BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GaN/InGaN TABANLI LED ÇİP FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet S. GENÇ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2018

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GaN/InGaN TABANLI LED ÇİP FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet S. GENÇ
(152080307)

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Deniz UZUNSOY
Eş Danışman: Prof. Dr. Atilla AYDINLI

AĞUSTOS 2018

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 152080307 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Muhammet S. GENÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GaN/InGaN TABANLI LED ÇİP FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Deniz UZUNSOY** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Bilgen OSMAN** Uludağ Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Nazlı AKÇAMLI Bursa Teknik Üniversitesi	.....

Savunma Tarihi : 17 Ağustos 2018

FBE Müdürü :	**Doç. Dr. Murat ERTAŞ** Bursa Teknik Üniversitesi	..... **……/……./…….**

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Muhammet S. GENÇ

İmzası :

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin oluşmasında desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanlarım Prof. Dr. Deniz Uzunsoy ve Prof. Dr. Atilla Aydınlı'ya, aygıt fabrikasyonu konusunda deneyimlerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen Dr. Volodymyr Sheremet ve Dr. Fatih Bilge Atar'a, moral ve motivasyon olarak hep yanımda hissettiğim saygıdeğer arkadaşlarım Seval Sarıtaş, Sinan Gündoğdu, Seval Şahin, Dr. Abdulah Demir, Seçkin Akıncı, Seda Arpacı, Berk Berkan Turgut, Eray Arslan, Burak Ünal ve Murat Sözen'e, epitaksiyel yapılarının üretilmesi ve karakterizasyonu kapsamında bilgilerini benimle paylaşmaktan sakınmayan Prof. Dr. Sezai Elagöz'e, verdikleri desteklerden dolayı Ermaksan Optoelektronik Ar-Ge Merkezi Yöneticisi Nizam Muzafferoğlu'na, desteklerini bir an olsun esirgemeyen anneme, babama ve biricik ablama, en içten teşekkürü bir borç bilirim.
Bu tez TÜBİTAK (113G042) 1007 KAMAG projesi kapsamında desteklenmiş, fabrikasyon aşamaları Bilkent Üniversitesi İleri Araştırmalar Laboratuvarı (İAL), Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM) ve Ermaksan Optoelektronik Ar-Ge Merkezi laboratuvarları kullanılarak yapılmıştır.

Temmuz 2018 Muhammet S. Genç

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **iix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **x**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiii**
1. GİRİŞ **1**
2. TEORİK KISIM **3**
2.1 Mavi Işık Yayan LED'lerin Tarihçesi 3
2.2 Literatür Araştırması 6
2.2.1 Galyum Nitrür'ün (GaN) kristal yapısı 6
2.2.2 III-nitrür yarıiletkenlerin enerji bant aralığı 7
2.2.3 Mavi ışık yayan LED'lerin p-GaN/p-InGaN metalizasyonu 8
2.2.4 LED çiplerinin boyutunun etkisi 8
2.2.5 Mavi ışık yayan LED'lerin n-kontak metalizasyonu 8
2.2.6 Dış kuvantum (EQE) ve elektro optik dönüşüm verimi (WPE) hesalama 9
2.2.7 Literatürde LED çip fabrikasyonu 9
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **12**
3.1 Çip Fabrikasyonunda Kullanılan Cihazlar 12
3.1.1 Maske hizalama ve spin kaplama cihazları 12
3.1.2 Elektron demeti ve püskürtme yöntemi ile metal kaplama 13
3.1.3 PECVD cihazı 14
3.2 Ters LED Çip (Flip Chip) Fabrikasyonu 14
3.3 Ters Olmayan LED Çip Fabrikasyonu 15
3.4 LED Çiplerin Paketlenmesi 16
3.5 Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyon 18
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA **21**
4.1 Akım-Voltaj Grafiği 21
4.2 Akım-Toplam Güç Grafiği 22
4.3 Akım Yoğunluğu-Dış Kuantum Verimi Grafiği 23
4.4 Akım Yoğunluğu-Elektro Optik Dönüşüm Grafiği 24
4.5 p-GaN ve p-InGaN Katmanlarının Analizi 24
4.6 Spesifik Kontak Direnç Analizi 25
4.6 Termal Kamera ile LED Çip'lerin Isıl Analizi 27
4.7 Yaşlandırma (Ömür) testi 28
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **30**
KAYNAKLAR **31**
EKLER **35**

ÖZGEÇMİŞ..... 37

KISALTMALAR

Ag : Gümüş
Al : Alüminyum
AlInGaN : Alüminyum İndiyum Galyum Nitrür
Au : Altın
BCl_3 : Bor Triklorür
BOE : Buffer Oxide Etch (Tampon Oksit Aşındırma)
c : Işık Hızı
Cl_2 : Klorür
Cr : Krom
CW : Sürekli Dalga
e : Elektron Yükü
EQE : Dış Kuvantum Verimi
GaN : Galyum Nitrür
h : Planck Sabiti
I : Akım
ICP : İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma
InGaN : İndiyum Galyum Nitrür
ITO : İndiyum Kalay Oksit
LED : Işık Saçan Diyot
LED-A : Ters Olmayan LED Çip
LED-B : Ters LED Çip
Mbps : Saniyede 1 megabit transfer hızı
MOCVD : Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
N_2 : Azot
n-GaN : N tipi malzeme ile katkılanmış Galyum Nitrür
Ni : Nikel
O_2 : Oksijen
P : Optik Güç
PECVD : Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
p-GaN : P tipi malzeme ile katkılanmış Galyum Nitrür
RTA : Hızlı Isıl Tavlama
SiO_2 : Silisyum Di Oksit
Ti : Titanyum
TiB_2 : Titanyum Di Borür
TLM : İletim Hattı Matrisi
v : Foton Enerjisi
V : Voltaj
WPE : Elektro Optik Dönüşüm Verimi
λ : Dalgaboyu

SEMBOLLER

%	**:** Yüzdelik Dilim
A/cm^2	**:** Amper/Santimetrekare
j	**:** Joule
mA	**:** Miliamper
mW	**:** Miliwatt
nm	**:** Nanometre
°C	**:** Santigrat
Ω.cm^2	**:** Ohm.Santimetrekare
V	**:** Voltaj
µm	**:** Mikrometre

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Ters ve ters olmayan LED çip'lerin kontak dirençleri **26**
EK A.1 : Mavi LED çip üretiminde kullanılan proses aşamaları.....**35**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : 2013 yılı Nobel Fizik Ödülünü mavi LED çip ile kazanan üç bilim adamı **3**
Şekil 2.2 : Fabrikasyonu bu tez kapsamında yapılmış mavi ışık yayan (GaN) çip **4**
Şekil 2.3 : Galyum Nitrür'ün Wurthzite ve Zinc Blende kristal yapısı…… **6**
Şekil 2.4 : Nitrür tabanlı malzemelerin bant aralığı-örgü sabiti-dalgaboyu grafiği..... **7**
Şekil 2.5 : LED çip proses aşamaları..... **11**
Şekil 2.6 : Ters olmayan ve ters LED çip paketleme gösterimi..... **11**
Şekil 3.1 : Maske hizalama ve spin (döndürerek) kaplama cihazları. **12**
Şekil 3.2 : Elektron demeti ve püskürtme yöntemi ile kaplama sistemi..... **13**
Şekil 3.3 : PECVD cihazı ve örnek olarak büyütülen film..... **14**
Şekil 3.4 : Ters LED çip'in epitaksiyel yapısı ve fabrikasyon tasarımı **15**
Şekil 3.5 : Ters olmayan LED çip'in epitaksiyel yapısı ve fabrikasyon tasarımı..... **16**
Şekil 3.6 : Ters olmayan LED çip'in (LED-A) paketleme işlemi **17**
Şekil 3.7 : Ters çip (LED-B) paketleme işlemi **17**
Şekil 3.8 : Parametre analiz sistemi..... **18**
Şekil 3.9 : LED-A ve LED-B'nin 3 volt gerilim altında elde edilen görünür ışıkları ve paketlendikten sonra toplam gücün ölçüldüğü optik küre **18**
Şekil 3.10 : LED-A ve LED-B'nin elektroluminesans spektrumu..... **19**
Şekil 3.11 : Mekanik profilometre ve örnek ölçüm görüntüsü..... **20**
Şekil 3.12 : RTA (Hızlı Isıl Tavlama) cihazı..... **20**
Şekil 4.1 : LED-A ve LED-B çip'lerinin akım-voltaj grafiği..... **21**
Şekil 4.2 : LED-A ve LED-B çip'lerinin toplam güç-uygulanan akım grafiği..... **22**
Şekil 4.3 : Dış kuvantum verimi (EQE)-Akım yoğunluğu grafiği **23**
Şekil 4.4 : Elektro optik dönüşüm verimi (WPE)-Akım yoğunluğu grafiği..... **24**
Şekil 4.5 : p-InGaN ve p-GaN katmanlarının aktivasyon analiz grafiği..... **25**
Şekil 4.6 : 850 °C'de 1 dk. N_2 ortamında tavlanan n-GaN ohmik kontak grafiği..... **26**
Şekil 4.7 : p-InGaN Ni/Au metallerinin ohmik kontak eğrileri..... **27**
Şekil 4.8 : LED-A ve LED-B için termal kamera analiz grafiği…… **28**
Şekil 4.9 : LED-A ve (LED-B) için ömür testi..... **29**
Şekil A1 : Mavi LED çip üretiminde kullanılan proses aşamaları..... **35**

GaN/InGaN TABANLI LED ÇİP FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada, InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu tabanlı mavi Işık Saçan Diyot'ların (LED) c-düzlemli safir alttaş üzerinde başarılı bir şekilde fabrikasyonu yapılmış ve karakterize edilmiştir. Mavi dalgaboyu'nda ışık saçan LED çip'lerin üretiminde kullanılan epitaksiyel malzeme, Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) sistemi kullanılarak büyütülmüştür. Fabrikasyon ve karakterizasyon çalışmaları için iki örnek hazırlanmış, LED-A örneğinde p-GaN kontak üzerine Ni/Au tabakası geçirgen ohmik kontak olarak kaplanmış, hemen ardından hızlı ısıl tavlama işlemi yapılarak difüzyon yapması sağlanmıştır. İndiyum Tin Oksit (ITO) malzemesi akım yayma tabakası ve ışığı geçirgen malzeme olarak kaplanmış ve Ni/Au/ITO metallerinin p-GaN yüzeyine olan kontak direnci $2.45 \cdot 10^{-2}$ ohm·cm^2 seviyesinde ölçülmüştür. LED-B örneği ise, çip'in ısınma ve yüksek seri direnç problemine bir çözüm olup olamayacağını anlamak amacıyla ters çip fabrikasyon yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada ayrıca, LED-A örneğinden farklı olarak Ni/Au p-kontak metalizasyonu üzerine, yansıtıcı katman olarak Ni/Ag kullanılmış, Ni/Au/Ni/Ag metallerinin p-GaN yüzeye olan kontak direnci $3.5 \cdot 10^{-3}$ ohm·cm^2 olarak ölçülmüş ve ışığın arka safir tarafından çıkması sağlanmıştır. LED-A ve LED-B örneklerinin Ti/Al/TiB_2/Au metallerinin n-GaN yüzeyine yapılan kontak dirençleri sırasıyla $1.74 \cdot 10^{-6}$ ve $7.72 \cdot 10^{-7}$ ohm.cm^2 olarak oldukça düşük elde edilmiştir. LED-A ve LED-B örnekleri kıyaslandığında, LED-B örneğinin 350 mA akım altında toplam güç ve dış kuvantum verimi değerleri bakımından %47 ve %49 oranında, LED-A örneğinden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: InGaN/GaN kuantum kuyulu LED, hızlı ısıl tavlama, yansıtıcı tabaka, akım yayma tabkası, indiyum kalay oksit.

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF GaN/InGaN BASED LIGHT EMITTING DIODES (LEDs)

SUMMARY

This dissertation presents high performance of InGaN/GaN Multi Quantum Well (MQW) based blue LEDs fabrication and characterization methods on c-plane sapphire substrate in two different configurations. The epitaxial material used in the production of blue light emitting LED chips were grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) system. Two samples were prepared for fabrication and characterization studies. In the case of LED-A, Ni/Au layer was deposited as a contact on the p-GaN then subsequent annealing was performed to get NiO_x ohmic form. To spread the current on the whole p-GaN surface, Indium Tin Oxide (ITO) material was deposited as current spreading layer. In the case of LED-B, it was fabricated by using flip-chip fabrication method in order to understand that the chip can be a solution to the heat and high series resistance problem. Ni/Ag was used as a reflective layer instead of the ITO. Ni/Au/ITO and Ni/Au/Ni/Ag to p-GaN specific contact resistances was obtained $2.45 \cdot 10^{-2}$ and $3.5 \cdot 10^{-3}$ ohm·cm^2 respectively which is quite low for p-GaN contacts. On the other hand, Ti/Al/TiB_2/Au to n-GaN specific contact resistances was obtained extrememly low for LED-A and LED-B as $1.74 \cdot 10^{-6}$ and $7.72 \cdot 10^{-7}$ ohm.cm^2. When LED-A and LED-B samples were compared, it was obviously observed rapid thermal annealed (RTA) LED-B flip-chip fabrication with Ni/Au/RTA/Ni/(Ag) films could provide good electrical and optical properties to improve output power and external quantum efficiency (EQE) about 47 % and 49 % respectively at 350 mA current.

Keywords: InGaN/GaN multi quantum well LED, rapid thermal annealing, reflective layer, current spreading layer, indium tin oxide.

1. GİRİŞ

Son on yılda, GaN-tabanlı yarı iletkenler, katı hal aydınlatmasından sensör ve iletişim alanlarına kadar uygulama potansiyelleri nedeniyle çok önemli bir teknoloji haline gelmiştir. Işık Yayan Diyot (LED) yapısında, yüksek ışık çıkarma verimliliği oldukça önemlidir. Yüksek emisyonlu konvansiyonel ışık saçan diyotlarda (LED-A), aktif bölgeden üretilen fotonların önemli bir kısmı, p-elektrotlar veya bağlama kontak metalleri tarafından engellenerek, ışık çıkarma verimliliğini azaltmaktadır. Bu nedenle elektrot dizaynı üst yansıtıcı yüzeyden safir tarafına doğru çıkartılacak şekilde yapılmış, ışık çıkarma verimliliğini artırıcı etkisi ile, ters çip LED-B yapısının daha verimli olduğu gösterilmiştir [1]. Ayrıca, giriş gücü arttığında, ısınma problemi oluşmakta ve özellikle LED-A yapıları için optik performans, güvenilirlik ve kullanım ömrü açısından olumsuz etkilere neden olmaktadır. Termal etkiyi azaltmak ve mevcut yayılmayı arttırmak için LED-B konfigürasyonu gibi yüksek güçlü ters çip tasarımını kullanmanın bu sorunu çözeceği gösterilmiştir [2]. LED-B çip'i ters çevrililerek ve ısıyı soğurucu alt bağlantı parçalarına monte edilerek paketlenmekte ve aktif tabakadan gelen ışık, şeffaf safir alttaş tarafından yayılmaktadır. Bu nedenle, ışığın zayıflaması, yarı saydam metal elektrot tarafından engellenmemiş olmaktadır. Ayrıca, p tipi elektrotların, yüksek yansıma ve düşük kontak direnci olan iyi reflektörler olması ya da yukarı çıkan ışığı tamamiyle yansıtması için p-katman üzerine kalın bir metal reflektörün yerleştirilmesi gerekmektedir. Ters çip LED-B'ye uygulanan akım homojenliği seviyesi, ihmal edilebilir tabaka direncine sahip kalın bir p-elektrot ve uygun soğutucu paket yoluyla artırılabilir. LED'de üretilen ısı, LED çip ve alt paketi birbirine bağlayan indiyum metal toplar üzerinden ısı iletimini azaltmak için doğrudan iletim sağlamaktadır [3]. Böylece LED-B yapısı yüksek güç ve yüksek verimlilik performansı sağlamaktadır. Tipik bir GaN/InGaN LED yapısı kullanılarak, bu tez kapsamında büyütülmüş ve fabrikasyonu gerçekleştirilmiş olan çiplerin analiz edilmiş sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca yine LED'lerin üretilmesinde en önemli noktayı oluşturan iletken-oksit tabakaların üretimi ve ohmik kontak çalışmalarına da yer verilmiştir. Tez'in

yazımına kadar gerçekleştirilen bilimsel faaliyetler aşağıda verildiği gibi özetlenebilir;

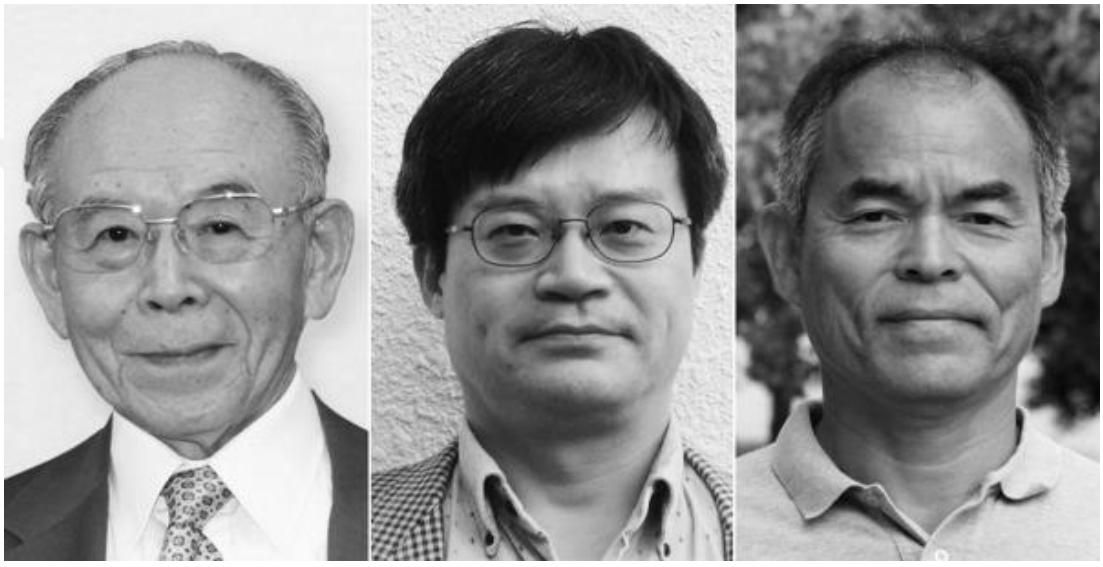
- Tez dönemi süresince, maskelerin tasarımı, hazırlanması ve testleri
- İletken oksit tabakaların uygun optik, morfolojik ve elektriksel özelliklerde elde edilmesi
- n-tipi ve p-tipi Galyum Nitrür (GaN) tabakalarına ohmik kontak metalizasyonlarının optimizasyonunun yapılması
- MOCVD ile büyütülen p-tipi GaN tabakalarının aktivasyonlarının gerçekleştirilmesi
- Paketleme işlemlerinin yapılması
- Üretilen aygıtların elektriksel ve optiksel olarak karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesi

LED-A ve LED-B örneklerinin fabrikasyonu ve karakterizasyonu için yapılan tüm bu adımların sonucu olarak yüksek güçlü ve verimli mavi ışık yayan LED Çip'lerin üretilebileceği gösterilmiştir [4]. LED'lerin üretimini gerekli kılan en temel özelliklerin başında sağladığı yüksek verimin yanında, tasarruflu ve dalga boylarının ayarlanabilir olması gelmektedir. Yapılan araştırmalara göre LED'ler aydınlatma uygulamalarında en az %50 oranında bir tasarruf sağlamaktadırlar [5]. Ayrıca yapılarını sağlamlığı, daha az yer kaplamaları, düşük ısı vermeleri ve yönlü ışık sağlama gibi avantajlarına sahip olmaları nedeniyle LED'lerin gelecek vaat eden bir teknoloji olduğu kabul edilmektedir. LED aydınlatma kullanarak elde edeceğiniz avantajlarla ilgili bir fikir sahibi olmanıza yardımcı olmak için 1 yıllık kullanım süresi içinde 25 W'lık bir LED lamba ile 25 W'lık bir akkor lamba kıyaslandığında; %80 oranında bir kazanç elde edilebilmekte ve toplam 8,48 kg CO_2 salımına engel olunabilmektedir. Tüm bunların sonucunda, dünyada enerji sıkıntısı hissedildiği günümüzde yeni ışık kaynağı veya önemli bir teknoloji elemanı olarak LED'ler artık hayatımızın ayrılmaz bir teknoloji ürünü olacaktır [6]. LED çip'lerin üretimi yüksek teknolojik altyapı ve bilgi birikimi gerektirdiğinden bu teknolojiyi Türkiye'de de üretmek, ülkemize yüksek katma değerli ürünler katmak, bu tezin oluşturulmasının en önemli amacı olmuştur.

2. TEORİK KISIM

2.1 Mavi Işık Yayan LED'lerin Tarihçesi

Ev- ofis aydınlatmaları ve elektronik aygıtların çalışması için esas olan enerji verimli mavi Işık Yayan Diyot'ların (LED) keşfi fizik alanında üç bilim adamına 2014 Nobel

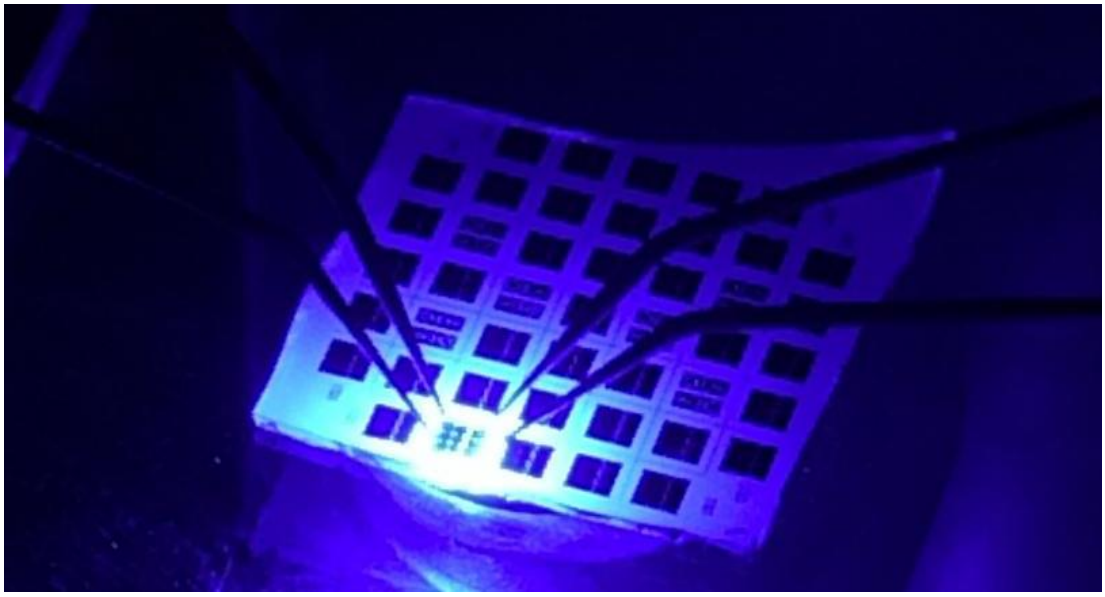


Şekil 2.1 : 2013 yılı Nobel Fizik Ödülünü, mavi LED Çip'in bulunması ile kazanan bilim insanları [7]

Ödülü'nü kazandırmıştır. Japonya'daki Meijo ve Nagoya Üniversitesi'nden Isamu Akasaki, yine Nagoya Üniversitesi'nden Hiroshi Amano ve Santa Barbara'daki Kaliforniya Üniversitesi'nden Shuji Nakamura 1,1 milyon dolar değerindeki ödülü paylaşmışlardır [7]. Rensselaer Politeknik Enstitüsü'nden elektrik mühendisi Fred Schubert konuyla ilgili şöyle demiştir: "Eğer bizler bu teknolojiye şöyle bir bakarsak, önce bir transistör ve birleştirilmiş bir devre ve sonra da mavi LED'i görürüz." Mavi LED, şu anda hızlı bir şekilde akkor flamanlı lambalarla değiştirilen beyaz LED lambalar için çok önemli bir ürün haline gelmiştir. Edison klasik keşfinde, beyaza benzeyen renkler dizisinin içinde ışık yayan bir lamba teli kullanmış ancak bu şekilde, ışığı ortaya çıkartmaktan daha çok, lamba telini ısıtmak için çok fazla elektrik harcandığını gözlemlemiştir [8].

Işık Saçan Diyot'lar (LED'ler) enerji verimlidir, çünkü fotonları ortaya çıkartmak için elektronlar kullanılmaktadır. LED'ler yarı iletken katmanlarından yapılmıştır,

materyalleri ise bilgisayarların çiplerine benzerlik göstermektedir. Bazı katmanlar elektron fazlasına sahipken bazıları elektron açısından yoksundur. Böylelikle, elektronların olması gerektiği, pozitif olarak şarj edilmiş deliklerin ortaya çıkışı sağlanmaktadır. Belli bir bölgede elektronları ve delikleri birleştirerek ışık yayarlar. 1962 yılında General Elektrik'ten (GE) Nick Holonyak, tesadüfi bir şekilde görünebilir ışığı yaymak için ilk yarı iletken diyodu keşfetmiştir. Laboratuvarında ışıkları kapattığı zaman "Galyum Arsenit Fosfat (GaAsP) bileşiği" örneğinin kırmızı olarak parladığını görmüştür. Bilim insanları bu andan itibaren günümüze kadar sürekli olarak kırmızı ve yeşil ışık yayan LED'ler geliştirmişlerdir. Beyaz dahil diğer renklerin çeşitliliğini meydana getirmek için çok önemli olan maviye ulaşmak ise adeta bir meydan okuma halini almıştır. Mavi ışık, görünebilir spektrumun yüksek, uç enerji noktasıdır ki böylesi yüksek enerjiye sahip bir ışığı yayacak elektronları ortaya çıkaracak materyaller ise fazla bulunmamaktadır. 1980'lerin sonunda o dönem öğrenci olan Amano, mavi parlaklık araştırmasında Galyum Nitrür (GaN) adı verilen bir yarı iletken üzerine çalışmıştır. Kağıt üzerinde galyum nitrür'ü diğer kimyasallarla karıştırarak mavi ışık yayma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir ancak düzinelerce mühendis, bunu gerçekleştirmeyi denemelerine rağmen "yetersiz-elektron katmanı" olan, yüksek kalitede galyum nitrat kristali geliştirmekte başarısız olmuşlardır [9].



Şekil 2.2 : Fabrikasyonu bu tez kapsamında yapılmış mavi ışık yayan galyum nitrür (GaN) LED çip

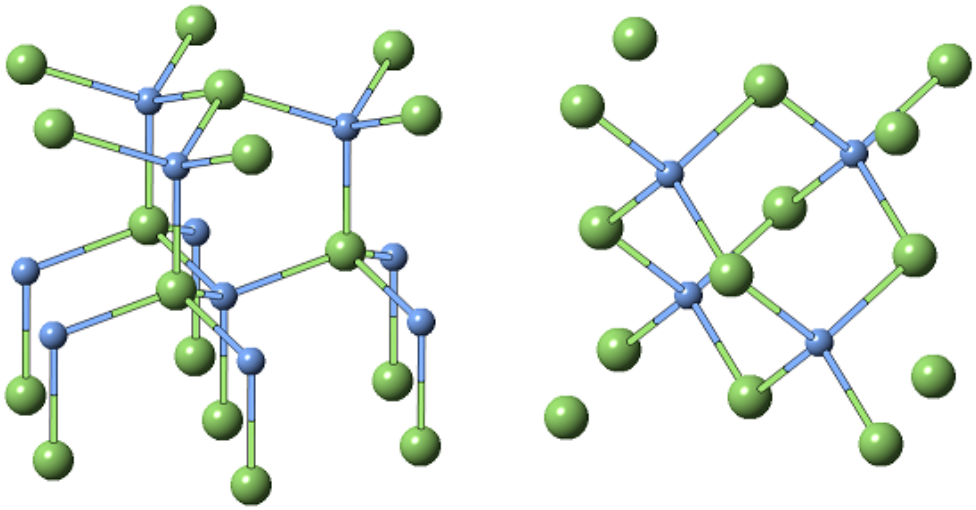
1986'da Akasaki ve Amano Galyum Nitrür'ü üzerinde oluşturabilecekleri safir bir alttaş kullanmışlardır. Sonra tıpkı Holonyak gibi kazara büyük bir keşifte bulunmuşlardır: Yetersiz bir elektron katman yaratmanın neden bu kadar zor olduğunu anlayabilmek için bir elektron mikroskobu altında çalışırken o katmanın gözlerinin önünde oluştuğunu görmüşlerdir. Aynı zamanda Tokushima'da bir kimyasal mühendislik şirketi olan Nichia Kimyasal'da çalışan Nakamura, yüksek kalite Galyum Nitrür büyütmek için kendi metodunu geliştirmiştir. Nakamura aynı zamanda Akasaki ve Amano'nun mikroskop gözleminin arkasındaki mekanizmayı da keşfetmiştir [10]. 1990'ların başında ise basit ve ekonomik bir şekilde mavi LED'ler üreten bir metod geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu metod sonucunda, Shuji Nakamura'nın teknoloji alanında çığır açan keşfi bir anlaşmazlığı da beraberinde getirmiştir. Nichia, Nakamura'ya mavi LED'lerin peşinden gitmemesini söylediği halde gitmiştir ve keşfi için kendisine yaklaşık olarak 2 milyon dolar ödeme yapmıştır. Camridge Üniversitesi'nden bilim adamı Colin Humphreys'e göre, Nakamura gece geç bir vakitte araştırmasını gerçekleştirmek adına laboratuvara gelmiş ve daha sonra Nakamura şirketi dava ederek yaklaşık 8,1 milyon dolar kazanmıştır. Araştırmacıların bu keşfi CD'lerin altın çağı sırasında ve DVD'lerin keşfinden hemen önce yapılmıştır. Bu yüzden ilk uygulama mavi lazerlerin geliştirilmesi alanında gerçekleşmiştir. Sonraki uygulamalar yüksek kapasite blu-ray diskler ve daha özellikli lazer yazıcılar olmuştur. 1996'da Nichia mühendislerinden Yoshinori Shimizu, beyaz ışık yayan bir devre yapmak için mavi LED'leri fosfor adı verilen sarımsı bir kaplamayla birleştirmiştir. Şu anda beyaz ışık saçan diyot (LED) lambalar, 100.000 saate kadar dayanabilirken akkor flamanlı lambalar ise sadece 1000 saat ömüre sahiptirler. Mavi LED temelli teknoloji, bugün 30 milyar dolarlık endüstrisi ile her yerde kullanılmaktadır. Ev aydınlatmaları, sokaklar ve ofislerin yanı sıra LED'ler birçok elektronik cihazda arka plan ışığı olarak da hizmet vermektedir. Örneğin enerji verimli televizyonlarda enerjiden tasarruf sağlamakta, laptop ve akıllı telefonlarda ise daha uzun süre batarya kullanım imkanı tanımaktadır [11]. İsveç Royal Akademisi'ndeki nobel komitesi genellikle teoriler ya da yeni fizik fenomeniyle ilgili incelemeler adına ödüller vermektedir. Ancak bu sefer jüri, araştırmaya etki eden büyük resmi düşünerek karar vermiştir. İsviçre'deki Linköping Üniversitesi'nden Fizisyen Olle Inganäs, yaptığı basın açıklamasında şunları ifade etmiştir: "Alfred Nobel, ödülünün insanlığın yararına icatlar geliştiren mucitlere verilmesini isterdi. Bizim bugün vurguladığımız şey

budur, keşfin insanlık yararına kullanılabilirliği ile ilgili.” Komite, enerji verimli LED’lerin dünya çapında elektriksel sisteme erişimi olmayan 1,5 milyar insana ışığı ulaştırmada yardımcı olabileceğini de özellikle belirtmiştir. Humphrey sözlerine şöye devam ederek: “Şu anda var olan aydınlatmaları LED’lerle değiştirebilirsek kullanılan elektriğin yarısını tasarruf edebiliriz.” demiştir [12].

2.2 Literatür Araştırması

2.2.1 Galyum Nitrür’ün (GaN) kristal yapısı

GaN’ın altıgen olarak kapalı paketlenmiş (HCP) wurtzite ve yüz merkezli kübik (FCC) Zinc Blende olarak yaygın bilinen iki kristal yapısı vardır. Ortam koşullarında en yaygın kullanılan GaN kristal biçimi ise Wurtzite’dir. Wurtzite yapısının kafes sabitleri a=3.1892 ± 0.0009 A ve c=5.1850 ± 0.0005 Å’dır. Bazı yabancı alttaşlarda epitaksiyal olarak büyütülen GaN filmi Zinc Blende formunda bulunur. Zinc blende formunun kafes sabiti ise a=4,49 Å ile a=4,55 Å arasında değişmektedir [13]. İki yapı Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



a-Wurtzite b-Zinc Blende

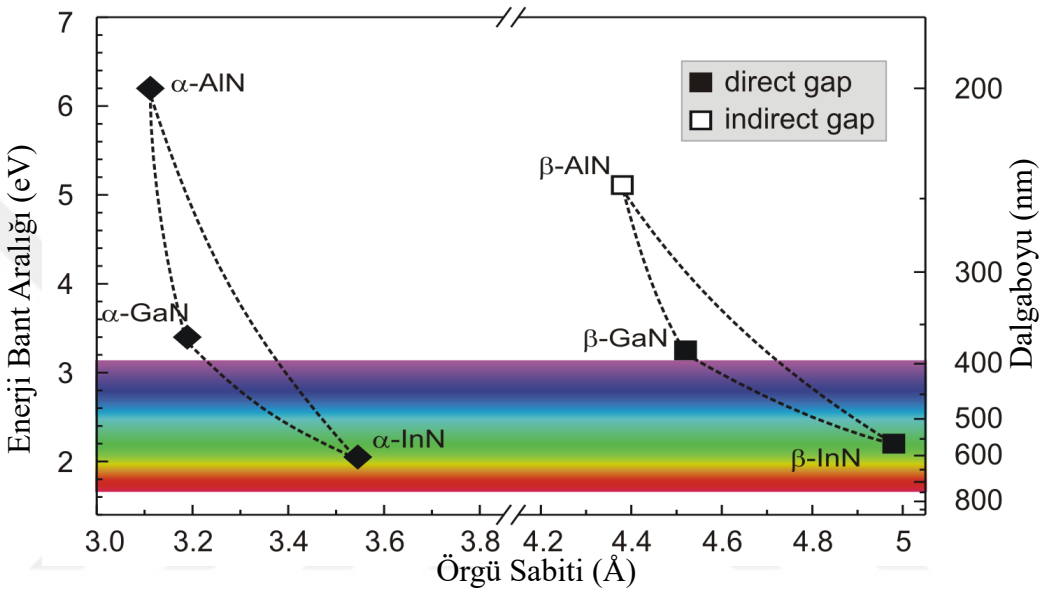
Şekil 2.3 : Galyum Nitrür’ün a) Wurthzite ve b) Zinc Blende kristal yapıları [13]

GaN, termal ve kimyasal olarak kararlı bir bileşiktir. GaN’nin atmosfer basıncı altında ayrışma sıcaklığı yaklaşık 850 °C’dir [14], bu da GaN tabanlı aygıtlara daha geniş bir işlem sıcaklığı aralığı sunabilir. GaN, su, asit, bazlar içinde oda sıcaklığında çözülmez ve sadece yüksek sıcaklıkta KOH ve NaOH gibi güçlü bazlarda yavaşça

aşındırılabilir. Islak aşındırma zorluğu nedeniyle, kuru aşındırma GaN aygıt fabrikasyonunda ana aşındırma tekniği halini almıştır.

2.2.2 III-nitrür yarıiletkenlerin enerji bant aralığı

Son zamanlarda, Galyum Nitrür (GaN) ve ilgili üçlü bileşikleri dikkat çekmektedir. Bu bileşik malzemeler, doğrudan ve geniş bant aralığı, yüksek ısı iletkenliği ve yüksek doyum hızı göstermektedir.



Şekil 2.4 : Nitrür tabanlı malzemelerin bant aralığı, örgü sabiti ve dalgaboyu grafiği [14]

Oda sıcaklığında, AlInGaN'ın enerji bant aralığı, bileşimine bağlı olarak 0,8 ila 6,2 eV arasında değişmektedir. (Şekil 2.4). Bu özellikler, kısa dalga boylu yayıcılar için nitrür esaslı materyalleri kullanılabilir hale getirmektedir. Nitekim, nitrojen esaslı UV LED'ler, lazer'ler ve dedektörler aydınlatmadan savunma uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Şekil 2.4'de Galyum Nitrür'ü (GaN) diğerlerinden ayıran temel özellikleri gösterilmiştir. Bu avantajlar GaN malzemesini, LED üretiminin dışında yüksek güç ve yüksek frekans özelliklerinden yararlanılarak transistor yapımında, yeni nesil nanotüplerin geliştirilmesinde, lazer diyot üretiminde, RF- mikrodalga güç yükselteci olarak ve yeni nesil güneş pillerinin geliştirilmesinde kullanılmakta ve silisyum'dan sonra bulunan en önemli malzeme olarak gösterilmektedir [14].

2.2.3 Mavi ışık yayan LED'lerin p-GaN/p-InGaN kontak metalizasyonu

Konvansiyonel nitrür tabanlı mavi LED'lerde, üst kontak olarak p-GaN üzerinde yarı saydam Ni/Au kontak metalleri kullanılmaktadır. Ni/Au'nın geçirgenliği %55-%75 seviyelerindedir. Bu nedenle, LED uygulamaları için III-N LED'lerin çıkış gücünü daha da artırmak gerekmektedir. Indium Kalay Oksit (ITO) üst temaslı, akımı tüm yüzeye yayan III-N LED'lerin, ITO ve p-GaN arasındaki kontak direncinin fazla olduğu gözlemlenmektedir [15]. Sonuç olarak, genellikle ITO LED'lerde göreceli olarak çalışma voltajı daha yüksektir. Bu sorunu çözmek için, Ag (gümüş) reflektörü LED'in üst tarafından çıkan ışığı geri yansıtmak için kullanılır ve aktif bolge alt tarafa gelecek sekilde paketlenerek sogutma saglanir. P-GaN kontak metalizasyonu için ısıl işlem 500-550 °C olarak uygulanmaktadır ve uygulanan ortam O_2 ortamı olarak seçilmektedir. O_2 kullanılmasının sebebi ise NiO_x yarıiletken formunu oluşturup kontak direncini düşürmektir [16]. Literatürde NiO_x/Au metallerinin ısıl işleminin ardından p-GaN yüzeyinde elde edilen kontak direnci 10^{-1}-10^{-4} Ohm.cm^2 seviyelerinde ölçülmektedir [17].

2.2.4 LED çip'lerin boyutunun etkisi

Sokak aydınlatması, yol aydınlatması, tünel aydınlatması, otopark aydınlatması, bahçe aydınlatması ve mimari aydınlatma gibi açık alanlarda aydınlatmanın penetrasyon oranı zaman geçtikçe artmaktadır. Genellikle bu aydınlatma türleri 1 W, 3 W, 5 W ve hatta 10 W'lık bir giriş gücüne ihtiyaç duymakta fakat çip boyutunu büyütmek istenilen güçlere verimli bir şekilde çıkmamızı sağlamamaktadır. Çip boyutu küçüldükçe LED'in verimi artmakta fakat optimize bir ölçünün altına inildiğinde belli bir noktadan sonra seri direnç artmaya başlamakta ve bu da LED'in ısınmasına yol açmaktadır. Yüksek güçlere ulaşmak için genellikle optimize edilmiş yaygın kullanılan boyut 1000 µm X 1000 µm alana sahip çip'lerdir ve bu çipler fazla sayıda kullanılarak yüksek güç eldesi sağlanmaktadır [18,19].

2.2.5 Mavi ışık yayan LED'lerin n-GaN kontak metalizasyonu

P-GaN katmanı üstte olacak şekilde büyütülmüş yapılarda n-GaN katmanından kontak alabilmek için yapıya göre değişen 250-1500 nm aralığında ıslak ya da kuru aşındırma işlemi uygulanmaktadır [20]. Aşındırma işlemi yapıldıktan sonra n-GaN bölgesine ohmik kontak oluşturmak için Ti/Al/Ti/Au, Ti/Al/Pt/Au, Ti/Pt/Au, Ti/Al/Ni/Au ya da bu tez'de kullanılan Ti/Al/TiB_2/Au gibi metal katmanları belli

kalınlıklarda kaplanıp hızlı ısıl işlem uygulanarak tavlanmaktadır [21]. Tavlama sıcaklığı verilen metaller için minimum 750 °C olmalıdır. Aksi takdirde ohmik kontak formu oluşmamaktadır. n-GaN katmanların Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemi ile büyütülme ve katkılama çalışmalarında çok büyük mesafeler alındığı ve kaliteli n-GaN katmanlar büyütüldüğü için kontak dirençlerini düşürmekte problem yaşanmamaktadır. Yukarıda verilen metal grupları ve gerekli ısıl tavlama işleminden sonra 10^{-7}-10^{-8} Ohm.cm^2 mertebelerine çok rahat inilebilmektedir [22].

2.2.6 Dış kuantum (EQE) ve elektro optik dönüşüm verimi (WPE) hesaplama

Işık Saçan Diyot'dan yayılan fotonların sayısıyla cihazdan geçen elektronların sayısına oranı, Şekil 8'de gösterildiği gibi Dış Kuvantum Verimliliği (EQE) olarak adlandırılmaktadır. Bir LED için EQE;

$$\frac{\text{Yayılan fotonlar}}{\text{Enjekte edilen yük taşıyıcıları}} \tag{2.1}$$

2.1'de ve 2.2'de verilen denklem yardımıyla bulunur.

$$\frac{P_0 \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot I} \tag{2.2}$$

Burada P_0 optik çıkış gücü, hν, emisyon frekansı ν olan bir foton enerjisidir. I, uygulanan akımı ve e, elektron yükünü göstermektedir. Kuvantum verimi hesaplamak için diyot ileri voltajına ihtiyaç duyulmamaktadır. Elektro Optik Dönüşüm Verimliliği'ni (WPE) hesaplamak için ise;

$$\frac{I.V}{P} \tag{2.3}$$

2.3'de verilen denklem kullanılmaktadır. Burada I ve V sırasıyla elektrik akımı ve gerilimdir. P, küreyi optik olarak entegre ederek ölçülen toplam optik gücü vermektedir [23].

2.2.7 Literatür'de LED çip fabrikasyonu

Günümüzde LED çip fabrikasyonları, safir alttaş üzerine Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) cihazı kullanılarak büyütülen GaN/InGaN kuvantum kuyulu yapılar üzerinde gerçekleştirilmektedir.

Büyütülen yapıların en üst kısmında p-GaN tabakası bulunmakta ve alt tabakalardaki n-GaN tabakasına ulaşmak için ıslak veya kuru aşındırma metodlarından biri

kullanılmaktadır. Safir alttaşı ıslak aşındırmak zordur ve olsa bile aşındırma kontrolü zor olduğu için genellikle tercih edilmemektedir. İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma (ICP) cihazı kullanılarak genellikle BCl_3:Cl_2 gaz kombinasyonunda aşındırma yöntemi tercih edilmektedir [24].

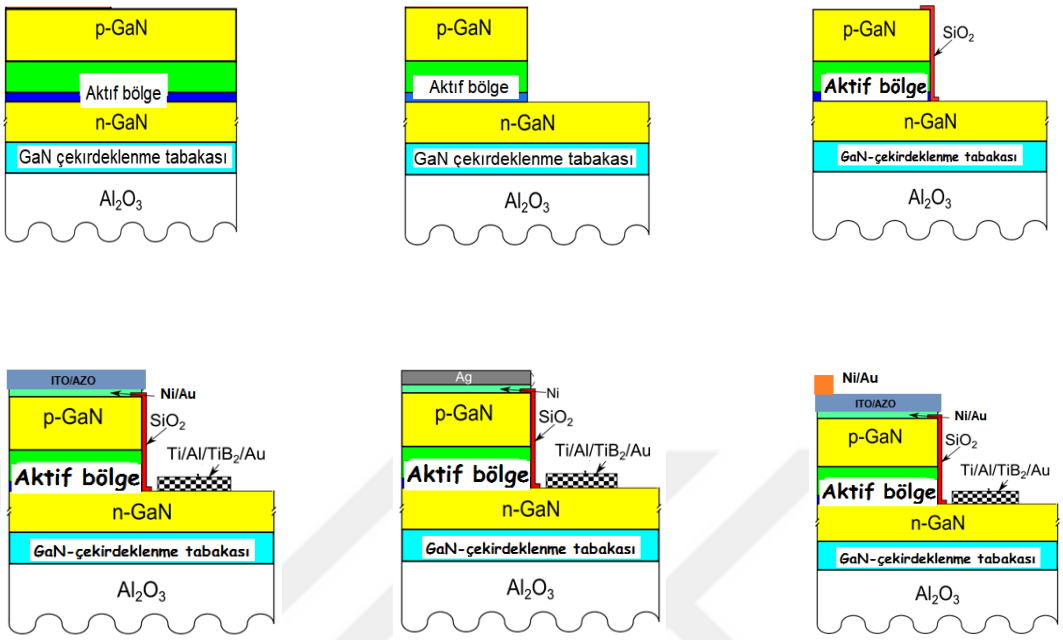
Bu aşamanın ardından n-GaN ve p-GaN metal kontakları için uygun metaller, gerekli maske, metal buharlaştırma cihazları ve litografik adımlar seçilerek yapılmaktadır. Bu kaplama aşamaları LED-A ve LED-B seçeneğine göre dizayn edilmekte ve gerekli metaller ona göre seçilmektedir. LED-A için üstten ışık çıkarmak amacıyla ışığı geçiren bir malzeme olan İndiyum Tin Oksit (ITO) ya da Aluminyum Çinko Oksit (AZO) malzemeleri, LED-B için ise ışığı alt taraftan (safir tarafından) çıkarmak için yansıtıcı olarak Gümüş (Ag) ya da Aluminyum (Al) gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Yarıiletken aygıtların mikrofabrikasyonunun her aşamasında yüzey temizliği çok önemlidir [25]. Bu temel olarak fotorezist artıkları başta olmak üzere hidrokarbon temizliği, aseton ve alkol gibi solventlerle yapılır. Bu şekilde yapılan temizlik aşaması birçok aygıt için yeterli olabilmektedir ancak çok ince hava ile temasında kendiliğinden oluşabilen oksit tabakalarının temizlenmesi için HF:H_2O gibi karışımlar tercih edilmektedir. Galyum Nitrür (GaN) yüzey temizliği açısından çok sorunlu bir malzemedir. Yeterli temizlik yapılmadığı zaman ohmik eklemlerden elde edilen seri dirençler ve diyotun akım geçirmeğe başladığı gerilim değerleri bundan olumsuz etkilenmektedir. GaN tabanlı LED mikrofabrikasyonunda yüzey temizliği yaygın olarak prosesin bütün aşamalarında yapılır.

Bu aşamalar bittikten sonra LED-B için çip ters çevirilip indiyum pasta kullanılarak, LED-A ise kontaklar üzerinden altın tel çekilerek şekil 2.6'de verildiği gibi uygun pakete paketlemesi yapılmaktadır [26].

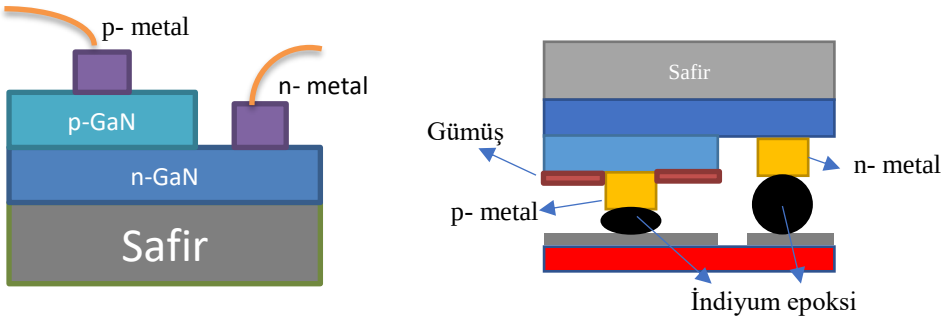
Paketleme işleminin ardından optiksel ve elektriksel karakterizasyon çalışmaları yapılarak LED çip'lerin verim, optiksel ve elektriksel güç ve kontak direnç değerleri analiz edilmekte ve olumsuz sonuçlar elde edildiğinde fabrikasyon aşamaları ve yonga yapısı tekrar gözden geçirilerek proses optimize edilmektedir [27]. Fabrikasyon adımlarında Şekil 2.5'de verilen tasarım, LED-A tasarımı ile aynıdır. LED-B tasarımı ise LED-A ile aynı olup, aralarındaki tek fark; akım yayma tabakası

olan İndiyum Kalay Oksit (ITO) malzemesi yerine yansıtıcı katman olarak gümüş (Ag) metalinin kullanılmış olmasıdır [28].



Şekil 2.5 : LED çip proses aşamaları

LED-A örneği altın tel kullanılarak, LED-B örneği ise ters çevirilip indiyum epoksi kullanılarak paketlenmektedir [29]. (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Ters olmayan ve ters LED çip paketleme gösterimi

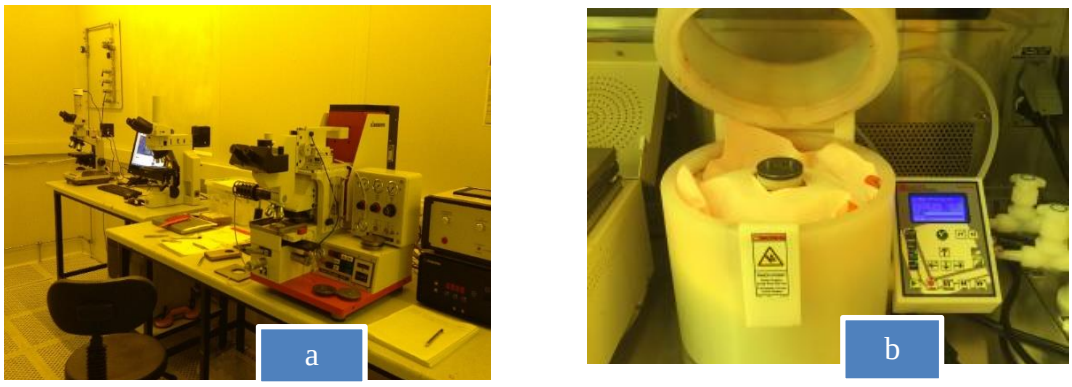
Paketleme işlemleri tez kapsamında optik mikroskop altında ve tel baglama cihazında tekrar tekrar yapılıp el alışkanlığı kazanılarak tamamlanmıştır. Profesyonel üretim yapılan ortamlarda, ters çip paketleme ve üstten ışıyan LED için otomatik tel baglama cihazları kullanılmaktadır. Paketleme kalitesinin yüksekliği, LED'lerin performansını ve ömrünü artırmada kritik bir öneme sahiptir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, safir üzerine metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniği ile büyütülen InGaN/GaN çoklu kuvantum kuyu (MQW) tabanlı LED yapıları kullanılmıştır. Epitaksiyel yapıda, p-GaN katmanına daha iyi kontak alabilmek için en üst kısma 20 nm kalınlığında InGaN katmanı büyütülmüştür. Aktif bölge, InGaN/GaN kuvantum kuyularından oluşmaktadır ve yaklaşık 390 nm kalınlıkta olacak şekilde büyütülmüştür. n-GaN bölgesine ohmik kontak sağlamak için aktif bölge altında n-GaN tabakası 3300 nm büyütülmüştür. Bu bölümde yapılan çalışmalar tez çalışmalarının başlandığı tarihten itibaren başlamış olup tez boyunca devam etmiştir. 300'e yakın LED çip üretilmiş ve bunların tamamında sistematik olarak n-tipi GaN ve p-tipi GaN tabakalarına yapılan kontak dirençleri ölçümleri, aygıtların I-V, I-P ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu üretilen çiplerden bir kısmıda paketlenmiş ve paketleme işlemlerinden sonra aygıtların optik küre (integrated sphere) yardımıyla toplam optik çıkış güçleri ölçülmüş ve bunların dış kuantum verimleri, bu ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır. Büyütülmüş yonga üzerine, ters olmayan LED-A ve ters LED-B aygıtlarının fabrikasyonları yapılarak sonuçları karakterize edilmiştir.

3.1 Çip fabrikasyonunda Kullanılan Cihazlar

3.1.1 Maske hizalama ve spin kaplama cihazları



Sekil 3.1 : a) Maske hizalama ve b) spin (döndürerek) kaplama cihazları

LED çip orneklerine gerekli temizlik islemleri uygulandiktan sonra UV ışığa duyarlı fotorezist malzemesi örneğin uzerine damlatılarak döndürerek kaplama yontemi ile örneğin üzerine 1,5 mikron kalinliginda kaplanmaktadır. Kaplama isleminin ardından fotorezistin sertleşmesi icin 110 °C'de 1 dakika bekletilmekte ve bu islemin ardından maske hizalama cihazi kullanılarak örnek üzerine aktarılması istenen yapı maskesi yerleştirilmektedir. Maskede UV ışığı geçiren bölgelerden ışık geçerek örnek üzerinde fotorezist kaplı bölgeyi zayıflatmaktadır. Bu işlemin ardından örnek, developer (banyo) adı verilen kimyasalda yeterli süre bekletilerek UV ışık altında zayıflayan bölgenin kalkması sağlanmakta ve istenilen desen örnek üzerine aktarılmaktadır.

3.1.2 Elektron demeti ve püskürtme yöntemi ile metal kaplama sistemi



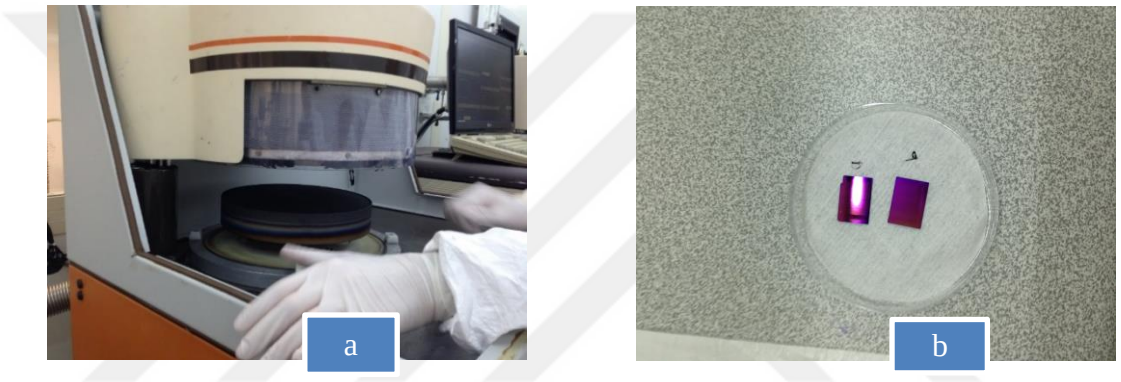
Şekil 3.2: a) Elektron demeti ve b) puskurtme yöntemleri ile kaplama cihazları

Yarıiletken aygıt fabrikasyonunda nanometre ve mikrometre kalınlık mertebelerinde bazı metallerin kaplamaları yapılmaktadır. Bu kaplamalar genellikle radyofrekans püskürtme ve elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi ile kaplanmaktadır. Düşük sıcaklık istenilen durumlarda püskürtme yöntemi kullanılmaktadır. Püskürterek kaplama yönteminde film kalitesi elektron demeti buharlaştırma yöntemine göre daha düşüktür. Daha iyi film kalitesi elde etmek için genellikle elektron demeti buharlaştırma yöntemi tercih edilmektedir.

3.1.3 PECVD (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme) cihazı

Bu cihaz, aygıt üretimi yaparken elektriksel olarak pasif (yalıtkan) yüzeyler oluşturmak amacıyla silisyum di oksit (SiO_2) veya silisyum nitrat (Si_3N_4) gibi elektriği iletmeyen filmlerin büyütülmesi icin kullanılmaktadır. Kaliteli filmlerin büyütülmesi icin gerekli olan parametreler aşağıda verilmiştir;

- Sıcaklık
- Basınç
- RF güç
- Gaz akış hızları ve
- Zaman



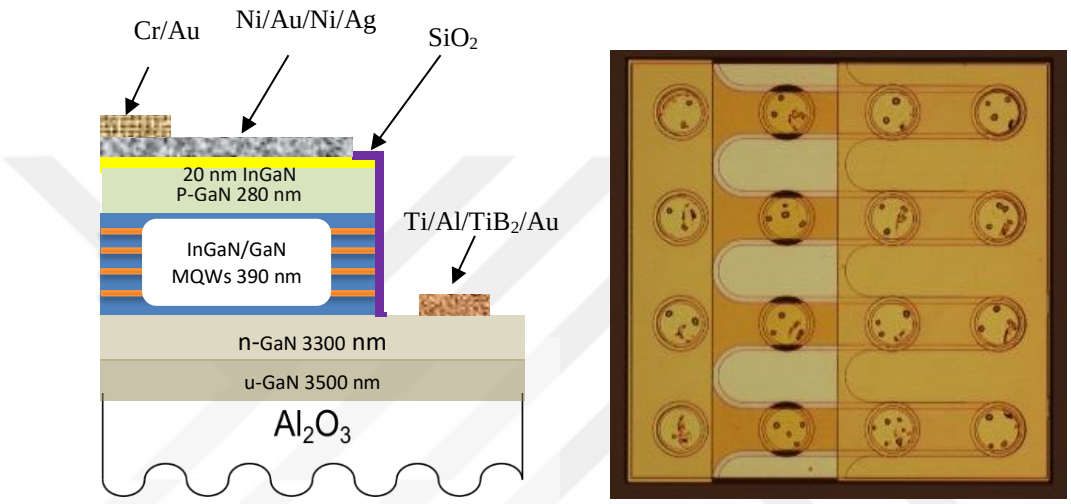
Sekil 3.3 : a) PECVD cihazı ve b) örnek olarak büyütülen film

Yukarıda verilen parametreler ile oynanarak büyütülen filmin kalitesi ve kırılma indisi ayarlanabilmektedir. Şekil 3.3'de PECVD cihazi ve örnek olarak büyütülen filmler gösterilmiştir.

3.2 Ters LED Çip (Flip Chip LED) Fabrikasyonu

Bu fabrikasyonda, mesalar İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma (ICP) ile BCl_3: Cl_2 gazlarının belli akış oranlarında çembere verilmesi ile oluşturulmuştur. n-GaN katmanına Ti(30nm)/Al(50nm)/TiB_2(50nm)/Au(70nm) metalleri buharlaştırılmış ve ardından 850 °C'de nitrojen (N_2) ortamında 30 saniye boyunca Hızlı Isıl Tavlama (RTA) uygulanarak ohmik kontak formu kazandırılmıştır. P-GaN yüzeyine ise ohmik kontak formu oluşturmak için Ni/Au (5nm/5nm) kaplanmış, ardından 500 °C'de 5 dakika boyunca Oksijen (O_2) ortamında hızlı ısıl tavlama yapılarak tavlanmıştır. Yansıtıcı katman olarak Ni/Ag (5nm/160nm) metalleri buharlaştırılmış ve ardından 500 °C'de 1 dakika N_2 ortamında ısıl işlem uygulanmıştır [30]. Ters LED çip'i

(LED-B) rahat paketleyebilmek için kontak pad olarak maskede tasarlanan bölgeye kalınlaştırmak amacıyla Cr/Au (30nm/200nm) metalleri buharlaştırılmış ve ardından 450 °C'de N_2 ortamında 30 saniye tavlanmıştır. Şekil 3.4'de gösterilen LED yapısı, 250 nm kalınlığında SiO_2 ile pasif hale getirilmiş yan duvarlardan akım kaçması engellenmiştir. Silisyum dioksit (SiO_2) filmi, ICP mesa aşındırma işleminden hemen sonra Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) tekniği ile büyütülmüştür. SiO_2 kaplanması istenilmeyen yüzey, BOE aşındırma kimyasalı ile litografi kullanılarak kaldırılmıştır.

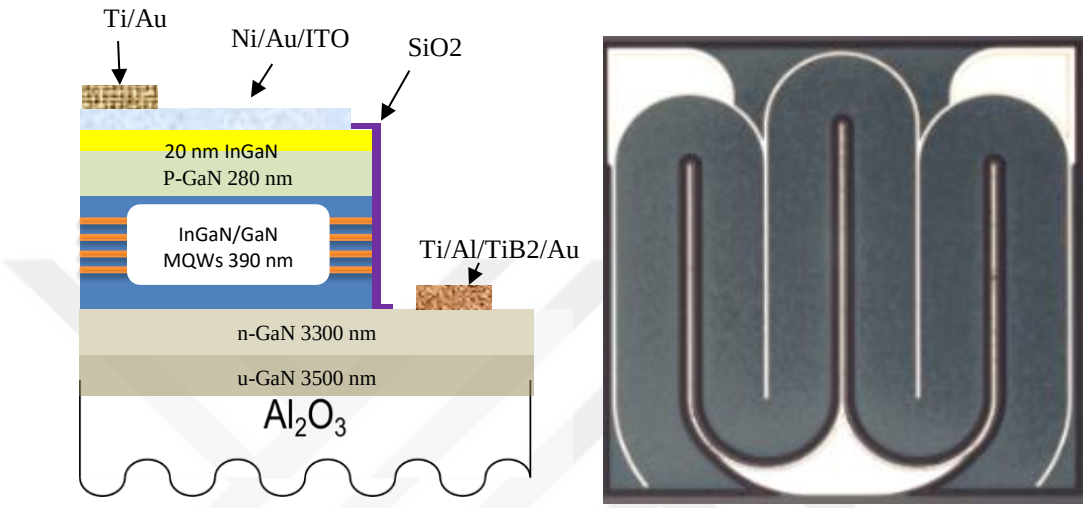


Şekil 3.4 : Ters LED çip'in (LED-B) epitaksiyel yapısı and fabrikasyon tasarımı

3.3 Ters Olmayan LED Çip Fabrikasyonu

Ters olmayan LED çip (LED-A) fabrikasyonunda ise, n-GaN bölgesine kadar aşındırılma işlemi İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma (ICP) ile BCl_3:Cl_2 gazlarının belli akış oranlarında çembere verilmesi ile oluşturulmuştur. n-GaN katmanına Ti(30nm)/Al(50nm)/TiB_2(50nm)/Au(70nm) metalleri buharlaştırılmış ve ardından 850 °C'de N_2 ortamında 30 saniye boyunca Hızlı Isıl Tavlama (RTA) uygulanarak ohmik kontak formu kazandırılmıştır. P-GaN yüzeyine ise ohmik kontak formu ve yansıtıcı katman oluşturmak için Ni/Au (7,5nm/7,5nm) kaplanmış ardından 500 °C'de 5 dakika boyunca oksijen (O_2) ortamında hızlı ısıl tavlama yapılmıştır. Işık üstten çıkacağı için akım yayma tabakası olarak İndiyum Kalay Oksit (ITO) (120nm) kalınlığında püskürtme yöntemi ile kaplanmış ve ardından 500 °C'de 1 dakika oksijen (O_2) ortamında ısıl işlem uygulanmıştır [31]. LED çip'i rahat paketleyebilmek için kontak pad olarak maskede tasarlanan bölgeye kalınlaştırmak amacıyla Ti/Au (30nm/200nm) metalleri buharlaştırılmış ve ardından 450 °C'de N_2

ortamında 30 saniye tavlanmıştır. Şekil 3.5'da gösterilen LED yapıları, 250 nm kalınlığında SiO_2 ile pasif hale getirilmiş yan duvarlardan akım kaçması engellenmiştir [32]. Silisyum dioksit (SiO_2) filmi, ICP mesa aşındırma işleminden hemen sonra Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) tekniği ile büyütülmüştür. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi, SiO_2 kaplanması istenmeyen yüzey BOE aşındırma kimyasalı ile litografi kullanılarak kaldırılmıştır [33].



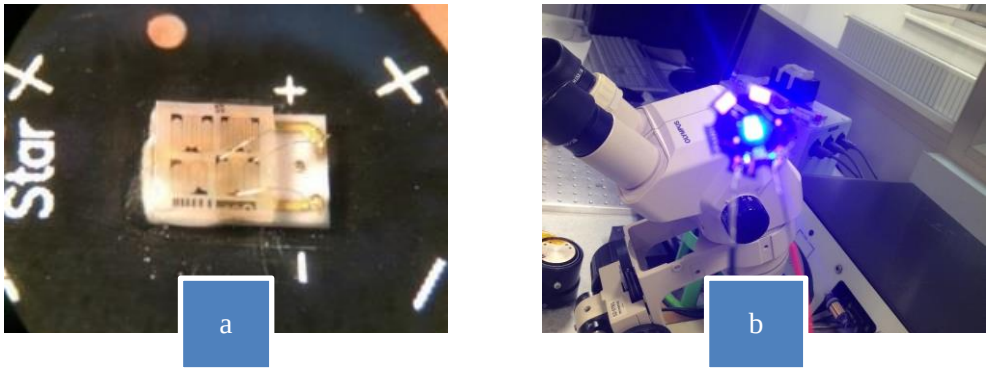
Şekil 3.5 : Ters olmayan LED çip'in epitaksiyel yapısı and fabrikasyon tasarımı

3.4 LED Çip'lerinin Paketlenmesi

LED'lerin çalışma performansı, ışığın toplam gücünün koruyucu lens'ler kullanılarak artırılması, ısınma probleminin en aza indirilmesi gibi nedenlerden dolayı LED çip paketlemesi kritik bir öneme sahiptir. Eğer aygıtların paketleme işlemleri sağlıklı olarak yapılamaz ise aygıtlar verimli bir şekilde çalışmayacaktır.

Ters olmayan LED çip (LED-A) fabrikasyonu tamamlandıktan sonra, LED-A örneği, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi 50 mikron kalınlığında altın tel kullanılarak artı ve eksi kutuplar yani p-n kontaklardan soğutucu tabakanın artı ve eksi noktalarına iletken altın tel atılarak LED'in çalışması sağlanmıştır [34].

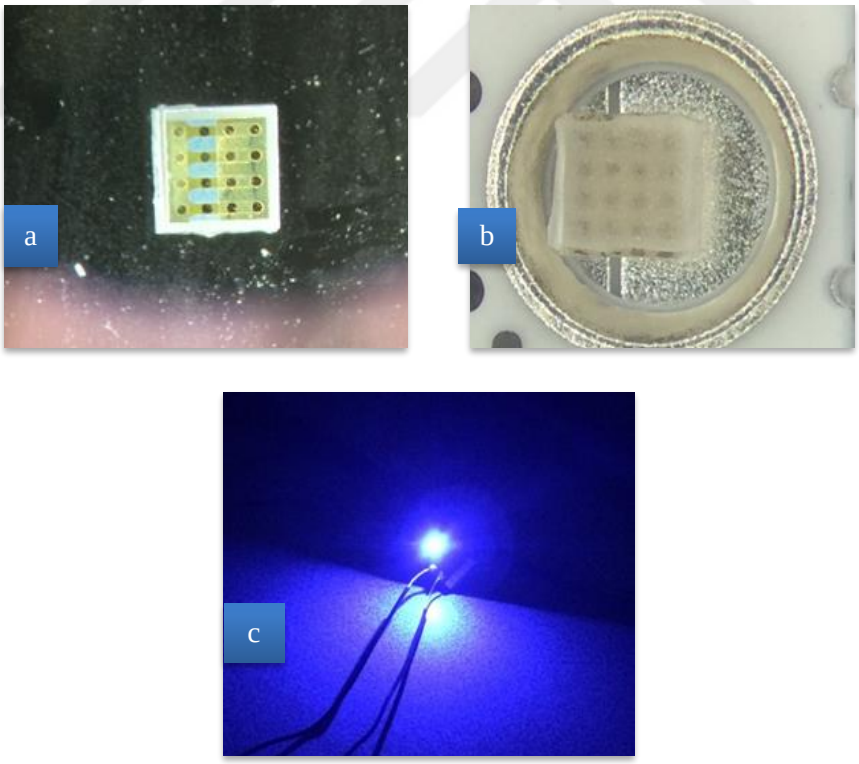
Ters LED çip (LED-B)'nin paketlenmesi için, epo-tec H20E marka iletken epoksi maddesinin A ve B modellerinden 1:1 oranında bir karışım hazırlanılarak çip'in üzerine damlatılmıştır. Epoksi'nin termal iletkenliği karıştırılma oranıyla yakından ilgilidir. Eğer karışım 1:1 oranından farklı bir oranda oluşursa paketlenen çip'lerin verimini ve kalitesini düşürmektedir.



Şekil 3.6 : Ters olmayan LED çip'in (LED-A) paketleme işlemi

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi kontak noktalarının soğutucu tabakanın üzerindeki artı ve eksi kutuplara teması için ters döndürülüp ardından 180 °C'de 2 dakika boyunca iletken hale geçmesi ve yapışması için ısıtılmıştır.

Epoksi damlatırken çip üzerindeki diğer yapılara dokunarak kısa devre yapmaması amacıyla, tüm yüzey silikon dioksit (SiO_2) yalıtkan malzemesi ile kaplanmış ve litografi ve BOE kimyasalı ile kontak pad'lerin olduğu alanlar açılmıştır [35].



Şekil 3.7 : a) LED-B'nin paketlenmesi için gerekli olan kesme işlemi b) Ters çevirilerek kürleme ile yapıştırma işlemi c) Ölçüm sonrasında elde edilen 4 V'daki görünür ışık

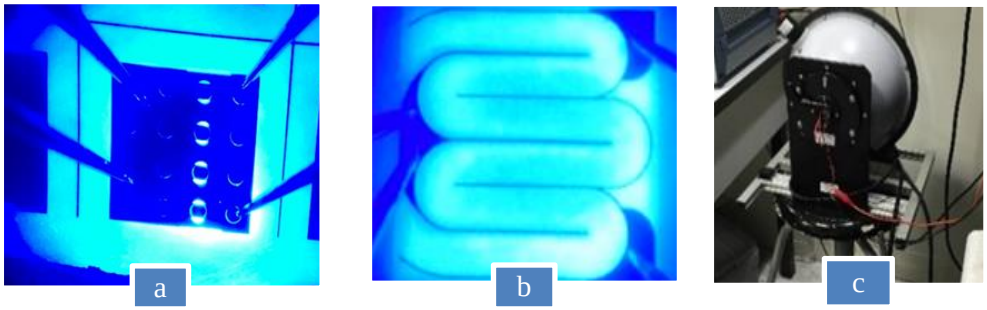
3.5 Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyon

Üretilen LED çip'lerinin elektriksel özellikleri bir Keithley 2430 akım-voltaj kaynağı ile parametre analiz sisteminin birbiri ile iletişimi sayesinde ölçülmüştür. Optik özellikler Instruments Systems CAS 140CT marka spektrometre cihazı ile incelenmiştir. Çiplerin toplam gücünü elde etmek için paketlenmiş LED-B ve LED-A örnekleri optik entegre küre'ye yerleştirilmiş ve toplam güç sonuçları elde edilmiştir.



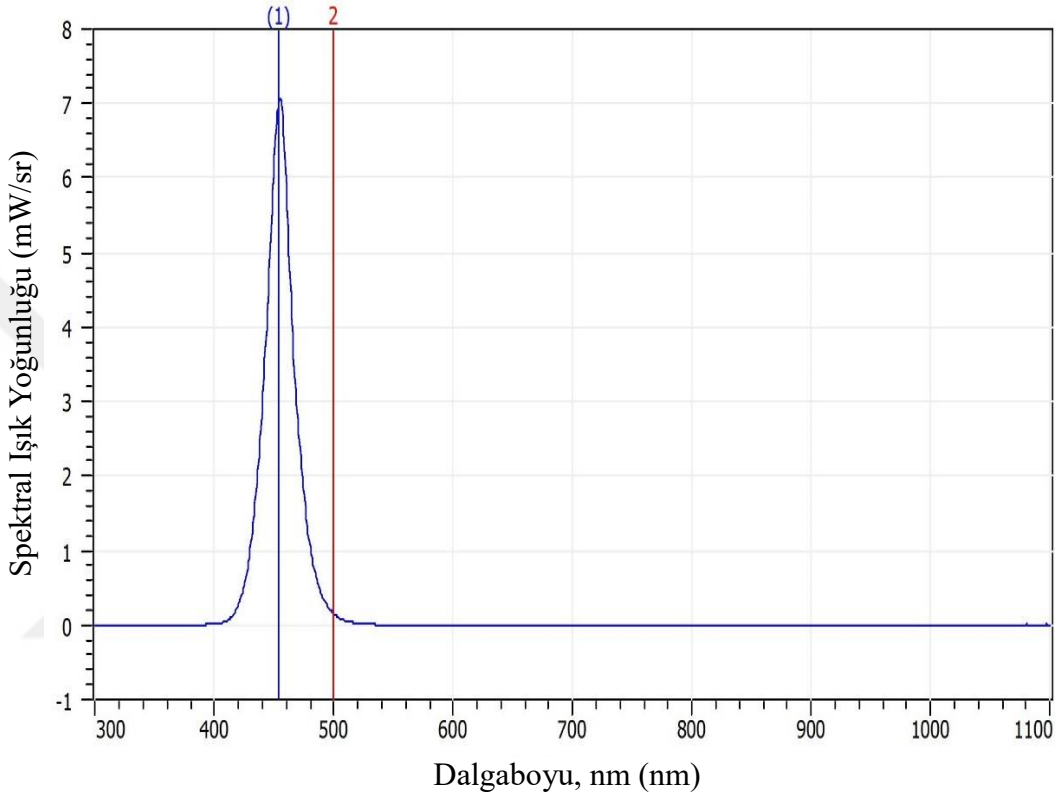
Şekil 3.8 : a) Parametre analiz sistemi ve b) Akım-voltaj kaynağı

Ohmik kontak direnci doğrusal ve dairesel yapılar üzerinde İletim Hattı Yöntemi (TLM) kullanılarak belirlenmiştir. Lineer TLM için, 20, 40, 60, 80, 100 ve 150 µm'lik ayrımlarla 75 x 450 μm^2 temas alanları kullanılmıştır. Dairesel TLM ölçümleri için ise iç kontak ped'lerinin çapları 50, 80, 100 ve 150 µm olarak belirlenmiş ve dış ve iç kontak çapları arasında sabit oran 2 olacak şekilde ayarlanmıştır. Üretilen LED'lerin, elektriksel olarak akım-voltaj, kontak direnci ve optik gücü Şekil 3.8'de verilen parametre analiz ve optik küre sistemi ile ölçülmüştür.



Şekil 3.9 : Ters ve ters olmayan LED çip'lerin 3 volt gerilim uygulandıktan sonra elde edilen görünür ışıkları a) LED-A b) LED-B ve c) Paketlendikten sonra toplam gücün ölçüldüğü optik küre.

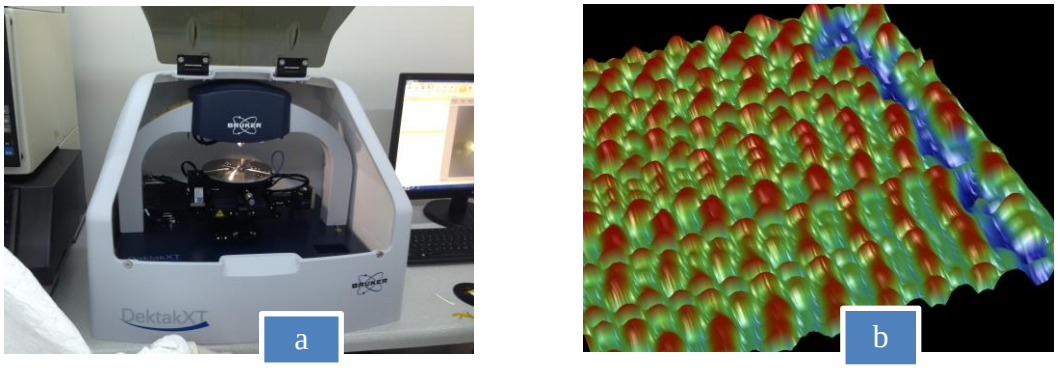
LED-A ve LED-B optiksel ve elektriksel ölçümlerini yapmadan önce paketleme işlemi yapılmış ve ardından optik küre'ye sırasıyla yerleştirilmiştir. Sürekli dalga (cw) olarak ölçüm alındığı için 500 mA değerinde akım sınırlaması yapılmıştır. Aksi takdirde yüksek akımlara ulaşıp LED'in aşırı ısınması sonucunda aygıt bir süre sonra yanmaktadır. Ardından -1 ile 8 Volt arasında 0,5 volt artırım yaparak akım-voltaj grafikleri elde edilmiştir. (Şekil 3.9).



Şekil 3.10 : LED-A ve LED-B'nin elektroluminesans spektrumu

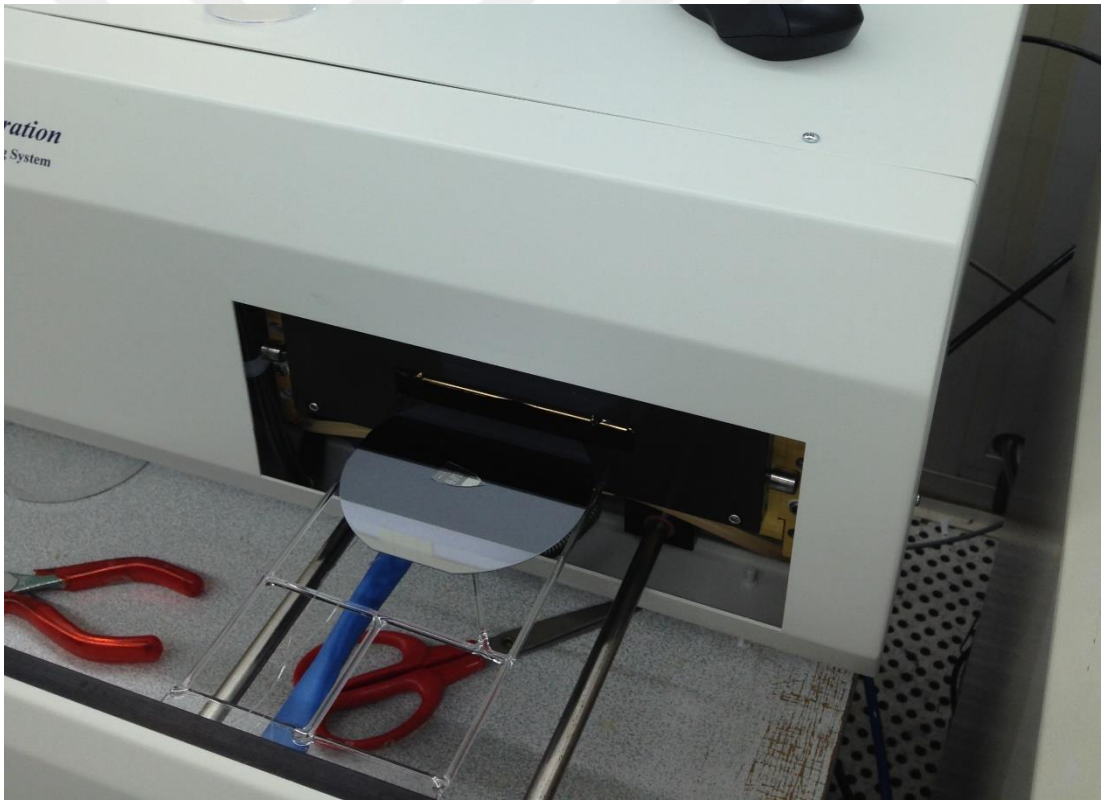
Işığın görülmeye başladığı noktada ise elektroluminesans pik'i oluşmakta pik'in oluştuğu nokta bize dalga boyu'nu göstermektedir. Dalga boyu 454,63 nm olarak gözlemlenmiştir. (Şekil 3.10).

Mekanik profilometre ile ise; 2 nm hassasiyete kadar kaplanan tüm metal film, fotorezist vb. gibi malzemelerin kalınlıkları ölçülmektedir. 2 µm kalınlığındaki uç, numune yüzeyinde x-y düzleminde hareket ederek tepe ve çukur kısımlara girip çıkarak kalınlığı yazılım yardımıyla kullanıcıya aktarır. Ayrıca üç boyutlu kalınlık taraması yapmak da mümkündür. Dektak profilometre kullanılarak, fotorezist ve metal kaplama kalınlıkları ile aşındırma derinlikleri ölçülerek test edilmiştir. (Şekil 3.11).



Sekil 3.11 : a) Mekanik profilometre ve b) Örnek ölçüm görüntüsü

InGaN ve p-GaN katmanları Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) cihazı kullanılarak Cumhuriyet Üniversitesi'nde büyütülmüş ve büyütülen katmanların analizi Hızlı Isıl Tavlama (RTA) adı verilen cihaz kullanılarak ve farklı sıcaklıklarda proses edilerek elde edilmiştir. (Şekil 3.12)



Şekil 3.12 : RTA (Hızlı Isıl Tavlama) cihazı

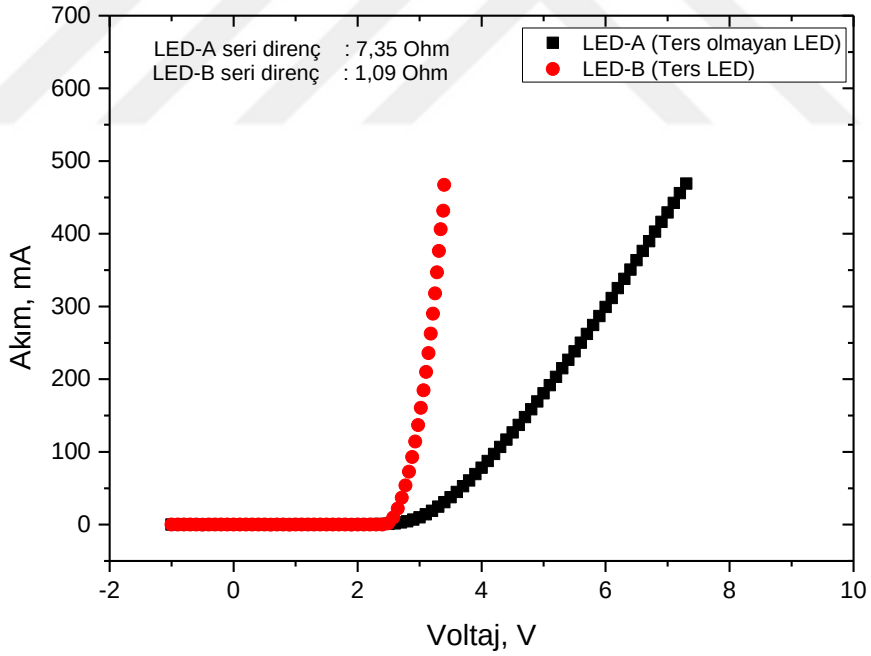
Yaşlandırma (ömür) testi ise FLIR marka termal kamera kullanılarak belli zaman aralıklarında aygıt sıcaklığı ölçülerek yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DEĞERLENDİRME

4.1 Akım-Voltaj Grafiği

LED-B'nin voltaj ve seri direnci Şekil 4.1'de gösterildiği gibi LED-A'dan daha düşük elde edilmiştir. Aktif bölgeden gelen ısının ters paketleme yapılarak en aza indirilmesi ve aynı zamanda yan duvarlardan gelen sızıntı akımının pasivasyon yapılarak giderilmesiyle LED-B'nin akım voltaj karakteristiğinin iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada önerilen Ni/Au ve Ni/Ag ohmik kontak ve yansıtıcı aynalı LED-B'nin, yüksek güvenilirlik ve düşük çalıştırma akımı gerektiren LCD panellerin arka aydınlatması gibi uygulamalarda daha uygun olacağı gösterilmiştir [36].

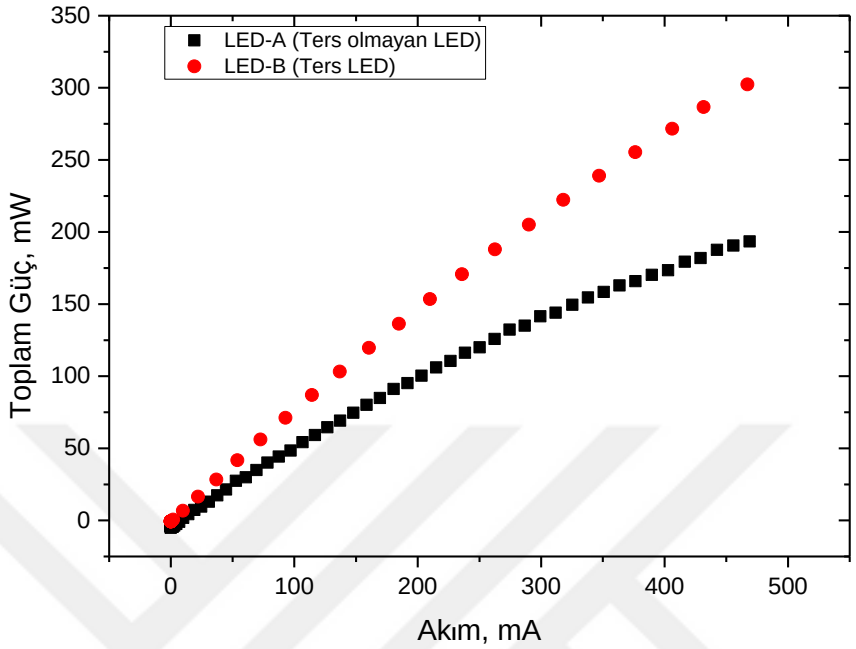


Şekil 4.1 : LED-A ve LED-B LED çip'lerinin akım-voltaj grafiği

4.2 Akım-Toplam Güç Grafiği

Toplam güç ve uygulanan akım arasındaki ilişki Şekil 4.2'de verilmiştir. Burada, LED-B'nin toplam gücünün LED-A'dan %47 daha fazla olduğu gösterilmiştir. Toplam gücün artırılmasındaki olaylardan biri ITO geçirgen film yerine, gümüş (Ag)

reflektör kullanılmış olmasıdır. LED-A'nın gücünün düşük olmasının sebebi ise Ni/Au/ITO metal katmanının, ışığın aktif bölgeden yayılıma başladıktan sonra bir miktar ışığı soğurmasıdır [37].

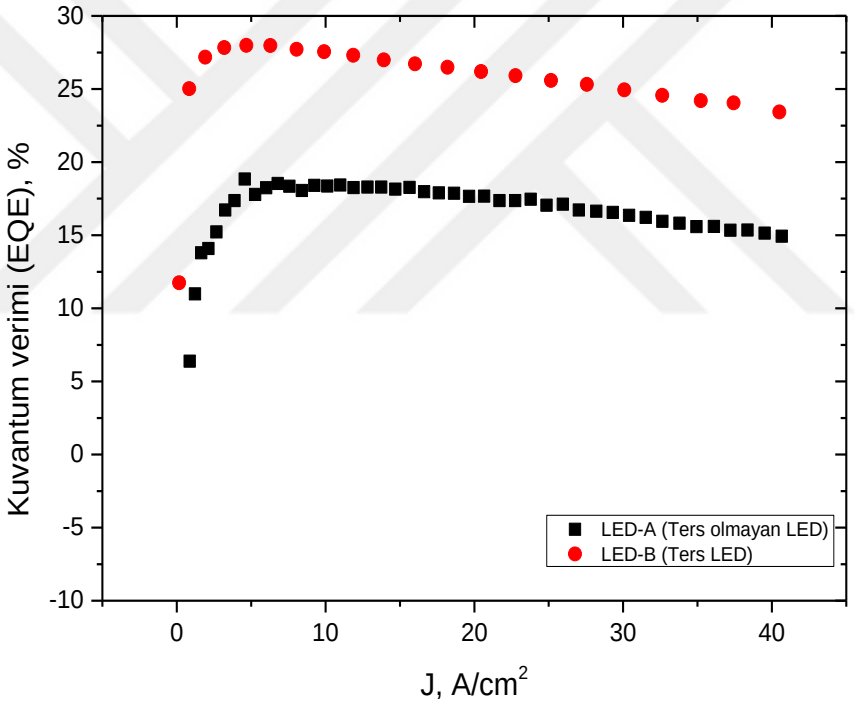


Şekil 4.2 : LED-A ve LED-B toplam güç-uygulanan akım grafiği

Bundan dolayı bir miktar ışık kaybı yaşanarak toplam güç de azalma meydana gelmektedir. Ters çip fabrikasyonunda ise; ışığın gümüş yardımı ile büyük bir kısımının örneğin safir tarafından çıkması sağlanarak, herhangi bir soğurucu yüzeye maruz kalmadan dışarıya çıkarılması sağlanmaktadır [38]. Ayrıca, çipin aktif bölge tarafı paket üzerindeki soğutucu yüzeye temas ettiği için, kuvantum kuyularda üretilen ısı dağılmakta ve bu soğutmanın verdiği etki ile çipin ömrü uzatılmaktadır. LED-A için, Ni/Au metalik filmler mümkün olduğunca inceltilmiştir. Bu durum, ışığı daha fazla çıkarmak için avantaj getirmekte, ancak kalınlığın az olması p-GaN yüzeyine olan kontak direncini artırıcı bir etki yapmaktadır [39]. Şekil 4.2'de LED-B'nin çıkış gücünün LED-A'dan daha yüksek olduğunu açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu durum, LED-B'nin üzerinde herhangi bir bağlama pedi veya telinin bulunmamasından dolayı avantaj sağlamaktadır. Safir alttaş ve GaN'nin kırıcılık indislerinin sırasıyla 1,7 ve 2,5 olduğu da hesaba katıldığında, LED-B'de üretilen fotonlar, GaN/hava ile karşılaştırıldığında safir/hava arayüzünden kaçış konisini daha kolay bulabilmektedir [40].

4.3 Akım Yoğunluğu-Dış Kuvantum Verimi Grafiği

Dış kuvantum verimi yayılan fotonların uyaran fotonlara oranıdır ve bunu hesaplarken toplam güç, elektronun enerjisi ve ışığın dalgaboyunun çarpımının, plank sabiti, akım ve ışık hızının çarpımına bölünmesiyle elde edilmektedir. Şekil 4.3'de LED-A ve LED-B arasında bu derece fark oluşmasının sebebi, uygulanan aynı akımda LED-B çip'inden daha fazla optik güç elde edilmesi ve daha verimli hale gelmesidir. Bir diğer önemli parametre ise LED'in veriminin akım yoğunluğu boyunca ne kadarlık bir düşüşe uğradığıdır. Genellikle bu düşüşün %50'den fazla olmaması istenmektedir [41]. Burada akım yoğunluğu, uygulanan akım değerinin fabrikasyonu ve tasarımı yapılan LED çip'in uygulandığı alana bölünmesiyle elde edilmektedir.



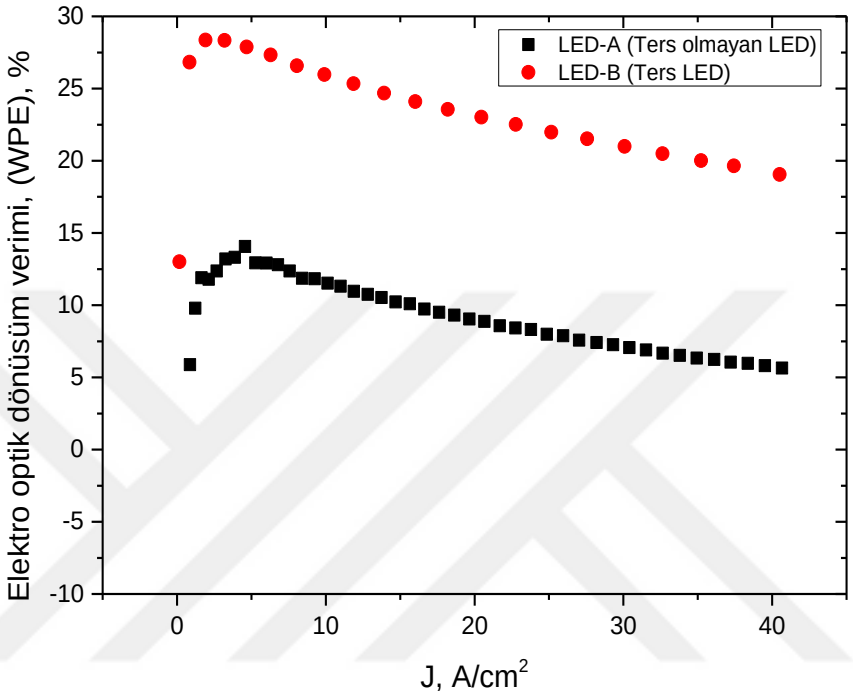
Şekil 4.3 : Dış kuvantum verimi (EQE) – Akım yoğunluğu grafiği

4.4 Akım Yoğunluğu-Elektro Optik Dönüşüm Verimi Grafiği

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, LED-B için elektro optik dönüşüm verimliliği LED-A'dan oldukça yüksektir. Ancak, LED-B ve LED-A için dış kuantum verimliliği, elektro optik dönüşüm verimliliği ile karşılaştırıldığında, elektrik enerjisinden üretilen ısınma nedeniyle, elektro optik dönüşüm veriminin akım yoğunluğuna bağlı

olarak düşüşü, dış kuvantum verimi düşüşünden daha sert olduğu gözlemlenmiştir [42].

Elekro optik dönüşüm verimi hesaplanırken, optik küre yardımıyla ölçülen optik güç yerine akım ve voltajın çarpımından elde edilen elektriksel güç kullanılmaktadır. Bu durum, ısınmaya yol açtığı için verim azalması daha fazla olmaktadır.



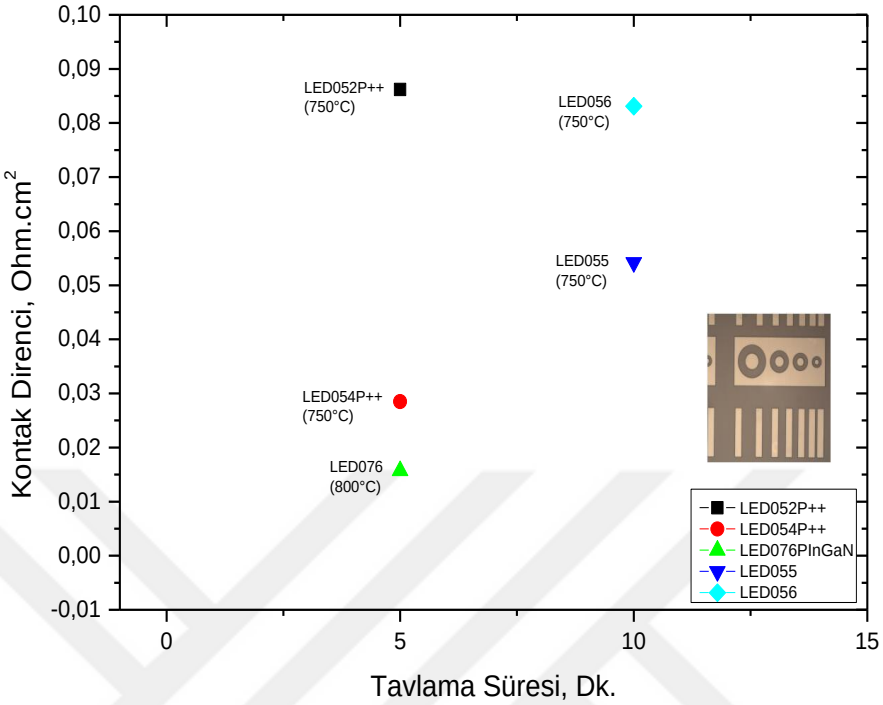
Şekil 4.4 : Elektro Optik Dönüşüm Verimi (WPE) – Akım yoğunluğu grafiği

Günlük hayatta kullanılan LED aygıtlar elektriksel olarak çalıştırıldığı için hesaba katılacak en sağlıklı veri elektro optik dönüşüm verimi olmalıdır. Elektro optik dönüşüm veriminin yüksek olması bize uzun ömürlü LED'ler sunmaktadır. Dış kuvantum verimi ise bize LED'in fiziksel kalitesini göstermektedir.

4.5 p-GaN ve p-InGaN Katmalarının Analizi

Ermaksan Optoelektronik Ar-Ge Merkezi tarafından farklı özelliklerde MOCVD cihazında büyütülmeleri yapılan LED çip'ler üzerinde 750 °C de N_2 (Azot) ortamında ısıl işlem uygulanarak tavlanmış ve sonuçları Şekil 4.5'de verilmiştir. En düşük kontak direnç değeri p-InGaN katmanı ile büyütülen LED076 örneğinde elde edilmiş ve tez kapsamında fabrikasyonu yapılan örneklere uygulanmıştır [43]. Bu sonuç, Işık Saçan Diyot (LED) yapılarının en üst katmanında InGaN tabakası kullanımının

gerekliliğini göstermiştir. Ayrıca, InGaN katmanı kullanılarak bu yüzeyde Ni/Au metallerinin oluşturduğu ohmik kontak daha düşük elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : p-InGaN ve p-GaN katmanlarının analiz grafiği

4.6 Spesifik Kontak Direnç Analizi

Ters çip LED-B ve ters olmayan çip LED-A kontak direnci parametre analiz sistemi ve keithley marka akım-voltaj kaynağı cihazları kullanılarak iletim hattı yöntemi (TLM) ile ölçülmüştür ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Her iki LED için de, n-GaN yüzeyine yapılan Ti/Al/TiB_2/Au metalizasyonun ohmik kontak dirençleri birbirlerine oldukça yakın elde edilmiştir fakat p-InGaN yüzeyine p-tipi metalizasyon kontak direnci indiyum tin oksit (ITO) [44] ve gümüş (Ag) metallerinin kullanımından dolayı farklı elde edilmiştir. Daha kalın Ni/Au (7,5nm/7,5nm) ve daha sonra tavlama kullanması nedeniyle, LED-B'nin kontak direnci LED-A'dan çok daha düşük elde edilmiştir (Çizelge 4.1).

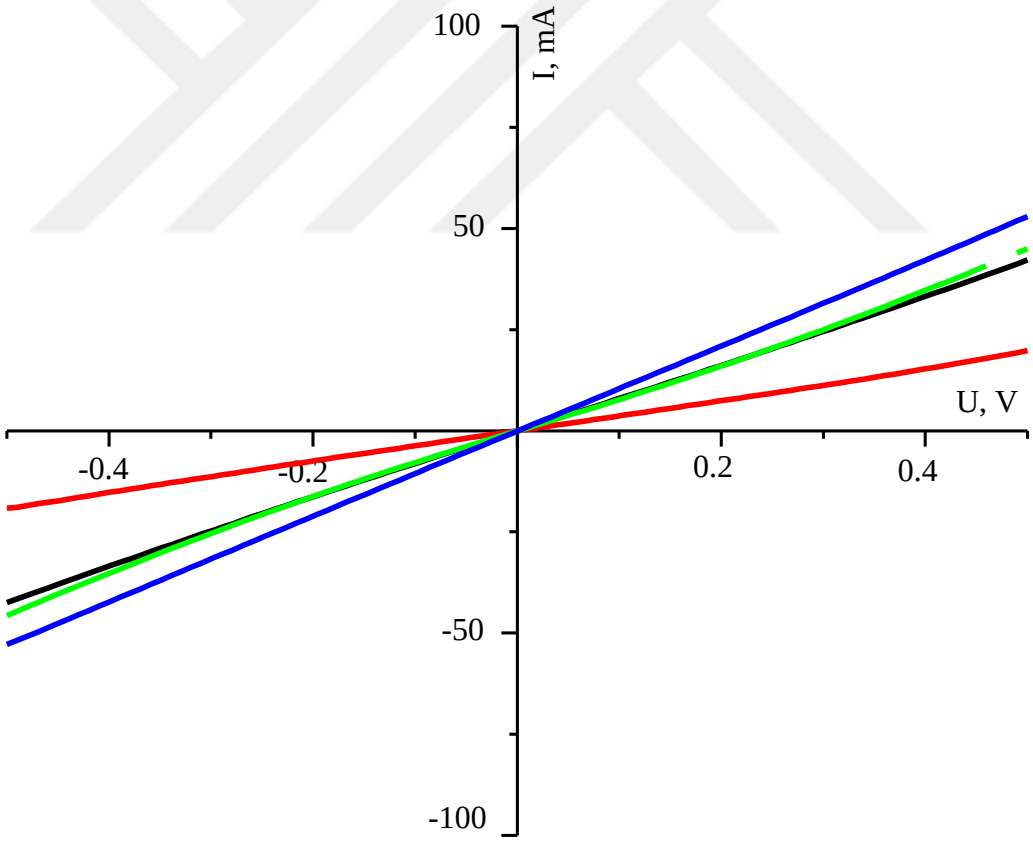
n ve p tipi malzemelerin ohmik kontak direnç değerleri ne kadar düşük elde edilirse LED çip'ler o kadar düzgün çalışmakta, az ısınmakta ve uzun ömürlü olmaktadır. Genellikle akademik çalışmalarda gösterilen en düşük ohmik kontak değerleri sırasıyla n tipi için 10^{-7} ve p için 10^{-4} Ohm.cm^2 değerleridir. Bu tez kapsamında elde

edilen sonuçlar da n tipi ve p tipi ohmik kontak açısından literatürle oldukça paralel sonuçlar elde edilmiştir [45].

Çizelge 4.1 : Ters ve ters olmayan LED çip'lerin kontak dirençleri

Ters çip olmayan	Ohm.cm^2	**Ters çip**	Ohm.cm^2
Ti/Al/TiB_2/Au to n-GaN	1,74.10^{-6}	Ti/Al/TiB_2/Au to n-GaN	7,72.10^{-7}
Ni/Au/ITO to p-InGaN	6,5.10^{-2}	Ni/Au/Ag to p-InGaN	4,81.10^{-3}
Ti/Au to ITO	1,8.10^{-6}	Cr/Au to Ag	4,26.10^{-6}

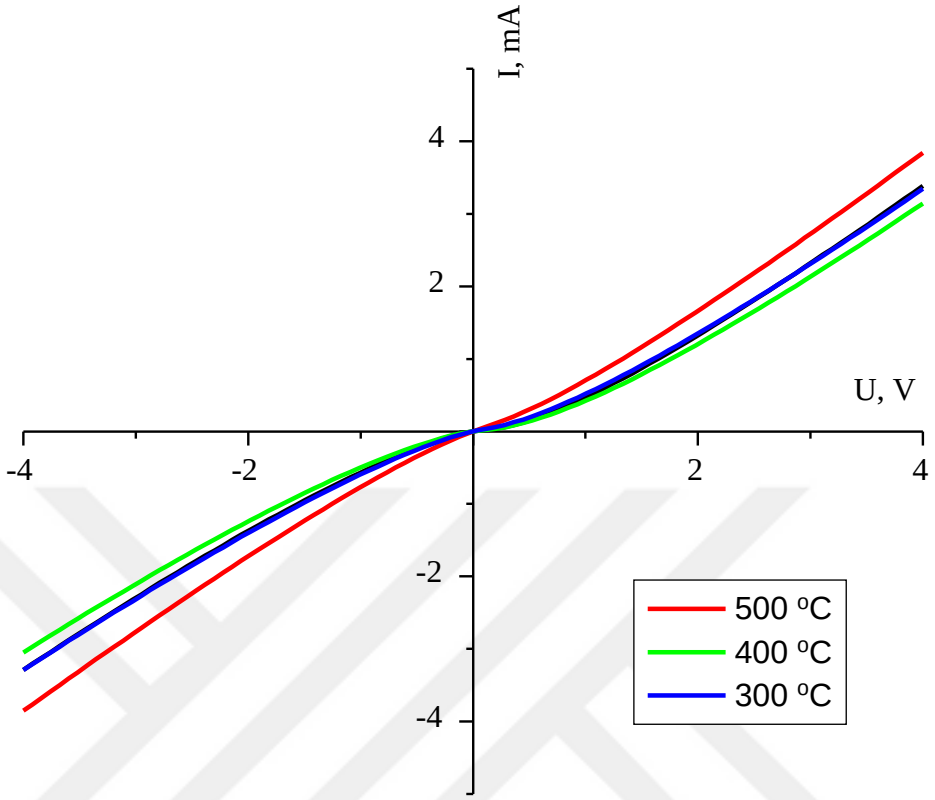
Ön hızlı ısıl işlem görmüş Ti/Al/Ti/B_2/Au dairesel İletim Hattı Metod'u (TLM) yapılarıyla ölçülen akım-voltaj eğrilerinde doğrusal akım-voltaj davranışı gözlemlenmiş ve düşük dirençli ohmik kontaklar elde edilebilmiştir. (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : 850 °C'de 1 dk. N_2 ortamında tavlanan n-GaN ohmik kontak grafiği

LED çip'lerde akım-voltaj davranışı ne kadar doğrusal ise difüzyon sayesinde elektriksel iletkenlik o kadar fazladır ve yüzey ile iyi kontak yapmaktadır. Bu eğrinin

doğrusal olmaması durumlarında ise metal kalınlıkları, türleri ve Hızlı Isıl Tavlama (RTA) aşamaları ile çalışılarak denemeler yapılmaktadır.



Şekil 4.7 : p-InGaN Ni/Au metallerinin ohmik kontak eğrileri

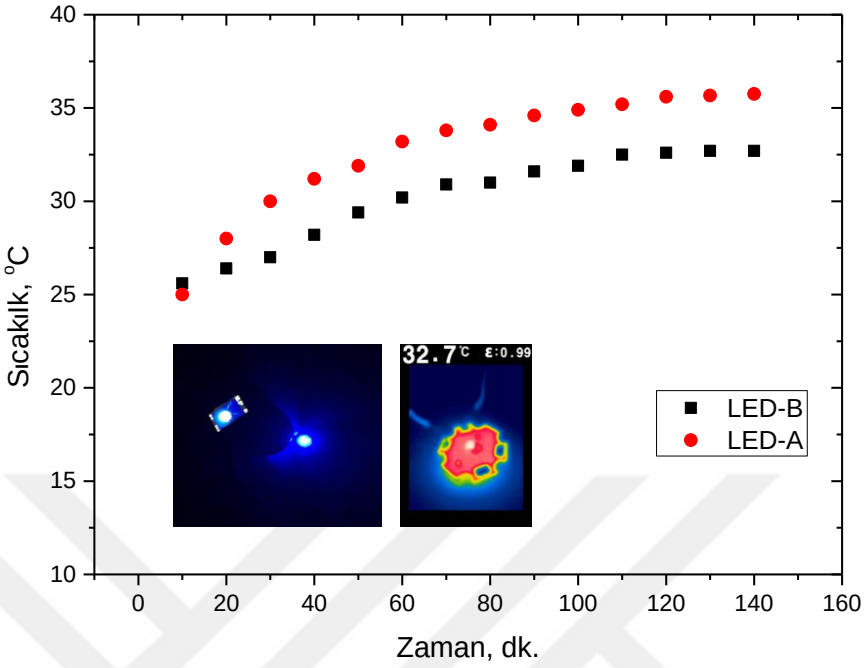
HF asidi ile yüzey oksit temizliği yapılan ve ısıl işlemlerinde azot kullanılan 300, 400 ve 500 °C de ısıl işlem uygulandıktan sonra elde edilen akım-voltaj eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir.

En iyi sonuç 500 °C de ısıl işlem görmüş örnek vermiştir ve tez çalışması için fabrikasyonu yapılan LED-A ve LED-B örneklerine uygulanmıştır.

4.7 Termal Kamera İle LED Çip'lerinin Isıl Analizi

LED-A ve LED-B örneklerinin paketlendikten sonra ne kadar ısındığını anlamak amacıyla 350 mA sabit akım uygulanarak termal kamera (FLIR) yardımıyla test edilmiştir. LED-A örneği pakete safir yüzey altta olacak şekilde monte edilip altın tel bağlanarak paketlenmiştir. LED çip'in GaN/InGaN kuvantum kuyulu aktif bölge tarafı paketteki aluminyum soğutma tabakasına temas etmemektedir, ve bu durum LED'in ısınmasına yol açmaktadır. LED-B örneği ise ters çevrilip pakete aktif bölge altta olacak şekilde paketlendiğinden dolayı ısınma LED-A örneğine göre biraz daha

az olmuştur. (Şekil 4.8). Her iki örnekte de ısınma grafiğine bakıldığında, belli bir süre sonrra (yaklaşık olarak 100 dakika) sıcaklık sabitlenmeye başlamaktadır [46].



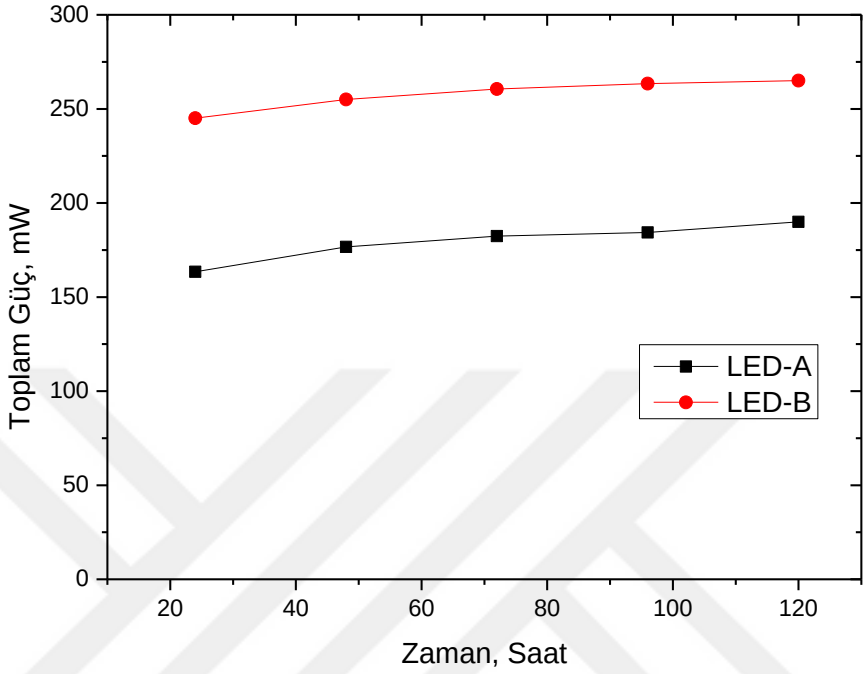
Şekil 4.8 : LED-A ve LED-B için termal kamera analiz grafiği

LED-A ve LED-B örneklerinin paketlendikten sonra ne kadar ısındığını anlamak amacıyla 350 mA sabit akım uygulanarak termal kamera (FLIR) yardımıyla test edilmiştir [47]. LED-A örneği pakete safir yüzey altta olacak şekilde monte edilip altın tel bağlanarak paketlenmiştir. LED çip'in GaN/InGaN kuvantum kuyulu aktif bölge tarafı paketteki aluminyum soğutma tabakasına temas etmemektedir ve bu durum LED'in ısınmasına yol açmaktadır [48]. LED-B örneği ise ters çevrilip pakete aktif bölge altta olacak şekilde paketlendiğinden dolayı ısınma LED-A örneğine göre biraz daha az olmuştur. (Şekil 4.8). Her iki örnekte de ısınma grafiğine bakıldığında, belli bir süre sonrra (yaklaşık olarak 100 dakika) sıcaklık sabitlenmeye başlamaktadır [46].

4.8 Yaşlandırma (Ömür) Testi

LED-A ve LED-B örnekleri 350 mA akım altında 120 saat boyunca açık bırakılmış ve belirli periyodlar ile toplam gücü optik küre yardımıyla ölçülmüştür. Toplam güç birinci saat ölçüldüğünde LED-A için 162 mW iken yüzyirminci saat sonunda 186 mW değerine ulaşmıştır. (Şekil 4.9). LED-B için ise 239 mW iken yüzyirminci saat sonunda 265 mW değerine ulaşmıştır. Bu durumun açıklaması olarak belli süre

içerisinde LED ısınmaktadır ve metal kontaklar üzerinde tavlama etkisi meydana getirmektedir. Bu da kontak dirençlerini azaltarak daha iyi kontak alınmasını ve toplam gücün artırılmasını sağlamaktadır. Optik gücün yüzyirmi saatten çok daha uzun süreli test zamanının ardından yavaş yavaş azalmaya başlaması beklenmektedir.



Şekil 4.9 : LED-A (normal çip) ve LED-B (ters çip) için ömür testi grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ters çip (LED-B) ve ters olmayan çip (LED-A)'nın fabrikasyon aşamalarındaki farklılıklar belirtilerek bu farklılıklardan kaynaklı deneysel sonuçlardan elde edilen çıktılar incelenmiş ve ters çip (LED-B) üretiminin, toplam güç ve dış kuantum verimliliği açısından %47 ve %49 oranlarında ters olmayan çip LED-A'ya göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. LED-B tasarımında elde edilen efektif alanın (%85), LED-A tasarımından (%80) daha fazla olması, dışarı çıkan ışık gücünün artırılmasında ve daha kalın Ni/Au tabakası kullanılması da LED-B'nin seri direncinin LED-A'nın seri direncinden yedi kat daha düşük elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, ters çip LED'lerin düşük bir çalışma voltajı (2,5 volt) ile ışık yaymaya başladığı ve uzun ömür sağlayabileceği gösterilmiştir. Ters LED çip (LED-B) örneğinde ışığın fazla çıkmasının sebeplerinden birtanesi de kontak metalleri tarafından ışığın çıkmasının engellenmemesidir. Bu durum LED-A örneğinde gözlemlenmiş ve ışığın bir kısmı metal kontaklar tarafından soğurulmuş, verimi ve optik gücü azaltmıştır. Ayrıca bu tez, 1992 yılında GaN tabanlı ilk mavi LED yapımından sonra dünya çapında hızla gelişen LED üretim teknolojilerini kazanmanın bilincinde GaN tabanlı LED konusunda birçok araştırmacının yetişmesine, bilgi birikiminin oluşmasına ve akademik çıktılara da yol açmıştır. Kazanımlar arasında dünya LED teknolojilerinin izlenmesi, LED pazarının anlaşılması, gittikçe genişleyen LED uygulamalarının öğrenilmesi ve bütün gizliliğe rağmen LED üreten şirketlerin faaliyetleri hakkında fikir sahibi olunması da gelmektedir. Dünya LED teknolojisi hızla evrimleşerek, bilim insanları sürekli yeni ürünler geliştirmektedirler. Dünya pazarlarındaki kıyasıya rekabete rağmen, kendine özgü tasarım, kalite ve ürün hacmini göz önüne alarak gelecekte yapılacak olan çalışmalarda ters LED çip yöntemi ile üretim yaparak; seri direnç, ısınma ve daha fazla optik güç elde etme açısından çok önemli avantaj sağlayacağı gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Chang, S. J., Chen, W. S., Lin, Y. C., Chang, C. S., Ko, T. K., and Y. P. Hsu, Y. P. (2006). Nitride-Based Flipchip Leds With Transparent Ohmic Contacts and Reflective Mirrors, *IEEE Trans Adv Package, 29*(3), 403–408.

[2] Arik, M., Weaver, S. (2005). Effect of Chip and Bonding Defects on The Junction Temperatures of High-Brightness Light-Emitting Diode, *Opt Eng*, *44*(11), 111 305-1–05-8.

[3] Chang, S. J., Chen, W. S., Shei, S. C., Ko, T. K., Shen, C. F., and Hsu, Y. P. et al. (2008). Highly Reliable High Brightness Gan-Based Flip Chip Leds, *IEEE Trans Adv Package, 30*(4), 752–757.

[4] Led Lambaların İcadı ve Kullanım Alanları. (2013). Erişim: 20 haziran 2018, https://www.bilgiustam.com/led-lambalarin-icadi-ve-kullanim-alanlari/

[5] Schubert, E.F. (2006). *Light Emitting Diodes.* Cambridge University Press; 2nd. Edition

[6] Let There Be Light, With Gallium Nitride. (2014). Erişim: 1 Temmuz 2018, https://engineering.ucsb.edu/~siddha/VonDollen_NobelPrize2014.pdf

[7] The 2014 Nobel Prize in Physics - Press Release. (2014). Erişim: 23 Haziran 2018, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html

[8] Nobel Prize in Physics With Light Emitting Diodes. (2014). Erişim: 24 Haziran 2018, https://www.aps.org/publications/apsnews/updates/nobel.cfm

[9] Blue LEDs Win Nobel Prize in Physics. (2014). Erişim: 07 Ekim 2017, http://www.sciencenews.org/article/blue-leds-win-nobel-prize-physics

[10] Nakamura, S., Harada, Y., Senoh, **M.** (1991). Light Emitting Diodes, *Appl. Phys. Lett. 58*, 2021-2023.

[11] Takeuchi, T., Sota, S., Katsuragawa, M., Komori, M., Takeuchi, H., Amano, H., Akasaki, **I.** (1997). Quantum-Confined Stark Effect due to Piezoelectric Fields in GaInN Strained Quantum Wells, *Jpn. J. Appl. Phys. 36*(1), 382-385.

[12] Hu, C., and Kuo, **Y. K.** (2013). Fabrication and Characterization of Flip-Chip Power Light Emitting Diode with Backside Reflector, *International journal of engineering and innovative tech (IJEIT) 3*(6), December 2013

[13] Morkoç, H. (1999). *Nitride Semiconductors and Devices.* (Springer, Berlin, 1999)

[14] Morkoç, H. (2008). *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices.* (Wiley, New York, 2008), Vol. 1.

[15] Schubert EF, Kim JK. (2005). Solid State Light Sources Getting Smart. *Science* (2005) 308-1274.

[16] Horn, R. H., Kuo, Y. W. (2012). Process Development of GaN Light Emitting Diodes with Imbedded Contacts, *Proc. SPIE 8484, Twelfth International Conference on Solid State Lighting and Fourth International Conference on White LEDs and Solid State Lighting*, (ss.848-406), 15 October.

[17] Nakamura, S., Senoh, M., Isawa, N., and Nagahama, **S.** (1995). High Brightness blue, green and yellow light emitting diodes with quantum well structure," *Jpn. J. Appl. Phys*, *34*(1), 799, July.

[18] Brinkley, S. E., Keraly, C. L., Sonoda, J., Weisbuch, C., Speck, J. S., Nakamura, S., and DenBaars, S. P. (2012). Chip shaping for light extraction enhancement of bulk c-plane light-emitting diodes, *Appl. Phys. Express 5*, 032104-1-032104-3.

[19] Kuang, H., Shi, A. H., Ying, L., Xiang, Q. Z., Mian, M. G., and Lu, L. (2014). The Effect of Chip Size on the Performence of GaN-Based LED Chips, *Advanced Materials Research.* 971-973. 1180-1182.

[20] Guo, D., Wang, L., Liu, Z., Liang, M., Fan, M., Wang, G., Wang, L., Li, J. (2008). Thermal Analysis of High Power Gan-Based Light Emitting Diode, *Proc. SPIE 6841, Solid State Lighting and Solar Energy Technologies*, (ss.68-410), 4 January.

[21] Sheremet, V., Genç, M., Geshlaghi, N., Elçi, M., Sheremet, N., Aydınlı, A., Altuntaş, I., Ding, K., Avrutin, V., Özgür, Ü., Morkoç, **H.** (2018). Two Step Passivation for Enhanced InGaN/GaN Light Emitting Diodes with Step Graded Electron Injectors, *Superlattices and Microstructures*, *113*(1), 623-634.

[22] Schubert, E.F. (2006). *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.

[23] Kim, H. (2010). Light Emitting Diode Materials, *Materials Science in Semiconductor Processing 13*(1), 180–184.

[24] McClintock, **R.** (2017). Investigation of LEDs, *J Laser Opt Photonics*, *4*(1*)*, (1-4).

[25] Lee, T. X., Go, K. F., Chung, T. Y., Sun, C. C. (2007). Light Extraction Analysis for Gan-Based Leds, *Proc. SPIE 6473, Gallium Nitride Materials and Devices II*, 64731P, 8 February.

[26] Jin, G.M., Choi, I.G., Park, J.C., Jeon, S.K., Park, E.H. (2015). High Performance Gan Based Blue Flip-Chip Light-Emitting Diodes, *Proc. SPIE 9571, Fourteenth International Conference on Solid State Lighting and LED-based Illumination Systems*, 95710S, 8 September.

[27] Chang, L. B., Shiue, C. C., Jeng, **M. J.** (2009). High Reflective P-Gan/Ni/Ag/Ti/Au Ohmic Contacts for Flip Chip Light Emitting Diode (FCLED) Applications, *App. Surf. Sci*, *255*(1), 6155-6158.

[28] Zhou, S., Zheng, C., Lv, J., Gao, Y., Wang, R., Liu, S. (2017). GaN Based Optic Devices, *Optics & Laser Technology, 92*(1), 95-100.

[29] Huang, J. J., Kuo, H. C., and Shen, S. C. (2008). *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs), 2*, 94-101.

[30] Schubert, E.F. (2006). *Light-emitting diodes, 2-nd ed.*, Cambridge University Press, Cambridge.

[31] Huang, J. J., Kuo, H. C., and Shen, S.C. (2008). *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs),* (Second Edition), ISBN: 978-0-08-101942-9.

[32] Chang, L. B., Shiue, C. C., Jeng, **M. J.** (2009). High Reflective P-Gan/Ni/Ag/Ti/Au Ohmic Contacts for Flip Chip Light Emitting Diode (FCLED) Applications, *App. Surf. Sci., 255*, 6155-6158.

[33] Nakamura, S., Senoh, M., Isawa, N., and Nagahama, **S.** (1995). High Brightness Blue, Green and Yellow Light Emitting Diodes with Quantum Well Structure, *Jpn. J. Appl. Phys., 34*, L799, July.

[34] Huang, J. J., Kuo, H. C., and Shen, S.C. (2008). *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs),* (Second Edition), ISBN: 978-0-08-101942-9.

[35] Schubert, E.F. (2006). *Light-emitting diodes, 2-nd ed.,* Cambridge University Press, Cambridge.

[36] Sheremet, V., Genç, M., Geshlaghi, N., Elçi, M., Sheremet, N., Aydınlı, A., Altuntaş, I., Ding, K., Avrutin, V., Özgür, Ü., Morkoç, H. (2017). The Role of ITO Resistivity On Current Spreading and Leakage in InGaN/GaN Light Emitting Diodes, *Superlattices and Microstructures,* 111, 1177-1194.

[37] Schubert, E.F. (2006). *Light-emitting diodes, 2-nd ed.,* Cambridge University Press, Cambridge.

[38] Li, C. K., and Wu, Y. R. (2012). Study on The Current Spreading Effect and Light Extrantion Enhancement of Vertical GaN/ InGaN LEDs, *IEEE Trans. Electron Devices 50*, 400-406.

[39] Hu, C., and Kuo, Y. K. (2013). Fabrication and Characterization of Flip-Chip Power Light Emitting Diode with Backside Reflector, *International journal of engineering and innovative tech, 3*(6), December.

[40] The Photon, LEDs and external quantum efficicency (EQE). (2015). Erişim: 19 Haziran 2018, http://electronics.stackexchange.com/questions/167001

[41] Yonkee, B. P. et al. (2016). Silver free III-nitride flip chip light-emitting-diode with wall plug efficiency over 70% utilizing a GaN tunnel junction, *Appl. Phys. Lett., 109*, 104-191.

[42] Hu et al., (2015). Fabrication and characterization of GaN-based light-emitting diodes without pre-activation of p-type GaN, *Nanoscale Research Letters*, 10-85,. doi: 10.1186/s11671-015-0792.

[43] Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M. (1994). Candela-Class High-Brightness Ingan/Algan Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes, *Appl Phys Lett. 64*, 1687.

[44] Li, C. K., and Wu, Y. R. (2012). Study on The Current Spreading Effect and Light Extrantion Enhancement of Vertical GaN/ InGaN LEDs, *IEEE Trans. Electron Devices 50*, 400-406.

[45] Greco, G., Iucolano, F., Roccaforte, F. (2016). Ohmic Contacts to Gallium Nitride Materials, *Applied Surface Science ,10,* 1016.

[46] Bulashevich, K. A., Evstratov, I. Y., Mymrin, V. F., and Karpov, S. Y. (2007). Current Spreading and Thermal Effects in Blue LED Dice, *Phys. Status Solidi C 4*, 45-48.

[47] Tsai, C. C., Yue, C. F., Lee, Y. C., Fu, K. J., Cheng, W. H. (2015). Packaging of Phosphor-Converted White Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting, *Proc. SPIE 9359, Optical Components and Materials XII,* 935924, 16 March.

[48] Lin, Y., Gao, Y. L., Lu, Y. J., Zhu, L. H., Zhang, Y., and Chen, Z. (2012). Study of Temperature Sensitive Optical Parameters and Junction Temperature Determination Of Light-Emitting Diodes, *Appl. Phys. Lett. 100,* 202108-1-202108-4.

EKLER

EK A : Mavi LED Çip Geliştirilmesinde Kullanılan Proses Aşamaları

Genel temizlik	• Aseton, metanol ve izopropanol ile 3'er dakika titreterek temizlik
Oksit temizliği	• (HCl:DI Su) ile 1:1 oranında. yüzey oksit temizliği
Fotolitografi	Spin kaplama ile 1,5 mikron AZ5214 fotorezizst kaplama • Isıl işlem 110°C 1 dk. • Maske hizalama ve uv • Develop H_2O:AZ400K=4:1 • Isıl işlem 125 ºC 3 min.
Oksit temizliği	• H_2O:HCl=1:1, 10 dakika; Oda sıcaklığı
ICP aşındırma için Ni maske kaplama	• Püskürtme ile Ni kaplama kalınlık=100 nm • Ar ile • Oda sıcaklığı • 0.5 A/s • Lift-off (Asetone, Izopropanol)
ICP aşındırma	• BCl_3:Cl_2=25:10 sccm, • RF 100 W, • ICP 600 W; • T=30 °C • Aşındırma derinliği ~1000 nm
	• Ni maskenin kaldırılması HCl: HNO_3: H_2O=1:1:3
Genel temizlik	• Aseton, metanol ve isopropanol ile 3'er dakika titreterek temizlik
p-GaN aktivasyon	• 750°C 5 min in N_2
PECVD SiO_2 büyütme	• T= 250 ºC, • 180 sccm 2% SiH_4/N2 + 720 sccm N_2O • 5 dk.

Fotolitografi	• Spin kaplama ile 1,5 mikron AZ5214 fotorezizst kaplama • Isıl işlem 110 °C 1 dk. • Maske hizalama ve UV • Develop H_2O:AZ400K=4:1 • Isıl işlem 125 ºC 3 min.
Etching of SiO_2	• BOE
Genel temizlik	• Aseton, metanol ve izopropanol ile 3'er dakika titreterek temizlik
Fotolitografi	• Spin kaplama ile 1,5 mikron AZ5214 fotorezizst kaplama • Isıl işlem 110 °C 1 dk. • Maske hizalama ve uv • Develop H_2O:AZ400K=4:1 • Isıl işlem 125 ºC 3 min.
n kontak metalizasyon	• e-demeti buharlaştırma Ti/Al/x/Au, (x= Ni, TiB_x) • Lift off (Acetone, Izo-propanol)
RTA	• 850 ºC • N_2 1 dk.
Fotolitografi	• Spin kaplama ile 1,5 mikron AZ5214 fotorezizst kaplama • Isıl işlem 110 °C 1 dk. • Maske hizalama ve uv • Develop H_2O:AZ400K=4:1 • Isıl işlem 125 ºC 3 min. • p- kontak metalizasyonu Ni/Au
RTA	• 500 °C • O_2/N_2 5dk.
Yansıtıcı katman ve kontak pad buharlaştırma	• e-demeti buharlaştırma Ag (100 nm) Ters Çip • ITO (120 nm) Ters Olmayan Çip • Lift off (Aseton, Izopropanol) • Kontak pad litografi, e-demeti buharlaştırma (Ti/Au) • Lift-off (Aseton ve isopropanol)
RTA	• 500 °C • 30 s • N_2

Şekil A.1 : Mavi LED Çip Geliştirilmesinde Kullanılan Proses Aşamaları

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ
VESİKALIK
FOTOĞRAF

Ad-Soyad **:** Muhammet S. GENÇ

Doğum Yeri **:** Denizli

E-posta **:** gencmuhammet@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2013, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği (ingilizce), 70.4/100
- **Yüksek Lisans** **:** 2018, Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 3.21/4.00

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ermaksan Optoelektronik Ar-Ge Merkezi
  Ar-Ge Mühendisi, Nilüfer/BURSA, 2014-Halen
- Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi-UNAM
  Araştırmacı, Çankaya/ANKARA, 2017-2018
- Bilkent Üniversitesi İleri Araştırmalar Laboratuvarı-ARL
  Araştırmacı, Çankaya/ANKARA, 2015-2017

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- V. SHEREMET, **M. GENC**, M. ELCI, N. SHEREMET, A. AYDINLI, I. ALTUNTAS, K. DING, V. AVRUTIN, U. OZGUR & H. MORKOC, "**The role of ITO resistivity on current spreading and leakage in InGaN/GaN light emitting diodes,**" SUPERLATTICES AND MICROSTRUCTURES, 2017, 0749-6036, 111, 1177,1194
- V. SHEREMET, **M. GENC**, N. GHESHLAGHI, M. ELCI, N. SHEREMET, A. AYDINLI, I. ALTUNTAS, V. AVRUTIN, H. MORKOC, K. DING & U. OZGUR, "**Two-step passivation for enhanced InGaN/GaN light emitting diodes with step graded electron injectors**," SUPERLATTICES AND MICROSTRUCTURES, 2018, 0749-6036, 113, 623-634

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **"GaN Tabanlı Mavi LED Çip Üretim Süreçleri"**, **Seminer (2017)**, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi.