

**(In)GaN ÇOK KUANTUM KUYULU IŞIK SAÇAN
DİYOTLARDA ATOMİK T ABAKA BİRİKTİRME İLE
PASİVASYONUN KAÇAK AKIMA ETKİLERİ
Hasan Mert BAYRAMLI**



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**(In)GaN ÇOK KUANTUM KUYULU IŞIK SAÇAN DİYOTLARDA ATOMİK
TABAKA BİRİKTİRME İLE PASİVASYONUN KAÇAK AKIMA ETKİLERİ**

Hasan Mert BAYRAMLI
ORCID: 0000-0001-7999-9328

Prof. Dr. Atilla AYDINLI
ORCID: 0000-0001-5952-5993

(Danışman)

Doç. Dr. Alpan BEK
ORCID: 0000-0002-0190-7945

(İkinci Danışman)

(Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OPTİK VE FOTONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır
TEZ ONAYI

TEZ ONAYI

Hasan Mert BAYRAMLI tarafından hazırlanan “(In)GaN Çok Kuantum Kuyulu Işık Saçan Diyotlarda Atomik Tabaka Biriktirme ile Pasivasyonun Kaçak Akıma Etkileri” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Atilla AYDINLI
İkinci Danışman : Doç. Dr. Alpan BEK

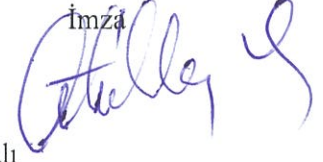
Başkan : Prof. Dr. Raşit TURAN
0000-0002-2612-8972
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza



Üye : Prof. Dr. Atilla AYDINLI
0000-0001-5952-5993
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı

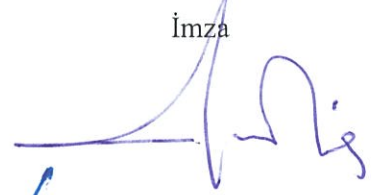
İmza



U.Ü.

Üye : Doç. Dr. Umut AYDEMİR
0000-0001-5396-4610
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.../.../....

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

05/02/2021

Hasan Mert BAYRAMLI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

(In)GaN Çok Kuantum Kuyulu Işık Saçan Diyotlarda Atomik Tabaka Biriktirme ile Pasivasyonun Kaçak Akıma Etkileri

Hasan Mert BAYRAMLI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Atilla AYDINLI

İkinci Danışman: Doç Dr. Alpan BEK

Galyum Nitrür (GaN) / İndium Galyum Nitrür (InGaN) tabanlı ışık saçan diyotların (light emitting diode - LED) üretiminde sık görülen sorunlardan biri kaçak akımdır. Kaçak akım dış kuantum verimi düşürür. Kaçak akım epitaksiyel büyütme sırasında oluşan kusurlar nedeniyle olabileceği gibi mikro-fabrikasyon sırasında mesa yapısı aşındırıldıktan sonra ortaya çıkan yüzey durumları nedeniyle de oluşabilir. Mesa duvarlarında kuru veya yaş aşındırma sonrası ortaya çıkan sallanan bağlar (dangling bonds) çeşitli ince film kaplamalarla pasifize edilebilir. Bu tez çalışmasında atomik tabaka biriktirme (ALD) ile kaplanan alüminyum oksit (Al_2O_3) filmlerin yan duvarlarda oluşan yüzey durumlarını pasivasyon etkisi araştırılmıştır. Çalışmada mesa aşındırmasının kaçak akıma etkisini göstermek için 3-4 ve 6'lı yapıda yan duvara sahip LED'ler üretilmiştir. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) ile yan duvar pasivasyonu yapılan LED'ler ALD ile büyütülen filmlerle pasivasyonu yapılan LED'lerle karşılaştırılmıştır. ALD ile yapılan pasivasyonların PECVD ile yapılan pasivasyonlara göre daha düşük kaçak akıma neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ışık çıkarma gücü ve ışık yoğunluğu da ALD ile pasivasyonu yapılan LED'lerde daha iyi olduğu ve ALD'nin yan duvarda oluşan yüzey kusurlarını daha iyi pasive ederek LED'ler hem optik hem de elektriksel iyileştirmeler yaparak kullanım ömürlerini arttırdığı gözlenmiştir. Son olarak kaçak akımın azalmasına neden olan mekanizmalar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pasivasyon, atomik katman biriktirme, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme, InGaN/GaN ışık saçan diyotlar, kaçak akım

2021, ix + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

Effects of Atomik Layer Deposition Passivation on Leakage Current in (In) GaN Multi-Quantum Well Light Emitting Diodes

Hasan Mert BAYRAMLI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Optics and Photonics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Atilla AYDINLI

Co-Supervisor: Doç. Dr. Alpan BEK

One of the frequent problems seen in the production of Gallium Nitride (GaN) / Indium Gallium Nitride (InGaN)-based light emitting diodes (LEDs) is leakage current. Leakage current lowers the external quantum efficiency. It may occur due to the defects during epitaxial growth, or due to surface defects that occur after the mesa structure has been etched during micro-fabrication. In this study, three, four- and six-sidewall LEDs were produced to show the effect of mesa etch on leakage current. Among them, LEDs in six-shaped structure had the highest leakage current. Dangling bonds that appear after dry or wet etching of mesa walls can be passivated with various thin film coatings. The passivation effect of aluminum oxide (Al_2O_3) films coated with atomic layer deposition (ALD) on the surface states of the side walls was investigated. LEDs with side wall passivation with plasma-assisted chemical vapor deposition (PECVD) were compared with LEDs passivated with ALD growth films. It has been observed that passivation with ALD caused less leakage current than that passivated with PECVD. Moreover, the light output power and light intensity are better in LEDs passivated with ALD. Surface defects on the side walls are passivated better with ALD, increasing the lifetime of the LEDs improving both optical and electrical characteristics. Finally, the study discusses the mechanisms that enables decrease of leakage current.

Key words: Passivation, atomic layer deposition, plasma assisted chemical vapor deposition, InGaN/GaN light emitting diodes, leakage current

2021, ix + 77 pages.

TEŞEKKÜR

Beni araştırma dünyasıyla tanıştıran, çalışmam sırasında derin bilgilerinden faydalanmamı sağlamaktan fazlasını yapan, teşviki, katkısı ve paha biçilmez rehberliği için danışman hocam Prof. Dr. Atilla Aydınlı'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmaya devam edebilmem için gerekli koşulları oluşturan ve tüm imkanları sağlayan, çok değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım eş danışmanım Doç. Dr. Alpan Bek'e sonsuz teşekkür ederim.

Laboratuvarlarımı kullanmama izin ve tezimin gerçekleşmesine destek veren Prof. Dr. Feridun Ay'a ve bana bizzat laboratuvarında destek olan öğrencisi Dr. Mustafa Demirtaş'a teşekkürü bir borç bilirim.

Temiz oda kullanımı, yarı iletken aygıt üretimi ve ölçümü konusunda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, Dr. Seval Arslan, Dr. Rahim Bahariqushchi ve Muhammed Genç'e, yardım ve katkılarından dolayı ne kadar teşekkür etsem azdır.

Bu tez çalışmasında laboratuvarlarını kullandığım Prof. Raşit Turan'a, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma ve Uygulama Merkezi (GÜNAM) ve Eskişehir Teknik Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkürlerimi sunarım. GÜNAM'da aygıt üretim basamaklarının bir kısmında bizzat yardım eden Oğuzhan Yücel'e ve optik ölçümlere yardım eden Hüseyin Umut Tepe'ye teşekkür ederim.

Bu tezde kullanılan maskeleri tasarlayan Dr. Volodymyr Sheremet'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca sonsuz sevgi, destek ve anlayışları için aileme, teşekkür ederim.

Hasan Mert BAYRAMLI

05/02/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Galyum Nitrür Tabanlı Işık Yayan Diyotlar.....	2
1.2 InGaN Tabanlı Mavi Işık Yayan Diyotlar.....	4
1.3 Işık Yayan Diyotlarda Kaçak Akım.....	7
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1 Galyum Nitrür (GaN) Epitaksiyel Tabakaları.....	9
2.2 İndiyum Nitrür (InN) Epitaksiyel Tabakaları.....	12
2.3 İndiyum Galyum Nitrür (InGaN).....	13
2.4 Alüminyum Nitrür (AlN) Epitaksiyel Tabakaları.....	14
2.5 Alüminyum Galyum Nitrür (AlGaN) Epitaksiyel Tabakaları.....	14
2.6 p-n Eklemi.....	15
2.7 InGaN/GaN Kuantum Kuyuları.....	19
2.8 Işık Yayan Diyotların Çalışma Prensipleri.....	22
2.8.1 Işımalı yeniden birleşme.....	26
2.8.2 Işımsız yeniden birleşme.....	28
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	31
3.1 LED Tasarımı.....	31
3.2 (In)GaN Epitaksiyel Kristal Büyütme Yöntemleri.....	32
3.2.1 Moleküler Demet Epitaksi.....	33
3.2.2 Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme.....	34
3.3 Üretim Süreçlerinin Geliştirilmesi.....	36
3.3.1 Maske tasarım.....	36
3.3.2 Epitaksiyel tabakaların temizliği.....	37
3.3.3 Fotolitografi.....	38
3.3.4 İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma (ICP) ile aşındırma.....	39
3.3.5 Atomik tabaka biriktirme ile pasivasyon.....	42
3.3.6 Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme.....	45
3.3.7 Metal Kaplama.....	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
4.1 Akım – Gerilim Ölçümleri.....	49
4.3. Işık Gücü Ölçümü.....	60
4.4 Elektroışıma Ölçümleri.....	62
5. SONUÇ.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
%	Yüzdellik Dilim
μm	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
A	Amper
cm	Santimetre
e	Elektron yükü
E_c	İletkenlik bandı
E_F	Fermi seviyesi
E_g	Yasak bant aralığı
E_v	Değerlik bandı
J_n	Azınlık taşıyıcı elektron akımı
J_p	Azınlık taşıyıcı deşik difüzyon akımı
J_s	p-n eklemindeki uzay yükü yeniden birleşme akımıdır.
n	Toplam elektron yoğunluğu
N_c	İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
n_i	Saf yarı iletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu
N_v	Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
p	Toplam deşik yoğunluğu
V	Volt
η_{inj}	Besleme verimi
~	Yaklaşık

Kısaltmalar	Açıklama
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
ALD	Atomik Tabaka Biriktirme
AlN	Alüminyum Nitrür
Cp_2Mg	Bis (siklopentadienil) Magnezyum
EQE	Dış kuantum verimi
eV	Elektron Volt
Ga	Galyum
GaAs	Galyum Arsenit
GaAsP	Galyum Arsenit Fosfat
GaInN	Galyum İndiyum Nitrür
GaN	Galyum Nitrür
HVPE	Hidrit Buhar Fazlı Epitaksi
ICP	İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma
In	İndiyum
InGaN	İndiyum Galyum Nitrür
InN	İndiyum Nitrür
IQE	İç kuantum verimi
LD	Lazer Diyot
LED	Işık Yayan Diyot
LED1	Pasivasyonu ALD ile yapılan LED

LED2	Pasivasyonu ALD ile yapılan LED
LEE	Işık çıkarma verimliliği
LEEBI	Düşük Enerjili Elektron Demet Işınlaması
LOP	Işık çıkış gücü
MBE	Moleküler Demet Epitaksi
Mg	Magnezyum
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MQW	Çoklu Kuantum Kuyuları
n-GaN	N-tipi katkılanmış Galyum Nitrür
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
p-GaN	P-tipi katkılanmış Galyum Nitrür
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
SiH ₄	Silan
UV	Ultraviyole
YAG	Yttriyum Alüminyum Garnet
ZnS	Çinko Sülfid

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Bazı malzemelerin elektroışma dalgaboyu.....	1
Şekil 1.2. Mavi LED ve YAG fosforun ışma spektrumu.....	4
Şekil 1.3. Atom prob tomografisi, In yoğunluğunun dağılımı.....	6
Şekil 2.1. Bant aralığına karşılık örgü sabiti (Wurtzite III-Nitrürler için) grafiği.....	9
Şekil 2.2. Bazı yarı iletkenlerin sıcaklığa karşı taşıyıcı konsantrasyonları.....	10
Şekil 2.3. Galyum nitrürün Wurtzite kristal yapısı.....	11
Şekil 2.4. İndiyum yoğunluğu ile InGaN bant aralığı enerjisi ilişkisi.....	13
Şekil 2.5. Ticari yeşil LED'lerin maksimum dış kuantum verimi	14
Şekil 2.6. AlGaIn bileşiğin Al yoğunluğuna bağlı bant aralığı enerjisi.....	15
Şekil 2.7. a) p-tipi yarı iletken b) n-tipi yarı iletken.....	15
Şekil 2.8. Termal dengede p-n eklemi bant diagramı.....	16
Şekil 2.9. Geri beslem altında p-n eklemi.....	17
Şekil 2.10. Düz beslem altında p-n eklemi.....	18
Şekil 2.11. p-n eklemi ideal akım-gerilim grafiği.....	18
Şekil 2.12. a) Besleme altında olmayan GaAs/AlGaAs kuantum kuyuları b) ileri besleme altında GaAs/AlGaAs kuantum kuyuları.....	19
Şekil 2.13. InGaN/GaN kuantum kuyularının şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.14. InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusu.....	21
Şekil 2.15. Elektron engel tabakalı çoklu kuantum kuyularının şematik diyagramı.....	22
Şekil 2.16. Şematik LED ışması.....	23
Şekil 2.17. Bantlar arası ışmalı yeniden birleşim.....	26
Şekil 2.18. InGaN kuantum kuyusunda elektron ve deşikler.....	27
Şekil 2.19. Yasak bant aralığı içindeki birleşme merkezi.....	28
Şekil 2.20. Auger süreçlerinin şematik gösterimi. a) sıcak elektronla (Auger elektronu) sonuçlanan Auger süreci, b) sıcak deşik (Auger deşiği) ile sonuçlanan Auger süreci. c) Işmalı yeniden birleşme d) Kaçak akım. Daha gerçekçi bant diagramlarında farklı bantlara saçılan Auger taşıyıcıları da olasıdır.....	29
Şekil 3.1. Üretimi yapılan LED'lerin epitaksiyel yapısı.....	31
Şekil 3.2. Desenli safir alttaş ve düz safir alttaşta sahip LED'lerin üretilen ışığın LED tabakalarından çıkışı ve iç yansıma.....	32
Şekil 3.3. MOCVD sistemi.....	35
Şekil 3.4. Bu tezde kullanılan maskenin şematik görünümü. a) Mesa aşındırma öcesi nikel maske aşaması. b) Yan duvar pasivasyon aşaması c) n-tipi kontak aşaması d) p-tipi kontak aşaması e) Kontak noktaları metal kaplama aşaması. Maskenin a,c,d ve e aşamaları ters litografi yapılarak uygulanmıştır.....	37
Şekil 3.5. Üretimi yapılan LED çiplerinin a) temizlik öncesi b) temizlik sonrası mikroskop görüntüsü.....	38
Şekil 3.6. Döndürerek kaplama cihazı.....	38
Şekil 3.7. Maske hizalama cihazı.....	39
Şekil 3.8. Şematik ICP aşındırma.....	40
Şekil 3.9. ICP cihazı.....	41
Şekil 3.10. ICP sonrası LED'lerin şematik gösterimi.....	41

Şekil 3.11. Şematik ALD işlem süreci. a) ALD ile kaplanmaya hazır numune. b) A öncülü atımları, numune yüzeyi ile reaksiyonu. c) A öncülü fazlalıkları ve reaksiyon sonucunda oluşan yan ürünler inert taşıyıcı gaz ile temizlenir. d) B öncülü atımları, numune yüzeyi ile reaksiyonu. e) B öncülü fazlalıkları ve reaksiyon sonucunda oluşan yan ürünler inert taşıyıcı gaz ile temizlenir. f) İstenilen kalınlığa ulaşılan kadar b-e arasındaki işlemler tekrarlanır.....	43
Şekil 3.12. ALD ile Al ₂ O ₃ birikimi döngüsü.....	44
Şekil 3.13. ALD cihazı.....	44
Şekil 3.14. a) Pasivasyon filmi kaplı LED çipi b) Pasivasyon filminin aşındırılmasından sonra LED çipinin mikroskop görüntüsü.....	45
Şekil 3.15. Şematik PECVD reaktörü.....	46
Şekil 3.16. a) Yüzey profilometresi b) Fabrikasyonu yapılan LED çipinin son halinin mikroskop görüntüsü.....	47
Şekil 3.17. Şematik üretim aşamaları.....	48
Şekil 4.1. LED'lerin akım - gerilim ölçümlerinde kullanılan kaynak metre ve probe mikroskoplu sonda istasyonu.....	49
Şekil 4.2. Üretimi yapılan LED serilerinin yan duvar ve kontaklarının şematik Görünümü.....	50
Şekil 4.3 Farklı yan duvar sayısına sahip LED1 serilerinin I-V grafiği	51
Şekil 4.4. Farklı yan duvar sayısına sahip LED2 serilerinin I-V grafiği.....	52
Şekil 4.5. 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED 2 serilerinin I-V grafiği.....	53
Şekil 4.6. I-V ölçümü yapılan LED.....	54
Şekil 4.7. Diyotlarda ani ve eşik gerilim altı açılış gösterimi. Eşik gerilim altı açılışa en fazla etki eden durum, yüzey kusurları boyunca taşıyıcı geçişleridir.....	55
Şekil 4.8. LED1 ve LED2 serilerinin eşik gerilim civarındaki akım-gerilim grafiği.	55
Şekil 4.9. a) LED1 seri direnç b) LED2 seri direnç.....	56
Şekil 4.10. 3-4-6 parmak yapılı LED1 serilerinin tipik ters gerilim - akım grafiği.....	57
Şekil 4.11. LED2 çiplerinin ters gerilim - akım grafiği.....	58
Şekil 4.12. LED1 ve LED2 çiplerinin tüm yapılarında ters I-V karşılaştırması.....	59
Şekil 4.13. LED1 ve LED2 çiplerinin tüm yapılarında ters logI-V karşılaştırması.....	60
Şekil 4.14. LED1 ve LED2 serilerinin I-P grafiği.....	61
Şekil 4.15. 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED2 serilerinin I-P grafiği.....	61
Şekil 4.16. LED1 ve LED2 çiplerinin ışımaya spektrumu.....	62

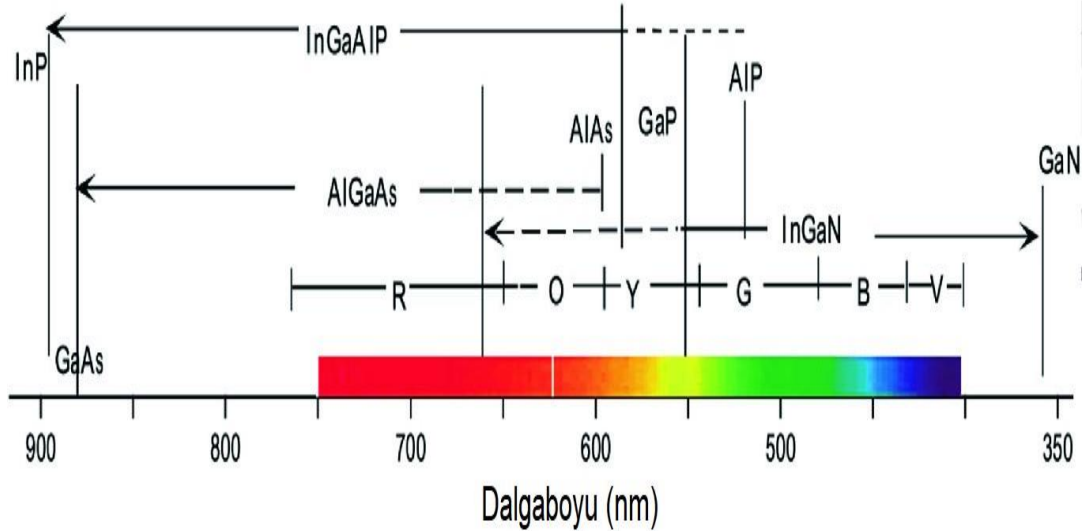
ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED2'nin bazı I-V verileri.....	54
---	----

1. GİRİŞ

Bir malzemeye uygulanan elektrik alan sonucu malzemeden yayılan ışık salımına elektroışıma (elektrolüminesans) denir. Işık yayan diyotlar (Light Emitting Diodes; LED'ler), uygulanan bir elektrik alana yanıt olarak elektromanyetik radyasyon yayan p-n eklemli yarı iletken ışık kaynaklarıdır (Maruska 1973). LED'lere uygulanan gerilim sonucunda aktif bölgede elektron ve deşiklerin yeniden birleşmesiyle kendiliğinden yayımlanan ışık ortaya çıkar. Yayılan ışığın dalga boyu, elektrik alan uygulanan yarı iletken malzemenin bant aralığına bağlıdır. Günümüzde piyasada bulunan LED'ler, yaklaşık 370 nm ile 1,65 μm arasında değişen optik dalga boyları ile yakın morötesinden yakın kızılötesine kadar olan spektral aralığı kapsar (Liu 2005).



Şekil 1.1. Bazı malzemelerin elektroışıma dalgaboyu (Li ve ark. 2020'den değiştirilerek alınmıştır).

Şekil 1.1.'de bazı malzemelerin bant boşluklarına karşılık ışıma yaptıkları dalgaboyları verilmiştir. Buradaki malzemelerin alaşımlarıyla üretilen LED'ler ile 900 nm'den 350 nm dalgaboyuna kadar farklı dalgaboylarında ışıma yapabilir. GaN malzemesine In eklenerek oluşturulan alaşımla yayılan ışığın görünür bölgede olması sağlanır.

Nitrür tabanlı ışık yayan diyotların ve lazer diyotların (LD'ler) gelişimi, optoelektronik teknolojisinin ilerlemesinde önemli bir noktadadır. Galyum Nitrür (GaN) temelli LED'ler,

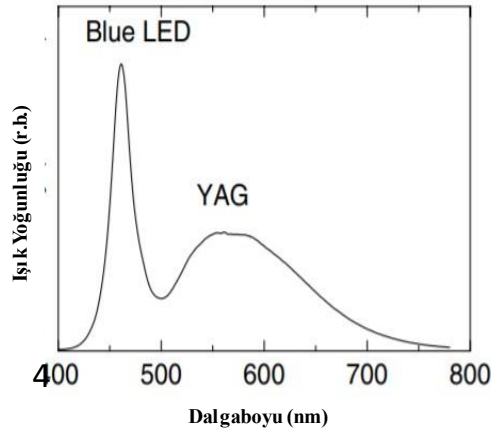
geleneksel ampullerin ve flüoresan lambaların yerine geçme, sensör, iletişim ve bilişim teknolojileri alanında önemli bir yere sahip olmalarına rağmen, yayılan ışığın önemli bir kısmı, toplam iç yansıma, kaçak akım, yüzey bozuklukları gibi nedenlerle kaybolmaktadır. Bu durum ışık çıkarım veriminin düşük olmasına sebep olur (Li ve ark. 2016). İndium Galyum Nitrür (InGaN) tabanlı LED'lerin üretiminde sık görülen sorunlardan birisi kaçak akımdır. Kaçak akım dış kuantum verimini düşürür. Kaçak akım epitaksiyel büyütme sırasında oluşan kusurlar nedeniyle olabileceği gibi mikrofabrikasyon sırasında mesa yapısı aşındırıldıktan sonra ortaya çıkan yüzey durumları nedeniyle de oluşabilir. Mesa duvarlarında kuru veya yaş aşındırma sonrası ortaya çıkan ve sallanan bağlar olarak adlandırılan kusurlar, çeşitli ince film kaplamalarla pasifize edilebilir. Pasivasyonun amacı, yapılan ince film kaplamalarla LED malzemesinin oluşturacağı ara yüzeyde yeni kimyasal bağlar oluşturarak kaçak akıma neden olan aktif yüzey durumlarının pasifleştirmek ve kaçak akıma yol açmasını önlemektir. Pasivasyon için tipik olarak saçtırma (sputtering) veya plazma ile zenginleştirilmiş buhar fazından kaplama (plasma enhanced chemical vapor deposition) yöntemleri ile elde edilen ince filmler kullanılır. Diğer bütün yöntemlerin aksine, her atomik düzlemin sırayla kaplandığı bir yöntem olan atomik tabaka biriktirme (atomik layer deposition, ALD) yöntemi, konformal olup atomik boyutlarda kaplamalar yapabilir. Bu çalışmada, alüminyum oksit (Al_2O_3) dielektrik malzeme atomik tabaka biriktirme yöntemi kullanılarak yapılan yan duvar pasivasyonunun ışık yayan diyotlar üzerindeki etkileri araştırıldı. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) ile yapılan yan duvar pasivasyonu, ALD ile büyütülen filmlerle karşılaştırıldı. ALD ile yapılan pasivasyonların PECVD ile yapılan pasivasyonlara göre daha düşük kaçak akıma neden olduğu gözlenmiştir. Son olarak kaçak akımın azalmasına neden olan mekanizmalar tartışılacaktır.

1.1 Galyum Nitrür Tabanlı Işık Yayan Diyotlar

Silisyum Karbür (SiC) ve II-VI grubu yarı iletken malzemeleri 1950'lerden önce bile oldukça iyi biliniyordu. Zaten, birçok II-VI grubu yarı iletken bileşikler doğada bulunur. İlk LED'ler SiC kullanılarak yapıldı ve 1936 yılında Çinko Sülfür (ZnS) LED'ler Destriau tarafından geliştirildi (Destriau 1936). Doğada kendiliğinden oluşmayan III-V yarı iletken

malzemelerin kullanımı 1950'lerin başında Heinrich Welker'in çalışmaları ile başladı (Welker 1952). III-V yarı iletken malzemeleri, daha önce bilinen yarı iletken malzemelere kıyasla daha iyi olan optik özellikleri sayesinde günümüz LED teknolojisinin de temellerini oluşturdu. Galyum Arsenit (GaAs) yarı iletken tabanlı p-n eklemli diyot yapılarının epitaksiyel olarak büyütülmesi sonucunda, 1962'de kızılötesi (870-980 nm) LED ve lazerler yapıldı. Görünür bölge spektrumlu LED 1962 yılında Holonyak ve Bevacqua'nın Galyum Arsenit Fosfat (GaAsP) yarı iletken bileşiğinin oluşturulması ile açıklandı (Holonyak ve Bevacqua 1962). Bu LED görünür bölgenin kırmızı kısmında ışık çıkarıyordu. 1969 yılında Maruska safir alttaş üzerine ilk GaN kristal filmi büyütmeyi başardı. Büyütülen tüm GaN filmler n-tipi özellik gösteriyordu. p-n eklemli bir cihaz için p tipi katkılayıcı bir atom (dopant) bulmaya çalıştı ancak bu konuda başarılı olamadı (Schubert 2006). p-n eklemli yapılamayışı nedeniyle, 1980'li yıllara kadar GaN filmler üzerine çalışmalar neredeyse hiç olmadı. Ancak 1989'da Isamu Amano ve çalışma arkadaşları Magnezyum (Mg) katkılı p-tipi GaN film geliştirmeyi başardılar. Bu durum verimli p-n eklemli LED ve lazer diyotların geliştirilmesinin önündeki büyük bir engeli kaldırdı (Amano ve ark. 1989). Bugün, GaN'ın Mg katkılanabilmesi tüm nitrid tabanlı LED'lerin ve lazer diyotların temelidir. 1992 yılında ilk p-n homo eklem GaN LED Akasaki ve arkadaşları tarafından yapıldı. Yaptıkları %10 verimlilik sağlayan ilk mavi ve yeşil InGaN LED ve oda sıcaklığında çalışan GaInN / GaN mavi lazer ile Shuji Nakamura ve Takashi Mukai'nin başında olduğu bir araştırma grubu, GaN filmlerinin büyütülmesine, LED'lerin ve lazerlerin gelişimine sayısız katkı yaptı (Nakamura ve ark. 1993). Bu çalışmaların sonucunda Isamu Akasaki, Hiroshi Amano ve Shuji Nakamura'ya "Parlak ve enerji tasarruflu beyaz ışık kaynakları sağlayan verimli mavi ışık yayan diyotların icadı" ile 2014 Nobel Fizik Ödülü verildi. Mavi ışık yayan LED'lerin keşfinin en fazla etkilediği alan aydınlatma teknolojisi oldu. LED'ler akkor ampullerden daha tasarrufludur. Dünyada kullanılan elektriğin dörtte biri aydınlatma ihtiyacını gidermek içindir. Günümüzde geleneksel ampullerin yerine geçen LED'ler, geleneksel ampullerden daha az enerji tüketerek dünya kaynaklarının korunmasında da etkilidir. Düşük enerji gereksinimleri nedeniyle LED'ler, güneş enerjisi gibi yöntemlerle dünya genelinde elektriğe ulaşamayan bir buçuk milyardan fazla insanın aydınlanma ihtiyacını karşılamak için büyük bir umut vaat etmektedir (The Nobel Prize in Physics 2014, 2014).

Mavi LED'lerin keşfi ile beyaz LED'ler de kullanılabilir oldu. Beyaz ışığı elde etmek için iki yol vardır. Birinci yöntem kırmızı, yeşil ve mavi LED çiplerinin birlikte kullanılmasıdır. İkinci yöntem ise mavi ışığı beyaz ışığa dönüştüren fosfor kullanımıdır (Cho ve ark. 2017). Mavi, yeşil ve kırmızı LED çiplerinin kullanımıyla beyaz ışık elde etmenin çip yerleşimi, sıcaklık ve zamanla kararlılığın azalması gibi zorlukları vardır (Muthu ve Gaines 2003). İkinci yöntemde, LED'den salınan mavi ışık Yttriyum Alüminyum Garnet (YAG) fosforu tarafından soğurulur daha sonra sarı floresan olarak yeniden yayılır. LED'den salınan mavi ışık ile fosfordan gelen sarı salınımın birleşmesiyle beyaz ışık elde edilir (Sheu ve ark. 2003). Şekil 1.2 ile mavi LED ve YAG fosforun tipik ışımaya spektrumları verilmiştir.



Şekil 1.2. Mavi LED ve YAG fosforun ışımaya spektrumu (Narukawa ve ark. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır).

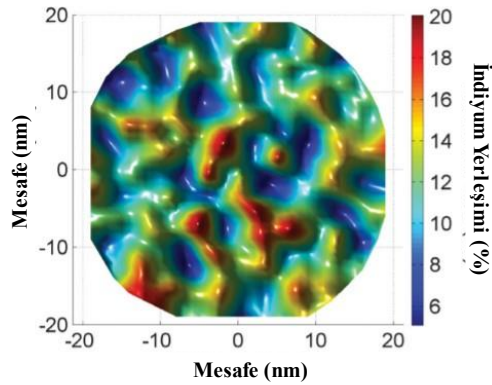
1.2 InGaN Tabanlı Mavi Işık Yayan Diyotlar

1960'lı ve 1970'li yıllarda GaN'ı büyütmenin önündeki en büyük zorluk GaN'ın örgü yapısıyla uyumlu bir alttaş bulunamamasıydı. Örgü parametreleri ve termal genleşme katsayısı GaN'dan büyük olan safir en fazla kullanılan alttaştır (Davis 1991). GaN epitaksiyel filmleri ilk olarak 1969'da Hidrit Buhar Fazlı Epitaksi (Hydride Vapor-Phase Epitaxy, HVPE) vasıtasıyla safir alttaşlarda büyütüldü. Ancak, bu filmlerin, kristal kalitesi düşüktü (Schubert 2006). GaN filmlerin kalitesini artırmak için, Yoshida ve çalışma arkadaşlarının çalışmasında olduğu gibi, Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) metodu ile GaN filminden önce safir alttaşa bir alüminyum nitrid

(AlN) tampon tabakası büyütülmesiyle filmlerin kalitesinin arttığı görülmüştür (Yoshida 1983). Daha sonra Amano ve çalışma arkadaşları, ilk önce düşük sıcaklıkta bir AlN tampon tabakasını metal organik kimyasal buhar biriktirme (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) ile büyütüp, bu tampon tabakanın üzerine GaN filmlerini büyüttüler. Bu çalışmalarında kaliteli film üretmek için GaN'ın büyütme sıcaklığına ek olarak AlN tampon tabakasının da büyütme sıcaklığının çok önemli bir parametre olduğunu belirttiler. (Amano ve ark. 1986). Amano ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada Mg katkılı GaN filmler MOCVD ile büyütüldükten sonra düşük enerjili elektron demet ışınlaması (LEEBI) kullanılarak p tipi katkılı GaN filmleri elde ettiler (Amano ve ark. 1989). Nagatomo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, MOCVD ile In yoğunluğunun %42'ye kadar olduğu $In_xGa_{1-x}N$ alaşımının oluşturulduğu açıklandı (Nagatomo ve ark. 1989). Nakamura ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Mg katkılı GaN filmlerin N_2 ya da vakum ortamında $700\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tavllanmasıyla daha düşük dirence sahip p-GaN filmlerin üretilmiştir (Nakamura ve ark. 1992). AlN tamponunun yanı sıra Nakamura ve arkadaşları, GaN filmini büyütme için düşük sıcaklıkta bir GaN tampon tabakası kullandılar. Bu şekilde tampon tabakasının üstünde büyütülen GaN filmlerin yüksek kristal kalitesine sahip oldukları açıklandı. InGaN / GaN çoklu kuantum kuyularının (Multi Quantum Well, MQW) elde edilmesi, 1992'de Nakamura ve arkadaşları tarafından, safir alttaşlar üstünde MOCVD kullanılarak büyütülen GaN filmlerden sonra InGaN filmlerinin de büyütülmesi ile elde edildi (Nakamura ve Mukai 1992). Ga alt örgüsüne giren In atomlarının Ga atomundan çok büyük olması nedeniyle InGaN tabakalarının büyütülmesi nispeten zordur. Temel olarak, LED bir p-n eklemidir, n-GaN ve p-GaN tabakaları yük taşıyıcıları barındırır, yani sırasıyla elektron ve deşik üretme rolünü üstlenirler. Modern LED'ler p-n eklemine genel olarak bir veya birden çok kuantum kuyusu eklenerek yapılır. Kuantum kuyusu, daha dar bant aralığına sahip InGaN kuyusu, her iki tarafındaki GaN engel (barrier) ile birlikte oluşturur. Silisyum (Si), n-tipi katkı için en yaygın elementtir. n-GaN'ın MOCVD ile büyümesi sırasında, n-tipi katkılama kaynağı olarak silan gazı (SiH_4) kullanılır. SiH_4 akışını kontrol ederek, katkılama yoğunluğu $10^{16} - 4 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ aralığında değiştirilebilir. p-GaN'ın MOCVD ile büyümesi sırasında, p-tipi katkılama kaynağı olarak Bis (siklopentadienil) Magnezyum (Cp_2Mg) gazı kullanılır. Cp_2Mg akışını kontrol ettikten sonra, azot (N_2) atmosferi ve $700\text{ }^\circ\text{C}$ altında büyütülen Mg katkılı p-GaN'ın ısı tavlama, p-tipi katkılama yoğunluğunun,

$10^{16} - 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ aralığına ulaşmasını sağlar (Li G. W., 2016). Mo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, InGaN mavi LED’de Si (1 1 1) alttaş olarak kullanıldı, stresi azaltmak ve filmde oluşabilecek çatlakları engellemek için yüksek sıcaklıkta GaN tampon tabaka kullanıldı, sonuçları safirin alttaş olarak kullanıldığı InGaN LED’lere göre kötü olsa da üzerinde daha fazla araştırma yapılması gereken bir konu olduğu açıklandı (Mo ve ark. 2005).

InGaN aktif bölgesinde In yoğunluğunun homojen dağılmaması aktif bölgede ışımalı yeniden birleşmelerle sonuçlanacak enerji durumları oluşturur. Aktif bölgeye elektron ve deşik beslemesi yapılırken, difüzyon sırasında elektron ve deşikler ışımsız yeniden birleşmenin gerçekleştiği yapıdaki diğer kusurlar tarafından yakalanabilir. Eğer In yoğunluğunun homojen olmayan dağılımı nedeniyle oluşan bu enerji seviyeleri arasındaki uzaklığın (nm) kusurlar arası uzaklıktan daha düşük olması sağlanırsa, elektron ve deşikler ışımsız yeniden birleşmenin gerçekleştiği kusurlara yakalanmadan önce bu enerji seviyeleri tarafından yakalanarak ışımalı yeniden birleşmeye katkı sağlar ve daha yüksek verimli InGaN elde edilebilir (Nakamura 1998). Şekil 1.3’de InGaN’daki In bileşiminin dağılımı gösterilmektedir. Buradaki kırmızı bölgeler In yoğunluğunun en yüksek olduğu yerlerdir ve bu bölgeler ışımalı yeniden birleşme enerji seviyeleri oluşturur.



Şekil 1.3. Atom prob tomografisi, In yoğunluğunun dağılımı (Browne ve ark. 2015’den değiştirilerek alınmıştır).

InGaN LED’lerde akım yoğunluğu artışı belli bir noktadan sonra optik ışımının azalmasına ve verim düşüşüne neden olmaktadır. Bu durum, LED’lerde artan akım

yoğunluğunun artmasıyla kuantum kuyularındaki taşıyıcı yoğunluğunun artmasına bağlı olarak Auger ışımasız yeniden birleşme olasılığının yükselmesiyle açıklanır (Shen ve ark. 2007). Seri direnci yüksek LED'lerde yüksek akım yoğunluklarında ısınma görülür bu da verimin düşmesine yol açar. Buna ısıl devrilme (rollover) denir. Seri direncin en düşük seviyeye indirilmesiyle bu etki azalır. Gardner ve arkadaşlarının yaptığı çalışmayla LED'lerde çoklu kuantum kuyularının yerine çift hetero yapılı aktif bölge kullanılmasının, Auger ışımasız yeniden birleşme ihtimalini en aza indirerek InGaN LED'lerde yüksek akım yoğunluğunda verim düşüşünün azaltılabileceğini göstermiştir (Gardner ve ark. 2007). Yüksek akım yoğunluklarında Auger yeniden birleşmesinin etkisinin azaltıldığı bir diğer çalışma, aktif tabaka olarak çoklu kuantum kuyuları yerine kısa periyot süper örgü kullanımınıdır. Süper örgüdeki kuantum kuyuları arasındaki bariyerler yeterince ince yapılarak elektron ve hollerin kuyulara dağılımının homojen olması sağlanmıştır. Zakheim ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada aktif bölgesi kısa periyot süper örgü ile yapılan LED'lerde maksimum akım yoğunluğunda verim düşüşünü %10'a kadar düşürmüşlerdir (Zakheim ve ark. 2012).

1.3 Işık Yayan Diyotlarda Kaçak Akım

InGaN / GaN-tabanlı LED'lerin, düşük enerji tüketimi, uzun ömürlü olmaları kontrol esnekliği, yüksek verimli ve çevre dostu olmaları göz önüne alındığında gelecekteki ışık kaynakları olarak büyük ilgi görmüştür. Bununla birlikte yapılan çalışmalar sonucunda yüksek akım yaşlandırma testlerinde GaN LED'lerin ışık yoğunluğunun zamanla azaldığı gözlemlenmiştir (Egawa ve ark. 1997). Işık yoğunluğundaki azalmanın sebebi, kristal büyütme sırasında InGaN aktif tabakada ya da yüzey kusurları nedeniyle oluşan ışımasız yeniden birleşme merkezleri ve taşıyıcıların tünellemesi olarak görülür (Cao ve ark. 2003). Ayrıca desenlenmiş safir alttaş ve düz safir alttaşta sahip LED'lerde, daha az kusur yoğunluğuna sahip desenlenmiş safir alttaşta sahip LED'lerin yüksek sıcaklıkta çalışma ömrü testinde ışık çıkış gücünde daha az düşüş gözlemlenmiştir (Zhou ve ark. 2015). Bu aygıtların dayanıklılığını ve performansını arttırmanın yöntemlerinden biri, kaçak akımın azaltılmasıdır. ICP ile aşınmış yan duvarlar hava ile temas ettiğinde nem tutarak ve kolayca kirlenerek kaçak akıma neden olur. Bu iletim yollarını izole etmek için pasivasyon tabakası gerekir. Pasivasyon tabakası için genellikle silikon oksit (SiO_x) veya

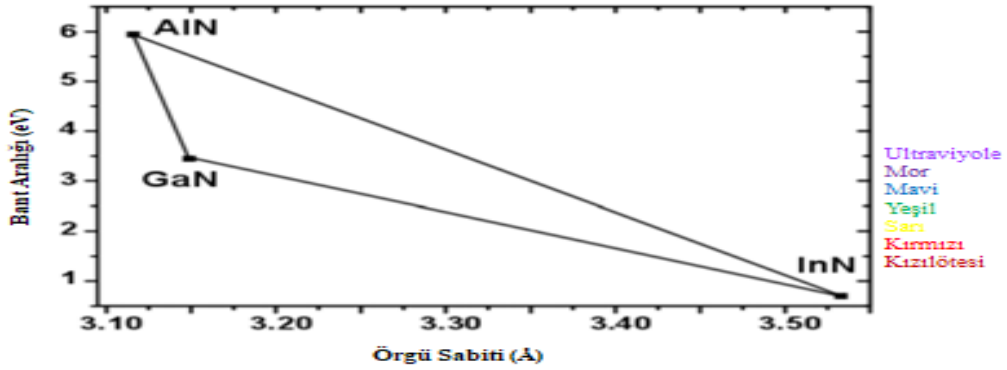
silikon nitrür (SiN_x) kullanılır. K. M. Chang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, elektron siklotron rezonans kimyasal buhar biriktirme (Electron Syclotron Resonance Chemical Vapor Deposition, ECR-CVD) sistemi kullanılarak yapılan SiN_x ile pasivasyon sonucunda ışık çıkışında %6'lık artış gözlenmiştir (Chang ve ark. 2001). GaN tabanlı elektronik aygıtlar için, V. Adivarahan ve arkadaşları, mesa aşındırmasından sonra oluşan ve ışımsız yeniden birleşmelere neden olan malzeme yüzey kusurlarından kaynaklanan kaçak akımın, SiO_2 yüzey pasivasyonu kullanılarak önemli ölçüde azaldığını, bunun aygıtların elektrik performansının iyileşmesine yol açtığını bildirdi (Adivarahan ve ark. 2000). Hyun Min Kim ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kuru aşındırmanın mesa yüzeylerinde ve yan duvarlarda hasar oluşturduğu, bu hasarların kaçak akıma neden olduğu belirtilmiş ve N_2O plazma pasivasyonu ile kaçak akımda ciddi düşüş sağladıklarını belirtilmiştir (Kim ve ark. 2002). Chung-Mo Yang ve arkadaşları $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ çift dielektrik tabakası kullanarak ışık çıkarma verimliliğini arttırmak için GaN tabanlı LED için yeni bir yüzey pasivasyonu konsepti önerdi, çift pasivasyon tabakasının LED'in yüzeyini etkili bir şekilde pasifleştirip, aynı zamanda LED'in genel ışık çıkarma verimini de arttırdığını ve ışık çıkarma gücünde (light output power) %25,4 artış olduğunu belirtmiştir (Yang, ve ark. 2012). Han-Yin Liu, ultrasonik sprej piroliz (Ultrasonic Spray Pyrolysis, UPS) sistemi ile Al_2O_3 pasivasyon yaparak USP ince film büyüme tekniğinin düşük maliyet, vakumsuz olması ve yüksek büyüme hızı avantajları ile PECVD'de SiO_2 pasivasyonu yapılan LED'ler ile rekabet edebileceğini belirtmiştir (Liu ve ark. 2014). Matthew S. Wong ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise PECVD ve ALD'de SiO_2 ile pasivasyonu yapılan LED'ler karşılaştırılmış, ALD ile pasive edilen LED'lerde daha yüksek dış kuantum verimine sahip olduğunu ve yan duvar kusurlarının neden olduğu kaçak akımın daha iyi engellendiğini bildirmiştir (Wong, ve ark. 2018).

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde periyodik cetveldeki LED tabakalarını oluşturabilecek III-V elementlerinden oluşan GaN, InGaN, InN, AlGaN ve AlN epitaksiyel tabakaların özellikleri anlatılmış, bu bileşikler kullanılarak elde edilen kuantum kuyularının çalışma prensipleri açıklanmış ve temel olarak bir p-n eklemi olan LED'lerin çalışma prensipleri özetlenmiştir.

2.1 Galyum Nitrür (GaN) Epitaksiyel Tabakaları

Galyum nitrür kristali oda sıcaklığı koşullarında 3,41 eV doğrudan bant aralığına sahiptir (Lacklison ve ark. 1995, Jogai 1998). Bu bant aralığı değerinde iletkenlik bandından değerlik bandına geçişler sırasında yaklaşık 365 nm dalga boyunda elektromanyetik dalga yayılır. Bu ışımaya ultraviyole bölgededir. Öte yandan InN kristallerinin oda sıcaklığıdaki bant aralığı 0.7 eV dir (Schulz ve ark. 2008). Şekil 2.1.'de AlN, GaN ve InN'in bant aralığı enerjileri gösterilmektedir. GaN bileşiğine Al eklenmesiyle bant genişliği artar ve UV ışınması gerçekleşir, In eklenmesiyle bant genişliği azalır ve daha uzun dalga boyunda ışımaya neden olur. Her iki durumda da direkt bant aralığı özelliği korunur.

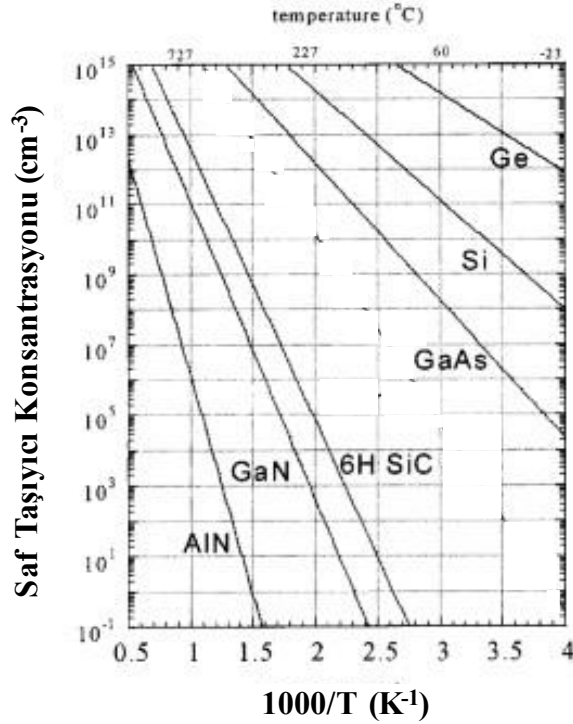


Şekil 2.1. Bant aralığına karşılık örgü sabiti (Wurtzite III-Nitrürler için) grafiği. (Wang 2015'den değiştirilerek alınmıştır).

Temel yarıiletken istatistiğine göre, saf kristallerde taşıyıcı yoğunluğu:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2.1)$$

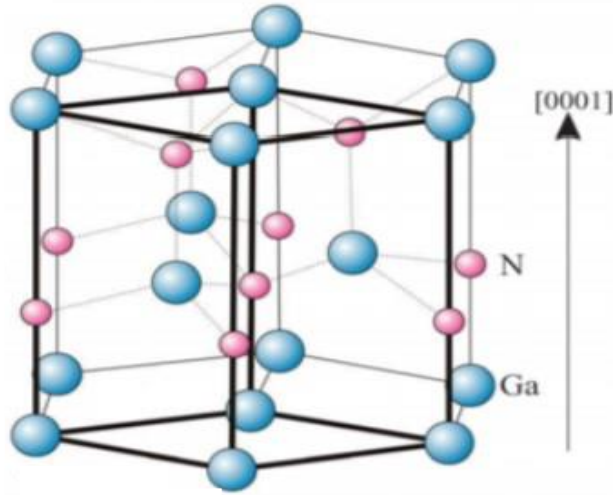
ile verilir. Burada N_v , değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu, N_c ise iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu olup k Boltzmann sabiti, T ise mutlak sıcaklıktır. Bu denklemden de görülebileceği gibi geniş bant aralığına sahip GaN kristallerde saf taşıyıcı yoğunluğu çok azdır. Yine denklemden (N_c ve $N_v \approx T^{3/2}$) anlaşılacağı gibi sıcaklık arttıkça saf kristallerde taşıyıcıların yoğunluğu artar., Ancak, GaN, geniş bir sıcaklık aralığında Si ve GaAs gibi geleneksel daha dar bant (sırasıyla 1.12 eV ve 1.4 eV) aralıklı malzemelerden çok daha düşük bir saf taşıyıcı yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle, GaN tabanlı aygıtlar yüksek sıcaklık çalışma koşullarına dayanabilir (Henini ve Razeghi 2004). Şekil 2.2. ile bazı yarı iletken malzemelerin sıcaklığa karşı saf taşıyıcı konsantrasyonları verilmiştir.



Şekil 2.2. Bazı yarı iletkenlerin sıcaklığa karşı taşıyıcı konsantrasyonları (Hassan ve ark. 2018'den değiştirilerek alınmıştır).

GaN kristali genelde wurtzite yapıda büyütülür (Şekil 2.3.). Wurtzite (hekzagonal) yapıda Ga atomları ile N atomları tetrahedral iyonik bağ yaparak kristali oluştururlar. c - düzleminde GaN tetrahedral bağ uzunlukları diğer düzlemlerdeki bağ uzunluklarına göre

biraz daha fazladır. Bu fazlalık kristal merkezine göre simetrik olmayan bir durum ortaya çıkarır ve ideal Wurtzite geometrisinden sapmasına neden olur. Böylece c - düzlemindeki yük merkezi değişir ve c – düzlemi boyunca dipol momenti oluşur. Bu, yerleşik dipol (0001) yönünde kendiliğinden polarizasyon ile sonuçlanır. Ayrıca hetero yapı, örgü uyumsuzluğu nedeniyle c – eksenini boyunca piezoelektrik polarizasyon oluşturur. Kendiliğinden oluşan ve piezoelektrik etkisi ile oluşan polarizasyonun toplamı, ara yüzde ve yüzeylerde yük yoğunluklarına yol açar. Bu etki kuantum sınırlı Stark etkisi olarak bilinir (quantum confined Stark effect) ve LED’lerde elektron deşik taşıyıcı nüfuslarını uzamsal olarak ayırarak ışımali birleşim oranını azaltır (Miller ve ark. 1984).



Şekil 2.3. Galyum nitrürün Wurtzite kristal yapısı (Wang 2016’dan değiştirilerek alınmıştır.).

Katkısız GaN kristali genelde n-tipi iletkenlik gösterir. Bunun nedeni olarak, azot boşluklarının ya da azot atomlarının yerini alan safsızlıklar gösterilir (Maruska ve Tietjen, 1969, Chung ve Gershenson 1992). n-tipi GaN için katkılama atomu olarak genelde Si kullanılır. Böylece GaN $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ‘e kadar elektron yoğunluklarına ulaşılabilir. Si atomlarının kristal yapıya katılması, filmler üzerindeki stresi artırarak film kalitesinin bozulmasına neden olabilir (Guo, ve ark. 1996). p-tipi GaN oluşturmak için katkılama atomu olarak genelde Mg atomu kullanılır. Hidrojen atmosferindeki büyütme sırasında, Mg katkılama atomları hidrojen atomları tarafından pasifleştirilir. Bu durumda Mg atomları örgüye deşik sağlayamazlar. Bu durum p tipi tabakaların elektriksel direncini artırır ve ışık elde etmek için gerekli olan çalışma gerilimini yükseltir. Mg katkılama

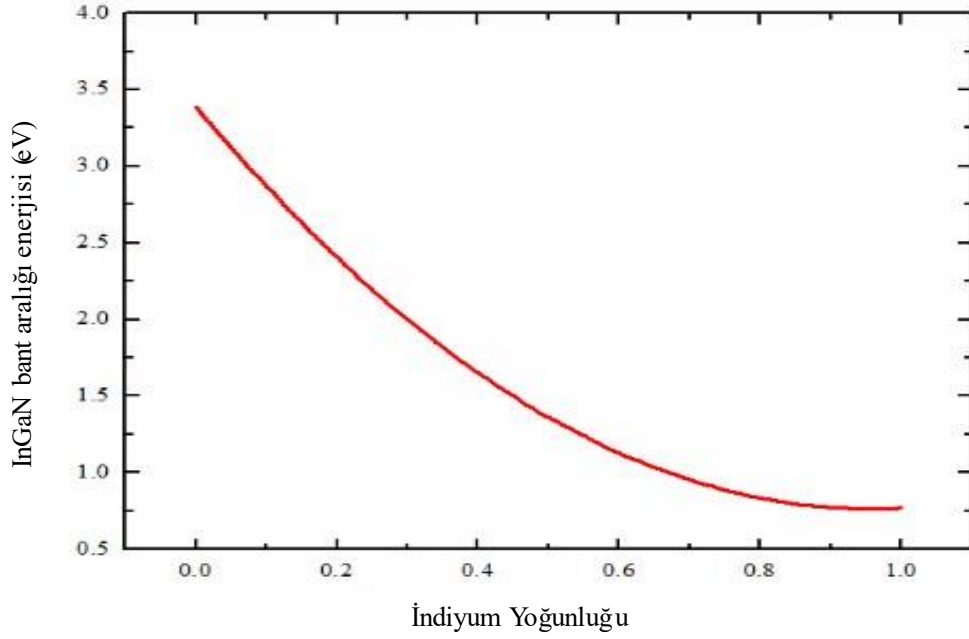
atomlarını elektriksel olarak aktifleştirmek için daha sonra tavlama gereklidir. p-GaN'daki deşik yoğunluğu n-GaN'daki elektron yoğunluğundan daha düşüktür. Bu durum, p-GaN'daki magnezyum alıcı atomları için iyonizasyon enerjisi oda sıcaklığında termal enerjiden çok daha büyük olan 170 meV' olmasıyla da açıklanabilir. Bu nedenle p-GaN'da düşük iletkenlik ve n-GaN'a göre daha yüksek tabaka direnci olur (Reboredo ve Pantelides 1999). GaN kristallerinin en önemli sorunlardan biri, yüksek kaliteli saf GaN alttaşların sınırlı bulunabilirliğidir. Diğer III-V (örn: GaAs) malzemelerin aksine, GaN kristallerinin kütleli büyütülmeleri zordur. Bu nedenle benzer örgü sabitine sahip alttaşlar kullanılır. Günümüzde genel olarak, geniş spektral bölgedeki şeffaflığı, düşük maliyeti ve yüksek dayanıklılığı gibi özelliklerinden dolayı GaN tabanlı ışık yayan diyotlarda safir alttaş olarak kullanılır. Silikon ve silikon karbür de kullanılan diğer alttaşlardır (Amano ve ark. 1988).

2.2 İndiyum Nitrür (InN) Epitaksiyel Tabakaları

İndiyum nitrürün, GaN ve AlN ile bileşimi kızıl ötesinden UV spektral bölgeye kadar LED'lerin yapılmasını sağlar (Bhuiyan ve ark. 2003, Schulz ve ark. 2008, Sarmazdeh ve ark. 2016). InN'in düşük etkin kütlesi, yüksek taşıyıcı hareketliliği ve III-N yarı iletkenleri arasındaki en düşük bant aralığına (0,7 eV) sahip olması en önemli avantajlarından (Wu ve ark 2002). InN'in düşük ayrışma sıcaklığı nedeniyle InN büyütülebilmesi için düşük sıcaklık gerekir ve azot moleküllerinin düşük sıcaklıklarda biriktirilememesi kaliteli InN filmler üretmenin en önemli zorluğudur (Bhuiyan ve ark., 2003) (Nanishi ve ark. 2003). MOCVD ile yapılan büyütmelerde kaynak olarak genelde trimetilindiyum, amonyak ve taşıyıcı gaz olarak N₂ kullanılmaktadır. MOCVD ile büyütülen InN filmlerde yaklaşık 10²⁰ cm⁻³ serbest taşıyıcı yoğunluğu elde edilmiştir (Bhuiyan ve ark., 2003). Nötr ve iyonize azot atomlarının plazma kaynağı olarak kullanıldığı MBE'de büyütülen InN kristalinde 4,9 x 10¹⁸ cm⁻³ taşıyıcı yoğunluğu elde edilmiştir (Nanishi ve ark. 2003). Bunun dışında farklı alttaşlarda büyütülen InN'lar 10¹⁰ cm⁻²'den fazla kusur yoğunluğuna sahiptir (Monemar ve ark. 2005).

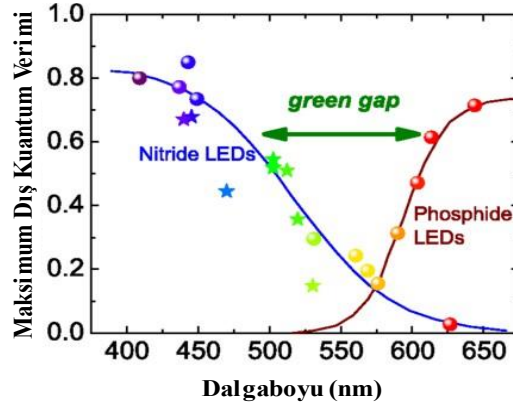
2.3 İndiyum Galyum Nitrür (InGaN)

InGaN alaşımları yapmak için GaN'a In atomları eklenerek bant aralığı küçültülüp ışımının görünür bölgede olması sağlanır. In miktarı arttıkça bant aralığı küçüldüğünden, derin maviden çok daha uzun dalgalılarına kadar birçok dalgalıyunda banttandan geçişler beklenir (Şekil 2.4.) (Takeguchi 2004).



Şekil 2.4. İndiyum yoğunluğu ile InGaN bant aralığı enerjisi ilişkisi (Wang 2018'den değiştirilerek alınmıştır).

In atomları yerine geçtikleri Ga atomlarına göre çok daha büyük olmaları nedeniyle, GaN kristalinde In yüzdesi arttıkça bu atomlar kümelenme eğilimi gösterirler ve yapısal kusurlar ile birlikte ışımsız yeniden birleşme merkezleri oluştururlar. (Cho ve ark. 2002). Bu durum kristal kalitesini düşürür ve örneğin GaN tabanlı yeşil LED'lerde verimin düşük olmasına neden olur. Bu aynı zamanda verimli turuncu ve sarı ışık yayan GaN tabanlı LED'lerin de önündeki engeldir (Zhao ve ark. 2012). Şekil 2.5.'de yeşil LED'lerin maksimum dış kuantum verimi gösterilmektedir.



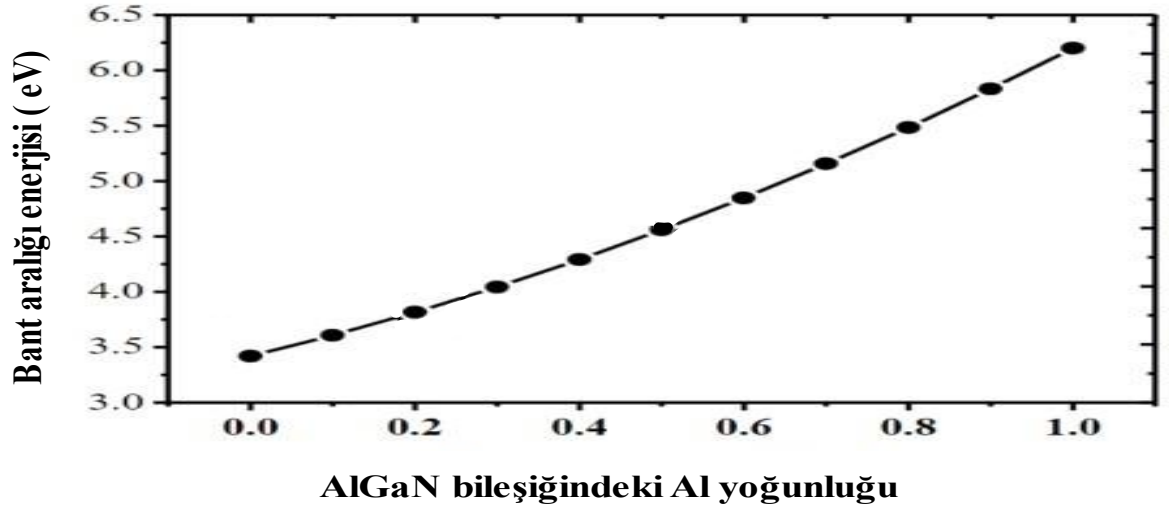
Şekil 2.5. Ticari yeşil LED'lerin maksimum dış kuantum verimi (Der Maur ve ark. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır).

2.4 Alüminyum Nitrür (AlN) Epitaksiyel Tabakaları

Alüminyum nitrür (AlN) yaklaşık 6,1 eV doğrudan bant aralığı enerjisi ile III-N bileşik yarı iletken malzemeleri arasında en geniş doğrudan bant aralığına sahip malzemedir ve AlN tabanlı aygıtlar derin ultraviyole bölgesinde çalışırlar (~ 200 nm) (Li ve ark 2002). AlN tabakaları mavi LED'lerde genellikle safir alttaş ile GaN tabakaları arasındaki örgü uyumsuzluğu nedeniyle oluşan stresi azaltmak için tampon tabaka olarak kullanılır (Kuokstis ve ark 2002).

2.5 Alüminyum Galyum Nitrür (AlGaN) Epitaksiyel Tabakaları

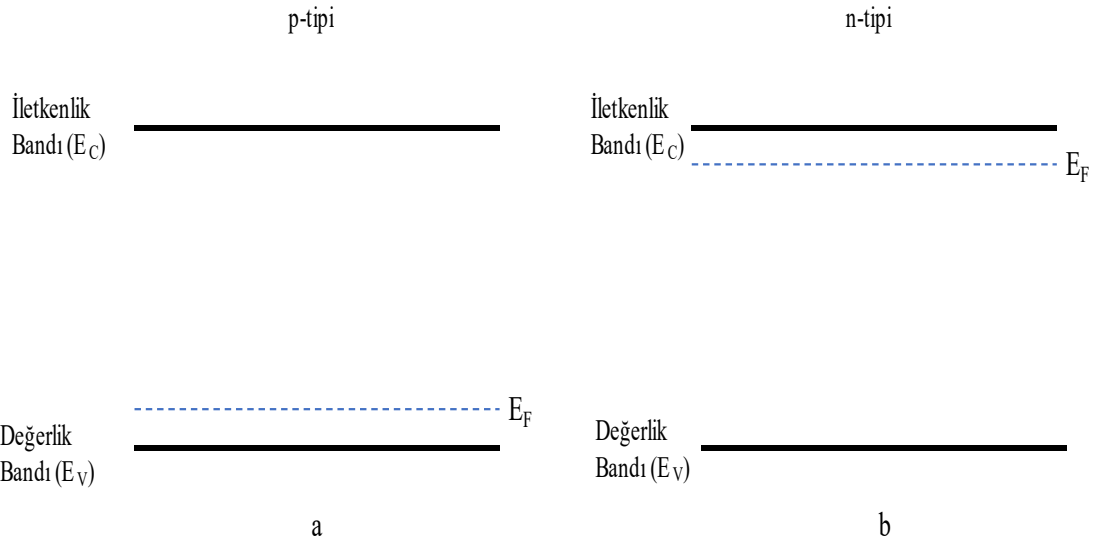
Alüminyum galyum nitrür (AlGaN) bileşiğinin bant aralığı Al yoğunluğuna bağlı olarak 3,5 eV ile 6,5 eV arasında Şekil 2.6.'de gösterildiği gibi değişmektedir (Nam ve ark. 2002). AlGaN bileşiğinde Al yoğunluğu arttıkça bant aralığı büyür ve daha kısa dalga boyunda çalışan aygıtlar üretilebilir. Mavi LED'lerde AlGaN tabakası genellikle kuyulardaki elektronların p-GaN bölgesine geçişini önlemek için engelleyici tabaka olarak kullanılır. (Vurgaftman ve ark. 2001).



Şekil 2.6. AlGaN bileşiğinin Al yoğunluğuna bağlı bant aralığı enerjisi (Sang ve ark. 2013'den değiştirilerek alınmıştır).

2.6 p-n Ekleme

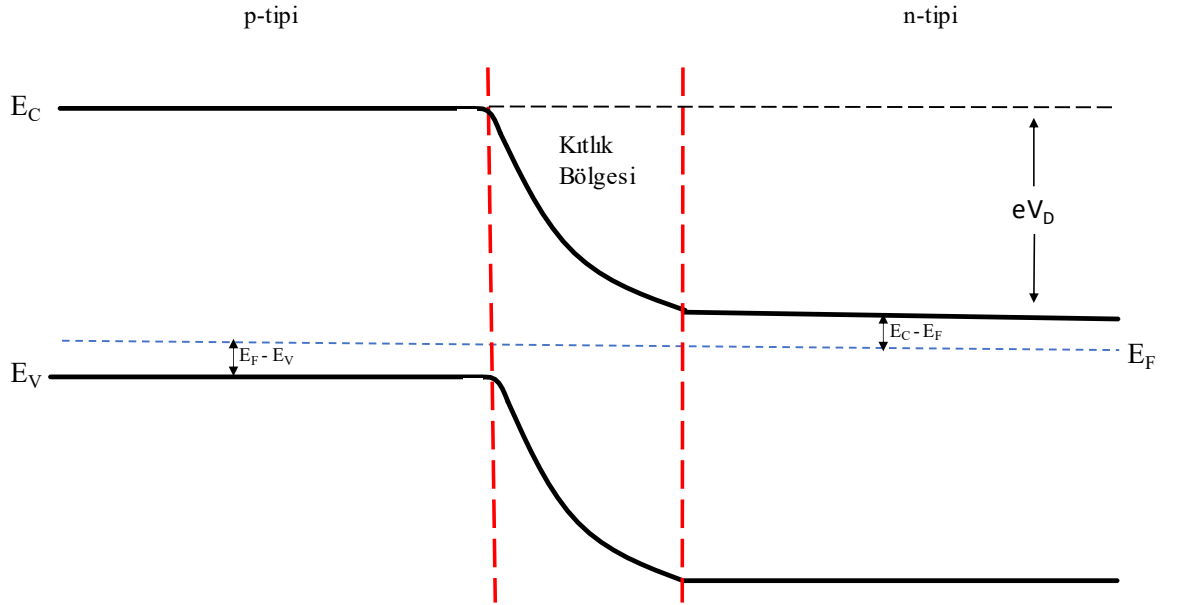
Şekil 2.7.'de p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin bant durumları şematik olarak gösterilmiştir. Bu yarı iletkenlerde verici konsantrasyonu N_D , alıcı konsantrasyonu N_A 'dır (Neamen 2012).



Şekil 2.7. a) p-tipi yarı iletken **b)** n-tipi yarı iletken. Burada E_C , Γ noktasındaki iletkenlik bant kenarını, E_V ise, Γ noktasındaki değerlik bant kenarını göstermektedir. E_F Fermi seviyesidir.

Bir p-n eklem p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. İki yarı iletkenin birleşmesinden sonra n bölgesindeki elektronlar p bölgesine, p bölgesindeki deşikler ise n bölgesine difüzyon ederler. p-n eklem gerilim uygulanmadığında, elektronların difüzyonu sonucunda n bölgesinde sabit pozitif yük, deşiklerin difüzyonu sonucunda p bölgesinde sabit negatif yükler oluşur. Bu yükler p-n eklemde elektrik alan oluştururlar. Elektrik alan yeteri kadar büyüdüğünde yüklere etkiyen kuvvetin ters yönde olmasından dolayı difüzyon durur ve bu bölgede bir kıtlık bölgesi oluşur Şekil (2.8.) (Colinge ve Colinge 2005, Sze ve Ng 2006, Neamen 2012). Denge durumunda Fermi seviyesi her yerde aynı olur. Bu durumda, n (p)bölgesindeki elektronlar (deşikler) p (n) bölgesine geçmek isterken bir potansiyel engel ile karşılaşılır. Yerleşik potansiyel engeli olarak adlandırılan bu engel V_D ile gösterilir (Yang 1978, Schubert 2006).

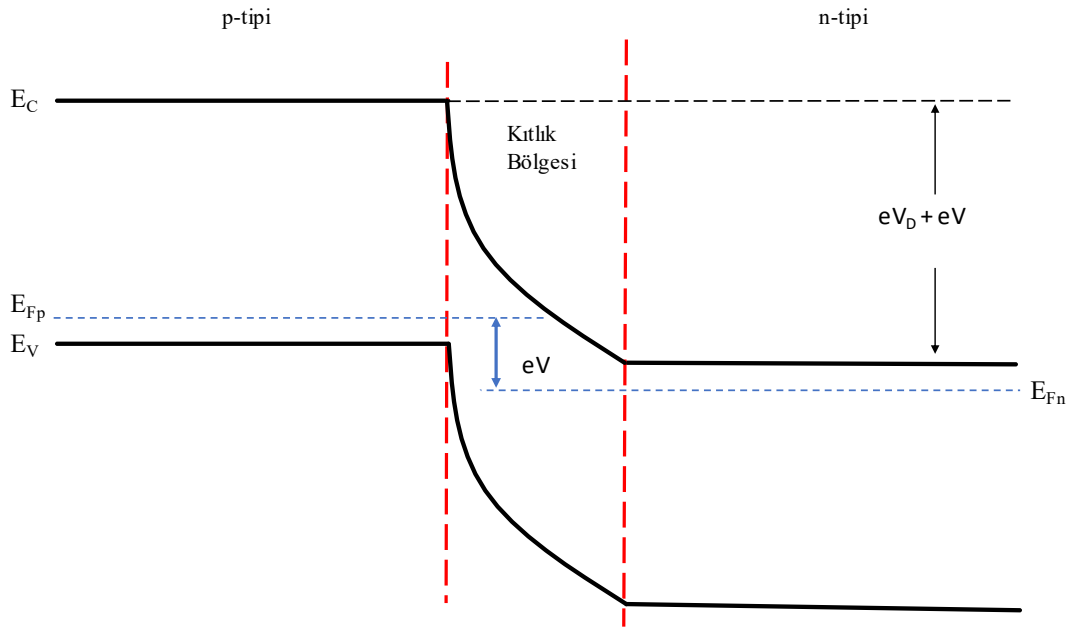
$$V_D = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.2)$$



Şekil 2.8. Termal dengede p-n eklemi bant diagramı

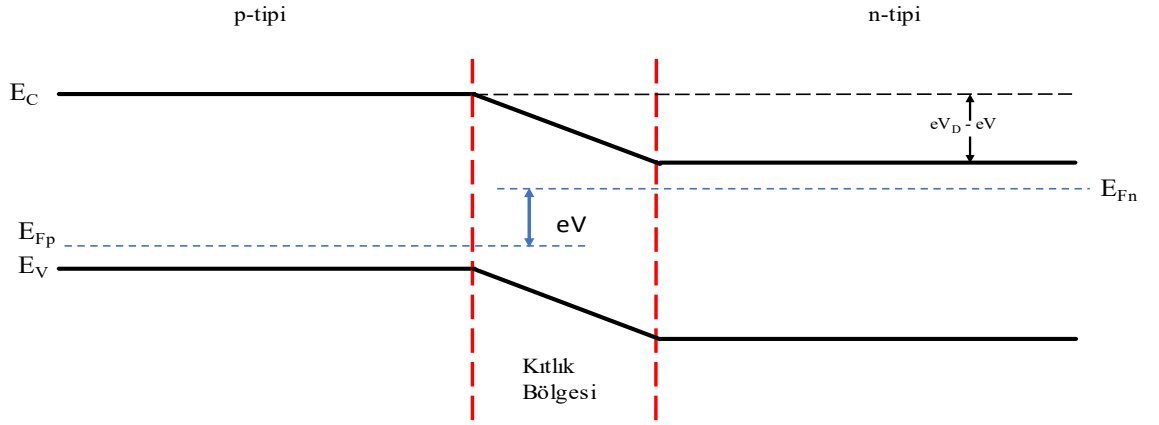
Burada V_D yerleşik potansiyel engelidir. $E_F - E_V$ ısı dengede durumdaki Fermi seviyesi p bölgesi değerlik bant arasındaki fark, $E_C - E_F$ ise n bölgesi iletkenlik bandı ile ısı dengedeki Fermi seviyesi arasındaki farktır.

Eğer p-n eklemine ters besleme yapılırsa, Fermi seviyesi denge durumunda olmayacak ve p bölgesindeki Fermi seviyesi (E_{Fp}) n bölgesindeki Fermi seviyesinden (E_{Fn}) yüksekte olacaktır. Her bölgedeki Fermi seviyesine Fermimsi (quasi Fermi veya imref) seviyesi denir. İki Fermi seviyesi arasındaki fark uygulanan gerilime eşittir. Böylece yerleşik potansiyel engeli ısı denge durumuna göre artacak ve elektron ve deşiklerin geçişini engelleyecektir (Sze ve Ng 2006, Neamen 2012). Şekil 2.9.'da geri beslem altında p-n eklemi bant diyagramı verilmiştir. Burada V uygulanan gerilim değeridir, E_{Fn} n bölgesindeki Fermi seviyesi ve E_{Fp} p bölgesindeki Fermi seviyesidir.



Şekil 2.9. Geri besleme altında p-n eklemi

p-n eklemine düz besleme yapıldığında, n bölgesindeki Fermi seviyesi (E_{Fn}), p bölgesindeki Fermi seviyesinden (E_{Fp}) yüksekte olacaktır. Bu durumda yerleşik potansiyel engeli termal denge durumuna göre daha azalacak ve elektron ve deşiklerin geçişlerini engellemeyecek ve böylece p-n eklemine akım oluşacaktır (Şekil 2.10.) (Schubert 2006, Sze ve Ng 2006).



Şekil 2.10. Düz besleme altında p-n eklemi

Akım ile gerilim arasındaki ilişki Shockley denklemleriyle açıklanır.

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

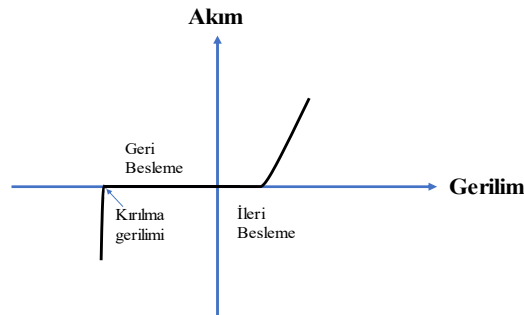
Burada D_p , deşiklerin difüzyon sabiti, D_n , elektronların difüzyon sabiti τ_p , deşik azınlık taşıyıcı ömrü, τ_n , elektron azınlık taşıyıcı ömrü, A , p-n ekleminin kesit alanı, n_i^2 , saf kristaldeki taşıyıcı yoğunluğu, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, V , uygulanan gerilimdir.

$$I_0 = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \quad (2.4)$$

ise,

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

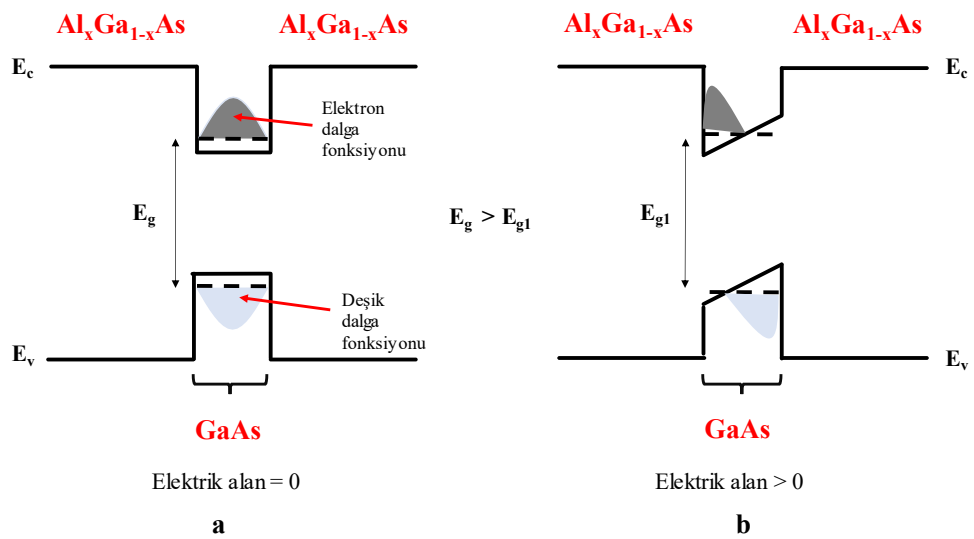
şeklinde yazılabilir (Schubert 2006). Bu formül Şekil 2.11.'de grafik olarak da verilmiştir.



Şekil 2.11. p-n eklemi ideal akım-gerilim grafiği

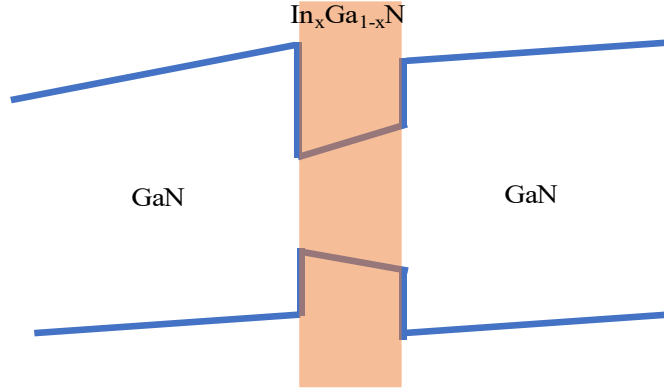
2.7 InGaN/GaN Kuantum Kuyuları

Farklı bant aralığına sahip yarıiletkenler üst üste büyütüldüklerinde ara yüzeylerde, iletkenlik ve değerlik bantları çakışamayacağından, ara yüzeyde her iki malzemenin bant kenarları enerji ölçeğinde farklılıklar gösterir. Bant kenarlarının ara yüzeydeki farkına enerji bant kayması (band offset) denir ve farklı malzemelerde bant kaymaları iletkenlik ve değerlik bantları için farklı değerler verir (Krijn 1991). İki büyük bant aralığına sahip yarı iletken arasına daha düşük bant aralığına sahip bir yarı iletken yerleştirildiğinde, büyük bant aralığına sahip yarı iletkenler bariyer, küçük bant aralığına sahip yarı iletken ise kalınlığı yarı iletkendeki elektronların de Broglie dalga boyundan daha düşük olduğu durumda kuyuyu oluşturur (Rosencher ve Vinter 2002). Böylece kuantum kuyuları elektron ve deşikleri hapseder, bu sınırlandırma sonucunda elektron ve deşiklerin iletkenlik bandındaki kuyu ile değerlik bandındaki kuyularda dalga-parçacık özelliklerinden dolayı farklı enerji seviyeleri oluşur. Bu etki bant kenarlarındaki elektron ve deşiklerin ışımali yeniden birleşme olasılığını artırır ve kayıplar azalır (Nakamura ve Chichibu 2000). Örneğin, en bilinen örnek olarak GaAs/AlGaAs yapısı aşağıda Şekil 2.12. a 'da verilmiştir. Burada kuyuda bulunan elektronlar, iletkenlik bant kenarında değil kuyunun genişliğine bant kaymasına bağlı olarak belirlenen enerji durumlarında bulunurlar. Benzer durum deşikler için değerlik bandında geçerlidir. Bu yapılara elektrik alan uygulandığında bant kenarları Şekil 2.12. b'deki gibi eğilir.



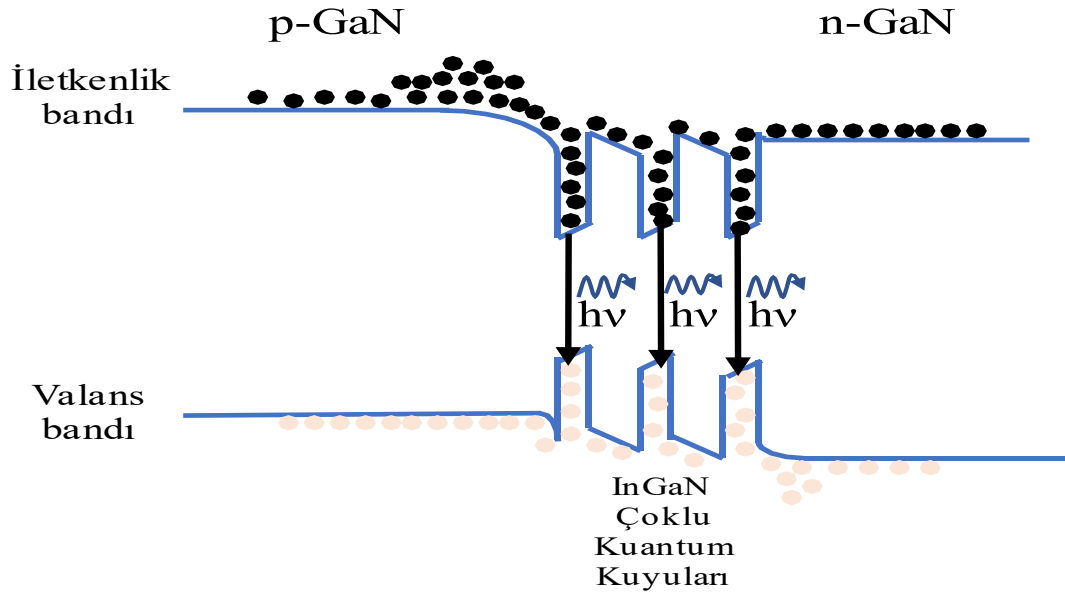
Şekil 2.12. a) Besleme altında olmayan GaAs/AlGaAs kuantum kuyuları b) ileri besleme altında GaAs/AlGaAs kuantum kuyuları.

Bu durum, GaN/InGaN/GaN kuantum kuyuları için bir farkla aynıdır. GaN/InGaN ara yüzlerinde ortaya çıkan iç piezoelektrik alan nedeniyle dış elektrik alan sıfır iken de band kenarları eğilir (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. InGaN/GaN kuantum kuyularının şematik gösterimi

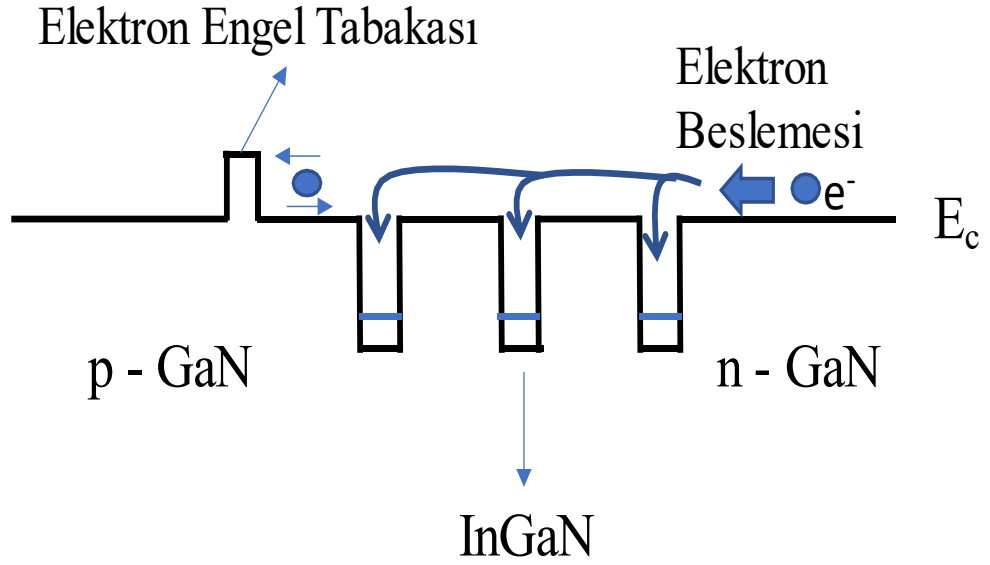
n-tipi ve p-tipi GaN arasına GaN'ın bant aralığından daha küçük bant aralığına sahip aktif bir InGaN tabakası eklenerek hem yük taşıyıcılarının uzun difüzyon yapımlarının önüne geçilerek GaN'ın kristal kusurlarında kayıp yaşanması engellenir hem de ışımalı yeniden birleşme olasılığı artırılmış olur (Nakamura 1996). Bununla birlikte, tekli kuyu tasarımında, kuyu bölgesi ince olduğundan, aktif bölge kolayca doygun hale gelir, böylece ek taşıyıcılar ışık yoğunluğunu arttıramaz (Han ve ark. 2009). Kuantum kuyularının tekrarlanması ile aktif tabaka kalınlaştırılarak bu sorunun çözülebileceği önerilmiştir. Tek kuantum kuyusu birkaç periyotta tekrarlanır ve bitişik kuantum kuyularına yakalanmayan fazladan yük taşıyıcılarını yakalamak için çoklu kuantum kuyuları oluşturulur. Çoklu kuantum kuyusu yapısı InGaN kuyu ve GaN bariyer tabakaları ile oluşturulur. Yasak bant aralığı enerjisi düşük olan InGaN tabakaları, yasak bant aralığı enerjisi daha yüksek olan GaN tabakaları arasındadır (Schubert 2006). Şekil 14'te gösterildiği gibi n-GaN bölgesinden elektron, p-GaN bölgesinden deşik beslemesi yapılır. Elektron ve deşikler kuantum kuyularında yakalanarak ışımalı yeniden birleşme yaparlar. Ancak çoklu kuantum kuyu modeli kullanılmasına rağmen kuyulardan sızan elektron ve deşikler olabilir.



Şekil 2.14. InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusu

GaN ve InN arasındaki örgü uyumsuzluğu sebebiyle kuantum kuyu bölgesinde kritik kalınlıklarda yüksek yoğunlukta kusurlar oluşabilir. GaN örgüsüne giren In atomları, büyüklükleri ile örgüyü gerer ve örgü sabitini büyütürler. InGaN ve GaN tabakaları arasındaki örgü uyumsuzluğu çok ince tabakalarda sadece stres yaratsa da kalınlık artınca stres kusur oluşması ile gevşer. Bu nedenle yüksek oranda In içeren kalın InGaN tabakalarını kusursuz büyötmek çok zordur. Çoklu kuantum kuyu modeli kullanılarak üretilen ilk GaN tabanlı LED 1995 yılında üretilmiştir (Nakamura 1996). Çoklu kuantum kuyularının olmasına rağmen, elektronların aktif tabakaya yakalanmadan elektriksel kontağa ulaşmasını engellemek için aktif tabaka ile p-tipi tabaka arasında bir elektron engelleme tabakası eklenmiştir. Taşıyıcıların kuantum kuyular bölgesinden kaçışını engellemek için eklenen bu tabaka Mg katkılı ince AlGaN tabakasıdır. AlGaN kristali GaN ve AlN kristallerinin bir karışımı gibi düşünülebilir. GaN kristalinin yasak bant aralığı 3.4 eV, AlN kristalinin yasak bant aralığı ise 6.2 eV dur. GaN kristaline az da olsa Al eklenmesiyle ile GaN yasak bant aralığı, daha geniş olan AlGaN yasak bant aralığına dönüşür. Daha geniş bant aralığı farkının büyük bir kısmı iletkenlik bandında ortaya çıkar ve bu fark elektronlar için bir engel teşkil eder. Elektron engelinin kuantum verimliliğini arttırmasının yanında, elektron engelleme tabakası ile GaN ara yüzeyinde aşağıya doğru bant bükülmesinden dolayı deşiklerin engellenmesinden kaynaklanan foton çıkışında

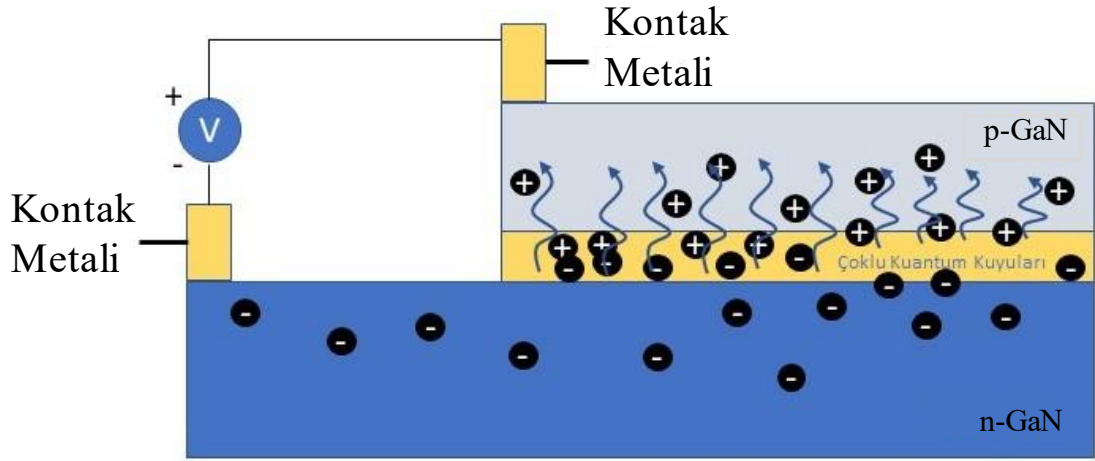
belirgin bir düşüş vardır (Xia ve ark. 2013, Tu ve ark. 2003). Elektron engel tabakasının LED yapısında bulunmasıyla azalan deşik enjeksiyonu ve bulunmamasıyla elektronların aktif bölgeden difüzyonundan kaynaklı istenmeyen etkileri azaltmak için elektron engel tabakasının moleküler yapısı dikkatle ayarlanmalıdır (Şekil 2.15.). Elektron engel tabakasındaki alüminyum yoğunluğunun, istenmeyen etkilerdeki dengeyi optimize etmeye yaradığı bulunmuştur (Ji ve ark. 2011).



Şekil 2.15. Elektron engel tabakalı çoklu kuantum kuyularının şematik diyagramı

2.8 Işık Yayan Diyotların Çalışma Prensipleri

LED'ler Şekil 2.16.'da gösterildiği gibi ışığı doğrudan elektronların ve deşiklerin ışımali yeniden birleşme işlemiyle yayar. LED'lerin çalışma prensibi kendiliğinden salımlıdır (spontaneous emission). İletken bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki deşikler yarı iletkenin bant aralığında ışımali ya da ışımali olmayan yeniden birleşme yapabilir. LED'lerde ışık salımı taşıyıcıların ışımali yeniden birleşmesine dayandığından, ışımali yeniden birleşme olasılığının büyük olması istenir (Schubert 2006).



Şekil 2.16. Şematik LED ışınması

Gerek GaN gerekse InGaN yasak enerji aralıkları doğrudandır. Her iki malzemede de iletkenlik bandının kenarı değerlik bandı kenarı ile Γ noktasında karşılaşır. Bu nedenle ışımalı geçiş olasılığı yüksektir. Günümüzde GaN/InGaN LED aygıtları bir veya birden çok kuantum kuyusu içerir. Kuantum kuyuları elektronları ve deşikleri lokalize eder ve eşik akım değerlerini düşürür. Kuantum kuyularının sayısı optimize edilecek bir parametredir. Beklenen en basit senaryoda, sürülen akımla LED'e giren elektronlar iletkenlik bandında, deşikler ise değerlik bandında sürüklenirler. Bu sırada, kuantum kuyuları tarafından yakalanmaları halinde kuyulardaki bağlı durumlar üzerinden ışımalı yeniden birleşme beklenir. Daha yüksek güçler için akım artırıldıkça, pratikte tek bir kuyu bütün elektronları ve deşikleri yakalayamaz. Bu nedenle kuyu sayısı artırılır. Literatürde bir ve birden çok hatta 12 kuyuya varan örnekler vardır. Ticari LED'lerde bu sayı, ticari bir sınırdır ancak 6 civarında olduğu söylenebilir. Çoklu kuantum kuyularda bile kuyular tarafından bütün elektronlar yakalanamaz ve akımın bir kısım kısa devre olur. Bu durumdaki elektronları ve deşiklerin taşıyıcı enerji engelleri ile kazanmanın mümkün olduğu gösterilmiştir (Han ve ark. 2009, Wang ve ark. 2010, Yan ve An Yin 2011).

Elektron ve deşikler yeniden birleşmeden önce aktif tabakalı diyotu elektron ve deşik ile beslemek gereklidir. Besleme verimi (η_{inj}), güç kaynağı tarafından sağlanan elektron sayısının aktif bölgeye ulaşabilen elektron sayısına oranı olarak tanımlanır. Besleme verimliliği elektron akımının toplam akıma oranı olarak şu şekilde ifade edilebilir (Li 2015).

$$\eta_{inj} = \frac{J_n}{J_p + J_n + J_R}$$

burada:

$$J_n = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

azınlık taşıyıcısı elektronların difüzyon akımını

$$J_p = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

azınlık taşıyıcısı deşiklerin difüzyon akımını,

$$J_R = \frac{eWn_i}{2\tau_0} \left[\exp\left(\frac{eV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

kıtlık bölgesindeki yeniden birleşme akımını verir.

Burada J_p deşiklerin difüzyon akımı, J_n elektron difüzyon akımı ve J_R p-n eklemindeki kıtlık bölgesi yeniden birleşme akımıdır.

Bir LED'in yüksek ışık akısı üretmesinin ilk adımı iç kuantum veriminin yüksek olmasına bağlıdır. İç kuantum verimliliği (IQE) LED içinde üretilen foton sayısının LED'e beslenen elektron sayısına oranıdır. Foton oluşumu, iletim bandındaki bir elektronun değerlik bandındaki bir deşik ile doğrudan yeniden birleşmesiyle gerçekleşir. Bununla birlikte ısı veya fonon üreten kusur seviyeleri Shockley-Read-Hall (SRH), Auger yeniden birleşimi gibi istenmeyen ışımaz süreçler de mevcuttur (Heikkilä, Oksanen, & Tulkki, 2010). İç kuantum verimi:

$$IQE = \frac{P_0 \cdot e}{h\nu \cdot I} \quad (2.7)$$

P_0 : Aktif bölgede oluşan ışık gücü

$h\nu$: Yayılma frekansı ν olan fotonun enerjisi

I : Uygulanan akım

e : Elektron yükü

Işık çıkarma verimliliği (LEE), LED’den dışarı yayınlanan foton sayısının LED’in içinde üretilen foton sayısına oranıdır. İdeal durumda aktif bölgede üretilen tüm ışığın LED’den yayınlanması beklenir ancak yayılan ışık, aktif tabaka, yarı saydam akım yayma filmi, metalik kontaklar vb. tarafından yeniden soğurulmasının yanı sıra LED ‘i oluşturan tabakaların kırılma indislerinin büyük olması da tam iç yansıma açısını küçülterek (GaN/hava arayüzeyinde 23.6°) Snell konisini daraltır ve aktif bölgede oluşan ışığın tamamının yayılmasına engel olur. Işık çıkarma verimi:

$$LEE = \frac{P}{P_o} \quad (2.8)$$

Bir LED’in performansı, elektrik gücünü optik güce ne kadar verimli bir şekilde dönüştürebildiğine bağlıdır. InGaN / GaN LED'lerin ışık çıkış gücü (Light Output Power, LOP), birim hacim başına birim zamanda üretilen foton sayısı olarak tanımlanır ve LED'in bize ne kadar parlak görüldüğünü belirler. LED'lerin LOP'u, aygıttan yayılan fotonların sayısının beslenen elektronların sayısına oranı olan dış kuantum verimliliği (External Quantum Efficiency, EQE) ile orantılıdır. Dış kuantum verimliliği üç bileşen ile tanımlanır (Huang ve ark. 2014). Dış kuantum verimliliği LED dışında ölçülen optik gücün harcanan toplam elektrik güce oranıdır:

$$EQE = \frac{P_{out}}{IV}$$

Dış kuantum verimliliği diğer üç bileşen ile de tanımlanabilir;

$$EQE = IQE \times LEE \times \eta_{inj} \quad (2.9)$$

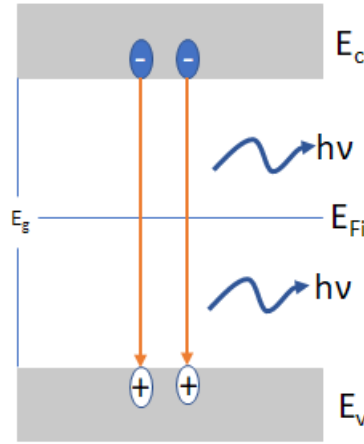
Burada IQE (Internal Quantum Efficiency) iç kuantum verimliliği, LEE (Light Extraction Efficiency) ışık çıkarma verimliliğidir.

2.8.1 Işımalı yeniden birleşme

Katkısız yarı iletkenlerde denge koşulları altında elektron (n_0) ve deşik (p_0) yoğunlukları eşittir. Işık soğurulması ya da ileri besleme altında yarı iletkenlerde fazlalık taşıyıcılar oluşur. Toplam taşıyıcı yoğunluğu aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \Delta n \\ p &= p_0 + \Delta p \end{aligned} \quad (2.10)$$

Burada Δn ve Δp , sırasıyla fazlalık elektron ve fazlalık deşik yoğunluğudur.

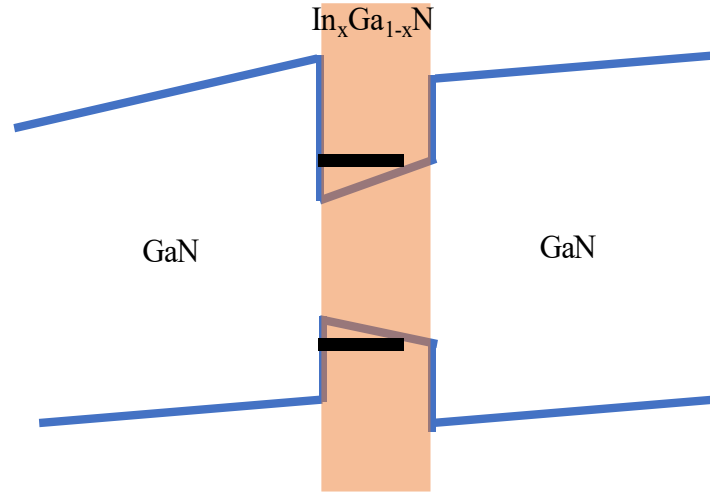


Şekil 2.17. Bantlar arası ışmalı yeniden birleşme. Enerjinin korunumu nedeniyle, elektron ve deşik birleşmesi sonucu salınan fotonun enerjisi elektronun iletkenlik bandındaki enerjisi ile değerlik bandındaki deşik ile birleştiği seviyenin enerjisi farkı kadardır.

Şekil 2.17. elektron ve deşik çiftinin bantlar arası yeniden birleşimi sonucunda yayınlanan fotonu gösterir. Yayınlanan bu fotonun enerjisi yarı iletkenin bant aralığı enerjisine eşittir. Taşıyıcıların azalma hızı R , taşıyıcı yoğunluğu ile orantılıdır. Dolayısıyla R , elektron ve deşik yoğunluklarının çarpımıyla orantılıdır, yani $R \propto n.p$ 'dir. Birim hacim başına birim zamandaki yeniden birleşme hızı şu şekilde yazılabilir (Schubert 2006);

$$R = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt} = Bnp \quad (2.11)$$

Bu denklem bimoleküler hız denklemi olarak adlandırılır ve orantı B sabitine bimoleküler yeniden birleşme katsayısı denir. III-V doğrudan bant aralıklı yarı iletkenler için tipik değeri $10^{-11} - 10^{-9} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ 'dir (Schubert 2006). Ancak, modern LED tasarımlarında neredeyse istinasız bir şekilde kuantum kuyuları kullanılır. İletkenlik bandındaki elektronlar fonon salımı ile enerji kaybederek iletkenlik bandındaki kuantum kuyusuna düşerler de benzer şekilde değerlik bandındaki kuantum kuyusunda düşerler. Böylece, elektronlar iletkenlik bandındaki kuantum kuyusunda, değerlikler ise değerlik bandındaki kuantum kuyusunda aynı malzeme içinde (InGaN) yerleşirler. Elektronları ve değerlikleri ince bir malzemeye hapseden kuantum kuyularında elektron ve değerliklerin enerjileri hapsolme nedeniyle bant kenarlarından daha fazladır. Bu durum Şekil 2.18.'de siyah çizgilerle gösterilmiştir:

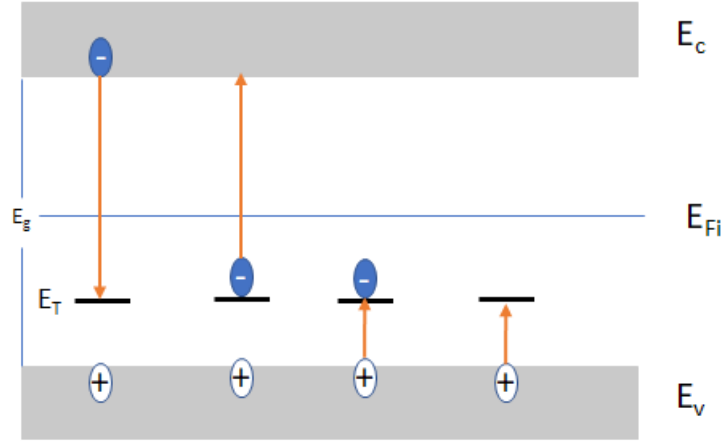


Şekil 2.18. InGaN kuantum kuyusunda elektron ve değerlikler

Bu durumda elektronlar ve değerlikler bant kenarlarında değil ilgili bağlı enerji durumları (bound states) üzerinden yeniden birleşirler. Yeniden birleşmenin diğer mekanizmaları daha önce anlatılanlarla aynıdır, bir farkla ki genellikle kuantum kuyularında taşıyıcı yoğunluğu birim hacim için değil birim alan için ifade edilir.

2.8.2 Işımasız yeniden birleşme

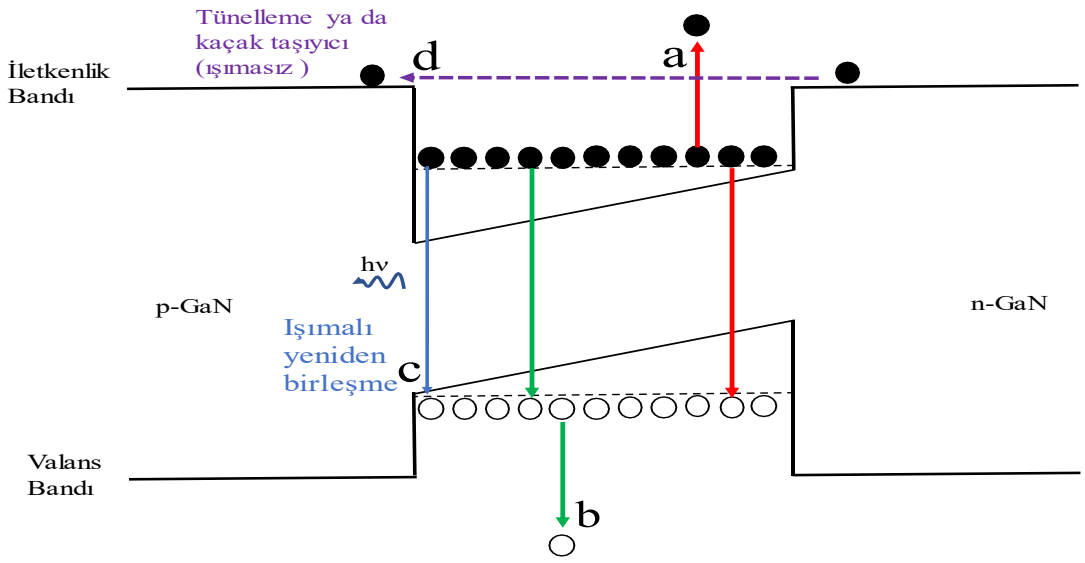
LED'lere beslenen elektron ve deşiklerin ışıklı olarak yeniden birleşmeleri verimi artırır. Ancak ışımasız birleşme de olasıdır. Işımasız yeniden birleşmeyi meydana getirebilecek birkaç mekanizma vardır. Kristal içindeki kusurlar ışımasız yeniden birleşmenin en yaygın sebebidir. Bu kusurlar, yabancı atomlar ve örgü içindeki bozukluklar sebebiyle ortaya çıkabilir ve yasak enerji aralığında tuzaklama seviyeleri ile temsil edilirler. Işımasız yeniden birleşme sırasında ışık olarak salınması beklenen elektron (deşik) enerjisi, örgü atomlarının titreşim enerjisine, yani fononlara dönüşür. Böylece elektronun fazla enerjisi ısıya dönüşür. Işık yayan aygıtlarda ışımasız yeniden birleşme olayları istenmez.



Şekil 2.19. Yasak bant aralığı içindeki birleşme merkezi

Işımasız yeniden birleşme, Şekil 2.19.'de gösterildiği gibi bant içindeki enerji durumları ile temsil edilen kusurlarda, elektronun boş bir birleşme merkezi (tuzak) tarafından yakalanması, dolu bir merkezden elektron salımı, boş bir merkez tarafından deşik yakalanması ya da dolu bir merkezden deşik salımı gibi geçiş durumları görülmektedir. Serbest taşıyıcıların tuzak seviyelerinde yeniden birleşimi ilk olarak Shockley, Read ve Hall tarafından analiz edildiğinden bu mekanizma Shockley-Read-Hall (SRH) mekanizması adıyla anılır (Shockley ve Read 1952, Hall 1952).

Bir diğerk ışımatsız yeniden birleşme mekanizması Auger yeniden birleşme sürecidir. Auger yeniden birleşmesi, elektron deşik birleşmesinden sonra oluşan enerjinin, foton olarak yayılması yerine, aynı bant içinde daha yüksek enerji durumlarına uyarılan elektronlara veya deşiklere aktarıldığı durumlara denir. Işımaları beklenen enerji Auger elektronuna aktarıldığından bu süreçte ışıma olmaz. Auger süreci malzemenin yapısına bağılı olarak hem elektronlar hem de deşikler için geçerlidir ve birçok kombinasyonu vardır. Deşikler için, örneğin hem hafif deşik bandındaki deşiklerin hem de ağır deşik bandındaki deşiklerin Auger sürecine katılmaları söz konusu olabilir.



Şekil 2.20. Auger süreçlerinin şematik gösterimi. **a)** sıcak elektronla (Auger elektronu) sonuçlanan Auger süreci, **b)** sıcak deşik (Auger deşiğı) ile sonuçlanan Auger süreci. **c)** Işımalı yeniden birleşme **d)** Kaçak akım. Daha gerçekçi bant diagramlarında farklı bantlara saçılan Auger taşıyıcıları da olasıdır.

Şekil 2.20’da gösterilen Auger süreçlerine göre yeniden birleşme denlemleri;

$$R_{Auger} = C_{pn}p^2 \quad (2.12)$$

$$R_{Auger} = C_{nn}n^2p \quad (2.13)$$

şeklindedir.

Auger yeniden birleşmesi, yeniden birleşme işlemi için aynı tipte iki taşıyıcı (iki deşik veya iki elektron) gerektiğinden taşıyıcı yoğunluğun küpü (np^2 veya pn^2) ile orantılıdır. İlk süreç (Denk. 2.12) p-tipi yarıiletkenlerde deşiklerin bolluğu nedeniyle meydana gelme olasılığı daha yüksektir. İkinci süreç (Denk. 2.13) n-tipi yarı iletkenlerde elektronların bolluğu nedeniyle daha olasıdır. Dengeye olmayan taşıyıcı yoğunluğunun dengedeki taşıyıcı yoğunluğundan yüksek olduğu durumda yüksek uyarma limitinde Auger yeniden birleşme denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$(C_p + C_n) n^3 = C n^3 \quad (2.14)$$

Burada C, Auger katsayısıdır. Auger katsayısının III-V yarı iletkenleri için tipik değeri $10^{-28} - 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$ 'dir (Schubert 2006). C nn çok küçük olması nedeniyle Auger süreçleri yüksek taşıyıcı yoğunluklarında belirginleşirler. Auger yeniden birleşmesinin taşıyıcı yoğunluğunun küpü ile orantılı olması, InGaN/GaN LED'lerde yüksek taşıyıcı yoğunluğunda, optik gücün düşmesinde önemli rol oynayabileceği anlamına gelmektedir. Böylece InGaN/GaN LED'lerde iç kuantum verimliliğini (IQE) ışıklı ve ışısız yeniden birleşme denklemleriyle aşağıdaki gibi karakterize edilebilir (David ve Grundmann 2010).

$$\text{IQE} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \quad (2.15)$$

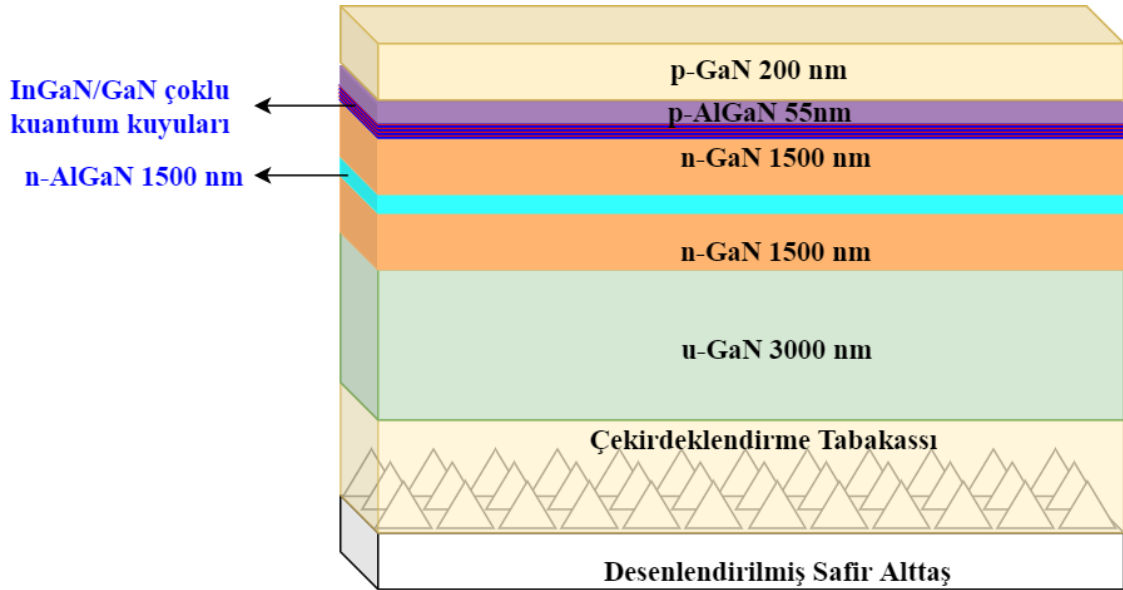
burada n, InGaN/GaN LED'lerin taşıyıcı yoğunluğudur. Burada paydadaki birinci terim, An, Schockley-Read-Hall mekanizmasını, ikinci terim, Bn^2 ise ışıklı birleşme sürecini üçüncü terim Cn^3 ise Auger sürecini temsil etmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde bu tez kapsamında üretimi yapılan LED'lerin üretim aşamaları, tasarım felsefesi ve epitaksiyel yapıları gösterilmiştir.

3.1 LED Tasarımı

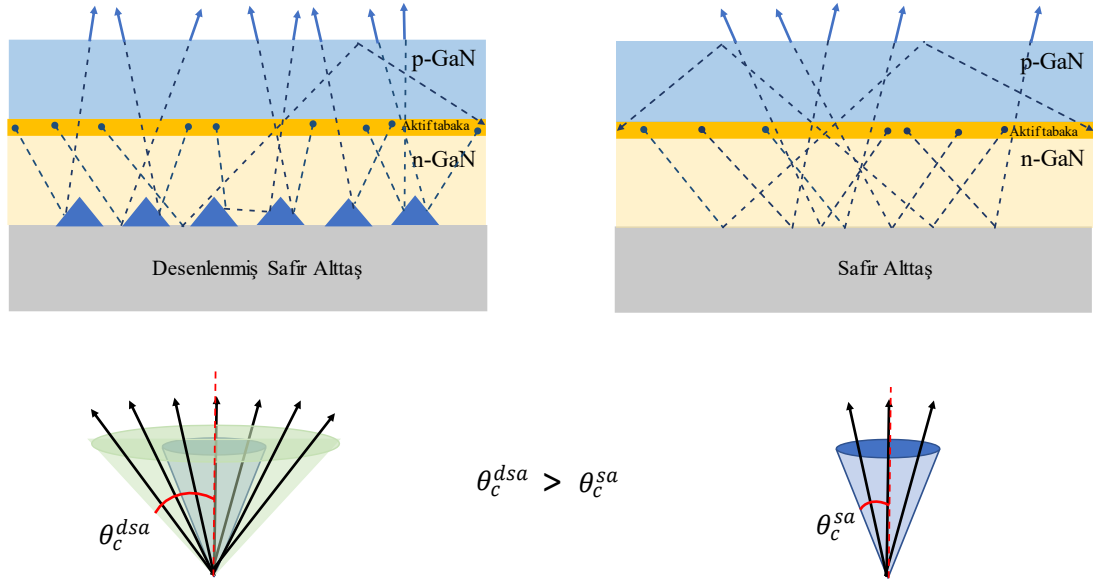
LED tasarımdan göz önüne alınması gereken birçok faktör vardır. Bunlar arasında üretilecek LED epitaksiyel tabakalarının en az kusurla büyütülmesi için gerekli faktörler, elektronik yapının optimizasyonu ve optik güç çıkışının artırılmasına yöneliktir. Bu tez kapsamında kullanılan ve metal organik kimyasal buhar biriktirme ile epitaksiyel tabakaları büyütülen LED yapısı Şekil 3.1. ile gösterilmiştir. Modern ticari LED yapılar genellikle safir alttaşlar üzerinde büyütülür. LED'lerde ışık üretiminin yanı sıra bir diğer sorunun kırılma indisleri farkı nedeniyle ışığın dışarı çıkmasını sağlamak olduğunu daha önce belirtmiştik.



Şekil 3.1. Üretimi yapılan LED'lerin epitaksiyel yapısı

Bu amaçla kullanılacak temel yöntemlerden bir tanesi LED epitaksisini desenlendirilmiş safir alttaşlar üzerinde büyütme. Böylece aktif bölgede üretilen ışığın bu ara yüzdeki desenlerden saçılarak dışarı çıkması kolaylaşır. Bu durum indis farkında

ortaya çıkan dar dışarı çıkma konisini genişletir. Şekil 3.2.'de desenlendirilmiş safir alttaşı üzerine LED yapısı ile desenlendirilmemiş safir alttaşı üzerine LED yapısı gösterilmiştir. Desenlendirilmiş safir alttaşı üzerine büyütülmüş LED'lerde düz safir alttaşı üzerine büyütülmüş LED'lere göre toplam iç yansımaya daha az olmuştur (Tadatomo ve ark. 2001).



Şekil 3.2. Desenli safir alttaşı ve düz safir alttaşa sahip LED'lerin üretilen ışığın LED tabakalarından çıkışı ve iç yansıma.

Desenlendirilmiş safir alttaşı üzerine büyütülen LED tabakalarının bir diğer avantajı, safir ile GaN kristalleri arasındaki örgü sabiti uyumsuzluğu nedeniyle oluşan kusur yoğunluğunun düz safir alttaşı üzerinden büyütülen LED'lere göre daha düşük olmasıdır. Bu kusurlar, elektron hareketliliği, ışımalı yeniden birleşme verimliliği gibi elektriksel ve optik özellikleri etkileyerek aygıt ömrünü kısaltır. Kusur yoğunluğunun daha düşük olmasıyla, daha yüksek ışık çıkış gücü elde edilir (Wuu ve ark. 2009).

3.2 (In)GaN Epitaksiyel Kristal Büyütme Yöntemleri

LED epitaksiyel yapılarının büyütülmesinde en sık kullanılan yöntem moleküler demet epitaksi (MBE) ve metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemleridir. Bu yöntemlerle büyütülen LED yapıları kısaca açıklanmıştır.

3.2.1 Moleküler Demet Epitaksi

Moleküler demet epitaksi (MBE), oksitlerden yarı iletkenlere ve metallere kadar çok çeşitli malzemelerin ince epitaksiyal filmlerini büyütme için kullanılan bir yöntemdir. İlk olarak bileşik yarı iletkenlerin büyütülmesine uygulanmıştır. Moleküler demet epitaksi, atomik veya moleküler demetlerin alttaş üzerine adsorbe olmasıyla, ultra yüksek vakum koşulları altında ısıtılmış kristal bir alttaş üzerine malzemelerin büyümesinin gerçekleştiği epitaksiyel bir işlemdir (Arthur 2002). Bu yöntemle alttaş ile aynı kristal yapısında ya da benzer simetriye sahip yapıda olan filmler ve alttaş ile örgü uyumsuzluğu en fazla %10 olan filmler büyütülebilir. Demetlerdeki atom ve moleküller kaynaklandıkları sıcak potalardan aldıkları enerji ile genel olarak ısıl enerjiye sahiptir ve ultra saf potalarda bulunan uygun malzemelerin buharlaştırılması veya süblimleştirilmesi ile filmler büyütülür. III-V alttaşların üzerinde büyütülen III-V yarı iletken filmlerin büyütülmesi grup-III atom ve grup-V moleküllerinin ısıtılmış alttaş yüzeyinde uygun örgü noktalarında etkileşime girmesiyle olur. Si ve berilyum (Be) gibi elementlerin atom demeti III-V bileşiklerinde n tipi ve p tipi katkılama sağlar (Henini 2012).

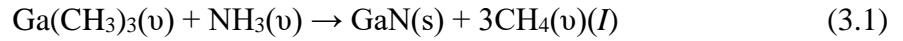
MBE sisteminde yüksek saflıkta filmler büyütebilmek için, süreçler ultra yüksek vakum altında gerçekleşir. Bu sebeple tüm odalar ve tahliye noktaları ultra yüksek vakuma göre tasarlanmıştır. Üç odalı bir MBE sisteminde, birinci oda alttaşın MBE sistemine sokulduğu yerdir ve burada alttaş birincil gazlardan arındırılır. Sonra alttaş çeşitli yöntemlerle yüzey analizlerinin yapıldığı ikinci odaya gönderilir. Üçüncü oda büyütmenin gerçekleştiği odadır. Büyütme kaynak potaları önündeki kapakların açılıp kapanmasıyla gerçekleşir. İnce katmanlı filmler üretmek ve alttaş yüzeyine zarar verebilecek tozları oluşturmamak için bu kapakların performansları önemlidir. Kaynak potaları pirolitik boron nitrür, kuvars, yüksek erime noktalı metal ve grafit gibi malzemelerden üretilir. Elektron demeti kaynak potaya odaklanarak kaynak malzemeyi ısıtır ve büyütme gerçekleşir. GaN büyütebilmek için, N kaynağı olarak N_2 ya da NH_3 molekülü kullanılır. Ancak N_2 molekülü çok kararlı olduğu için alttaş yüzeyinde N_2 moleküllerinin ayrıştırılması zordur. Isıtılmış alttaş yüzeyinde NH_3 moleküllerini ayrıştırmak daha kolaydır. Bunların dışında N atomlarını büyütmenin en etkili yolu N_2 gazını uyararak için plazma kullanımınıdır (Asahi ve Horikoshi 2019).

InGaN alaşımları düşük ısı ayrışma sıcaklığına sahip olduğundan, indiyum bakımından zengin InGaN alaşımlarını MBE ile büyütme iyi bir yaklaşımdır. InGaN / GaN çoklu kuantum kuyularının MBE kullanarak büyütülmesi, LED'ler için kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır (Hirsch ve BarrièRe 2003). Kuantum kuyularındaki indiyum bileşiminin dağılımlı kuantum kuyusunun genişliği ve büyüme sıcaklığı, InGaN / GaN filmlerin optik özelliklerini etkiler. InGaN kuantum kuyularında iç kuantum verimindeki önemli düşüş, yüksek verimli görünür LED'ler yapmak için MBE kullanımını zorlaştırır. Bu, kuantum kuyularındaki, kusurlar, kuantum sınırlı Stark etkisinden dolayı bir piezoelektrik alan, büyüme veya tavlama sonrası doping tabakasındaki bozulmalar nedeniyle bir piezoelektrik alan gibi çeşitli faktörlere bağlanmıştır (Wang ve Yoshikawa 2004).

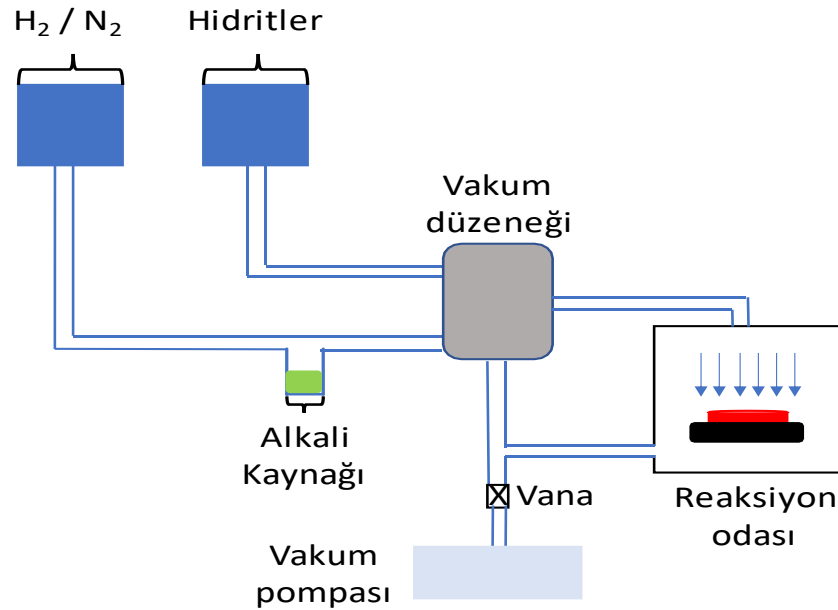
3.2.2 Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme

Son on yılda grup III-V yarı iletken aygıtların üretimi için Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) sistemleri büyük gelişim göstermiştir. MOCVD sistemlerinin, büyüme hızı, katkılama seviyesi, düzgün ara yüzlerin elde edilmesi gibi büyüme parametrelerinin iyi bir şekilde kontrol edilebilirliğini sağlaması, ışık yayan diyotlar, lazer diyotlar, hetero-bipolar eklemli transistörler (HBT'ler), yüksek elektron mobilite transistörleri (HEMT) güneş pilleri ve fotodetektörler gibi GaN ve GaAs tabanlı optoelektronik aygıtların üretimi için en popüler sistem haline gelmiştir. Nitrür tabanlı aygıtlar için tipik büyüme basınçları, malzeme özellikleri ve reaktör tasarımının sınırlamaları nedeniyle 50 ila 1000 mbar aralığındadır. Reaktörde, altaşlar, ısıtılan bir altaş taşıyıcısının üzerine yerleştirilir. Metal-organik (MO) In, Ga gibi atom kaynakları olan malzemeler ya gaz fazında bulunur ya da tüp içinde buharlaşır ve taşıyıcı gaz tarafından reaktöre taşınır, kaynak malzemeler sıcak altaş üzerinde adsorbe olur ve altaşın sıcaklığı ile yavaş yavaş ısınır ve ayrışırlar. Metalik atomlar yüzeyde kalırken uçucu gaz bileşikler vakum sistemi ile dışarı atılır (Yang 2014). Genel olarak, GaN filmleri, GaN altaşların yokluğu nedeniyle yabancı altaşlar üzerinde büyütülür. GaN'ın hetero-epitaksisinin ana fikri, kristal ekseninin hizalanması, altaş ile üst tabakalar arasındaki ısı uyumsuzluğun azaltılması ve örgü uyumsuzluğunun dengelenmesidir (Huang ve ark. 2014). MOCVD, epitaksiyel GaN büyümesinde en popüler ve etkili yöntem olarak kabul edilmiştir, çünkü yüksek kaliteli GaN tabakaları, 1986'da bu yöntem

kullanılarak başarıyla elde edilmiştir. MOCVD, iyi kontrol kabiliyeti nedeniyle hetero yapıları büyötmek için kullanılabilir. Ayrıca MOCVD kullanımında Ga / N akış oranı çok düşüktür bu da GaN tabakalarındaki azot boşluklarını büyük ölçüde azaltabilir (Wang 2015). MOCVD’de bir In/GaN LED yapısı oluşturmak için kullanılan grup III kaynakları, trimetilgalyum (TMGa) ve trimetilalüminyum (TMA1), trimetilindiyumdur (TMIn). Bu kaynaklar, içinden bir taşıyıcı gazın aktığı basınçlı gaz tüplerinde saklanır. Tüp sıcaklığı, kaynak malzemenin buhar basıncının tam kontrolünü sağlar. Taşıyıcı gaz ile kaynak malzeme ısıtılmış alttaşa taşınır. Grup V kaynakları genel olarak gaz halindeki hidritlerdir örneğin nitrür büyötmek için amonyak (NH₃) kaynak malzemedir. Alttaşa genellikle, bir RF bobini ile ısıtılabilen, grafit bloğa yerleştirilir. MOCVD kullanılarak GaN büyötmeye işlemini tarif eden temel reaksiyon aşağıdaki gibidir (Nakamura ve Chichibu 2000).



MOCVD ile InGaN kuantum kuyularının büyütülmesinde büyöme basıncı arttıkça In birleşmesi artar. Bu nedenle daha uzun dalga boyunda ışık saçan cihaz yapmak için çoklu kuantum kuyularını daha büyük basınçta büyötmek daha faydalıdır (Yamamoto ve ark. 2016). Şekil 3.3’de şematik MOCVD sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. MOCVD sistemi

3.3 Üretim Süreçlerinin Geliştirilmesi

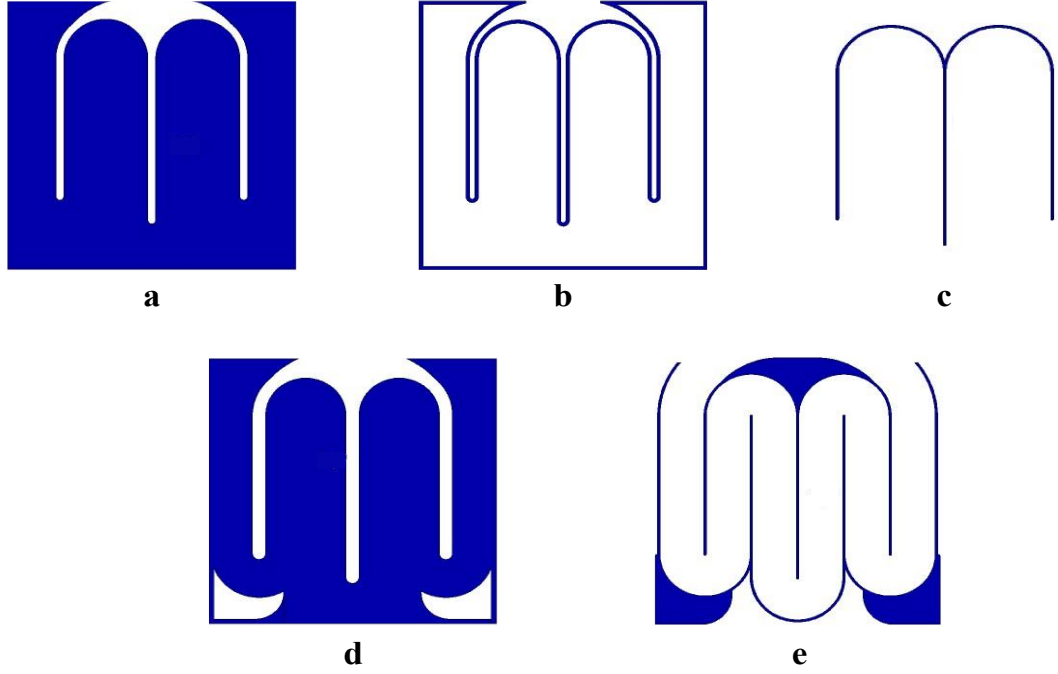
Mikrofabrikasyon üretim süreçleri genellikle karmaşık adımlar içerir. Her adımda yapılabilecek küçük hatalar sonucu çok etiler ve çalışan bir LED elde edilmesini güçleştirir. LED ışısıa bile elektriksel ve optik özellikleri arzulanan seviye olmaz. Üretim süreçlerinde bir sonraki adımın daha önce yapılan işlemleri etkilememesi önemlidir. Özellikle kontak metali kaplamalarında sık sık kullanılması gereken yüksek sıcaklık tavlama adımları, bu konuda dikkat edilmesi gerek adımlardır. LED en basit hali ile bir p-n eklemi olduğu için yüzeyde bulunan p bölgesi ile daha derinlerde bulunan n-tabakasına omik metalizasyon yapmak temel hedeftir. Mikrofabrikasyon süreci çeşitli adımların ayrı ayrı test edilmesinden sonra bir araya getirilir ve tüm aşamalar bir mikrofabrikasyon süreci olarak da ayrıca test edilir. Daha sonra üretim süreci olarak rutin olarak kullanılır. Bu sürecin temel taşı fotolitografi adımlarını belirleyen maske tasarım adımındır. Litografi adımlarından sonra metal kaplamaları öncesi yüzeyde oluşan oksit tabakayı ve fotorezist kalıntılarını kaldırmak önemli ara aşamalardır.

3.3.1 Maske tasarım

Maske kuartz veya soda cam üzerinde ince krom tabakasından oluşur. Maske tasarımı ticari bir yazılım ortamında yapılır ve maske üreticisine gönderilen yazılıma uygun olarak krom film desenlendirilir. Maske üzerinde kalan krom bölgelerden ışık geçmez, kromun kaldırıldığı şeffaf bölgelerden ışık geçer.

Bu tezde kullanılan maske 10 x 10 cm² boyutlarındadır. Bu maske, mesa aşındırması sırasında p – tipi GaN bölgelerinde aşındırılması istenmeyen bölgeleri korumak için Ni kaplama, aşındırma işleminden sonra yan duvarlar pasivasyonu için ALD ya da PECVD ile dielektrik kaplama işleminden sonra pasivasyon yapılması istenmeyen bölgelerden pasivasyon filmini kaldırma, n-tipi kontak metalleri kaplama, p-tipi kontak metalleri kaplama ve tel bağlama noktaları için metal kaplama aşamalarından oluşur. Maske üzerinde 3-4-6 parmaklı yapılar bulunur. Her yapıdaki parmak genişliği 50 µm'dir. 3 parmaklı yapıda parmaklar arası mesafe 400 µm, 4 parmaklı yapıda parmaklar arası mesafe 200 µm ve 6 parmaklı yapıda parmaklar arası mesafe 100 µm'dir. Tüm yapılar 1000 x 1000 µm² boyutlarındadır. Fotolitografi aşamasında hizalama için işaretler

bulunur. Ayrıca ohmik kontak direncini belirlemek için doğrusal ve dairesel yapıda iletim hattı modeli (TLM) yapıları bulunur (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Bu tezde kullanılan maskenin şematik görünümü. **a)** Mesa aşındırma öncesi nikel maske aşaması. **b)** Yan duvar pasivasyon aşaması **c)** n-tipi kontak aşaması **d)** p-tipi kontak aşaması **e)** Kontak noktaları metal kaplama aşaması. Maskenin a,c,d ve e aşamaları ters litografi yapılarak uygulanmıştır.

3.3.2 Epitaksiyel tabakaların temizliği

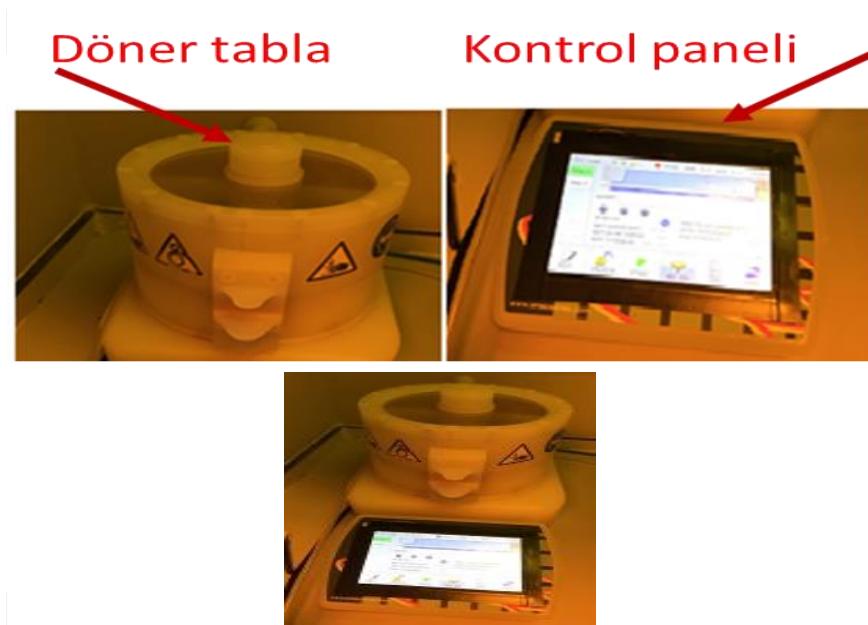
Temizleme işleminin amacı epitaksiyel örnekleri organik, iyonik kirliliklerden ve doğal oksitten arındırmak için yapılmıştır. Organik temizleme adımları ultrasonik ile beşer dakika süreyle yapılmıştır. GaN numunesi ilk önce yağdan arındırılmak için asetona batırılır. Daha sonra numune, aseton kalıntılarını arındırmak için metanole batırılır. Son olarak numuneler izopropil alkol ile organik çözücülerden tamamen uzaklaştırılır. Numune daha sonra deiyonize (DI) suda iyice durulanır ve iyonik kirlilikler ve doğal oksidin aşındırılması için hazırdır. 1:1 karışım oranında HCl ve DI H₂O çözeltisi Ga₂O₃ için iyi bir aşındırıcıdır (King ve ark. 1998), numuneler HCl/ H₂O çözeltisinde 10 dk bekletildikten sonra DI su ile durulandı ve N₂ gazı ile kurutuldu (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Üretimi yapılan LED çiplerinin a) temizlik öncesi b) temizlik sonrası mikroskop görüntüsü.

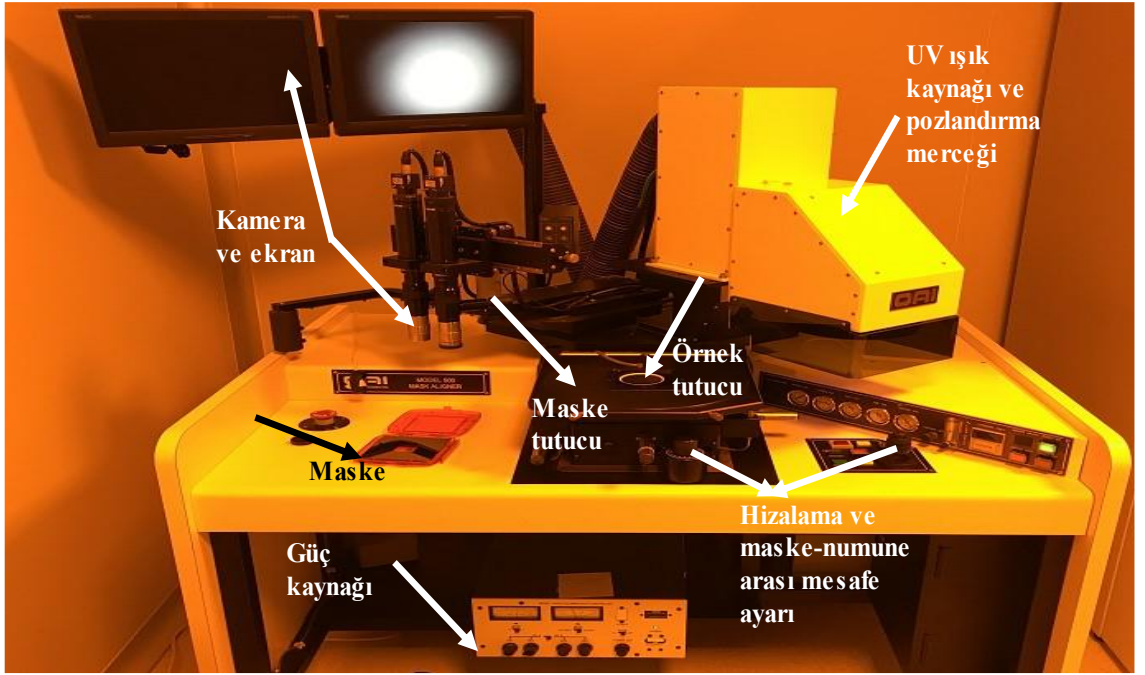
3.3.3 Fotolitografi

Fabrikasyonun en önemli adımlarından biri, desenleri fotomaske aracılığı ile numuneye aktarmaktır. Fotolitografi işlemi, fotorezist serme, yumuşak pişirme, maske hizalama, UV ışığa maruz bırakma ve banyo işlemi olmak üzere beş adımdan oluşur. MicroChemicals AZ5214E fotoresist 4000 rpm'de 55 saniye döndürülerek Şekil 3.3'de gösterilen döndürerek kaplama cihazı ile numunelere kaplanmıştır. Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'da bu tezde kullanılan döndürerek kaplama cihazı ve maske hizalama cihazı (OAI Model 500) gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Döndürerek kaplama cihazı.

Fotorezist kaplama işleminden sonra numuneler 110 °C'de 1 dk yumuşak pişirme işlemine tabi tutulur. Ardından maske hizalama cihazı kullanılarak fotomaske aracılığı ile desenler numuneye aktarılır. Maskede UV ışığı geçiren bölgelerden ışık geçerek numune üzerinde fotorezist kaplı bölgeyi zayıflatmaktadır. UV ışığa maruz kalan numune, banyo adı verilen kimyasala daldırılır ve UV ışık altında zayıflayan bölgenin kalkması ile istenilen desen numune üzerine aktarılır.

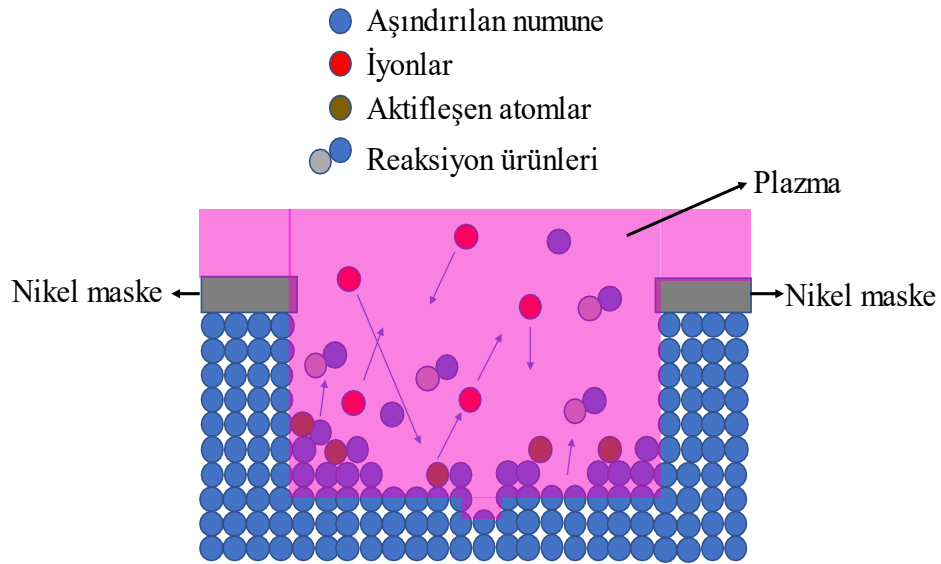


Şekil 3.7. Maske hizalama cihazı.

3.3.4 İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma (ICP) ile aşındırma

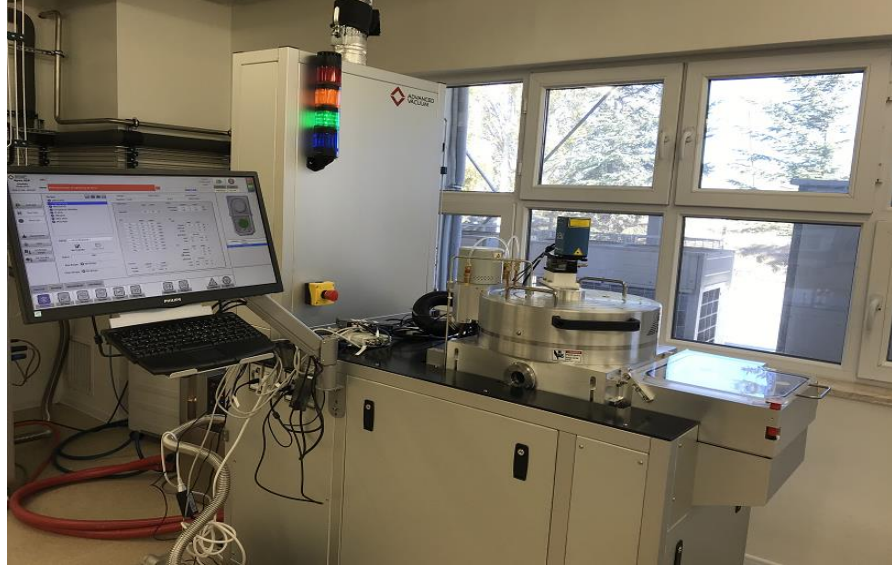
İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma (ICP) ile aşındırma, yüksek aşındırma hızı, yüksek seçicilik ve düşük hasar özellikleri ile yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Plazma düşük basınçlarda muhafaza edilebildiğinden mükemmel profil kontrolü de sağlanır. ICP plazmaları, içine rf gücünün uygulandığı bir endüktif bobin ile çevrelenen bir dielektrik kaptadır. Kabin merkezinde, bobine eş merkezli olan elektrik alan nedeniyle yüksek yoğunluklu bir plazma üreten güçlü bir manyetik alan indüklenir. Düşük basınçlarda, plazma üretim bölgesinden difüze olur ve nispeten düşük iyon enerjisinde

alttaşa sürüklenir. Bu nedenle, ICP aşındırma (etching) işleminin yüksek aşındırma hızlarına ulaşırken düşük hasar vermesi beklenir. Anizotropik profiller, iyon enerjisini bağımsız olarak kontrol ederek numuneye bir RF gücünün uygulanmasıyla elde edilir (Shul, ve diğerleri, 1996). Şekil 3.8.'de şematik ICP aşındırma süreci gösterilmiştir. Burada nikel aşındırılması istenmeyen bölgeleri korumak için maske olarak kullanılmıştır. Plazmada, reaksiyona girecek ürünler oluşturulur ve aşındırılacak numune yüzeyi ile reaksiyona girer. İyonlar manyetik alan ile malzeme yüzeyine gönderilir ve yüzeydeki atomlara çarparak yüzeydeki atomik bağları kopararak onları aktifleştirir. İyonlar yatay yüzeye yan duvarlardan daha fazla çarparak yatay yüzeyi daha hızlı aşındırır. Reaksiyon ürünleri atık gaz olarak uzaklaştırılır.

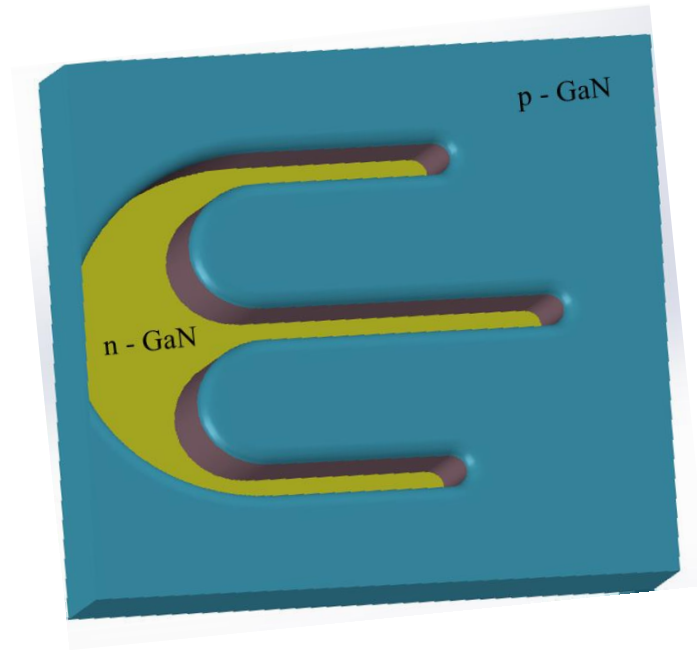


Şekil 3.8. Şematik ICP aşındırma.

Bu çalışmada numuneler Advanced Vacuum's APEX SLR ile Eskişehir Teknik Üniversitesinde aşındırılmıştır (Şekil 3.9.). Aşındırma için CF_4 ve Ar gazları kullanılmıştır. CF_4 akış hızı 20 sccm, Ar akış hızı 4 sccm, kap basıncı 10 mTorr, RF gücü 500W reçetesi kullanılmıştır. Bu reçetede aşındırma hızı 1 dakikada 350 angström'dür.



Şekil 3.9. ICP cihazı

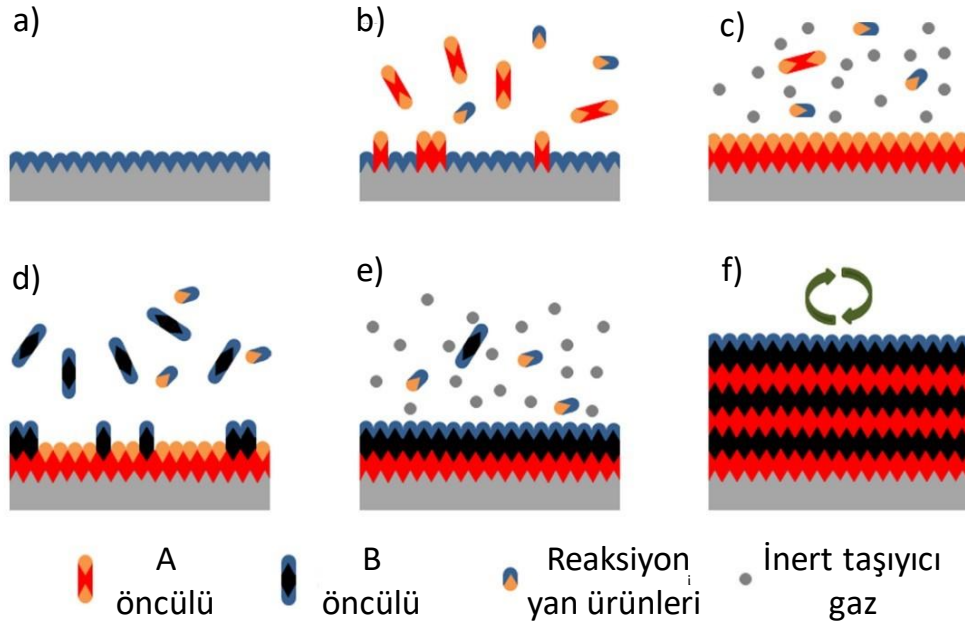


Şekil 3.10. ICP sonrası LED'lerin şematik gösterimi

Şekil 3.10.'da ICP işlemi sonrası LED'ler şematik olarak gösterilmiştir. Numuneler 1,5 μm derinlikte n – tipi kontak tabakasına kadar aşındırılmıştır. Bu aşamada aşındırılması istenmeyen p – GaN bölgeleri nikel maske ile korunmuştur.

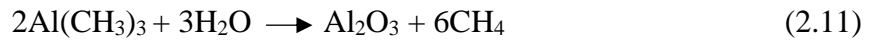
3.3.5 Atomik tabaka biriktirme ile pasivasyon

Atomik tabaka biriktirme (ALD), kimyasal gaz fazında ince film büyütme yöntemlerinden biridir. ALD, 1970'lerin sonunda Suntola ve arkadaşları tarafından yeni kimyasal buhar biriktirme yöntemi olarak geliştirildi. İnce Film Elektrolüminesans (TFEL) düz panel ekranlar yapmak için yapılan araştırmalar ALD'nin geliştirilmesinde en önemli kaynaktı. ALD'nin geliştirilmesinden kısa bir süre sonra, bileşik yarı iletkenlere uygulanabilirliği birkaç çalışma ile gösterildi. Özellikle III-V yarı iletken bileşikler en kapsamlı incelenen malzemeler oldu. Sürekli azalan cihaz boyutları nedeniyle 1990'ların ortasından bu yana mikro elektronik cihazların üretiminde ALD'ye olan ilgi arttı. Azalan boyutlar çok ince film gereksinimi doğurarak ALD'nin en önemli sorunu olarak gösterilen düşük biriktirme hızının dezavantaj olmasının önüne geçti (Ritala ve Leskelä 2002). ALD, kaplanan yüzeyin her yerinde eşit ve uyumlu kaplama yapabilmesi ve kaplanan filmlerin atomik boyutlarda kalınlık kontrolüne imkan sağlaması sebebiyle ince film üretiminde büyük potansiyele sahiptir. Temel olarak ALD işlem süreci Şekil 3.11.'de gösterilmiştir. ALD işlemi, gaz halinde bulunan kimyasal öncüllerin ardışık ve dönüşümlü olarak atımlarla numune yüzeyi ile reaksiyona girmesiyle gerçekleşir. Öncüllerin ardışık atımıyla ayrı ayrı gerçekleşen gaz ve yüzey arasındaki reaksiyonlar yarı reaksiyon olarak adlandırılır. Her yarı reaksiyon sırasında, öncülün kendi kendini sınırlayan bir işlemle numune yüzeyi ile reaksiyona girebilmesi için, belirli süre aralıklarıyla vakum (<1 Torr) altındaki bir odaya atımlar yapılır. Daha sonra oda, öncül atımlarının fazlalıklarını ve öncülün numune yüzeyi ile reaksiyonu sonucunda oluşan yan ürünlerinden taşıyıcı inert gaz ile temizlenir. Taşıyıcı inert gaz tipik olarak N_2 ya da Ar gazıdır. Bu işlemi diğer öncül atımları ve arındırma işlemi izler ve numune yüzeyi tek katman kaplanmış olur. Bu işlemler istenilen film kalınlığına ulaşılan kadar devam eder (Johnson ve ark. 2014).

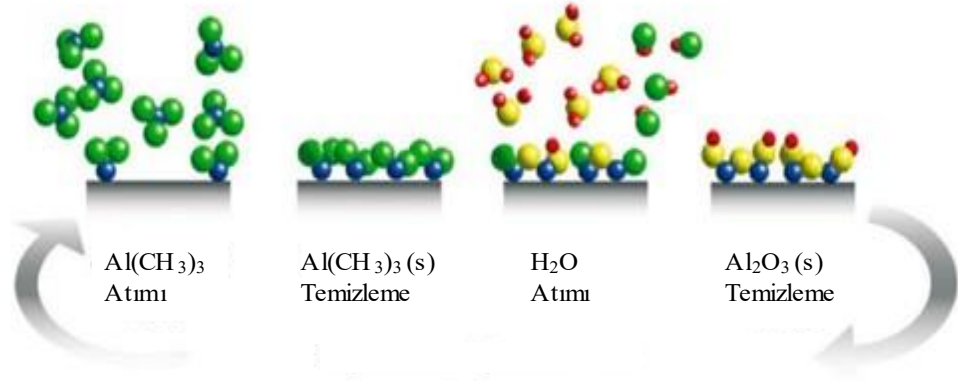


Şekil 3.11. Şematik ALD işlem süreci. **a)** ALD ile kaplanmaya hazır numune. **b)** A öncülü atımları, numune yüzeyi ile reaksiyonu. **c)** A öncülü fazlalıkları ve reaksiyon sonucunda oluşan yan ürünler inert taşıyıcı gaz ile temizlenir. **d)** B öncülü atımları, numune yüzeyi ile reaksiyonu. **e)** B öncülü fazlalıkları ve reaksiyon sonucunda oluşan yan ürünler inert taşıyıcı gaz ile temizlenir. **f)** İstenilen kalınlığa ulaşılan kadar b-e arasındaki işlemler tekrarlanır (Johnso ve ark., 2014).

ALD ile Al_2O_3 kaplama yollarından üzerine en çok çalışma olan ve en sık başvurulan yöntem, öncül olarak su ve trimetilalüminyum (TMA) kullanımındır. Oda sıcaklığında TMA sıvı haldedir ve buhar basıncı suyun buhar basıncına yakındır. Bu sebeple hem TMA'nın hem de suyun belirli sürelerle vakum odasına atımları kolaydır. İşlem sırasında temel reaksiyon;

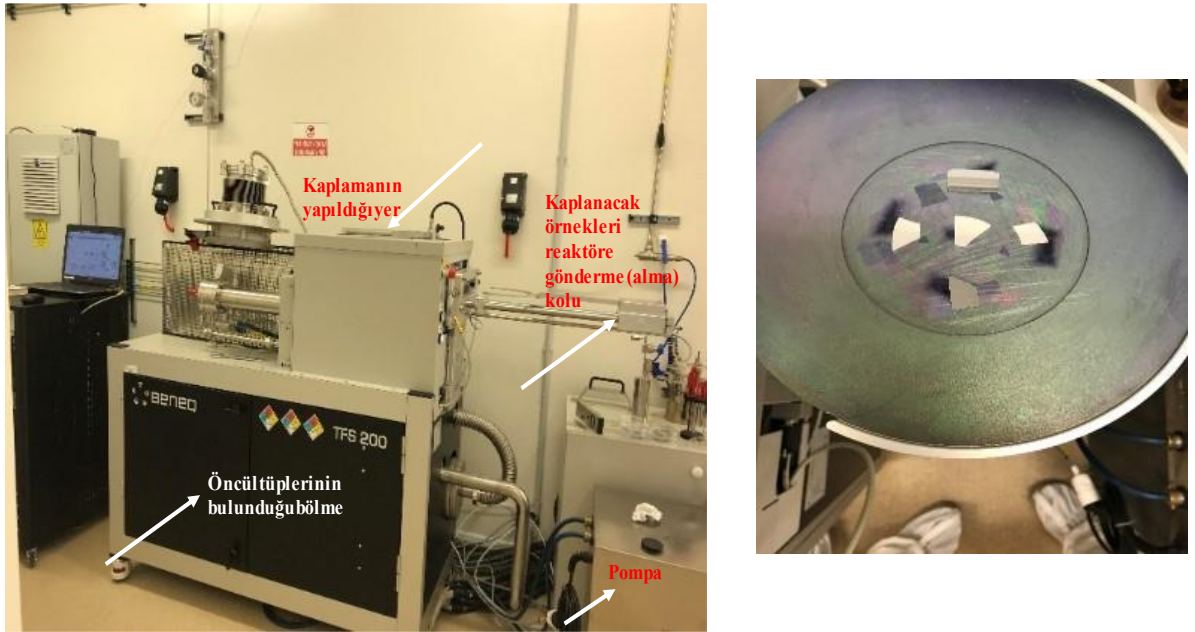


şeklindedir (Şekil 3.12.). Literatürde TMA ve su öncülleri kullanılarak her döngüde 0,9 – 1,3 Å kalınlıkta kaplama yapıldığı belirtilmiştir. Ticari ALD'lerde sıcaklığa ve numune yüzeyine bağlı olarak her bir döngü süresi bir saniyeden az ya da birkaç saniye arasında değişmektedir. Oluşturulan Al_2O_3 filmlerin kırılma indislerinin 1,65 – 1,70 arasında olduğu belirtilmiştir (Kääriäinen ve ark. 2013).



Şekil 3.12. ALD ile Al₂O₃ birikimi döngüsü (Forgenano 2020)

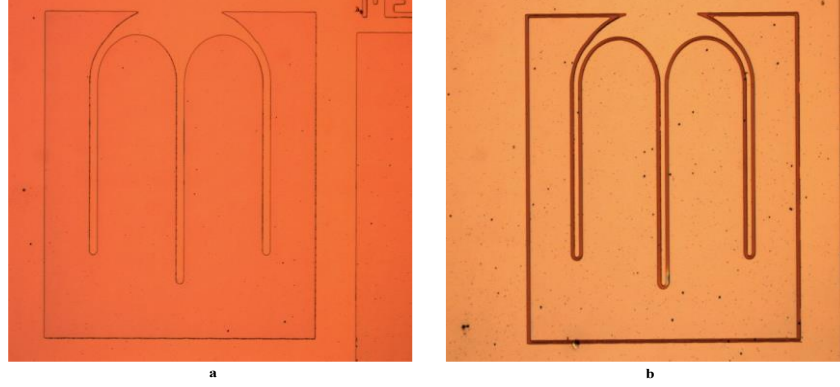
ALD ile TMA ve su öncülleri kullanılarak 250 °C sıcaklıkta 70 nm kalınlığında Al₂O₃ yan duvar filmler büyütülmüştür. ALD işlemi için Şekil 3.13.'de gösterilen Beneq TFS 200 ALD sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.13. ALD cihazı.

Kaplamalar yapıldıktan sonra yan duvarlar harici bölgelerden ALD ile Al₂O₃ filmleri kaldırmak için 75 °C'de %85 fosforik asit (H₃PO₄) kullanılmıştır. H₃PO₄ 75 °C'de olan ısıtıcı üzerinde bekletilmiştir. Daha sonra örnekler H₃PO₄'e daldırılıp bekletilmiştir.

Yaklaşık 90 saniye sonra örnekler fosforik asitten çıkarılıp DI su ile durulanıp azot ile kurulanmıştır (Şekil 3.14.). Bu reçetede aşındırma hızı 40-45 nm/dk 'dır.



Şekil 3.14. a) Pasivasyon filmi kaplı LED çipi **b)** Pasivasyon filminin aşındırılmasından sonra yan duvar pasivasyonu yapılmış LED çipinin mikroskop görüntüsü.

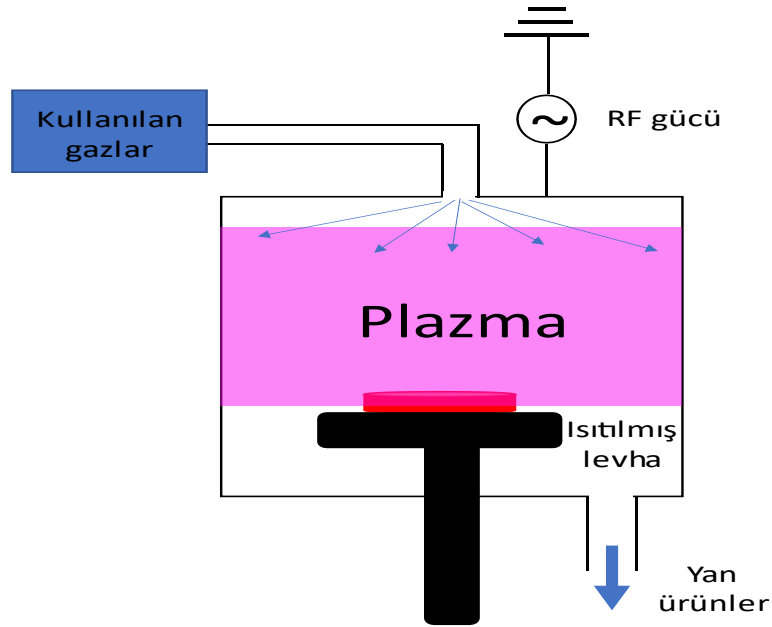
3.3.6 Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme

Kimyasal buhar biriktirme yönteminin, fiziksel buhar biriktirme yöntemine göre en önemli avantajı geniş yüzeyleri daha homojen bir filme kaplayabilmesidir. Ancak yüksek sıcaklık ihtiyacı ise kimyasal buhar biriktirmenin dezavantajıdır. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD), kimyasal buhar biriktirme yönteminin yüksek sıcaklık ihtiyacı gibi bazı sorunlarını ortadan kaldırmıştır. Kimyasal buhar biriktirme yönteminde plazma kullanımı, 1950'li ve 1960'lı yıllarda elektron demeti ile organik bileşiklerin ayrışmasının gerçekleştirildiği deneylerle başlamıştır. Plazma kısmen veya tamamen iyonize gazdır. Genellikle elektron, yüklü parçacıklar ve nötr atomların oluşturduğu bir karışımdır. PECVD işleminde plazma oluşturmak için dışarıdan bir enerji kaynağına ihtiyaç vardır. Plazma oluşturma yöntemlerinden biri olan gazı ısıtmak, iyonlaşma enerjilerinin yüksek olmasından dolayı kullanışlı değildir. Plazma oluşturma yönteminin diğer yolları ses frekansı, radyo frekansı ve mikrodalga frekansında elektrik enerjisi kullanımıdır. Plazma oluştuktan sonra nötr moleküller, plazmadaki elektron ve iyonlarla etkileşerek ve reaktif hale gelir (Hamedani ve ark. 2016).

PECVD reaksiyonu, sıcaklık, basınç, RF gücü, gaz akış hızı ve zaman değişkenlerinin kontrol edilmesi gereken karmaşık bir yöntemdir. Her değişken, üretilen filmin kalınlık, elektrik ve optik özelliklerini etkilemektedir ve bu değişkenleri optimize etmek uğraş

gerektirir. PECVD ile üretilebilen silikon nitrür, silikon oksit ve silikon oksinitrür dielektrik ve yalıtkan filmler mikroelektronik cihaz imalatında en sık kullanılan filmlerdir. Film biriktirme hızı kaliteli filmler için en önemli parametredir. Düşük hızda kaliteli filmler için, yüksek akış hızında inert taşıyıcı gaz ve düşük akış hızında reaktif gazlar kullanılmalıdır. Düşük kaplama hızlarında büyütülen filmlerin nispeten daha yoğun, delik kusuru olmayan ve daha iyi elektriksel özellikte olan filmler olduğu rapor edilmiştir (Şekil 3.15.) (Batey ve Tierney 1984).

PECVD ile SiO₂ biriktirmek için silan (SiH₄) ve N₂O gazları karışımı kullanılır. Her gaz odaya farklı kanallardan ulaşır. Pereyra ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, N₂O / SiH₄ oranı sabit tutulup SiH₄ akış hızı artırılarak yapılan büyütmelerde kırılma indisinin düştüğü, rf gücünün artırılmasıyla kırılma indisinin düştüğü, sıcaklığın artırılmasıyla kaplama hızının ve kırılma indisinin düştüğü, 20-80 mTorr basınç arasında kırılma indisinin arttığı daha yüksek basınçlarda azaldığı ve değişen N₂O / SiH₄ oranının artmasıyla önce azaldığını daha sonra oranın en büyük değerleri için tekrar arttığını rapor ettiler (Pereyra ve Alayo 1997).



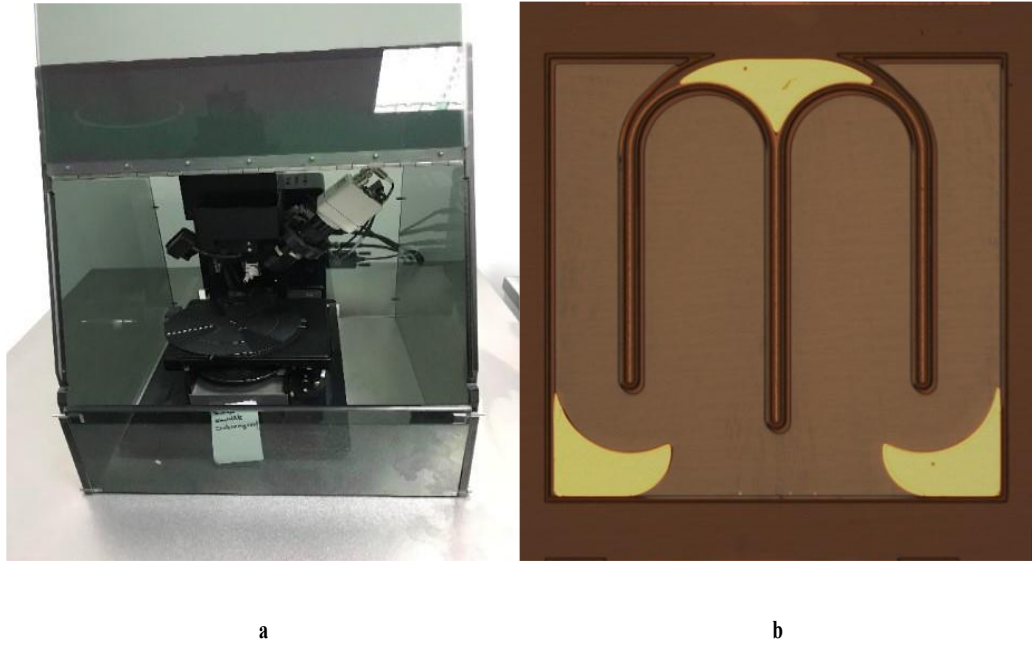
Şekil 3.15. Şematik PECVD reaktörü.

PECVD ile büyütülen SiO₂ filmler ise 250 °C 50 sccm 2% SiH₄/N₂, 1000 sccm N₂O gaz karışımı kullanılarak 250 nm kalınlıkta üretilmiştir.

PECVD ile SiO₂ kaplamaları ise tampon oksit aşındırıcı (BOE) ile yaklaşık 80 saniye bekletilerek aşındırılmıştır. Yan duvar pasivasyon filmleri fotolitografi yapılarak fotorezist ile korunmuştur.

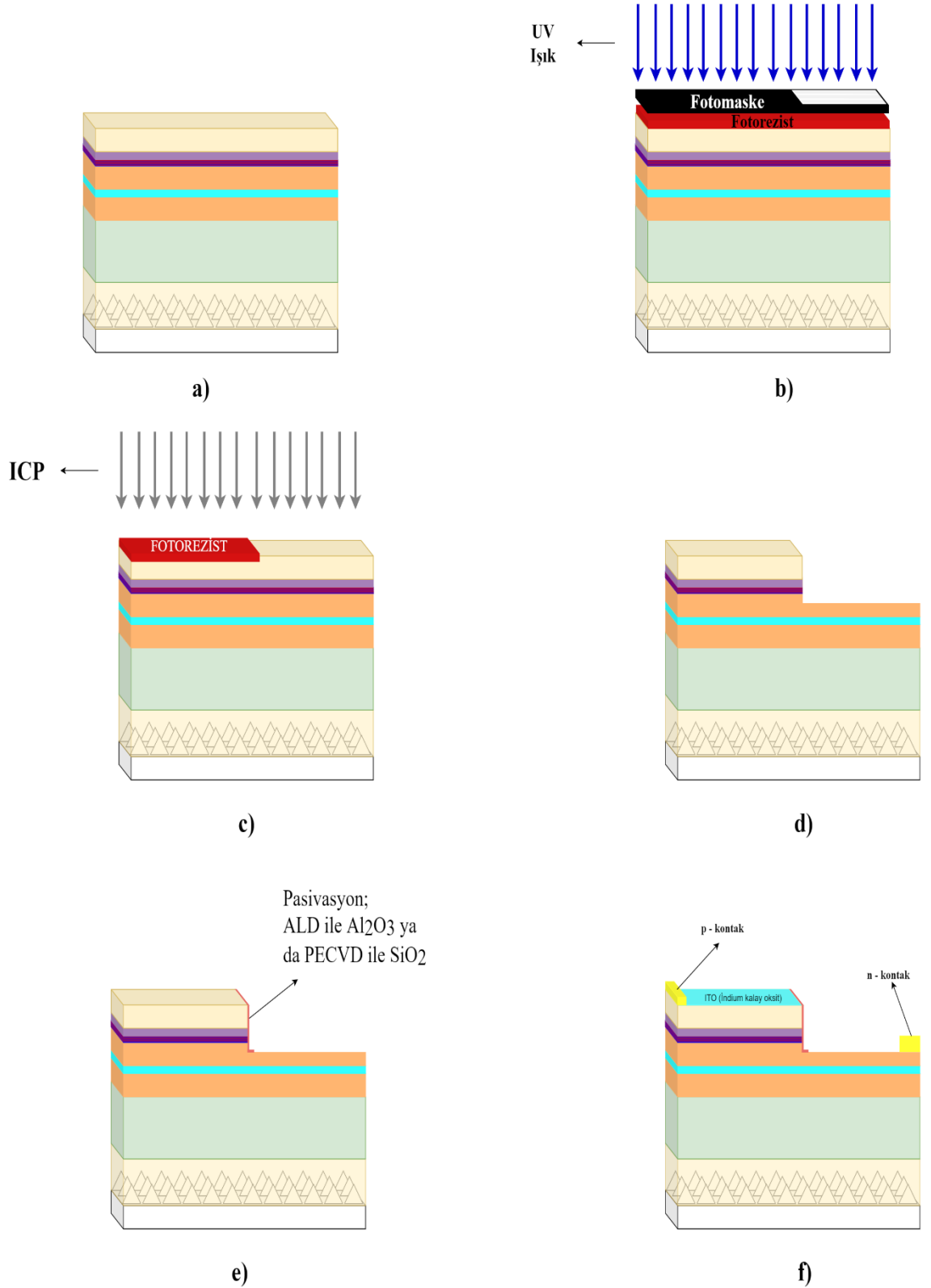
3.3.7 Metal Kaplama

Pasivasyon aşamasından sonra numunelerin n – tipi kontak tabakasına Ti (30 nm), Al (50 nm), Ti (60 nm) ve Au (70 nm) kaplanmıştır. p – tipi kontak tabakasına Ni (5 nm), Au (5 nm) ve akım yayma tabakası olarak ITO (120 nm) kaplanmıştır. Kontaklara Hızlı Isıl Tavlama (RTA) yapılarak ohmik olmaları sağlanmıştır. Üretim aşamasında kaplanan filmlerin kalınlığı Veko Dektak 6m yüzey profilometresi ile ölçülmüştür (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. a) Yüzey profilometresi **b)** Üretimi tamamlanan LED'in mikroskop görüntüsü

Tüm üretim aşamaları Şekil 3.17.'te kısaca gösterilmiştir.



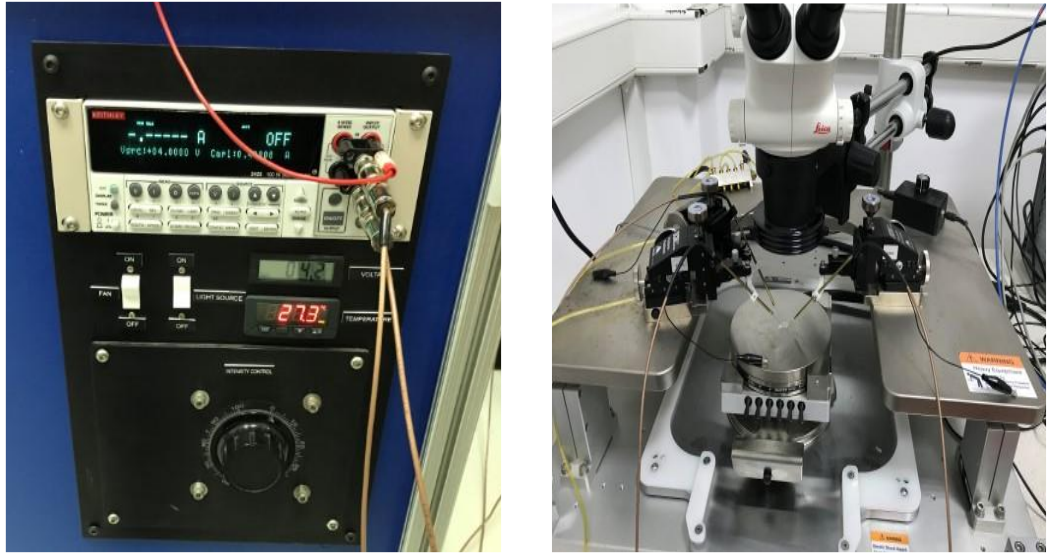
Şekil 3.17. Şematik üretim aşamaları. **a)** Temizliği yapılan numune **b)** Litografi aşaması **c)** ICP aşındırma **d)** n – GaN tabakasına kadar aşındırılmış numune **e)** Yan duvar pasivasyonu **f)** Kontakt metalleri kaplama

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Bölüm 3’te anlatılan yöntemlerle üretilen LED’lerin elektriksel ve optik özelliklerinin ölçüm sonuçları verilmiştir.

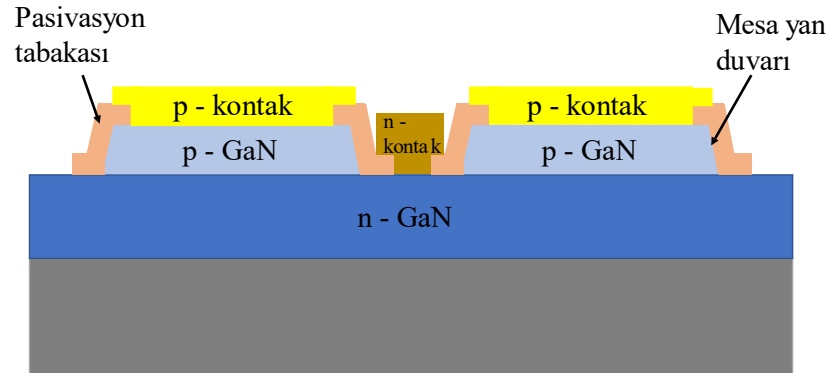
4.1 Akım – Gerilim Ölçümleri

Akım – gerilim ölçümleri Keithley 2425 kaynak metre ve Cascade Microtech probe istasyonu kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.1.). Kaynak metre ile LED’e akım beslenmekte ve yine aynı kaynak metre ile LED üzerinde düşen gerilim okunmaktadır. Bu ölçümler sırasında akımın uygulanması ve gerilimin ölçülmesi aynı sonda uçları üzerinden yapılmaktadır. Ölçüm öncesi LED’lere yanlışlıkla aşırı akım verilmesinin engellenmesi için, akım sınırlaması yapılmakta ve daha sonra akım bilgisayar kontrollü olarak belirli bir hızda artırılmakta ve akım ve gerilim değerleri kaydedilmektedir. LED çiplerinin küçük olması nedeniyle sonda uçları n - tipi ve p - tipi kontaklara mikroskop yardımı ile dokundurulmaktadır. Bu yöntem kullanılarak çeşitli geometrilere onlarca LED ölçülerek akım- gerilim eğrileri oluşturulmuştur.



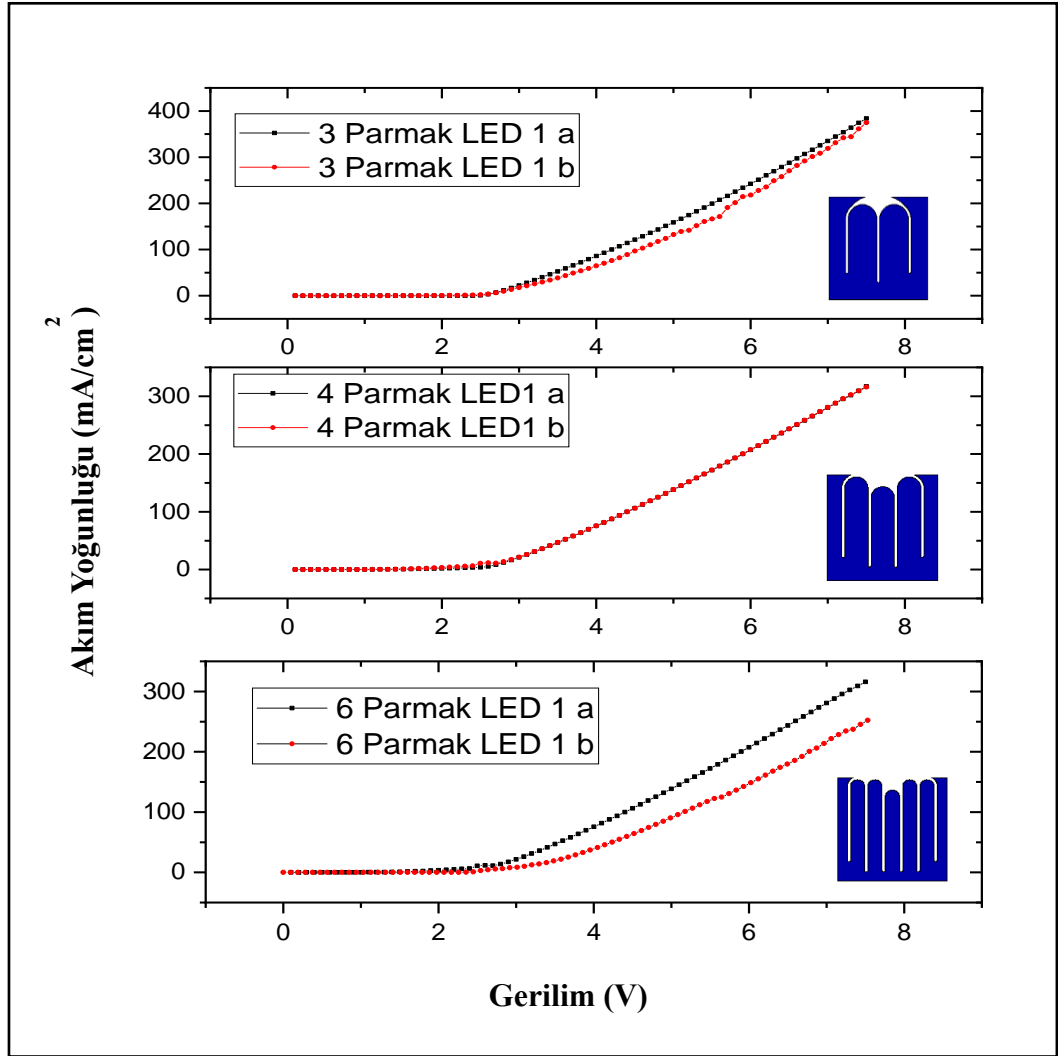
Şekil 4.1. LED’lerin akım- gerilim ölçümlerinde kullanılan kaynak metre ve probe mikroskoplu sonda istasyonu.

GaN kristallerinin p- tipi katkılamasının Mg ile yapıldığı ve 5×10^{17} Mg/cm³ den daha fazla katkılama yapılırsa dahi p-GaN tabakalarının iletkenliğinin artmadığı daha önce belirtilmişti. Bu nedenle ve seri direnci düşürmek için p-GaN tabakasına yapılan kontaklar en üstte ve mümkün olan en geniş alanı kaplayacak şekilde yapılmıştır. Diyotun diğer ucu olan n-GaN tabakası, diyot yüzeyinin 1500 nm kadar altındadır. Bu tabakaya ulaşmak için (Şekil 3.10) ince parmak geometrisinde bir bölüm ICP ile aşındırılmıştır, pasivasyon tabakası uygulandıktan sonra metal n-GaN tabakasına pasivasyon filmi aşındırılarak pencereler açılmıştır ve n tipi kontaklar uygulanmıştır. n-kontak alanının küçük olmasına rağmen n-GaN tabakasının yüksek katkılama nedeniyle iyi bir iletken olması, bu tabakada akımın yayılmasına ve böylece optik verimin artmasına ve seri direncin düşmesine neden olmaktadır. Şekil 4.2.'de üretimi yapılan LED serilerinin yandan görünümü verilmiştir, n-kontaktların sayısını artırmak p-kontak alanını azaltmakta ve seri direnci artırmaya yönelik bir durum yaratmaktadır. Öte yandan, bu tezde parmak olarak ifade edilen n- kontaktların sayısının artırılması Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi aynı zamanda yan duvar alanını ve sayısını da artırmaktadır.



Şekil 4.2. Üretimi yapılan LED serilerinin yan duvar ve kontaktlarının şematik görünümü.

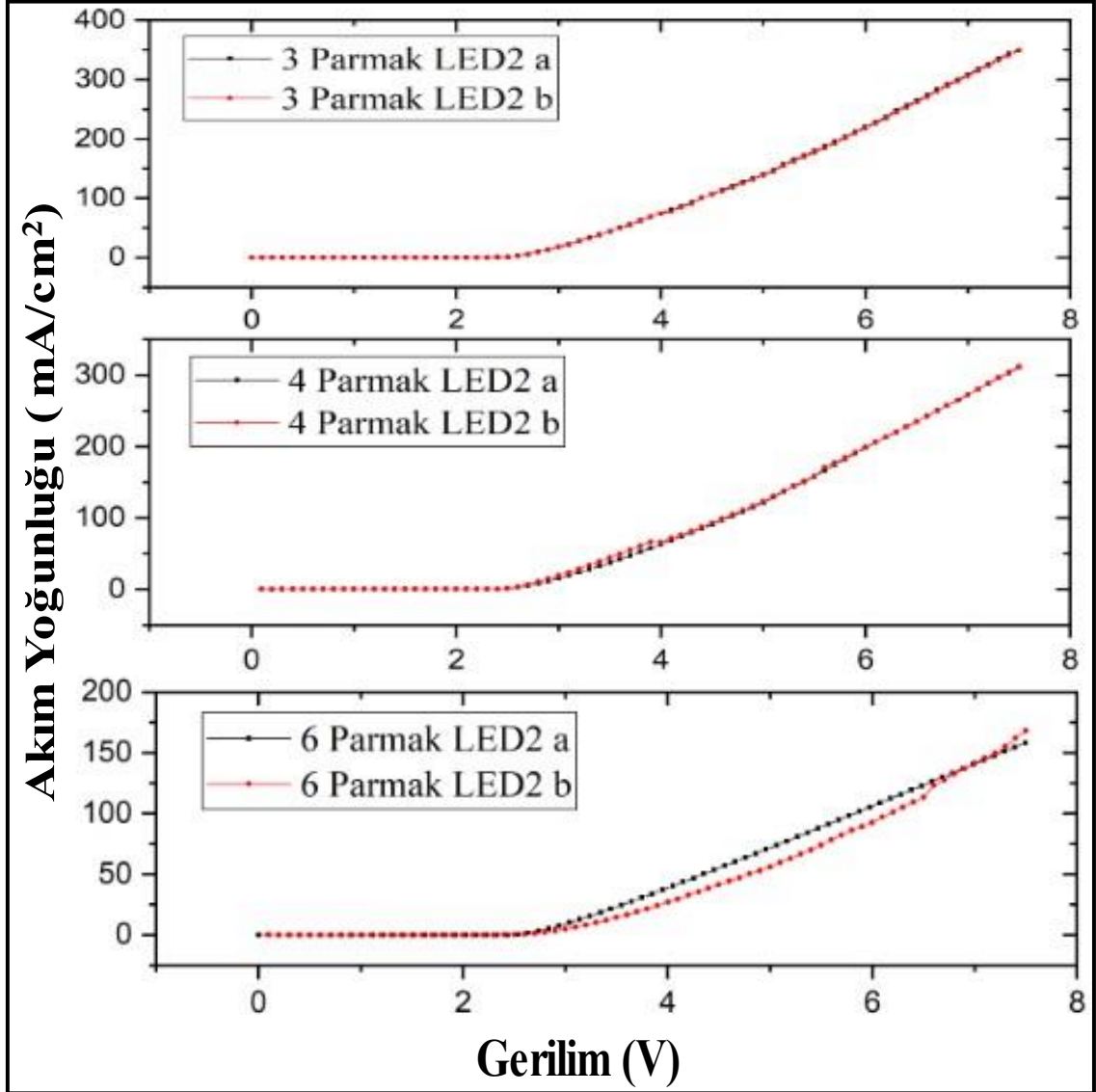
Şekil 4.3.'te ALD ile Al₂O₃ yan duvar pasivasyonu yapılan ve LED1 serisi olarak adlandırılan 3-4 ve 6 parmaklı LED1 serisinden tipik akım gerilim grafik örnekleri verilmiştir. Burada aynı parmak sayısına sahip LED1 a-b serileri arasında fark olmamakla birlikte üretilen çiplerin tipik akım gerilim örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Farklı yan duvar sayısına sahip LED1 serilerinin I-V grafiği

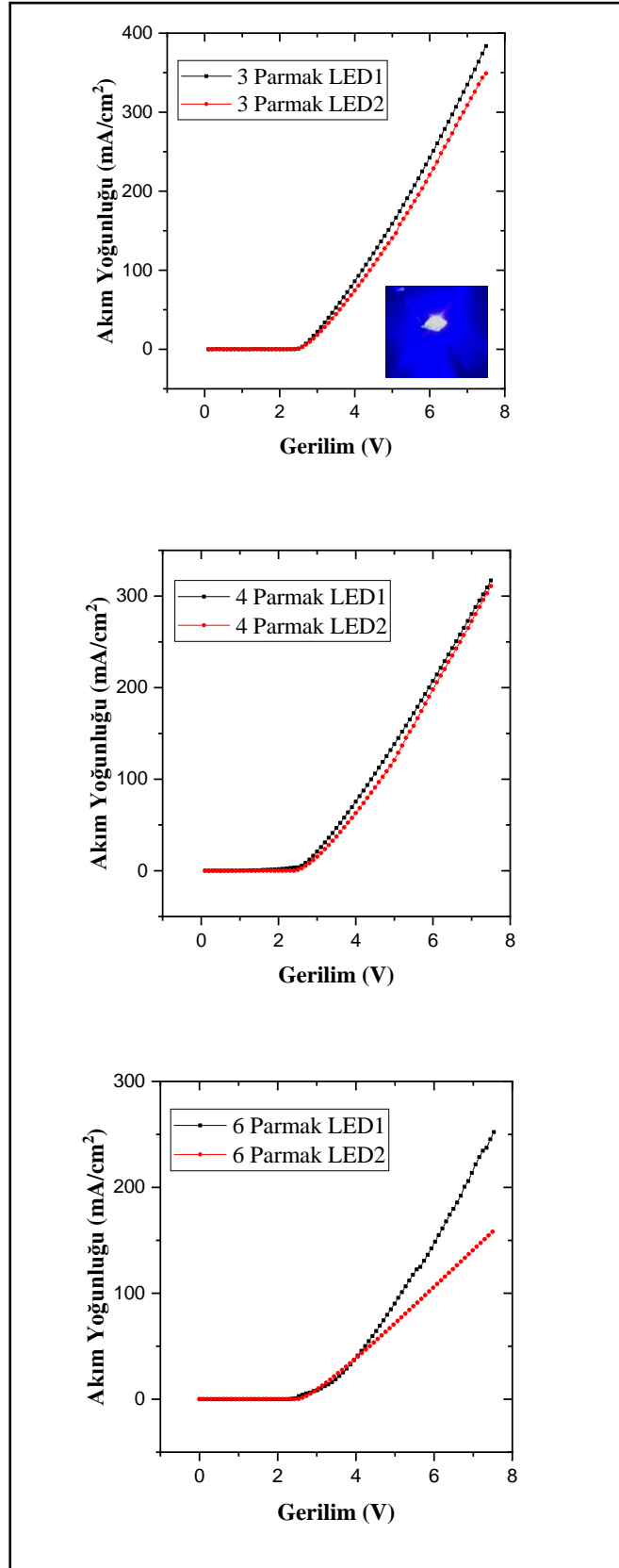
Şekil 4.4.'te ise PECVD ile SiO_2 yan duvar pasivasyonu yapılan ve LED2 serisi olarak adlandırılan 3-4 ve 6 parmaklı LED2 serilerinin tipik akım gerilim grafikler örnekleri verilmiştir. Burada aynı parmak sayısına sahip LED2 a-b serileri arasında fark olmamakla birlikte üretilen çiplerin tipik akım gerilim örnekleri gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında üretilen LED serilerinde 3 parmaklı LED serileri en az yan duvar sayısına, 6 parmaklı LED serileri ise en fazla yan duvar sayısına sahip LED serileridir. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te 3 parmaklı LED1 ve LED2 serilerinin 4 ve 6 parmaklı LED serilerine göre daha iyi akım karakteristiğine sahip olduğu görülmüştür. ALD ile pasivasyonu yapılan LED1 serilerinde olduğu gibi LED2'lerde de yan duvar sayısının artışıyla akım yoğunluğu

azalmıştır. Yan duvar sayısının artması, yan duvarlardaki kusur yoğunluğunun artmasına neden olur ve bu kusurlar kaçak akımın artışına neden olarak LED'lerdeki akım karakteristiğini olumsuz etkilemektedir.



Şekil 4.4. Farklı yan duvar sayısına sahip LED2 serilerinin I-V grafiği

Şekil 4.5.'te 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED2 serilerinin akım - gerilim grafikleri karşılaştırmalı verilmiştir. Tüm serilerde ALD Al₂O₃ ile yan duvar pasivasyonu yapılan LED1 serileri, LED2 serilerine göre daha fazla akım yoğunluğuna sahiptir. Bu durum pasivasyonun ALD ile PECVD'ye göre daha iyi yapıldığı ve yan duvarlardan gelen kaçak akımın azaltılmasıyla LED1 serilerinin akım karakteristiğinin LED2 serilerine göre iyileştirmesi sağlamıştır.

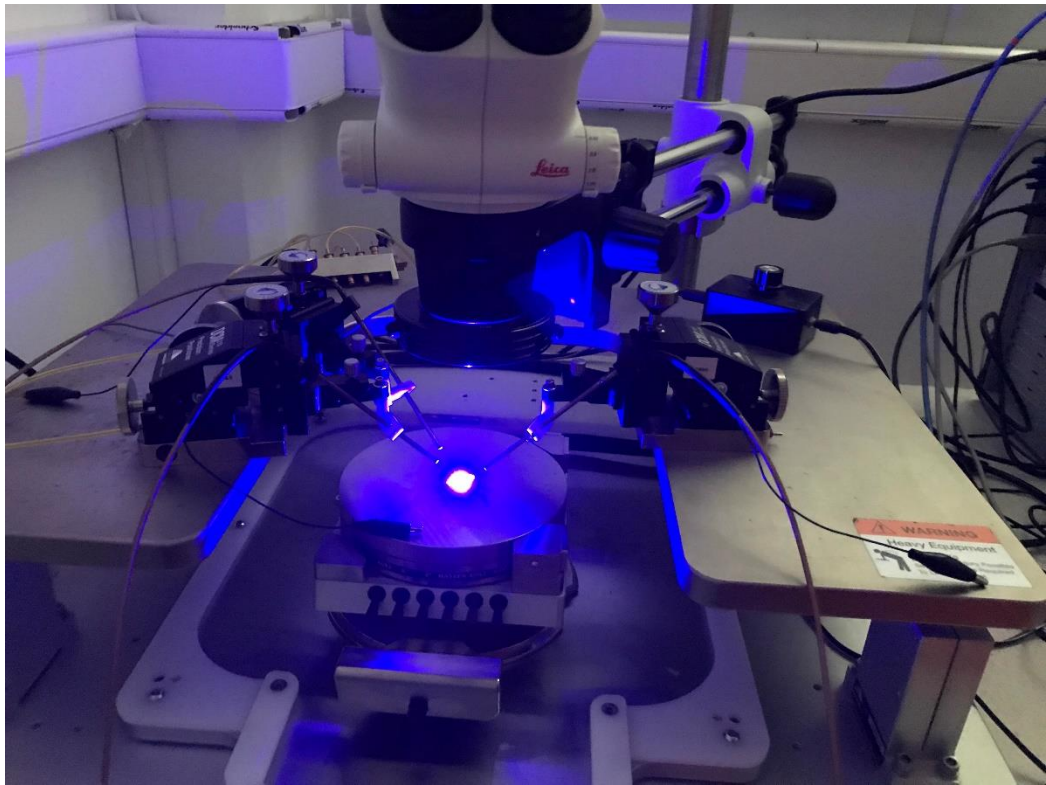


Şekil 4.5. 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED 2 serilerinin I-V grafiği

Şekil 4.5'e göre LED1 ve LED2'de bazı akım yoğunluğu-gerilim bilgileri çizelge 4.1 ile verilmiştir.

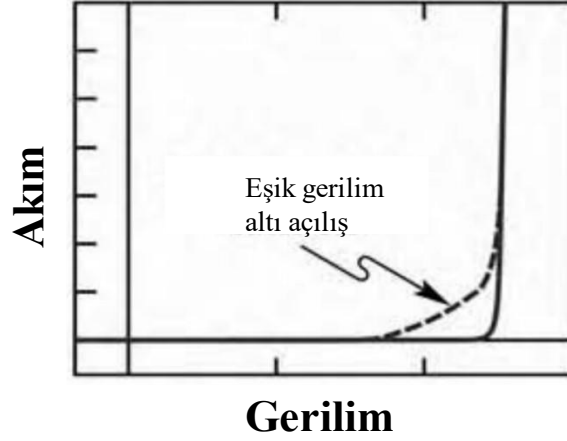
Çizelge 4.1. 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED2 serilerinin bazı I-V verileri

	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)
3 Parmak LED1	335	7
3 Parmak LED2	335	7,3
4 Parmak LED1	295	7,2
4 Parmak LED2	295	7,3
6 Parmak LED1	154	6
6 Parmak LED2	154	7,3



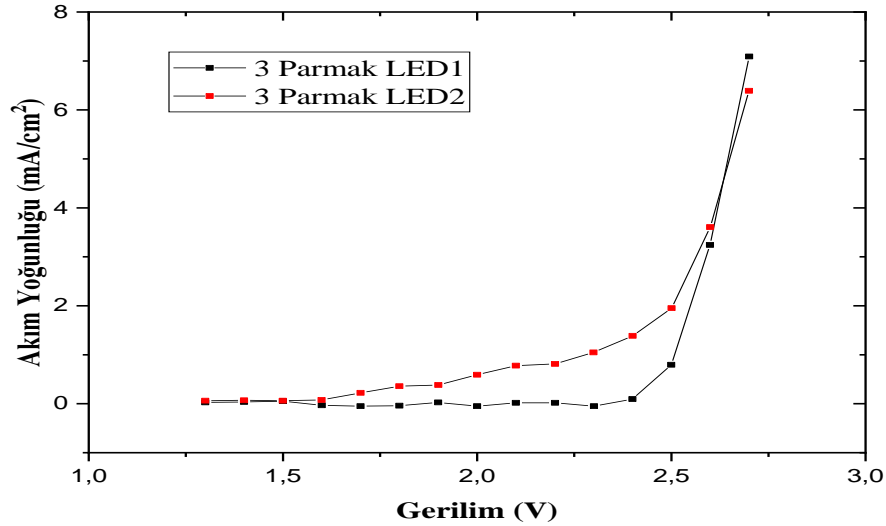
Şekil 4.6. I-V ölçümü yapılan LED

İleri besleme altında eşik akım civarında düşük gerilimlerde görülen fazla akım değerleri kaçak akımla, yüksek gerilim değerleri ise seri direnç ile ilgilidir. Yan duvar kusurlarının, aktif bölgedeki kusurların ve düşük bariyer yüksekliğinin sebep olduğu kaçak akım diyotlarda düşük eşik gerilimine neden olur (Şekil 4.7.) (Li ve ark. 2004) (Schubert 2006).

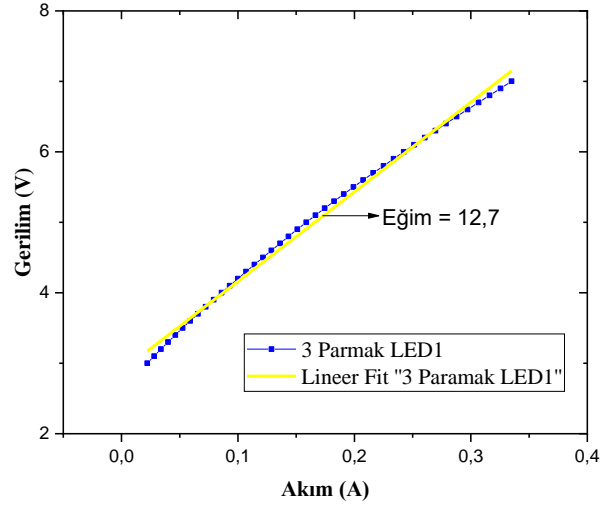


Şekil 4.7. Diyotlarda ani ve eşik gerilim altı açılış gösterimi. Eşik gerilim altı açılışa en fazla etki eden durum, yüzey kusurları boyunca taşıyıcı geçişleridir. (Schubert 2006'dan değiştirilerek alınmıştır.).

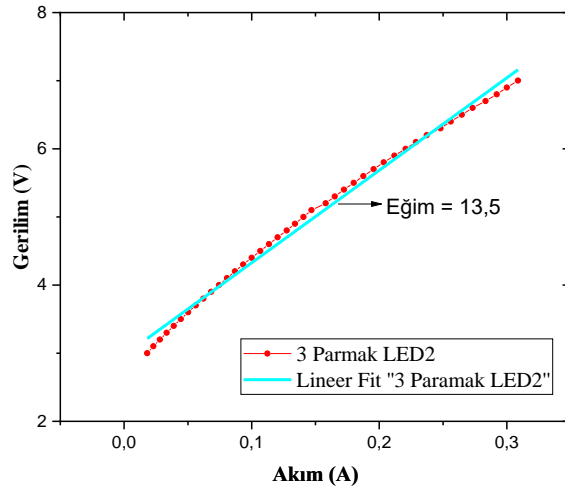
Şekil 4.8.'de görüleceği gibi LED2'in düşük gerilim değerlerinde daha yüksek akım yoğunluğuna sahip olduğu ve LED1'e göre daha yüksek kaçak akıma sahip olduğu, bu nedenle eşik gerilim değerinin (3 Parmak LED2 serisi için yaklaşık 1,7 V) düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 4.8. LED1 ve LED2 serilerinin eşik gerilim civarındaki akım-gerilim grafiği. Burada LED2 serilerinde yan duvardaki kusurların oluşturduğu yüzey durumları boyunca taşıyıcı geçişleri eşik gerilim altı açılışa sebep olmuştur.



a)



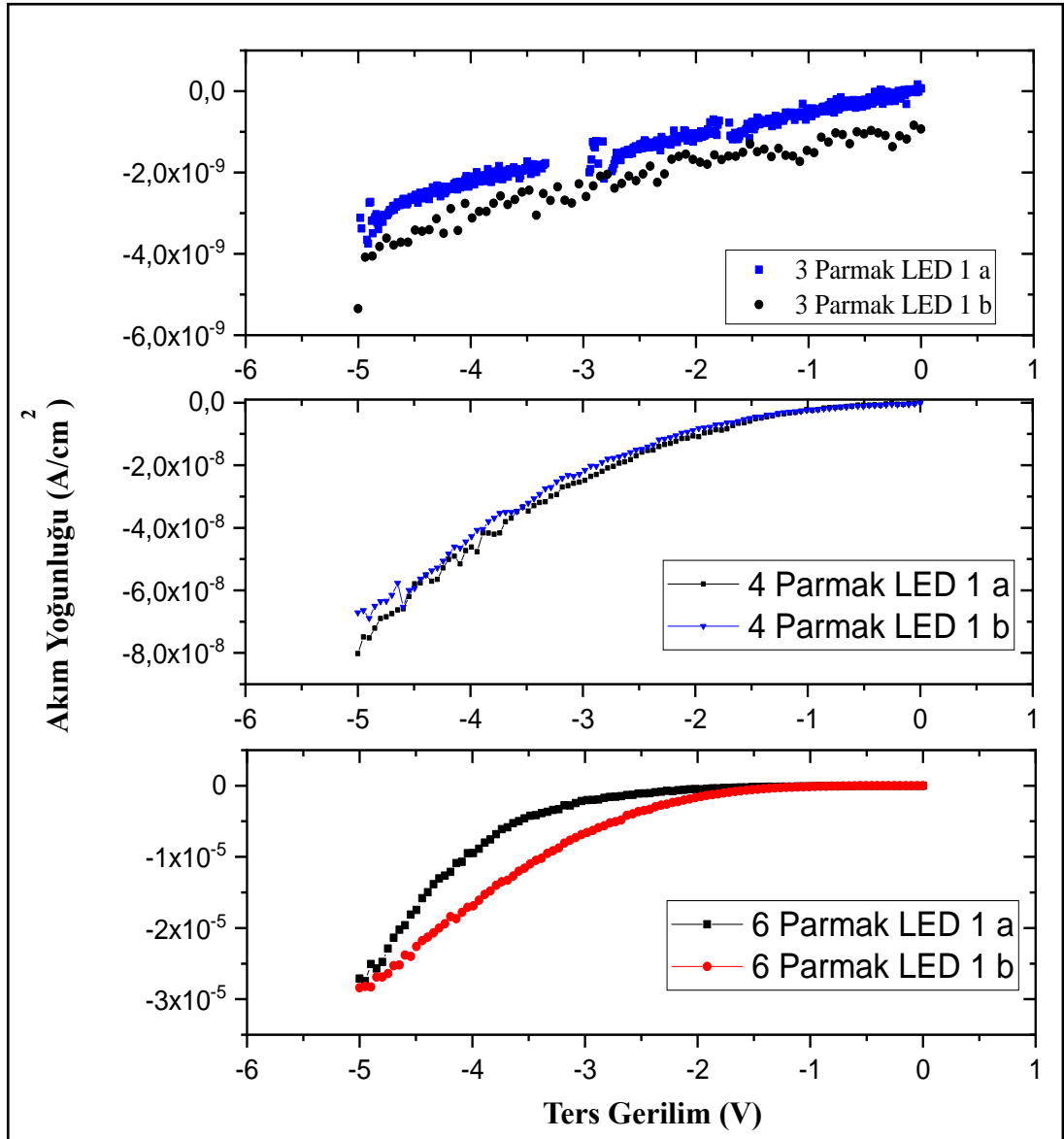
b)

Şekil 4.9. a) LED1 seri direnç b) LED2 seri direnç

Şekil 4.9. 3 parmaklı LED1 serilerinin tipik seri direncinin $12,7 \Omega$ ve 3 parmaklı LED2 serilerinin seri direncinin $13,5 \Omega$ olduğunu gösterir. Seri direnç, yüksek kontak direnci, örgü sabitleri uyumsuz hetero yapılar, düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahip katmanlar ve sıcaklık kaynaklı olabilir (Cao ve ark. 2004). Seri direncin LED2 serilerinde daha yüksek olması ışımsız yeniden birleşmelerin, aygıt sıcaklığını arttırmasıyla açıklanır (Schubert 2006). LED2 serisinin pasivasyon filmi kaplanması sırasında tekrar plazmaya girmiş olması, p – GaN tabakasındaki katkı atomlarının hidrojen atomları tarafından

pasifleştirilmesiyle p – GaN tabaka direncini yükseltmesi sonucu seri direncin yükselmesine sebep bir diğer etken olabilir.

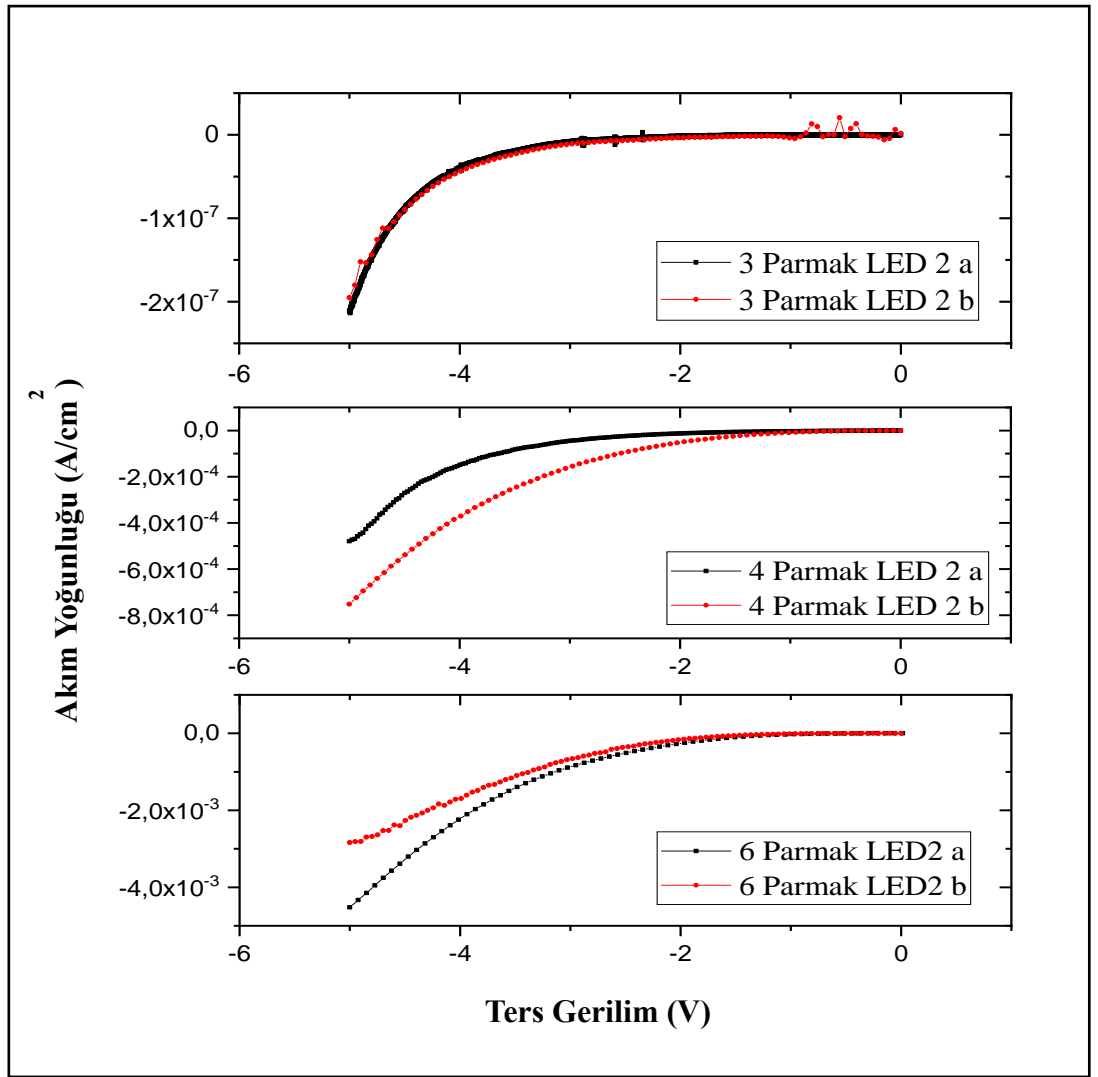
LED1 ve LED2 örneklerinin -5V ile 0V ters gerilim altında akım yoğunlukları ölçülerek pasivasyon katmanlarının kaçak akıma etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.10’da 3-4-6 parmak yapıları LED1’in ters gerilim altında akım yoğunlukları verilmiştir. 3 parmak yapıları LED1’lerde kaçak akımın 10^{-9} A gibi çok düşük seviyede olduğu görülmüştür.



Şekil 4.10. 3-4-6 parmak yapıları LED1 serilerinin tipik ters gerilim – akım yoğunluğu grafiği

Yan duvar sayısının artmasıyla 6 parmaklı LED1 serilerinde akım yoğunluğunda ciddi bir artış gözlenmektedir. Bu artış üretim kaynaklı olabileceği gibi yan duvar sayısının artmasıyla Al_2O_3 pasivasyon filmlerinin yetersiz kaldığını da gösterebilir.

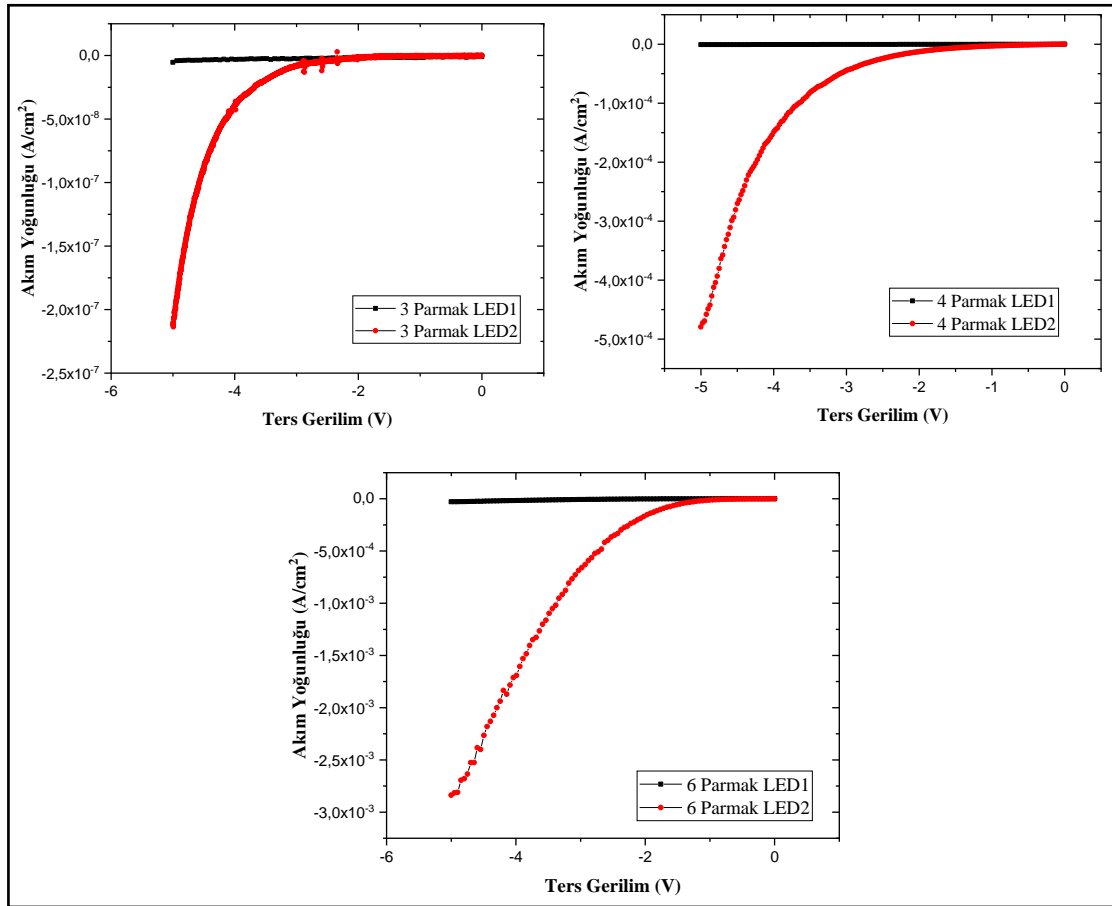
Şekil 4.11.'de LED2 çiplerinin ters gerilim altında akım yoğunluğu grafikleri verilmiştir. LED2 çiplerinde de yan duvar sayısının artışıyla ters gerilim altında akım yoğunluğunda artış gözlemlendi.



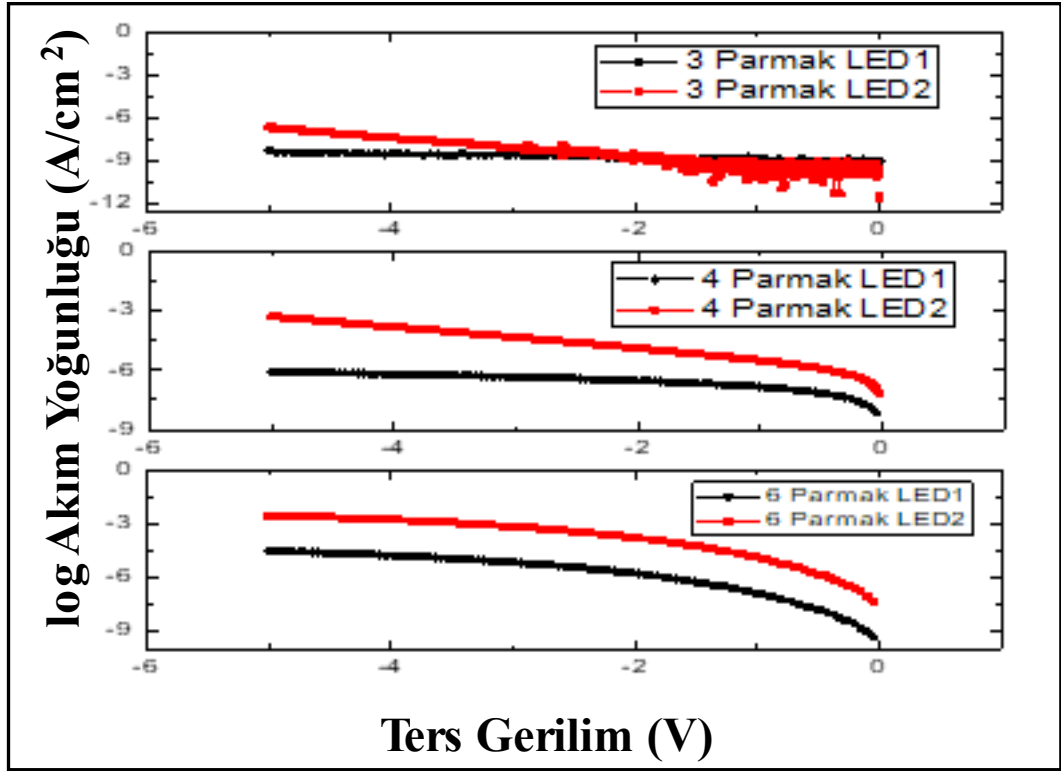
Şekil 4.11. LED2 çiplerinin tipik ters gerilim – akım yoğunluğu grafiği

4 parmaklı LED1'lerde akım yoğunluğu 10^{-8} A seviyesinde olup, yan duvar sayısı fazla olmasına rağmen 3 parmaklı LED2 serilerinden daha düşük akım yoğunluklarına sahiptir. ALD ile yapılan Al_2O_3 yan duvar pasivasyonunun PECVD ile yapılan SiO_2 yan duvar pasivasyonundan daha etkili olduğu görülmüştür.

Şekil 4.12. ve 4.13.'te tüm yapılarda LED1 ve LED2 serilerinin ters gerilim altındaki akım yoğunluğu grafiği ve logaritmik akım yoğunluğu grafikleri gösterilmiştir. Burada da görüleceği gibi ALD ile pasivasyon tüm yapılarda yan duvar hasarlarına PECVD ile yapılan pasivasyona göre çok daha iyi etki ederek kaçak akımı engellemiştir.



Şekil 4.12. LED1 ve LED2 çiplerinin tüm yapılarında ters I-V karşılaştırması

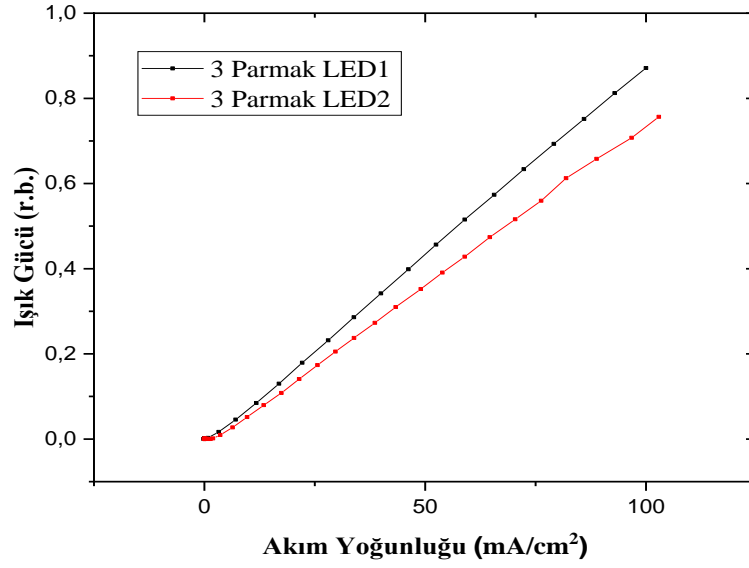


Şekil 4.13. LED1 ve LED2 çiplerinin tüm yapılarında ters logI-V karşılaştırması

4.3. Işık Gücü Ölçümü

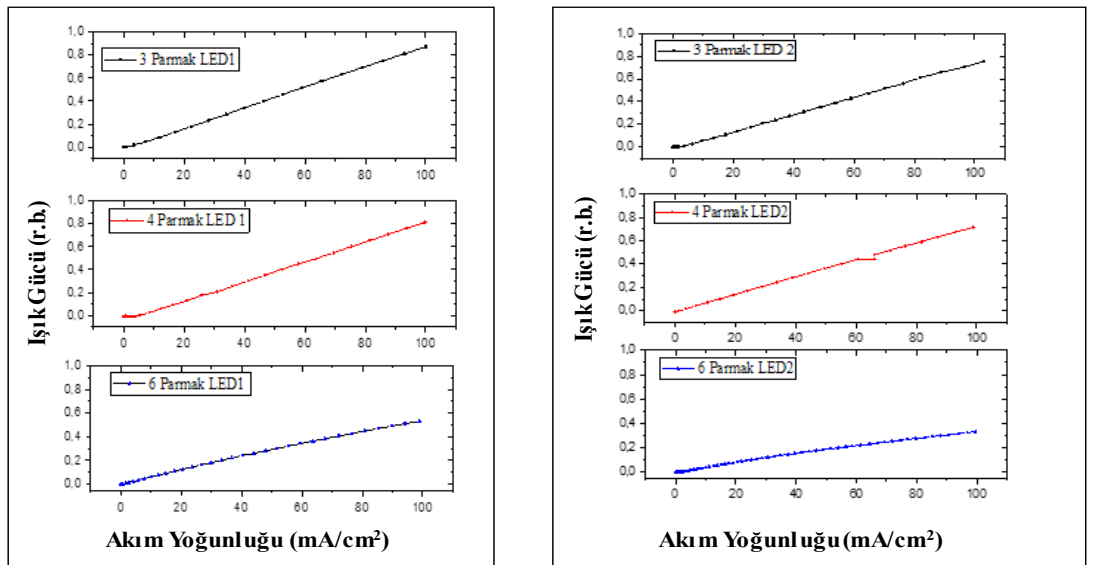
LED1 ve LED2 örneklerinin ışık gücü ölçümleri Newport Power Meter Model 1936-C güç metre ile yapılmıştır. Işık gücü ölçümü, üretilen LED'lerden çıkan ışığın 25 mm çaplı ve 5 cm odak uzunluğuna sahip lens ile toplanarak güç metrenin detektörüne yönlendirilerek yapılmıştır.

Şekil 4.14'te LED1 ve LED2 çiplerinin ışık gücü – akım yoğunluğu grafikleri verilmiştir. LED1 serilerinin ışık gücünün LED2 serilerine göre daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durum yan duvar yüzey kusurlarının ve çoklu kuantum kuyularının yan duvara yakın ışımsız birleşme merkezlerinin ALD ile daha iyi pasive edildiğini ve ışımalı yeniden birleşme ihtimalini artırmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.14. LED1 ve LED2 serilerinin I-P grafiği. LED1 serilerinde kuantum kuyuları yakınındaki yan duvar kusurlarının pasivasyonunun LED2 serilerine göre daha iyi yapılmasıyla LED1 serilerinde hem ışısız yeniden birleşme merkezleri azaltılmış hem de ışısız yeniden birleşme sonucunda oluşabilecek sıcaklık artışı engellenerek LED2 serilerine göre daha yüksek ışık gücü elde edilmiştir.

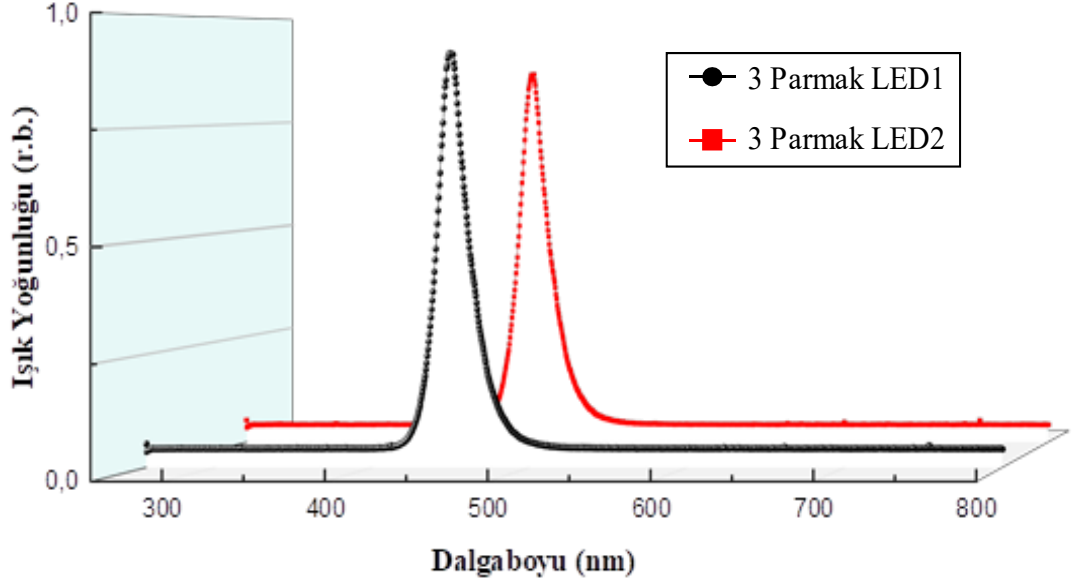
Şekil 4.15.'deki LED1 ve LED2 çiplerinin 3-4-6 parmaklı yapıda ışık gücü – akım yoğunluğu grafiklerine göre yan duvar sayısının artmasıyla artan ışısız yeniden birleşme merkezleri nedeniyle ışık gücünde düşüş gözlenmiştir.



Şekil 4.15. 3-4-6 parmaklı LED1 ve LED2 serilerinin I-P grafiği

4.4 Elektroşıma Ölçümleri

Örneklerin EL ölçümleri Ocean Optcis Maya2000 Pro spektrometre ile yapılmıştır. Şekil 4.16.'da 3 parmak yapılı LED1 ve LED2'nin ışıma spektrumu verilmiştir.



Şekil 4.16. LED1 ve LED2 çiplerinin ışıma spektrumu

Şekil 4.15.'de LED1 örneklerinin ışık yoğunluğunun LED2 örneklerinden fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca LED1 ve LED2 örneklerinin ışıma spektrumlarında tepe dalga boyu değerleri 450 nm'dir ve aynıdır. Pasivasyonun dalga boyu değerine etkisi görülmemiştir. Işık yoğunluğunun yan duvarları LED1'den daha kötü pasive edilen LED2 serilerinde daha düşük olması, LED2 serisinin yan duvarlarında kusur yoğunluğunun fazla olması nedeniyle ışımasız yeniden birleşmelerin fazla olmasıyla açıklanabilir.

5. SONUÇ

Bu tezde farklı yan duvar sayısına sahip LED1 serilerinin ALD ile ve LED2 serilerinin PECVD ile pasivasyonu yapılmıştır. Yan duvar sayısının artışıyla kuru aşındırma sırasında oluşan yüzey kusurları nedeniyle LED performansının olumsuz etkilediği görülmüştür. Atomik tabaka biriktirme yönteminin PECVD ile kaplanan pasivasyon filmlerine göre daha homojen ve daha kaliteli pasivasyon filmler üretmesinden faydalanılarak InGaN/GaN LED'lerde yan duvarlarda oluşan kusurların daha iyi pasive edilmesiyle üretilen LED'lerin elektriksel performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir. ALD ile çok daha kaliteli filmler üretilmesinin yanı sıra diğer kaplama yöntemlerine göre (elektron demet buharlaştırma, saçtırma ile kaplama, termal buharlaştırma, kimyasal buhar biriktirme vd.) zamandan da çok fazla kaybı yoktur. ALD'nin PECVD'ye göre daha homojen ve kaliteli pasivasyon filmler kaplaması, LED'lerde kuru mesa aşındırması sırasında oluşan kusurların daha iyi pasive edilmesiyle LED'lerde ışıklı yeniden birleşme ihtimali artırılarak daha yüksek parlaklık elde edilebileceği anlaşılmıştır.

ALD ile pasivasyonu yapılan LED'lerin PECVD ile pasivasyonu yapılan LED'lere göre geri besleme altında (-5V – 0V) yaklaşık 10^2 kat daha az akım yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. İleri besleme altında PECVD ile pasive edilen LED2 serileri daha düşük eşik gerilimle çalışmaktadır. Bu da kaçak akımın LED1 serilerinde daha az olduğunu göstermiştir. Işık gücü ölçümünde LED1 serilerinin LED2 serilerine göre 100 mA akım yoğunluğunda yaklaşık %10 daha fazla ışık gücüne sahip olduğu görülmüştür. Elektroışıma ölçümlerinde LED'lerden yayılan ışığın tepe dalgaboyuna pasivasyon etkisi görülmemiştir ve tüm örneklerde tepe dalga boyu yaklaşık 450 nm'dir. LED1'lerin aynı akım yoğunluğunda daha yüksek ışık yoğunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışma ve ölçümler sonucunda ALD pasivasyonun yan duvar kusurlarını daha iyi pasive ederek LED'lerin elektriksel ve optik özelliklerinin geliştirebileceğini ve daha uzun ömürlü aygıtlar yapılabileceği gösterilmiştir.

Bundan sonra yan duvar yüzeyindeki kusurları Al_2O_3 malzemesinden başka pasive edebilecek ALD ile kaplanabilen malzemelerin (hafniyum oksit, titanyum dioksit, çinko

oksit vb.) araştırılması yapılabilir. Farklı malzemelerin farklı kalınlıklarda, farklı ALD büyüme sıcaklıklarında kaplamaları yapılarak LED'lerdeki kaçak akıma etkisi araştırılabilir. GaN ile hava arasındaki kırılma indisi farkı nedeniyle, GaN ile hava arasında $\sim 25^\circ$ kritik açı değeri vardır. Kritik açının bu düşük değeri LED'in aktif bölgesinde oluşan ışığın toplam iç yansıma nedeniyle dışarı çıkmasını engellemektedir ve LED'in ışık çıkarma verimini azaltmaktadır. Yan duvarların dışında, tüm p-GaN yüzeyi ALD ile büyütülebilen çeşitli malzemelerle kaplanarak hatta kaplanan malzemenin desenlendirilmesi yapılarak, çeşitli kalınlıklarda ve kırılma indislerinde hem Fresnel kayıp (Fresnel loss) en aza indirilebilir hem de toplam iç yansıma etkisi azaltılarak ışık çıkarma verimi artırılabilir.

KAYNAKLAR

Adivarahan, V., Simin, G., Yang, J.W., Lunev, A., Khan, M.A., Pala, N., Shur, M., Gaska, R., 2000. SiO₂-passivated lateral-geometry GaN transparent Schottky-barrier detectors. *Applied Physics Letters*, 77: 863-865.

Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y. 1986. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. *Applied Physics Letters*, 48(5): 353-355.

Amano, H., Akasaki, I., Hiramatsu, K., Koide, N., Sawaki, N. 1988. Effects of the buffer layer in metalorganic vapour phase epitaxy of GaN on sapphire substrate. *Thin Solid Films*, 163: 415-420.

Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., Akasaki, I., 1989. P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI). *Japanese Journal of Applied Physics*, 28: L2112–L2114.

Anonim, 2014. Press release. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. - <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/press-release/> , (Erişim tarihi : 22.12.2020).

Arthur, J. R. 2002. Molecular beam epitaxy. *Surface science*, 500(1-3): 189-217.

Asahi, H., Horikoshi, Y. 2019. Molecular Beam Epitaxy: Materials and Applications for Electronics and Optoelectronics. John Wiley & Sons, USA, pp512.

Batey, J., Tierney, E. (1986). Low-temperature deposition of high-quality silicon dioxide by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, 60(9): 3136-3145.

Browne, D.A., Mazumder, B., Wu, Y.-R., Speck, J.S., 2015. Electron transport in unipolar InGaN/GaN multiple quantum well structures grown by NH₃ molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 117(18): 185703

Bhuiyan, A. G., Hashimoto, A., & Yamamoto, A. 2003. Indium nitride (InN): A review on growth, characterization, and properties. *Journal of applied physics*, 94(5): 2779-2808.

Cao, X. A., Sandvik, P. M., LeBoeuf, S. F., Arthur, S. D. 2003. Defect generation in InGaN/GaN light-emitting diodes under forward and reverse electrical stresses. *Microelectronics Reliability*, 43(12): 1987-1991.

Cao, X. A., Teetsov, J. A., Shahedipour-Sandvik, F., Arthur, S. D. 2004. Microstructural origin of leakage current in GaN/InGaN light-emitting diodes. *Journal of crystal growth*, 264(1-3): 172-177.

Chang, K. M., Lang, C. C., Cheng, C. C. 2001. The Silicon Nitride Film Formed by ECR-CVD for GaN-Based LED Passivation. *physica status solidi (a)*, 188(1): 175-178.

Cho, H., Lee, J., Song, J., Yu, P., Yang, G., & Kim, C. 2002. Influence of strain induced indium clustering on characteristics of InGaN/GaN multiple quantum wells with high indium composition. *Journal of Applied Physics*, 1104-1107.

Cho, J., Park, J. H., Kim, J. K., & Schubert, E. F. (2017). White light-emitting diodes: History, progress, and future. *Laser & photonics reviews*, 11(2), 1600147.

Chung, B. C., Gershenson, M. 1992. The influence of oxygen on the electrical and optical properties of GaN crystals grown by metalorganic vapor phase epitaxy. *Journal of applied Physics*, 651-659.

Colinge, J. P., Colinge, C. A. 2005. *Physics of semiconductor devices*. Springer Science & Business Media.

David, A., Grundmann, M. J. 2010. Droop in InGaN light-emitting diodes: A differential carrier lifetime analysis. *Applied Physics Letters*, 96-99.

Davis, R. 1991. III-V nitrides for electronic and optoelectronic applications. *Proceedings of the IEEE*, 702-712.

Der Maur, M. A., Pecchia, A., Penazzi, G., Rodrigues, W., Di Carlo, A. 2016. Efficiency drop in green InGaN/GaN light emitting diodes: The role of random alloy fluctuations. *Physical review letters*, 116(2): 027401.

Destriau, G. 1936. Recherches sur les scintillations des sulfures de zinc aux rayons α . *Journal de Chimie Physique*, 587-625.

Egawa, T., Jimbo, T., Umeno, M. 1997. Characteristics of InGaN/AlGaN light-emitting diodes on sapphire substrates. *Journal of Applied Physics*, 5816-5821.

Forgenano, 2020. <https://www.forgenano.com/atomic-layer-deposition/> (Erişim tarihi : 22.12.2020)

Gardner, N. F., Mller, G. O., Shen, Y. C., Chen, G., Watanabe, S., Gtz, W., Krames, M. R. 2007. Blue-emitting InGaN–GaN double-heterostructure light-emitting diodes reaching maximum quantum efficiency above 200 A/cm². *Applied Physics Letters*, 91(24): 243506.

Guo, J. D., Lin, C. I., Feng, M. S., Pan, F. M., Chi, G. C., Lee, C. T. 1996. A bilayer Ti/Ag ohmic contact for highly doped n-type GaN films. *Applied physics letters*, 235-237.

Hall, R. N. 1952. Electron-Hole Recombination in Germanium. *Physical Review*, 387-387.

Hamedani, Y., Macha, P., Bunning, T., Naik, R., Vasudev, M. 2016. Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition: Where we are and the Outlook for the Future. S. Neralla içinde, Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices (s. 248-280). Intech.

Han, S. H., Lee, D. Y., Lee, S. J., Cho, C. Y., Kwon, M. K., Lee, S. P., Noh, D. Y., Kim, D., Kim, Y. J., Park, S. J. 2009. Effect of electron blocking layer on efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 94(23): 231123.

Hassan, A., Savaria, Y., & Sawan, M. 2018. GaN Integration Technology, an Ideal Candidate for High-Temperature Applications: A Review. *IEEE Access*, 6: 78790-78802.

Heikkilä, O., Oksanen, J., Tulkki, J. (2010). The challenge of unity wall plug efficiency: The effects of internal heating on the efficiency of light emitting diodes. *Journal of Applied Physics* , 107-112.

Henini, M., Razeghi, M. (2004). Optoelectronic Devices: III Nitrides. Elsevier.

Henini, M. 2012. Molecular beam epitaxy: from research to mass production. Newnes.

Hirsch, L., Barrière, A. 2003. Electrical characterization of InGaN/GaN light emitting diodes grown by molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 5014-5020.

Holonyak, N. J., Bevacqua, S. F. 1962. Coherent (Visible) Light Emission From Ga(As_{1-x}P_x) Junctions. *Applied Physics Letters*, 82-83.

Huang, J. J., Kuo, H. C., Shen, S.-C. 2014. Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs) . Woodhead Publishing.

Ji, P., Liu, N., Wei, T., Liu, Z., Lu, H., Wang, J., Li, J. 2011. Improvement of the efficiency droop of gan-leds using an algan/gan superlattice insertion layer. *Journal of Semiconductors*, 1-4.

Jogai, B. 1998. Effect of hydrostatic strain on the band gap of wurtzite GaN. *Solid state communications*, 105(7): 465-468.

Johnson, R. W., Hultqvist, A., Bent, S. F. 2014. A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications. *Materials today*, 17(5): 236-246.

Kääriäinen, T., Cameron, D., Kääriäinen, M.-L., Sherman, A. 2013. Atomic Layer Deposition - Principles, Characteristics, and Nanotechnology Applications . Scrivener Publishing LLC.

Kim, H. M., Huh, C., Park, S. J. 2002. Reduction in leakage current of InGaN-based light-emitting diodes by N₂O plasma passivation. In *Solid State Lighting II* (s. 247-254). International Society for Optics and Photonics.

King, S. W., Barnak, J. P., Bremser, M. D., Tracy, K. M., Davis, C. R., & Nemanich, R. J. 1998. Cleaning of AlN and GaN surfaces. *Journal of Applied Physics*, 84(9): 5248-5260.

Krijn, M. P. C. M. (1991). Heterojunction band offsets and effective masses in III-V quaternary alloys. *Semiconductor Science and Technology*, 6(1): 27-31.

Kuokstis, E., Zhang, J., Fareed, Q., Yang, J.W., Simin, G., Khan, M.A., Gaska, R., Shur, M., Rojo, C., Schowalter, L., 2002. Near-band-edge photoluminescence of wurtzite-type AlN. *Applied Physics Letters* 81; 2755–2757.

Lacklison, D. E., Orton, J. W., Harrison, I., Cheng, T. S., Jenkins, L. C., Foxon, C. T., Hooper, S. E. 1995. Band gap of GaN films grown by molecular-beam epitaxy on GaAs and GaP substrates. *Journal of applied physics*, 78(3): 1838-1842.

Leung, K. K. 2010. Fabrication and characterization of GaN-based light emitting diodes. Doktora Tezi, PolyU, Department of Electronic and Information Engineering, Hong Kong.

Li, D. S., Chen, H., Yu, H. B., Jia, H. Q., Huang, Q., Zhou, J. M. 2004. Dependence of leakage current on dislocations in GaN-based light-emitting diodes. *Journal of applied physics*, 96(2): 1111-1114.

Li, G., Wang, W., Yang, W., Lin, Y., Wang, H., Lin, Z., Zhou, S. 2016. GaN-based light-emitting diodes on various substrates: a critical review. *Reports on Progress in Physics*, 79(5), 056501.

Li, K. H. 2015. Nanostructuring for Nitride Light-Emitting Diodes and Optical Cavities. Springer.

Li, J., Nam, K.B., Nakarmi, M.L., Lin, J.Y., Jiang, H.X., 2002. Band-edge photoluminescence of AlN epilayers. *Applied Physics Letters* 81, 3365–3367.

Li, J., Wang, J., Yi, X., Liu, Z., Wei, T., Yan, J., Xue, B. 2020. III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications.

Liu, H. Y., Hsu, W. C., Chou, B. Y., Wang, Y. H., Sun, W. C., Wei, S. Y., Yu, S. M. 2014. Al₂O₃ passivation layer for InGaN/GaN LED deposited by ultrasonic spray pyrolysis. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1243-1246.

Liu, J.-m. 2005. Photonic Devices, University of California, USA,

Maruska, H. P. 1973. GALLIUM NITRIDE LIGHT-EMITTING DIODES, Stanford University, USA

- Maruska, H. P., Tietjen, J. J. 1969.** The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN. *Applied Physics Letters*, 327-329.
- Miller, D. A., Chemla, D. S., Damen, T. C., Gossard, A. C., Wiegmann, W., Wood, T. H., Burrus, C. A. 1984.** Band-edge electroabsorption in quantum well structures: The quantum-confined Stark effect. *Physical Review Letters*, 2173-2176.
- Mo, C., Fang, W., Pu, Y., Liu, H., & Jiang, F. 2005.** Growth and characterization of InGaN blue LED structure on Si (1 1 1) by MOCVD. *Journal of crystal growth*, 285(3): 312-317.
- Monemar, B., Paskov, P. P., Kasic, A. 2005.** Optical properties of InN—the bandgap question. *Superlattices and Microstructures*, 38(1): 38-56.
- Muthu, S., Gaines, J. 2003.** Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design. In *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.* (Vol. 1, pp. 515-522). IEEE.
- Nagatomo, T., Kuboyama, T., Minamino, H., Omoto, O. 1989.** Properties of Ga_{1-x}In_xN films prepared by MOVPE. *Japanese journal of applied physics*, 28(8A): L1334.
- Nakamura, S., Mukai, T. 1992.** High-quality InGaN films grown on GaN films. *Japanese journal of applied physics*, 31(10B): L1457.
- Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M., Iwasa, N. 1992.** Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films. *Japanese Journal of Applied Physics*, 31(2B): L139.
- Nakamura, S. 1996.** High-brightness blue/green LEDs and first III-V nitride-based laser diodes, In *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices IV*, 43-56.

Nakamura, S. 1998. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes. *Science*, 281(5379): 956-961.

Nakamura, S., Chichibu, S. F. 2000. Introduction to nitride semiconductor blue lasers and light emitting diodes, CRC Press.

Nakamura, S., Senoh, M., Mukai, T. 1993. P-GaN/n-InGaN/n-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 32.

Nam, K.B., Li, J., Nakarmi, M.L., Lin, J.Y., Jiang, H.X., 2002. Achieving highly conductive AlGa_N alloys with high Al contents. *Applied Physics Letters* 81: 1038–1040

Nanishi, Y., Saito, Y., Yamaguchi, T. 2003. RF-molecular beam epitaxy growth and properties of InN and related alloys. *Japanese journal of applied physics*, 42(5R): 2549.

Narukawa, Y., Ichikawa, M., Sanga, D., Sano, M., & Mukai, T. 2010. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of physics D: Applied physics*, 43(35): 354002 (6pp).

Neamen, D. A. 2012. *Semiconductor physics and devices: basic principles*. New York, NY: McGraw-Hill,.

Pereyra, I., Alayo, M. 1997. High quality low temperature DPECVD silicon dioxide. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 212(2-3): 225-231.

Reboredo, F. A., Pantelides, S. T. 1999. Novel defect complexes and their role in the p-type doping of GaN, *Physical review letters*, 82(9): 1887-1890.

Ritala, M., Leskelä, M. 2002. Atomic layer deposition. H. S. Nalwa içinde, *Handbook of Thin Films*, Academic Press pp. 103-104

Rosencher, E., Vinter, B. 2002. *Optoelectronics*. Cambridge University Press.

Sang, L., Liao, M., Sumiya, M., 2013. A Comprehensive Review of Semiconductor Ultraviolet Photodetectors: From Thin Film to One-Dimensional Nanostructures. *Sensors* 13: 10482–10518.

Sarmazdeh, M. M., Mendi, R. T., Zelati, A., Boochani, A., Nofeli, F. 2016. First-principles study of optical properties of InN nanosheet. *International Journal of Modern Physics B*, 30(19), 1650117.

Schubert, E. F. 2006. Light Emitting Diodes, Cambridge University Press

Schulz, S., Schumacher, S., Czycholl, G. 2008. Spin-orbit coupling and crystal-field splitting in the electronic and optical properties of nitride quantum dots with a wurtzite crystal structure. *The European Physical Journal B*, 64(1): 51-60.

Shen, Y. C., Mueller, G. O., Watanabe, S., Gardner, N. F., Munkholm, A., Krames, M. R. 2007. Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence. *Applied Physics Letters*, 91(14): 141101.

Sheu, J.K., Chang, S.J., Kuo, C.H., Su, Y.K., Wu, L.W., Lin, Y.C., Lai, W.C., Tsai, J.M., Chi, G.C., Wu, R.K. 2003. White-light emission from near UV InGaN-GaN LED chip precoated with blue/green/red phosphors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(1): 18-20.

Shockley, W., W. T. Read, J. 1952. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. *Physical Review*, 835-842.

Shul, R.J., McClellan, G.B., Casalnuovo, S.A., Rieger, D.J., Pearton, S.J., Constantine, C., Barratt, C., Karlicek, R.F., Tran, C., Schurman, M. 1996. Inductively coupled plasma etching of GaN, *Applied Physics Letters*, 1119-1121.

Sze, S. M., Ng, K. K. 2006. *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons.

Tadatomo, K., Okagawa, H., Ohuchi, Y., Tsunekawa, T., Imada, Y., Kato, M., Taguchi, T. 2001. High output power InGaN ultraviolet light-emitting diodes fabricated on patterned substrates using metalorganic vapor phase epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40(6B), L583.

Takeguchi, M., McCartney, M. R., Smith, D. J. 2004. Mapping In concentration, strain, and internal electric field in InGaN/GaN quantum well structure. *Applied physics letters*, 84(12), 2103-2105.

Tu, R. C., Tun, C. J., Pan, S. M., Chuo, C. C., Sheu, J. K., Tsai, C. E., Wang, T-E., Chi, G. C. 2003. Improvement of near-ultraviolet InGaN-GaN light-emitting diodes with an AlGaN electron-blocking layer grown at low temperature. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(10), 1342-1344.

Vurgaftman, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan, L.R., 2001. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics* 89: 5815–5875.

Wang, C. H., Ke, C. C., Lee, C. Y., Chang, S. P., Chang, W. T., Li, J. C., Li Z. Y., Yang, H. C., J. C., Kuo, H. C., Lu, T. C., Wang, S. C. 2010. Hole injection and efficiency droop improvement in InGaN/GaN light-emitting diodes by band-engineered electron blocking layer. *Applied Physics Letters*, 97(26), 261103.

Wang, L. 2015. Gallium Nitride-based Electronic and Optoelectronic devices. Doktora Tezi, PennState, Engineering Science and Mechanics, USA.

Wang, M. 2016. Layout Optimisation of (In)GaN LEDs for High Brightness Applications, Ms Theses, Electrical and Computer Engineering, University of Toronto.

Wang, X. 2018. *Characterization of InGaN Thin Films and Nanowires by Analytical Transmission Electron Microscopy.* PhD thesis, University of Sheffield.

Wang, X., Yoshikawa, A. 2004. Molecular beam epitaxy growth of GaN, AlN and InN. *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 48: 42-103.

Welker, H. 1952. On new semiconducting compounds. *Zeitschrift fur Naturforschung*, 7: 744-749.

Wong, M. S., Hwang, D., Alhassan, A. I., Lee, C., Ley, R., Nakamura, S., DenBaars, S. P. 2018. High efficiency of III-nitride micro-light-emitting diodes by sidewall passivation using atomic layer deposition. *Optics express*, 21324-21331.

Wu, J., Walukiewicz, W., Yu, K.M., Ager, J.W., Haller, E.E., Lu, H., Schaff, W.J., Saito, Y., Nanishi, Y., 2002. Unusual properties of the fundamental band gap of InN. *Applied Physics Letters*, 80(21): 3967-3969.

Wuu, D. S., Wu, H. W., Chen, S. T., Tsai, T. Y., Zheng, X., Horng, R. H. (2009). Defect reduction of laterally regrown GaN on GaN/patterned sapphire substrates. *Journal of Crystal Growth*, 311(10): 3063-3066.

Xia, C. S., Li, Z. M., Sheng, Y. 2013. On the importance of AlGaIn electron blocking layer design for GaN-based light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 233505-(1-5).

Yamamoto, T., Akira, T., Usami, S., Mitsunari, T., Nagamatsu, K., Nitta, S., Honda, Y., Amano, H. 2016. Evaluation of excess In during metal organic vapor-phase epitaxy growth of InGaIn by monitoring via in situ laser scattering. *Japanese Journal of Applied Physics*, 05FD03-1-4.

Yan Zhang, Y., An Yin, Y. 2011. Performance enhancement of blue light-emitting diodes with a special designed AlGaIn/GaN superlattice electron-blocking layer. *Applied physics letters*, 99(22), 221103.

Yang, C.-M., Kim, D.-S., Lee, S.-G., Lee, J.-H., Lee, Y., & Lee, J.-H. 2012. Improvement in Electrical and Optical Performances of GaN-Based LED With SiO₂/Al₂O₃ Double Dielectric Stack Layer. *IEEE Electron Device Letters*, 564–566.

Yang, E. S. 1978. Fundamentals of semiconductor devices. McGraw-Hill Companies.

Yang, F. (2014). Modern metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) reactors and growing nitride-based materials. J. Huang, H.-C. Kuo, S.-C. Shen, Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs) (s. 27-65). Woodhead Publishing.

Yoshida, S. (1983). Improvements on the electrical and luminescent properties of reactive molecular beam epitaxially grown GaN films by using AlN-coated sapphire substrates. *Applied Physics Letters*, 427-429.

Zakheim, D. A., Pavluchenko, A. S., Bauman, D. A., Bulashevich, K. A., Khokhlev, O. V., Karpov, S. Y. 2012. Efficiency droop suppression in InGaN-based blue LEDs: Experiment and numerical modelling. *Physica Status Solidi (a)*, 209(3): 456-460.

Zhao, Y., Yan, Q., Huang, C.-Y., Huang, S.-C., Shan Hsu, P., Tanaka, S., Pan, C.-C., Yoshinobu K., Fujito, K., Van de Walle, C. G., Speck, J. S., DenBaars, S. P., Nakamura, S., Feezell, D. 2012. Indium incorporation and emission properties of nonpolar and semipolar InGaN quantum wells. *Applied Physics Letters*, 201108-(1-4).

Zhou, S., Yuan, S., Liu, Y., Guo, L. J., Liu, S., Ding, H. 2015. Highly efficient and reliable high power LEDs with patterned sapphire substrate and strip-shaped distributed current blocking layer. *Applied Surface Science*, 355: 1013-101

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hasan Mert Bayramlı
Doğum Yeri ve Tarihi : 14/08/1991 Bakırköy
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Yahya Kemal Beyatlı Lisesi 2009
Lisans : Ankara Üniversitesi Fizik 2017
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Optik ve Fotonik Müh. 2021

İletişim (e-posta) : hasanmertbayramli@gmail.com