

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**InGaN/GaN IŞIK YAYAN DİYOTLARIN KUANTUM
VERİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

NURİ CAN

BALIKESİR, ARALIK - 2016

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**InGaN/GaN IŞIK YAYAN DİYOTLARIN KUANTUM
VERİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

NURİ CAN

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali TEKE (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Sibel GÖKDEN

Prof. Dr. Seydi DOĞAN

Doç. Dr. Mustafa GÜNEŞ

Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

BALIKESİR, ARALIK - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

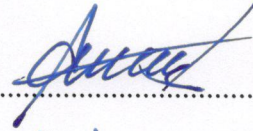
Nuri CAN tarafından hazırlanan “InGaN/GaN IŞIK YAYAN DİYOTLARIN KUANTUM VERİMLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 16.12.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

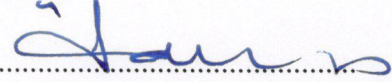
Danışman

Prof. Dr. Ali TEKE



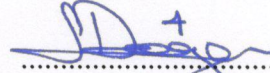
Üye

Prof. Dr. Sibel GÖKDEN



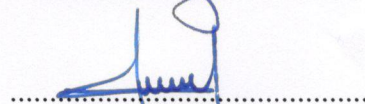
Üye

Prof. Dr. Seydi DOĞAN



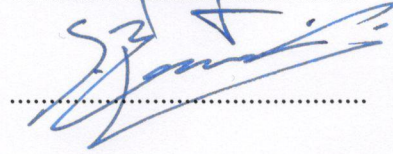
Üye

Doç. Dr. Mustafa GÜNEŞ



Üye

Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1059B141300627 başvuru nolu proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

**InGaN/GaN IŞIK YAYAN DİYOTLARIN KUANTUM VERİMLERİNİN
ARAŞTIRILMASI
DOKTORA TEZİ
NURİ CAN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ TEKE)**

BALIKESİR, ARALIK - 2016

Bu tez çalışmasında InGaN/GaN hetero ve kuantum yapılı ışık yayan diyotların kuantum verimliliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Buna yönelik olarak, büyütme yaklaşımlarının ve yapısal tasarımların kuantum verimliliği üzerine etkiyen temel faktörleri belirlemek ve tanımlamak amacıyla dört farklı örnek grubu incelenmiştir. İlk olarak, InGaN/GaN kuantum yapılarında delta-katkılı InGaN kuantum bariyerler kullanılarak tabaka kalitesinden ödün verilmeden aktif bölge içerisindeki deşik konsantrasyonunu arttırmak suretiyle deşik enjeksiyonunu verimliliğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. İkinci olarak, 1,5, 2 ve 3 nm InGaN kuantum kuyu kalınlıklarına sahip üç farklı ışık yayan diyotun sıcaklığa bağlı rekombinasyon dinamikleri, aktif bölge boyutsallığı ve iç kuantum verimlilikleri incelenmiştir. Işınsal ömrün sıcaklığa bağlılığından ($\tau_{\text{rad}} \propto T^{N/2}$) N aktif bölge boyutsallığının kuantum kuyusunun artması ile tutarlı olarak azaldığı gözlenmiştir. 3 nm kalınlığındaki kuyular 3-boyutlu yapıya, 1.5 ve 2 nm kalınlığındaki kuyular 2-boyutlu yapıya ait özellikleri taşıdığı gözlenmiştir. Üçüncü olarak, safir alttaşın c ve m-düzlemleri üzerine büyütülen (11 $\bar{2}$ 2) yarı polar InGaN yapılarındaki indiyum katılma verimlilikleri kuantum sınırlı Stark etkisi dikkate alınarak yüksek uyarma yoğunluklarında FL spektrumlarının karşılaştırılmasıyla incelenmiştir. Son olarak, büyütme doğrultusu boyunca kusurların yayılmasını engelleyen nano-gözenekli SiN_x ara tabakaların eklenmesi ile, (11 $\bar{2}$ 2) semipolar GaN yapılarının optiksel ve yapısal kaliteleri araştırılmıştır. Nano-gözenekli SiN_x ile büyütülen (11 $\bar{2}$ 2) GaN örnekler için oda sıcaklığı fotoluminesans (FL) şiddeti, aynı kalınlıklı fakat SiN_x tabakaların olmadığı referans örneklerle kıyasla 4 kat daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: InGaN LED, ELO, delta p-katkılama, kuantum verimlilik, polar ve yarı polar GaN

ABSTRACT

INVESTIGATION of QUANTUM EFFICIENCIES of InGaN/GaN LIGHT EMITTING DIODES

Ph.D THESIS

NURİ CAN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

PHYSICS

(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ TEKE)

BALIKESİR, DECEMBER 2016

This thesis purpose to improve the quantum efficiencies for InGaN/GaN heterostructure and quantum wells. From this perspective, different growth approaches and structural designs were investigated to identify and address the major factors of efficiency with four different sample groups. First, delta p-doped InGaN quantum barriers were employed to improve hole concentration inside the active region and hole injection without sacrificing the layer quality. Second, temperature dependent recombination dynamics in InGaN light emitting diodes (LEDs) with different well thicknesses, 1.5, 2, and 3 nm, were investigated to determine the active region dimensionality and its effect on the internal quantum efficiencies. From the temperature dependence of the radiative lifetimes, $\tau_{\text{rad}} \propto T^{N/2}$, the dimensionality N of the active region was found to decrease consistently with decreasing well width. The 3 nm wide wells exhibited $\sim T^{1.5}$ dependence, suggesting a three-dimensional nature, whereas the 1.5 and 2 nm wells were confirmed to be two-dimensional ($\sim T^1$). Third, indium incorporation efficiency of (11 $\bar{2}$ 2) semipolar InGaN LED structures grown on c-plane and m-plane sapphire substrates was derived from the comparison of PL spectra considering the effect of quantum confined Stark effect on the emission wavelength. Finally, the improvement of optical and structural quality of semipolar (11 $\bar{2}$ 2) GaN layers by means of inserting nano-porous SiN_x interlayers, which block propagation of extended defects in the growth direction has been demonstrated. The intensity of room temperature PL for the (11 $\bar{2}$ 2) samples grown with nanoporous SiN_x was found to be up to four times higher compared to those for the reference samples having the same thickness but no SiN_x interlayers.

KEYWORDS: InGaN LED, ELO, delta p-doping, quantum efficiency, polar and semipolar GaN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 III-Nitrür Yapıların Kristal Özellikleri	6
1.3 Malzeme Büyütme Süreci: Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama (MOCVD) Tekniği	9
1.4 Epitaksiyel Yanal Büyütme (ELO)	10
1.5 InGaN LED Yapılarda Verimlilik Kaybı ve A-B-C Modellemesi	12
2. Mg δ-KATKILI BARIYERLERE SAHİP InGaN LED YAPILARDA KUANTUM VERİMLİLİĞİ VE TAŞIYICI ENJEKSİYON SİMETRİSİNİNDEKİ GELİŞİM.....	25
2.1 Genel Bakış	25
2.2 Deneysel Detaylar	26
2.3 Deneysel Sonuçlar	29
3. SICAKLIĞA BAĞLI ZAMAN ÇÖZÜMLÜ FOTOLÜMİNESANS ÖLÇÜMLERİNDEN InGaN LED YAPILARININ KUANTUM VERİMLİLİĞİ VE AKTİF BÖLGE BOYUTSALLIĞININ BELİRLENMESİ	35
3.1 Genel Bakış	35
3.2 Deneysel Detaylar	36
3.3 Deneysel Sonuçlar	38
4. (11 $\bar{2}$ 2) YARI POLAR DOĞRULTUDA YÖNLENDİRİLMİŞ InGaN TABANLI LED YAPILARINDA IN-KATILMA VERİMLİLİĞİ.....	45
4.1 Genel Bakış	45
4.2 Deneysel Detaylar	46
4.3 Deneysel Sonuçlar	49
5. SiN _x NANO-GÖZENEK ARA TABAKALARININ KULLANILMASI İLE (11 $\bar{2}$ 2) YARI POLAR GaN YAPILARIN OPTİK VE YAPISAL KALİTESİNİN ARTTIRILMASI	52
5.1 Genel Bakış	52
5.2 Deneysel Detaylar	53
5.3 Deneysel Sonuçlar	55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
7. YAYINLAR	66
8. KAYNAKLAR.....	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1:** Günümüze kadar elde edilen birim güçteki lümen miktarına göre beyaz ışık performansları.3
- Şekil 1.2:** Yole Development & EPIC tarafından tahmin edilen küresel LED pazarının sağlayacağı kazanç değerleri.3
- Şekil 1.3:** Ticari LED yapılarının tarihsel gelişimi.4
- Şekil 1.4:** III-Nitrür kristaller için Wurtzite yapı gösterimi.6
- Şekil 1.5:** III-Nitrür yapılarda kendiliğinden (P_{sp}) ve piezoelektrik (P_{pz}) polarizasyon için şematik gösterim.7
- Şekil 1.6:** III-Nitrür ve üçlü bileşik yarıiletkenler için oda sıcaklığında düzlemdeki örgü sabitlerinin ve enerji bant aralıklarının oranına göre değişimi. Eğrilik (bowing) parametresi dikkate alınmadan çizilmiştir.8
- Şekil 1.7:** Yatay reaktör düzeneğine sahip MOCVD sistemi.9
- Şekil 1.8:** Büyütme içerisinde (in-situ) gerçekleştirilen ELO süreç şematığı. (a) GaN tampon tabaka üzerine şerit olarak şekillenmiş maske görüntüsü. (b) Tekrar büyütme süreci. GaN malzeme pencere bölgelerinde büyümeye başlamaktadır ve hem yatay olarak hemde dikey olarak genişlemektedir. (c) Belirli bir zaman sonra, GaN kanatlar birleşecekler ve sürekli bir film oluşturacaklar. İki kanadın birleştiği yerde çok az kusur bu birleşme noktalarında tekrar oluşacaktır. (d) c-düzlem, a-düzlem ve m-düzlem GaN yapılarındaki ELO maske desenlerinin doğrultuları.11
- Şekil 1.9:** Verim düşüşüne dair LED ışık gücü karakteristiği (kırmızı çizgi). Kıyaslama için, verim kaybının olmadığı ideal linear ışık gücü gösterilmiştir (yeşil çizgi).12
- Şekil 1.10:** InGaN LED yapılarında verimlilik kayıplarına yol açan mekanizmalar.14
- Şekil 1.11:** Verimlilikteki azalmayı önleyen bazı yaklaşımlar.14
- Şekil 1.12:** (a) Doğrusal ve (b) doğrusal olmayan e-h Auger rekombinasyon süreçleri.18
- Şekil 2.1:** Hex (6x) çift heteroeklem LED yapılarının iletim bandı şematığı. Mg δ -delta katkılama, n^+ -GaN tarafına yakın hem sadece 6nm kalınlıklı ilk bariyer hem de ilk ve ikinci 6 nm kalınlık $In_{0.06}Ga_{0.94}N$ bariyerler ile çalışılmıştır. Geri kalan tüm bariyerler katkısızdır ve 3nm kalınlığa sahiptirler. Referans örnek olarak, Mg δ -delta katkılamasının yapılmadığı bariyerlere sahip LED yapısı kullanılmıştır.28
- Şekil 2.2:** Silvaco Atlas simülasyon programı ile $100 A/cm^2$ akım enjeksiyonunun da simüle edilmiş referans LED yapısı (eğri 0), ilk bariyeri Mg δ -delta katkılı (eğri 1) ve ilk iki bariyeri Mg δ -delta katkılı (eğri 2) LED yapıları için (a) elektron konsantrasyonu (b) deşik konsantrasyonu ve (c) karşılık gelen enerji band yapılarının

	şematığı. Kesikli çizgiler quasi-Fermi seviyelerini göstermektedir. Sol taraf 15 + 15 nm SEI yapısına sahip n-GaN tarafıdır..	30
Şekil 2.3 :	Güç yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak iç kuantum verimliliği (IQE).	32
Şekil 2.4 :	İncelenen LED yapıları için akım yoğunluğuna karşı (a) normalize edilmiş EL şiddeti ve (b) görelî dış kuantum verimleri	33
Şekil 3.1:	İncelenen LED yapılarının şematik diyagramı.	38
Şekil 3.2:	Hex (6x) 1,5 nm (a), 2 nm (b) ve 3 nm (c) kuyu genişliğine sahip LED yapılarının zaman çözünümlü FL geçilerinin sıcaklığa bağımlılığı.	39
Şekil 3.3:	Hex (6x) 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılarının FL şiddeti.	40
Şekil 3.4:	Sıcaklığın fonksiyonu olarak Hex (6x) 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılarının FL (τ_{PL}), ışımsal (τ_r) ve ışımsal olmayan (τ_{nr}) sönüm zamanları.	41
Şekil 3.5:	Hex (6x) 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ışımsal sönüm zamanlarının değişimi.	43
Şekil 4.1:	(a) Wurtzite GaN yapıda polar c-düzlemi ve yarı polar ($11\bar{2}2$) kristalografik yönelim ve (b) tasarlanan edilen yarı polar ($11\bar{2}2$) LED yapısının düz bant yapısı ve şematik gösterimi.	50
Şekil 4.2:	Yan yana büyütülen (a) polar ve (b) yarı polar 2x3 nm çift heteroeklem LED yapılarının uyarma gücüne bağılı mikro-FL spectra ölçümleri. Ok işareti gücün arttığını göstermektedir.	50
Şekil 4.3:	($11\bar{2}2$) yarı polar ve c-düzlem polar LED yapıları için foto-uyarılmış taşıyıcı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak emisyon piklerinin dalga boyu değişimi.	51
Şekil 5.1:	Farklı büyüme evrelerinde B örneğinin SEM görüntüleri. (a) GaN/m-safir tampon tabaka (b) 4,5 dakika SiN_x ara tabaka depolama ve 10 dakika GaN çekirdek tabaka büyütülmesinden sonra (c) 76 Torr basınçta ek 1,5 saat büyütme sonrası ve (d) 200 Torr bas basınçta ek 1,5 saat büyütme sonrası.	56
Şekil 5.2:	(a) 4,5 dakika [B örneği] (b) 5 dakika [C örneği] ve (c) 7 dakika [D örneği] boyunca depolanan SiN_x ara tabakalar ile büyütülen ($11\bar{2}2$) GaN filmlerin SEM görüntüleri.	57
Şekil 5.3:	SiN_x depolama zamanına karşılık [$11\bar{2}3$] GaN ve [$1\bar{1}00$] GaN doğrultuları boyunca ölçülen XRD eğrilerinin FWHM değerleri.	51
Şekil 5.4:	(a) Farklı SiN_x ara tabakalı ($11\bar{2}2$) örnekler için oda sıcaklığı FL spektrumu. Aynı zamanda, ($11\bar{2}2$) yarı polar (turuncu) ve c-düzlem nano-ELO (yeşil) örnekleri gösterilmektedir. (b) SiN_x depolama zamanının fonksiyonu olarak normalize edilmiş oda sıcaklığı FL Şiddeti.	59
Şekil 5.5:	4,5 dakika (mavi), 5 dakika (kahverengi) ve 7 dakika (pembe) boyunca depolanan SiN_x ara tabakalı ($11\bar{2}2$) GaN yapıları için 25 K düşük sıcaklık FL spektrumu. c-düzlem nano-ELO referans örneği (yeşil – E örneği) ve SiN_x uygulamasının bulunmadığı ($11\bar{2}2$) GaN örneği (turuncu – A örneği) için elde edilen spektrumda gösterilmektedir.	61

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: AlN, GaN ve InN için örgü ve kendiliğinden polarizasyon sabitleri.....	7
Tablo 3.1: İncelenen LED yapıları için oda sıcaklığı rekombinasyon katsayıları ve IQE değerleri	44
Tablo 5.1: İncelenen örnekler için büyütme şartları.	55



SEMBOL LİSTESİ

E_g	:	Bant Aralığı Enerjisi
U_{Auger}	:	Auger Rekombinasyon Hızı
n	:	Elektron Taşıyıcı Konsantrasyonu
p	:	Deşik Taşıyıcı Konsantrasyonu
c_n	:	Elektronlar için Auger Rekombinasyon Katsayısı
c_p	:	Deşikler için Auger Rekombinasyon Katsayısı
n_0	:	Denge Elektron Taşıyıcı Konsantrasyonu
p_0	:	Denge Deşik Taşıyıcı Konsantrasyonu
Δn	:	Aşırı Elektron Taşıyıcı Konsantrasyonu
Δp	:	Aşırı Deşik Taşıyıcı Konsantrasyonu
h	:	Planck Sabiti
τ	:	Yaşam Ömrü
n_i	:	İçsel Taşıyıcı Konsantrasyonu
A	:	Shockley-Read-Hall Rekombinasyon Katsayısı
B	:	Işınsal Rekombinasyon Katsayısı
C	:	Auger Rekombinasyon Katsayısı
IQE	:	İç Kuantum Verimliliği
EQE	:	Dış Kuantum Verimliliği
EQE	:	Dış Kuantum Verimliliği
ELO	:	Epitaksiyel Yatay Büyütme
FL	:	Fotoluminesans
EL	:	Elektrolüminesans
GEI	:	Kademeli Elektron Enjektör
SEI	:	Merdiven Tipi Elektron Enjektör
$TRPL$:	Merdiven Tipi Elektron Enjektör
$QCSE$:	Kuantum-Sınırlı Stark Etki
$D^{\circ}X$:	Verici Bağlı Eksiton

ÖNSÖZ

Bu çalışma esnasında ilgisini ve desteğini esirgemeyen, bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Ali TEKE'ye çok teşekkür ederim. Bir araştırmacı olarak kişisel gelişimimde göstermiş olduğu gayret için müteşekkirim.

Virginia Commonwealth Üniversitesi'nde geçirdiğim süre boyunca yaşamış olduğum tecrübe olağan üstü olup bana bu fırsatı veren Prof. Dr. Hadis MORKOÇ'a ve bu süre boyunca bana danışmanlık yapan, her türlü desteği veren ve özveri gösteren Doç. Dr. Ümit ÖZGÜR'e çok teşekkür ederim. Yaşadığım bu deneyimde beraber çalıştığım arkadaşlarım Serdal, Shopan, Mykyta, Morteza, Barkat, Mahbub ve Saikat ile çalışmak bir ayrıcalıktı.

Tez komite üyeleri olan Prof. Dr. Sibel GÖKDEN ve Prof. Dr. Seydi DOĞAN hocalarıma süre boyunca yapmış oldukları yönlendirmeleri ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince tarafıma sağlanan maddi ve manevi desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na çok teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her saniyesinde parmağı olan aileme bana göstermiş oldukları sabır, anlayış ve tarif edilemez destekleri için çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

GaN, InN ve AlN gibi III-Nitrür yarıiletkenler ve bunların üçlü/dörtlü alaşımları sahip oldukları üstün fiziksel özelliklerinden dolayı özellikle ışık yayan diyot (LED), lazer, fotodedektör, güneş pilleri, yüksek güçlü transistörler ve daha birçok askeri ve sivil amaçlı optoelektronik ve elektronik uygulamaları için önemli malzeme gruplarından birini oluşturmaktadır [1].

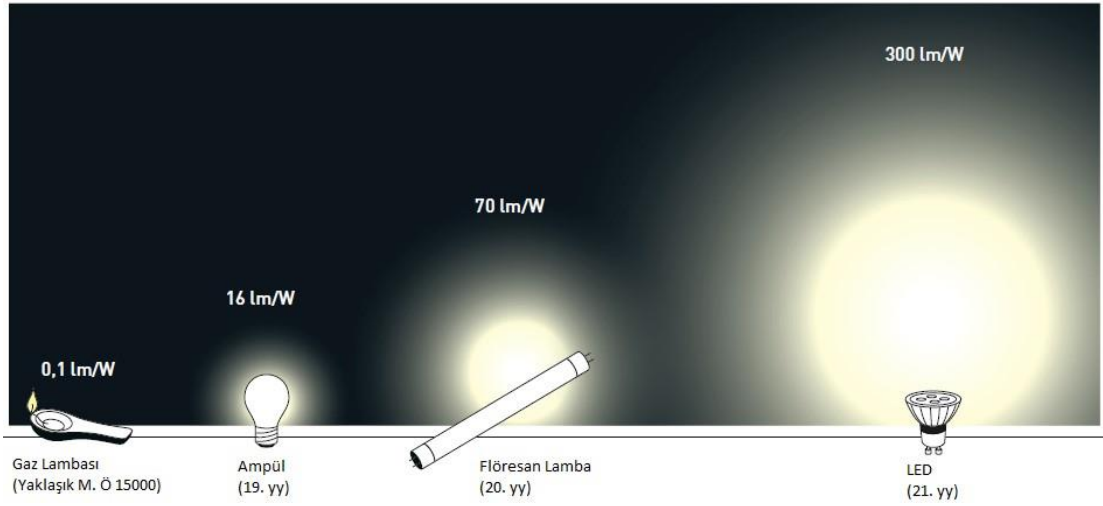
LED teknolojisi günlük yaşamımızın önemli teknolojilerinden biri olup, hali hazırda renkli ekranlar, trafik sinyalleri, kamera flaşları, otomotiv farları ve yüksek hızlı şebeke ağları gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Bununla birlikte III-Nitrür temelli LED'lerin yüksek hızda optiksel veri transferinde de kullanılabilirliği başarılı bir şekilde gösterilmiştir. Örneğin, yapılan bir çalışmada 4 mikro-LED'in paralel olarak kullanılmasıyla, 1.5 Gbit/s'e kadar hatasız veri transfer hızının elde edildiği rapor edilmiştir [3].

AlGaN tabanlı mor ötesi (*ultraviolet*, UV) foton salınımı yapan LED yapılar mor ötesi mikrop kırıcı ışınım sistemlerini içine alan uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir. 280 nm dalga boyundan daha küçük dalga boyuna sahip UV ışınımına maruz kalınması çoğu bakteri, virüs ve mikroorganizmaların DNA yapılarını bozmaktadır [4].

LED yapılarının diğer bir kullanım alanı ise son zamanlarda ülkemizde de görülmeye başlayan sera aydınlatma sistemleridir. Bitkiler iyi bir gelişim için ışığa gereksinim duyarlar. Bitki gelişiminde ihtiyaç duyulan ışığın kaynağı güneş veya yapay ışıklardır. Son dönemlerde LED teknolojisi ile daha ucuz ve bitkinin fotosentetik aktivitesinin yoğun olduğu ışıklandırma sağlanabilmektedir. Seralarda ve kapalı alanlarda bitki yetiştirmek için kullanılan yüksek basınçlı sodyum ve metal halojen gibi yüksek enerji harcayan lambalar yerine, uygun spektrum ve dalga boylarında LED armatürlerin kullanılmasına başlanmıştır [5].

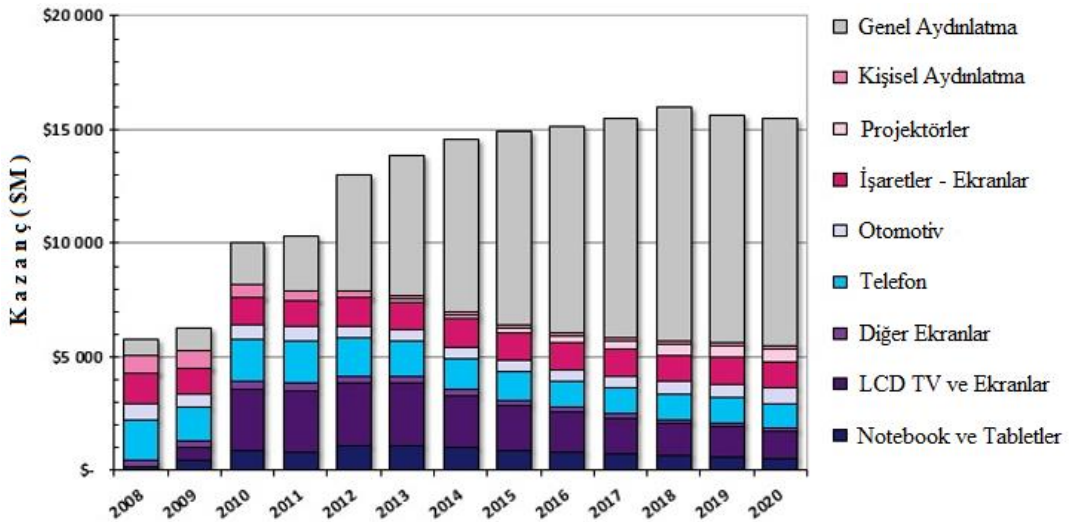
Bu tarz uygulamaların yanı sıra LED'lerin genel aydınlatma uygulamalarında çok büyük bir potansiyele sahip olduğu kabul edilmektedir. Genel aydınlatma amaçlı kullanılan LED'lerin, akkor lambalar, halojen lambalar ve flüoresan lambalara göre çok daha düşük enerji tüketimine, fiziksel dayanıklılığa, daha küçük boyutlarda üretilebilme ve daha hızlı devre bağlantı değişimi içeren birçok avantaja sahip olduklarını ortaya konulmuştur. Örnek olarak, 1 W LED lamba 20 W değerinde bir kompakt flüoresan lambanın vermiş olduğu aydınlatmaya sahiptir. Aygıt ömrü olarak, flüoresan lambalar 8.000-25.000 saat civarında çalışma süresine sahip olabilirken, akkor lambalar 750-4.000 saat sürecinde bitme eğilimi göstermektedir. LED lambalar ise 100.000 saat civarında çalışabilmektedir. Bu durum materyal tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır [6]. Evlerin ve binaların aydınlatmalarında kullanılan mevcut teknolojilerin LED'ler ile değiştirilmesi durumunda dünyada tüketilen toplam elektrik enerjisi ve materyal tüketiminin önemli miktarda azalması beklenmektedir. LED aydınlatma uygulamalarının konuyla en çok ilgili örnekleri ticari, endüstriyel ve konut çevresi gibi iç aydınlatma, sokak ve park alanları gibi dış aydınlatma, mimari alanlar ve dekoratif aydınlatmalardır.

Elektrik-ışık dönüşümü açısından III-Nitrür tabanlı LED'ler, elektriğin çoğunu ısıya sadece küçük bir miktarını ışığa dönüştüren akkor ve flüoresan lambalara göre çok üstündür. Şekil 1.1 de gösterildiği gibi, CREE firması tarafından sunulan en son rapora göre, 5150 K ilişkilendirilmiş renk sıcaklığında (*correlated color temperature*) ve 350 mA sürücü akım değerinde birim güçteki LED verimliliği 300 lümen (lm) olarak ölçülmüştür ve bu değer sıradan ampüller ve flüoresan lambalar için kabul edilen, sırasıyla 16 lm/W ve 70 lm/W değerleri ile kıyaslanamayacak kadar yüksektir [7]. LED'lerin bu üstün verimlilikleri, boyutsal avantajları, daha düşük fiyat çözümleri ve yüksek enerji tasarrufundan dolayı sağlamış oldukları çözümler sayesinde katı hal aydınlatma endüstrisi için potansiyeli artırmaktadır.



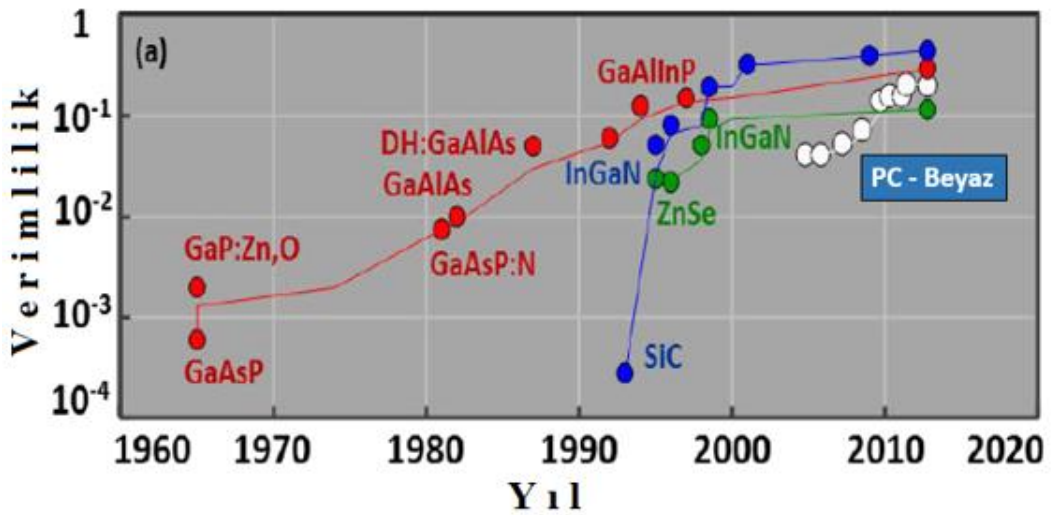
Şekil 1.1: Günümüze kadar elde edilen birim güçteki lümen miktarına göre beyaz ışık performansları.

Bu yeni gelişen aydınlatma teknolojisinin maliyeti göz önünde bulundurulması gereken bir konu olmasına rağmen, GaN tabanlı teknolojinin maliyetinin büyüklüğü gün gittikçe düşecektir. *Yole Development* ve *EPIC* firmasının son yıllarda gerçekleşen ve yakın gelecekte beklentileri yansıtan LED'lerin endüstrine ait veriler oldukça çarpıcıdır.



Şekil 1.2: Yole Development & EPIC tarafından tahmin edilen küresel LED pazarının sağlayacağı kazanç değerleri.

Şekil 1.2 de görüldüğü gibi, 2014 LED Pazar büyüklüğü yaklaşık olarak 14,5 milyar dolar olarak hesaplanmıştır ve 2018 yılına kadar 17,1 milyar doları bulacaktır. Günümüzdeki uygulamalar arasında toplam satışın %48'i genel aydınlatma, %21'i televizyon ve monitörler ve %14'ü mobil elektronikler olarak hesaplanmıştır. Genel aydınlatma alanının da kullanılan LED'ler önümüzdeki beş yıl içerisinde büyümeye devam etmesi beklenmektedir. 2018'e kadar yüzdelik dilim genel aydınlatma için %65 civarında olması öngörülmektedir. Bu durum Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bölümü tarafından duyurulan raporun incelenmesiyle anlaşılabilir. Geçtiğimiz 2014 yılında, Birleşik Devletlerde genel aydınlatmada kullanılan LED lambaların tüketim değeri 1,22 milyar dolara ulaşmıştır ve bu değer 2019 yılında 3,36 milyar dolara ulaşacaktır. Avrupa bölgelerinde LED lambaların tüketim değeri yaklaşık olarak 1 milyar dolara ulaşmıştır ve 2019 yılında 4,37 milyar dolar olacaktır.



Şekil 1.3: Ticari LED yapılarının tarihsel gelişimi.

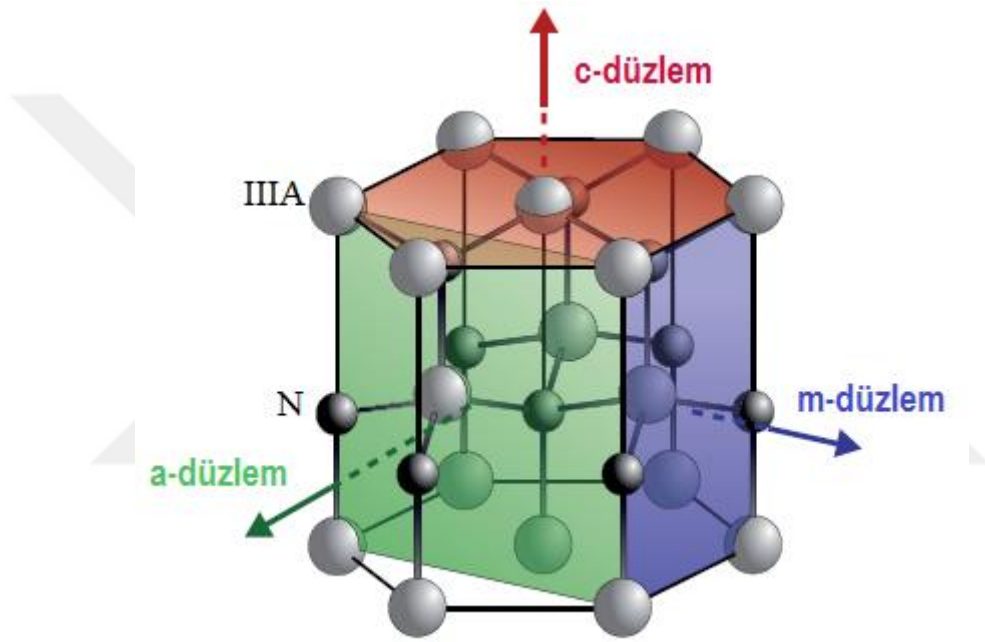
İç ve dış aydınlatma da kullanılan beyaz LED'lerin üretimi konusunda, mavi LED'lerin bulunması en önemli ve bir hayli zor olanıdır. Görülebilir ışık salınımı konusunda ilk belirleyici ilerleme kırmızı LED üretimidir ve LED tarihinin ilk zamanlarına egemen olan renktir. Şekil 1.3 de görüldüğü gibi verimlilikteki ilerleme ilk olarak GaP ve GaAsP daha sonra AlGaAs ve son olarak AlInGaP yarıiletken materyallerin ağırlıklı olarak araştırma ve geliştirmenin bir sonucudur. Parlaklık verimliliği, 1970'lerde GaP ve GaAsP LED'ler için 0,02 lm/Watt değerlerinde olup 1990'larda AlGaAs LED'ler için 10 lm/Watt değerlerine ulaşmıştır. AlInGaP LED'lerin verimliliği günümüzde 150 lm/Watt değerinin üzerindedir.

Görülebilir ışık salınımı yapan LED'lerdeki ikinci öncül gelişim ise mavi ışığın elde edilmesidir ve bu renk LED'lerin günümüz tarihini egemenliği altına almıştır. 1993'de Nichia Kimya Kurumunda çalışan S. Nakamura indiyum galyum nitrid (InGaN) yarıiletken malzemeyi kullanarak ilk parlak mavi ışık salınımı yapan LED'i üretmiştir [8]. Mavi ışığı üretmek için grubun yapmış olduğu çalışmalarda yarıiletkenlerdeki indiyum miktarını ayarlayarak enerji bant aralığı ayarlanmış ve InGaN/AlGaN çift heteroeklem yapılar kullanılarak %2,7 kuantum verimliliği elde edilmiştir. Şekil 1.3 de görüldüğü gibi kuantum verimliliğindeki gelişme hızlı bir şekilde devam etmiştir. Günümüzün en gelişmiş mavi LED'ler düşük güç yoğunluklarında (*power density*) %80 değerlerini aşan güç dönüşüm verimliliklerine sahiptirler [9]. En önemlisi, mavi görülebilir spektrumun kısa dalga boyu (yüksek enerji) bandındadır ve fosforlu, floresan materyaller kullanılarak yeşil, sarı ve hatta kırmızı ışığın alt dönüştürücüsü olarak kullanılması mümkündür [10]. Dolayısıyla, görülebilir spektrum doldurulabilir, beyaz ışık üretilebilir ve genel aydınlatma uygulamalarının ihtimali hayata geçirilebilir.

InGaN materyaller mor ötesi, mor, mavi ve yeşil ışık saçmalarının yanısıra, yüksek enjeksiyon akım ile sağlanan yüksek ışık akılarının gerekli olduğu genel aydınlatma da kullanılan çoğu yüksek güçlü ledlerin temel yapısını oluşturmaktadır. Son zamanlarda InGaN LED'lerin verimliliği konusunda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Ancak yüksek enjeksiyon seviyelerinde karşılaşılan en büyük problem verimlilik kaybı olup, bu fiziksel durumun altında yatan mekanizmaları incelemek için farklı çalışmalar yapılmıştır [11,12]. Bu tez çalışmasının temel amacı verim düşüşü olarak adlandırılan problemi anlamak ve yüksek enjeksiyon akımlarında InGaN LED yapılarının elektriksel ve optiksel verimliliklerini geliştirmek için optimum bir LED yapısının elde edilmesinde başarılı olmak.

1.2 III-Nitrür Yapıların Kristal Özellikleri

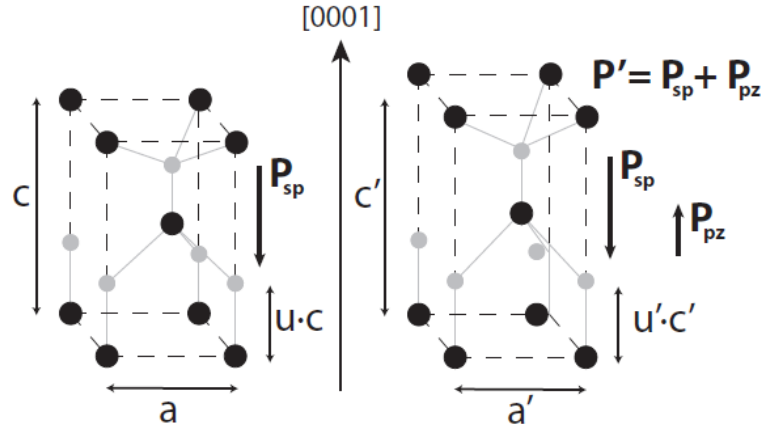
Optoelektronik aygıtların temelini oluşturan Galyum Nitrür (GaN), Alüminyum Nitrür (AlN), İndiyum Nitrür (InN) ve bunların üçlü ve dörtlü bileşiklerinin oluşturduğu III-Nitrürler genel olarak benzer fiziksel özelliklere sahiptirler. Bu yapılar her ne kadar çinko sülfür ve kaya tuzu formunda kristalenebilselerde, termodinamik şartlarda çoğunlukla hekzagonal wurtzite yapıda kristallenirler ve C_{6V}^4 uzay, C_{6V} noktasal gruba aittirler. Tipik bir wurtzite yapının şematik gösterimi Şekil 1.4’de verilmektedir.



Şekil 1.4: III-Nitrür kristaller için Wurtzite yapı gösterimi.

Wurtzite birim hücre, komşu atomlar arasındaki mesafeyi tanımlayan a ve atomik düzlemler arasındaki ayrımı tanımlayan c örgü sabitleri ile gösterilmektedir. Her bir tür atom (metal ve nitrojen) hekzagonal sıkı paketli bir sistemde, diğer (0001) c-eksenine göre kaymış bir şekilde düzenlenmektedir. Wurtzite yapı ABABAB... dizisi ile karakterize edilirken her bir atomik tabaka bir sonrakine göre düzlemde 30° ile dönmektedir. Wurtzite yapıdaki en önemli özelliklerden biri de pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezlerinin c-ekseni boyunca çakışmamasıdır. Bu durum polar eksen olarak adlandırılan c-ekseni boyunca yığın materyallerde kendiliğinden polarizasyona yol açmaktadır. Kendiliğinden polarizasyonun büyüklüğü ideal kristal

yapısından sapmaya bağlıdır. Bunun yanısıra, dış stress, örgüyü deforme ederek piezoelektrik polarizasyon oluşturabilmektedir. Bu iki tür polarizasyon Şekil 1.5 de gösterilmektedir.



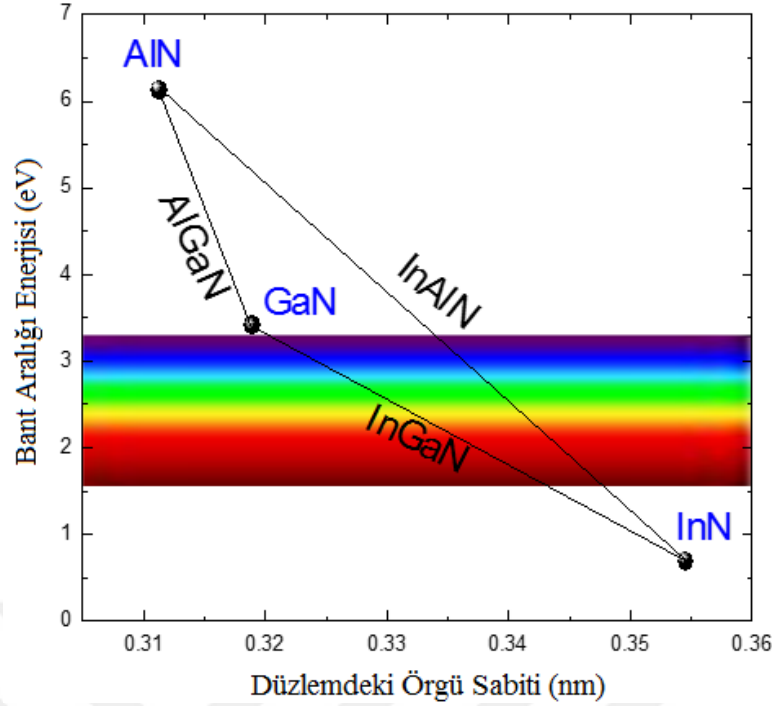
Şekil 1.5: III-Nitrür yapılarında kendiliğinden (P_{sp}) ve piezoelektrik (P_{pz}) polarizasyon için şematik gösterim.

GaN, AlN ve InN yapılarının örgü parametreleri ve kendiliğinden polarizasyon sabitleri Tablo 1.1 de verilmektedir.

Tablo 1.1: AlN, GaN ve InN için örgü ve kendiliğinden polarizasyon sabitleri.

Parametreler	AlN	GaN	InN
a örgü sabiti (nm – 300 K)	0,3112	0,3189	0,3533
c örgü sabiti (nm – 300 K)	0,4982	0,5185	0,5693
Kendiliğinden Polarizasyon Sabiti (C / m^2)	5,3	3,2	2,9

Giriş bölümünde bahsedildiği gibi III-Nitrür yapıların optoelektronik endüstrisi ve teknolojisindeki önemi öncelikli olarak bu yapıların direkt enerji bant aralığına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. III-Nitrürlerin kendileri, üçlü ve/veya dörtlü bileşenlerinin enerji band aralıkları morötesi (AlN – 6,14 eV) bölgesinden kızılötesi (InN – 0,64 eV) bölgesini içeren geniş bir spektrumu kapsamaktadır. III-Nitrürlerin ve bunların üçlü bileşiklerinin alaşım oranına bağlı olarak düzlem özgülüklerinin ve enerji bant aralıklarının değişimi Şekil 1.6 da gösterilmektedir.



Şekil 1.6: III-Nitrür ve üçlü bileşik yarıiletkenler için oda sıcaklığında düzlemde örgü sabitlerinin ve enerji bant aralıklarının alaşım oranına göre değişimi. Eğrilik (bowing) parametresi dikkate alınmadan çizilmiştir.

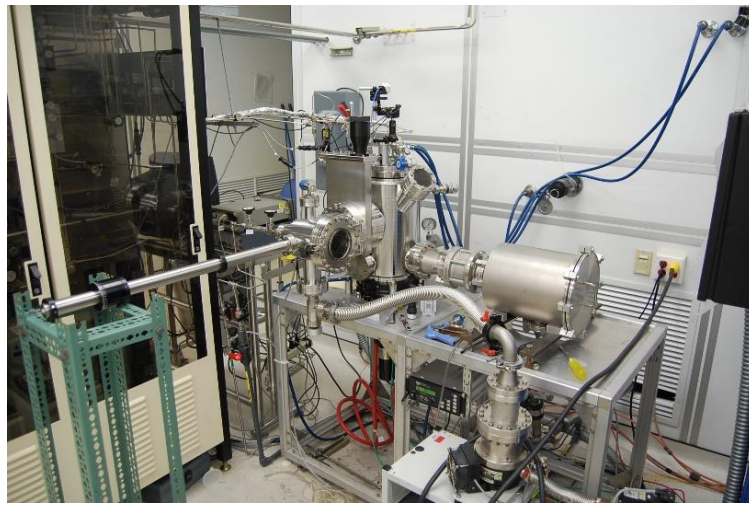
Üçlü bileşiklerin (AlGaIn, InGaIn, InAlIn) bant aralığı enerjileri alaşım kompozisyon değerine bağlı olarak aşağıda verilen ampirik denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$E_g (A_x B_{1-x} N) = xE_g (AN) + (1-x)E_g (BN) - x(1-x)b(A_x B_{1-x} N) \quad (1.1)$$

A ve B sembolleri Ga, In veya Al elementlerini, x kompozisyonu ve b eğrilik parametresini temsil etmektedir. Bowing parametreleri için literatürde farklı değerler rapor edilmektedir. Ancak, InGaIn, AlGaIn ve AlInIn için en yaygın kabul görmüş değerler sırasıyla 1,4 eV, 0,7 eV ve 3,0 eV olarak verilmektedir [13]. Şekil 1.6'da görüleceği üzere spektrumun görünür bölgesinde soğurma veya emisyon yapabilecek yapılar uygun alaşım oranları ile elde edilebilme potansiyeline sahiptir. Yüksek verimlilikli mavi LED yapılarının gelişimi ve lazer diyotlar InGaIn aktif bölge kullanılmasıyla mümkün hale gelirken, AlGaIn ve AlInIn alaşımları alan etkili transistörler ve UV emitörler için kullanılmaktadır [1].

1.3 Malzeme Büyütme Süreci: Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama (MOCVD) Tekniği

MOCVD tekniği yarıiletken ince film tabanlı aygıtların hazırlanması için kullanılan epitaksiyel büyütme yöntemlerinden bir tanesidir. MOCVD teknolojisi yüksek kaliteli epitaksiyel tabakaların üretimi için oldukça elverişlidir. Bu teknik hem temel araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalarda kullanılan III-nitrür ve diğer yarıiletken tabanlı LED, lazer, fotodiyot ve transistör gibi elektronik ve optoelektronik aygıtların üretiminde uzunca bir süredir kullanılmaktadır. MOCVD tekniğinin diğer büyütme tekniklerine kıyasla avantajı istenilen hızda (saniyede birkaç atomik tabaka) ve hassasiyette büyütme imkânı sağlamanın yanı sıra yılda 1000 adet büyütme yapabilecek kapasiteye sahip olmasıdır. MOCVD büyütme sisteminde, gaz akışının büyük yüzey alanlarda ve çoklu tabaka tasarımlarında daha düzgün olması için gaz girişi ve pozisyonuna göre yatay ve dikey olmak üzere iki tip reaktör vardır [Şekil 1.7]. Epitaksiyel tabakaların büyütülmesi genellikle vakumlu bir hazne içindeki ısıtılmış bir alttaş üzerine V. grup hidritlerin ve III. grup alkilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. GaN büyütülmesinde, trimetilgalyum (TMGa - $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) veya trietilgalyum (TEGa - $\text{Ga}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$) genellikle Ga kaynağı ve NH_3 amonyak gazı ise N kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak trimetilindiyum (TMIn - $\text{In}(\text{CH}_3)_3$), trimetilalüminyum (TMAI - $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) ve seyreltilmiş SiH_4 silan gazı sırasıyla In, Al ve Si kaynakları olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.7: Yatay reaktör düzeneğine sahip MOCVD sistemi.

Öncü kaynaklar büyütmenin gerçekleştiği vakum altındaki reaktör bölümüne taşıyıcı gaz aracılığıyla iletilmektedirler. Bu taşıyıcı gaz genellikle hidrojen (H_2) ve nitrojen (N_2) ya da ikisinin karışımı ile oluşan gazlardır. Yukarıda bahsedilen metal organikler bu taşıyıcı gaz ile reaktör odasına iletilmektedirler.

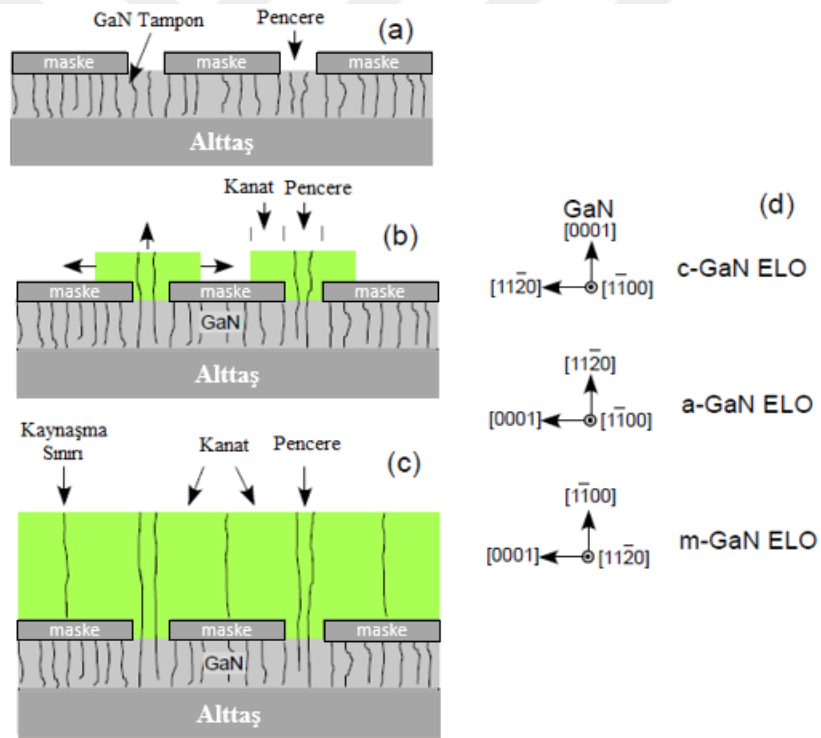
Bu tez çalışmasında kullandığımız InGaN numuneler, *Virginia Commonwealth* Üniversitesi Mikroelektronik Malzemeler ve Aygıt laboratuvarında bulunan yatay reaktör geometrisine sahip EMCORE firmasının ürettiği MOCVD sistemi ile büyütülmüştür. Bu sistem, firmanın sıcaklık kontrolü, büyütme sırasında görüntüleme, büyütülen materyalin yüzey düzgünlüğünün sağlanması konularında yaptığı bütün geliştirmelere ve iyileştirmelere sahiptir.

1.4 Epitaksiyel Yanal Büyütme (ELO)

Yarıiletken materyallerin özelliklerini geliştirmek için Epitaksiyel Yanal Büyütme (Epitaxial Lateral Overgrowth, ELO) tekniği kusur yoğunluğunu azaltmak için MOCVD sistemi içerisinde çoğu zaman kullanılmaktadır [14]. Bu büyütme tekniğinin temel yaklaşımı ve amacı Şekil 1.8 de gösterildiği gibi dielektrik maskeler (SiO_2 veya SiN_x) kullanılarak kusurları filtrelemektir. İlk olarak, düzlemsel GaN tampon tabaka safir, SiC veya Si gibi alttaş üzerine büyütülür ve takiben dielektrik maske depolanması gerçekleşir. Standart fotolitografi kullanılarak, bir takım paralel şeritler Şekil 1.8 (a) gösterildiği gibi pencere olarak adlandırılan dielektrik şeritler arasındaki ayrımlar ile GaN üzerine tanımlanır. Daha sonra maske desenine sahip örnek GaN büyütülmesi için MOCVD sistemine tekrar geri yüklenir. Bu süreç boyunca, GaN epitaksiyel büyütmesi pencere bölgelerinde başlar.

Bu bölgede temeli oluşturan GaN mikroyapı tekrar üretilirken, Şekil 1.8 (b) de görüldüğü gibi maskelenmiş bölge üzerinde herhangi bir büyüme gerçekleşmez. Maske üzerine büyütülen GaN hem yatay hem de dikey olarak genişleyecektir. Yatay-dikey büyüme oranı kullanılan büyütme şartlarına direkt olarak bağlıdır. Yatay olarak büyüyen bölgeler kanat bölgeleri olarak adlandırılır ve daha az kusur yoğunluğu içermektedir. Belirli bir büyütme zamanından sonra, tekrar büyütülen GaN birleşmeye başlayacaktır ve Şekil 1.8 (c) de görüldüğü gibi birleşme bölgesinde oldukça az kusur yoğunluğu oluşacaktır. c-düzlem GaN ELO durumunda, dielektrik film şeritleri genellikle GaN m-ekseni $[1\bar{1}00]$ göre hizalanmaktadır, bu yüzden Şekil

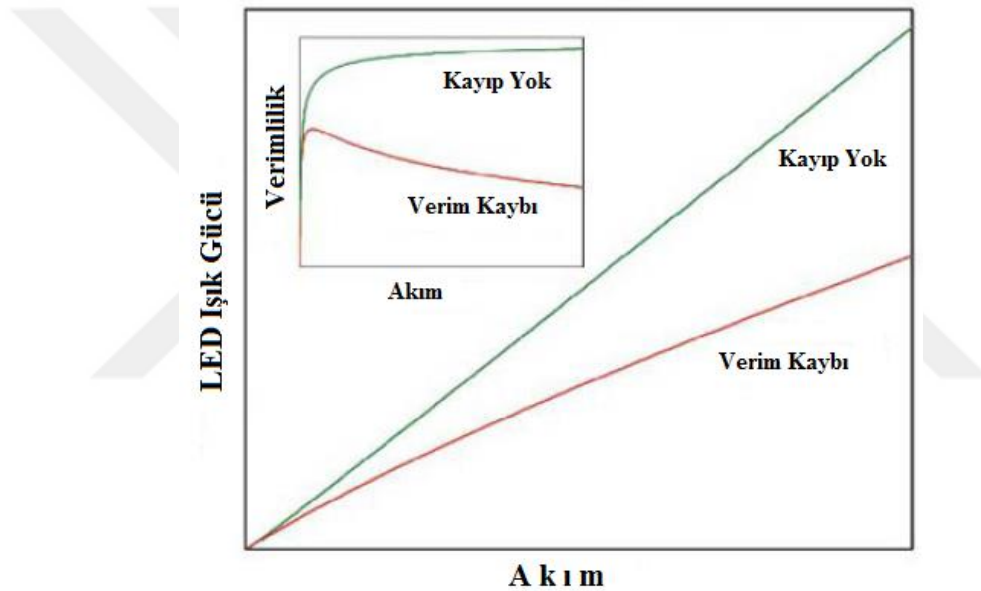
1.8 (d) de görüldüğü gibi yanal olarak büyüyen kanatlar GaN a-eksenine $[11\bar{2}0]$ göre genişlemektedir. Maske şeritleri bu yönelimde dizildiği zaman yanal büyüme hızının dikey büyüme hızına oranı daha yüksek olacağı ve yan duvar kesimi büyüme şartları ile kontrol edilebilmesi daha kolay olduğu gösterilmiştir [15]. Buna karşın, maske şeritleri GaN'ın a-eksenine $[11\bar{2}0]$ göre dizildiği ve yanal büyütme GaN'ın m-eksenine göre devam ettiği zaman, yanal büyütme GaN yapılarıdaki en kararlı ve yok edilmesi zor olan $[1\bar{1}00]$ kesimlerinin yavaş büyüme hızı tarafından sınırlanacaktır [15]. Ancak, $(11\bar{2}0)$ a-düzlem GaN veya $(1\bar{1}00)$ m-düzlem GaN ELO durumlarında, şerit olarak şekillenmiş maskeler GaN $[1\bar{1}00]$ m-eksenine ve GaN $[11\bar{2}0]$ a-eksenine göre dizilmelidir, bu yüzden maske üzerine büyüyen kanatlar GaN c-eksenine boyunca yatay olarak ilerlemektedir ve maske üzeri büyüyen GaN kanat bölgeleri içerisinde etkili bir kusur yoğunluğu azalmasına yol açmaktadır.



Şekil 1.8: Büyütme içerisinde (in-situ) gerçekleştirilen ELO süreç şematığı. (a) GaN tampon tabaka üzerine şerit olarak şekillenmiş maske görüntüsü. (b) Tekrar büyütme süreci. GaN malzeme pencere bölgelerinde büyümeye başlamaktadır ve hem yatay olarak hemde dikey olarak genişlemektedir. (c) Belirli bir zaman sonra, GaN kanatlar birleşecekler ve sürekli bir film oluşturacaklar. İki kanadın birleştiği yerde çok az kusur bu birleşme noktalarında tekrar oluşacaktır. (d) c-düzlem, a-düzlem ve m-düzlem GaN yapılarıdaki ELO maske desenlerinin doğrultuları.

1.5 InGaN LED Yapılarda Verimlilik Kaybı ve A-B-C Modellemesi

LED'ler daha öncede bahsedildiği üzere genel aydınlatma başta olmak üzere bir çok uygulama alanında hızlı bir şekilde yer almaktadır. Kompakt flöresanlara kıyasla, LED ampüller daha uzun yaşam ömrüne ve hızlı tepki zamanına sahiptirler. Ancak, LED'lerde yaşanan problemlerin başında yüksek sürücü akım yoğunluğu değerlerinde beklenmeyen verim kayıpları gelmektedir. Yüksek akım yoğunluğu değerlerinde doğal olarak yaşanabilecek ısıl problemler dışarılandığında dahi LED'in Şekil 1.9'da görüldüğü gibi optik çıkış gücünün sürülen akıma göre doğrusal olarak değişmediği görülmektedir.



Şekil 1.9: Verim düşüşüne dair LED ışık gücü karakteristiği (kırmızı çizgi). Kıyaslama için, verim kaybının olmadığı ideal lineer ışık gücü gösterilmiştir (yeşil çizgi).

Uygulanan kaynaktan enjekte edilen her bir elektron-deşik çiftinin ışımsal rekombinasyon yoluyla bir fotona dönüşmesi beklenen ideal bir LED yapısının %100 verimle çalışması mümkündür. Ancak, elektriksel enerjinin optiksel enerjiye dönüşümü ve oluşan fotonların salınımı sırasında, her zaman elektron-deşik çifti ve foton kayıpları olmaktadır. Bu kayıp mekanizmalarını temel olarak toplam dış kuantum verimi, (*EQE*), iç kuantum verimi (*IQE*) ve foton çıkarım verimi (*EXE*) gibi üç farklı başlık altında değerlendirmek mümkündür. Verimlilik terimleri birer cümleyle şu şekilde açıklanabilir.

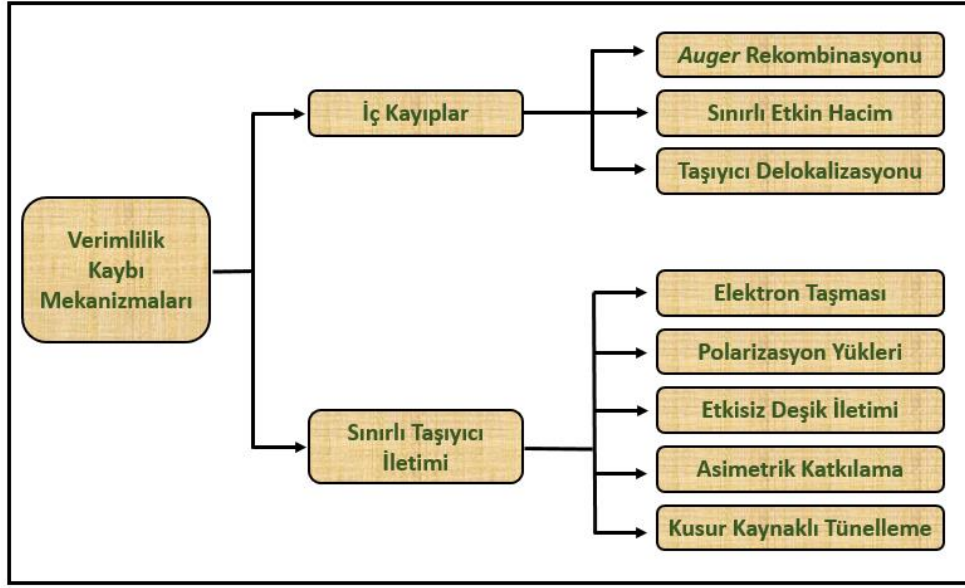
İç kuantum verimliliği, IQE: Yarıiletkenin aktif bölgesinden salınan fotonların, LED yapısının p-n eklem bölgesine enjekte edilen elektronların sayısına oranıdır.

Ekstraksiyon verimliliği, EXE: Kapsüllenen LED çipinden havaya salınan fotonların çipin içerisinde üretilen fotonların sayısına oranıdır. Bu durum hava ve aygıt yüzeyi arasındaki kırınım indeksi farklılığından dolayı çip içerisine geri yansıyan ışık gücünün etkisini içermektedir, fakat fosfor dönüşümü esnasında oluşan kayıplar buna dahil değildir.

Dış kuantum verimliliği, EQE: Ekstraksiyon edilen fotonların p-n eklem bölgesine enjekte edilen elektronların sayısına oranıdır ve aslında IQE ve EXE değerlerinin çarpılmasıyla elde edilebilir.

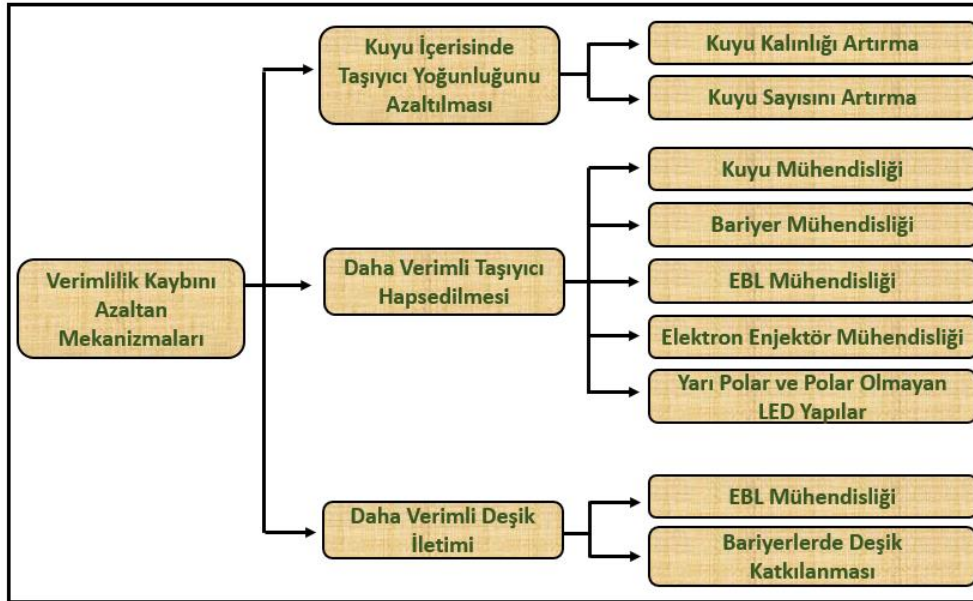
InGaN tabanlı LED yapılarda, kuantum verimliliğindeki karakteristik düşüşün bir tanesi emisyon dalga boyundaki artış olarak telaffuz edilmektedir. InGaN tabanlı LED yapılarının aktif bölgelerindeki indiyum mol oranının artmasıyla meydana gelen verim kayıplarının nedeni olarak birçok farklı mekanizmalar öne sürülmektedir [16,17]. Bunlar arasında en çok kabul görenler arasında, aktif bölgede yüksek kusur yoğunlukları, indiyum oranındaki dalgalanmalar, iletim bandı bant süreksizliğindeki (*band offset*) artıştan dolayı elektronların daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmaları ve artan *Auger* rekombinasyon geçişleridir.

Verimlilikteki düşüş, açık bir şekilde LED yapılarının aktif bölgelerinde bulunan heteroyapılar/kuantum kuyularının içinde veya dışında etkin olabilen ışınal olmayan taşıyıcı kayıp mekanizmaları tarafından meydana gelmektedir. Eğer bu süreç kuantum kuyusu içerisinde gerçekleşir ise, kusurlara bağlı *Shockley-Read-Hall* (SRH) rekombinasyonu, *Auger* rekombinasyonu, taşıyıcı delokalizasyonu ve enjeksiyon için önemli olan aktif bölge hacmindeki azalma gibi mekanizmalar verim düşüşünün temel nedenleri arasında gösterilmektedir [18]. Eğer süreç kuantum kuyusunun dışında gerçekleşir ise verim düşüşünün kaynağı, taşıyıcı sızması (*leakage*), yeterli olmayan deşik enjeksiyonu, asimetrik katkılama, polarizasyon yükleri veya elektronların aktif bölge üzerinden bariyerlere taşması (*overflow*) gibi etkenler olabilmektedir. InGaN tabanlı LED'lerde meydana gelen verimlilik kaybı mekanizmalarının özeti Şekil 1.10'da verilen tabloda gösterilmektedir.



Şekil 1.10: InGaN LED yapılarında verimlilik kayıplarına yol açan mekanizmalar.

Verimlilik kaybının arkasında yatan mekanizmaların etkinliğini azaltmak için çeşitli varsayımlar öne sürülmüş ve geniş bir çözüm aralığı ortaya çıkarılmıştır. Bunlar; (i) aktif bölgede kuyulardaki taşıyıcı yoğunluğunun azaltılması, (ii) aktif bölge içerisinde daha iyi verimli hapsedilmesi ve (iii) aktif bölge içerisinde deşik enjeksiyonunun artırılması. Şekil 1.11 olası verim kaybını önleyebilecek mekanizmalar özetlemektedir.



Şekil 1.11: Verimlilikteki azalmayı önleyen bazı yaklaşımlar.

En popüler seçenek, ya daha kalın kuyu yaparak ya da çip alanının artırmak ve yatay akım yayılımının artırmak yoluyla aktif bölgedeki taşıyıcı yoğunluğunu azaltmaktır. Öncelikli hedef Auger rekombinasyon etkisini azaltmak iken, aynı zamanda elektron kaçağını da azaltmaktadır. Daha kalın kuyulara dönülmesi sıradan bir çözüm değildir, sebep olarak ise dislokasyon oluşumu kuantum ya da heteroeklem yapılarında kuyunun kalınlığının optimizasyonunu belirlemede aynı zamanda bir faktördür. Daha kalın kuyular ile taşıyıcı yoğunluğunu azaltmak için aktif bölge boyunca göreceli olarak üniform bir taşıyıcı dağılımı sağlanmalıdır. Eğer LED yapılar düşük In bileşenli kuyulara sahip iseler, bu kuyuları daha kalın yapmak, elektrik alanı azaltmaktadır ki bu durum dalga fonksiyonlarının dağılımına yol açar ve dolayısıyla elektron ve deşiklerin dalga fonksiyonları üst üste gelerek ışınal rekombinasyonda artışa yol açmaktadır. Ancak, daha kalın kuyulu yapılar farklı sorunları ortaya çıkarabilir. Eğer LED yapılar In bileşeni zengin olan kuyulardan oluşuyorsa, materyal kalitesinde sorunlar olabilmektedir. En iyi çözüm, iç elektrik alandan dolayı ortaya çıkan Kuantum-Sınırlı Stark Etkisi ile ilgili güçlüklerden sakınmak için kuyu kalınlıklarını yeteri kadar küçük tutup, kuyu sayısını artırmaktır.

Auger rekombinasyon Landsberg ve iş arkadaşları tarafından yıllar önce keşfedilmiş ve teorik olarak çalışılmıştır. InGaN/GaN LED yapılarında verimlilik kaybına yol açan mekanizmalardan bir tanesidir. Auger rekombinasyonu, verilen bir yarıiletken için içsel (*intrinsic*) bir özellik olup iletim bandı, valansı bandı ve doğrusal (*direct*) ya da doğrusal olmayan (*indirect*) bant aralığının özellikleri ile belirlenir. Dahası, bu süreç bantlar arası taşıyıcı rekombinasyonu ve aynı zamanda daha yüksek enerji seviyelerine taşıyıcı uyarılmasını içermektedir. Süreç bir çok taşıyıcıyı içermektedir ve bundan dolayı yüksek taşıyıcı yoğunluklarında çok önemli bir yer tutmaktadır.

Elektron kaçağının azalmasından dolayı geliştirilen LED verimliliği, aktif tabakanın, elektron bloklama tabakasının (*electron blocking layer, EBL*) ve elektron enjektör yapısının dizaynında yapılan modifikasyonlar ile sağlanması umut vermektedir. Bu yöntemler ile elde edilen başarının çeşitliliği aynı zamanda polarizasyon alanındaki azalmadan ileri gelmektedir, ki bu yöntem çoklu-kuantum kuyulu ve EBL yapılarına sahip LED'lerde sağlanabilmektedir. Ayrıca, LED yapıları için düzlemlerin polar olmayan ya da yarı polar düzlemlere kayması da LED verimliliğini bazı durumlarda artırabilmektedir. Ancak, bu tarz yapılar literatürde yer almasına rağmen, bu ticari olmayan düzlemler için sahip olunan teknoloji c-düzlem

çeşitliliğine henüz erişememiştir. Etkili bir emisyon verimliliği çok yüksek kalite bulk GaN alttaşların kullanımına bağlıdır, ki bu alttaşlar oldukça pahalı ve çok küçük olup, dolayısıyla LED üretimi için çok uygun değildirler. C-düzlem üzerine büyütülen çok iyi malzeme kalitesi sayesinde, LED performansı için halen ölçüleri belirleyen düzlemdir.

LED aktif bölgesinden elektron kaçışını azaltmak için en uygun yaklaşım EBL yapısının yüksekliğini artırmaktır. AlGaN yapılarından InAlN yapılarına kayılması GaN ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ her ikisinin de bant kenarlarının yüksekliğini (*offset*) ve aktif bölgenin $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ tabakası ile örgü uyumunu artırmaktadır. Verimdeki bozulma azaltılmasında InAlN EBL yapı AlGaN EBL yapıdan daha etkili olduğu gözlenmiştir [19], fakat *p*-GaN bölgesinde bariyerlerdeki bir genişleme de değişik enjeksiyonunu önlemektedir. Mg-katkılı InAlN bu problemi biraz olsun azaltmaktadır, fakat yeteri kalınlıkta InAlN yapısının *p*-katkılama yapılması oldukça zordur. Hedeflenen çözümlerden birisi *p*-katkılı InAlN/GaN süper örgülerden (*superlattice*) oluşan EBL yapısı kullanılmaktadır [20].

Bazı araştırmacılar verim kaybını elektron kaçışı ile sonuçlanan polarizasyon etkilerine atfetmiştir. Bu problemi ortadan kaldırmak için, çoklu kuantum kuyularının ya da çift heteroeklemlerin aktif bölgesindeki polarizasyon uyumunu sağlamak için uygun bariyerler seçilmiştir. GaN bariyerler yerine AlInGaN [21] ya da InGaN [22] yapıların bariyer olarak kullanılması daha düşük verim kaybına yol açtığı görülmüştür.

Diğer bir elektron kaçışı olan sıcak elektron (*hot electron*) modeline göre yüksek enerjili elektronlar aktif bölgeye enjekte olmaktadır. Enjeksiyona bağlı olarak sahip oldukları potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşmektedir ve *n*-GaN bölgesinden aktif bölgeye difüz oldukları esnada ortamda bulunan her bir alandan etkilener ek enerji kazanmaktadırlar. Bu etkiyi azaltmak ve dolayısıyla elektron kaçışını hafifletmek için elektron soğutucu yapıları kullanılmaktadır [23]. Bu yapılar, *n*-GaN ve aktif bölge arasında kademeli InGaN elektron enjeksiyon (SEI/GEI) tabakalarından oluşmaktadır. Büyük bir verimliliğe sahip bu yöntem değişiklerin aktif bölgeye ulaşmasını engelleyen EBL yapılarının kullanımını ortadan kaldırmıştır. Her bir enerji adımı ideal olarak LO (*Boyuna optik*) fonon enerjisine eşit ya da biraz daha fazladır (GaN için 92 meV).

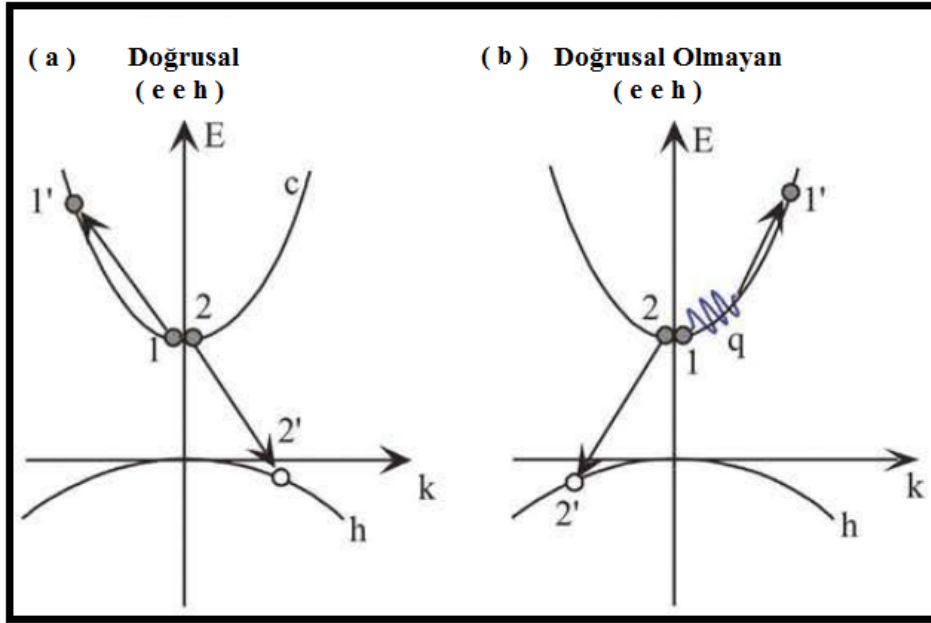
Aktif bölgeye değişik iletimini artırmanın diğer bir yolu bariyerlerin magnezyum ile katkılanmasıdır [24]. Bu işlem verimdeki azalmanın başlangıcını

geciktirmektedir, fakat aktif bölgedeki magnezyum bileşeninin artmasıyla band kenarı emisyon verimliliği düşmektedir. Dolayısıyla, LED verimliliğini azaltmaktadır. Alternatif olarak, magnezyum delta-katkılı bariyerler aynı zamanda çoklu kuantum kuyularında ya da çift hetero eklem yapılarda olası magnezyum difüzyonunu azaltmak için etkili bir yöntemdir [25].

InGaN LED yapılarında kaynağı çeşitli mekanizmalara atfedilen verim kayıplarının etkilerini azaltmak için görüldüğü gibi bir çok seçenek bulunmaktadır. *Auger* rekombinasyonu ve elektron kaçağı öncü olan iki unsurdur ve her iki hipotezi destekleyen bir çok teorik ve deneysel kanıtlar bulunmaktadır. Ancak, endüstri çok titiz bir şekilde ilerlemekte ve devamlı olarak büyütme, aygıt dizayn şemalarını optimize ederek LED performansını geliştirmektedir. LED yapılarında verimlilik sürecini daha iyi anlamak için, A-B-C modeli denilen yöntemi daha yakından inceleyelim:

InGaN/GaN yapılarında *Auger* rekombinasyon süreci verimlilik kaybına yol açan mekanizmalardan bir tanesidir ve farklı *Auger* rekombinasyon süreçleri rol almaktadır. Bunlardan ilki, Şekil 1.12 (a) da görüldüğü gibi doğrusal *Auger* rekombinasyon sürecidir. Bu süreçte, *eeh* türü, iletim bandından valans bandına düşen elektron tarafından salınan enerji diğer bir elektronu iletim bandı içerisinde ki daha yüksek bir enerji seviyesine uyararak için kullanılmaktadır. Bu zincir olay esnasında enerji ve momentum korunumu gereksinimleri sağlanmaktadır. Valans bandında olası bir *hhe* süreci iletim bandında meydana gelen *eeh* sürecine kıyasla oluşma olasılığı onda bir oranındadır, dolayısıyla bu ve diğer doğrusal *Auger* rekombinasyon süreçlerinin meydana gelmesi oldukça düşük ihtimallidir ve ihmal edilebilir olarak değerlendirilir [1].

Şekil 1.12 (b) de gösterilen doğrusal olmayan *Auger* rekombinasyon, ki doğrusal olan sürece paralel bir şekilde yer alabilir, fonon yardımcı süreçleri ve/veya diğer bir çok saçılma mekanizmalarını içeren süreçleri kapsamaktadır. Doğrusal süreçler sıcaklığa eksponansiyel olarak bağlıyken, doğrusal olmayan süreçler kuvvet katsayısı bağımlılığı göstermektedir.



Şekil 1.12: (a) Doğrusal ve (b) doğrusal olmayan e-h Auger rekombinasyon süreçleri.

İletim bandında daha üst bir seviyeye elektron uyarımı durumunda ki Auger rekombinasyon hızı alttaki ifade verilir:

$$U_{Auger} = c_n [n(pn - n_i^2)] = c_n (n_0 + \Delta n) [(p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta n) - n_i^2] \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte c_n elektronlar için Auger rekombinasyon katsayısını göstermektedir. n ve p sırasıyla elektron ve deşik konsantrasyonu, p_0 ve n_0 denge konsantrasyonları, Δn ve Δp ise aşırı taşıyıcı konsantrasyonlarını göstermektedir. GaN yapılarıdaki normal olarak n tip olduğu ve içsel taşıyıcı konsantrasyonu n_i çok küçük olduğu için $p_0 \ll n_0$ ve $n_i^2 \ll (p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta n)$ tanımlanarak denklem (1.2) alttaki gibi yazılabilmektedir.

$$U_{Auger} = c_n \Delta p (n_0 + \Delta n)^2 = c_n \Delta n (n_0 + \Delta n)^2 \quad (1.3)$$

Yüksek enjeksiyon seviyeleri için, aşırı taşıyıcı konsantrasyonu dengedeki elektron konsantrasyonunu önemsiz kılarak baskın hale gelmektedir, dolayısıyla Auger rekombinasyon hızı alttaki gibi yazılabilir:

$$U_{Auger} = c_n (\Delta n)^3 \approx c_n n^3 \quad (1.4)$$

Deşiklerin valans bant içerisinde daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılma durumunun dahil olduğu süreçte, Auger rekombinasyon hızı:

$$U_{Auger} = c_p \left[p (pn - n_i^2) \right] \quad (1.5)$$

ile verilmektedir. Hem elektronlar hem de deşiklerin dahil olduğu bir Auger rekombinasyon sürecinde rekombinasyon hızı denklem (1.2) ve (1.4) toplamı ile ifade edilmektedir.

Yüksek enjeksiyon seviyelerinde daha etkili olan *Auger* rekombinasyonuna ek olarak, SRH rekombinasyonu daha düşük enjeksiyon seviyelerinde daha fazla farkedilmektedir. *p*-tipi yarıiletkenelerde meydana gelen SRH rekombinasyon hızı, ışımsal olmayan hız veya ışımsal olmayan rekombinasyon hızı ile alttaki gibi ifade edilmektedir.

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_t (pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i \cosh \left[\frac{(E_t - E_i)}{kT} \right]} = \frac{1}{\tau_{nr}} \frac{(pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i \cosh \left[\frac{(E_t - E_i)}{kT} \right]} \quad (1.6)$$

N_t kusur konsantrasyonu, σ kusurların yakalama kesit alanı ve v_{th} termal hızıdır. Net rekombinasyon hızının kusur merkezi enerji seviyesine bağımlılığı \cosh terimi içerisinde yer almaktadır. Kusur merkezlerinin içsel enerji seviyesinde ya da yakınlarında olduğu yaklaşımında bulunursak eğer, denklem (1.6) alttaki ifadeye indirgenebilir.

$$U = \frac{1}{\tau_{nr}} \frac{(pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i} \quad (1.7)$$

Eğer taşıyıcı konsantrasyonunu denge ve aşırı taşıyıcı konsantrasyonu yönünden açıklarsak eğer, denklem (1.7) alttaki ifade ile açıklanabilir.

$$U = \frac{1}{\tau_{nr}} \frac{[(p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta n) - n_i^2]}{p_0 + \Delta p + n_0 + \Delta n + 2n_i^2} \quad (1.8)$$

Auger rekombinasyon sürecinde yaptığımız $p_0 \ll n_0$ ve $n_i^2 \ll (p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta n)$ yaklaşımları, GaN yapıların normalde n -tipi yapı olduğundan, içsel taşıyıcı yoğunluğu n_i çok küçük olmasından dolayı ve $\Delta p = \Delta n$, uygularsak eğer denklem (1.8) alttaki gibi ifade edilebilir.

$$U = \frac{1}{\tau_{nr}} \frac{\Delta n(n_0 - \Delta n)}{2\Delta n + n_0} \quad (1.9)$$

Yüksek enjeksiyon yoğunluklarında ve/veya göreceli olarak $\Delta n > n_0$ düşük denge electron yoğunluklarında ki $n_0 + \Delta n \approx \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p \approx \Delta p = \Delta n \approx n$ ve $pn \gg n_i^2$ anlamına gelir ve dolayısıyla denklem (1.9) alttaki formu alır.

$$U = \frac{\Delta n}{2\tau_{nr}} = A\Delta n, \quad A = (2\tau_{nr})^{-1} \quad (1.10)$$

Auger ve SHR rekombinasyonlarına ek olarak, ışımsal rekombinasyon hızı Van Roosbroeck and Shockley tarafından çalışılmıştır [26]. Van Roosbroeck and Shockley oluşturmuş oldukları denge uygulaması ısı dengede ve E foton enerjisinde $\phi(E)$ denge salınım şiddetini vermektedir.

$$\phi(E) = \frac{8\pi n_R^2 E^2 \alpha(E)}{h^3 c^2} \frac{1}{e^{E/kT} - 1} \quad (1.11)$$

$\alpha(E)$ enerjiye bağılı soğurma katsayısıdır ve direkt bant yapısına sahip yarıiletkenler için alttaki gibi ifade edilmektedir [27]. $A^* \approx q^2(2m_r^*)^{3/2}/(n_R ch^2 m_n^*)$, m_r^* indirgenmiş etkin kütedir. m_n^* elektron etkin kütesi ve m_p^* deşik etkin kütesi bakımından $1/m_r^* = 1/m_n^* + 1/m_p^*$ denklemleri ile verilmektedir ve n_R kırılma indisidir.

Birim hacimdeki üretme hızı olası bütün olası enerjileri kapsayan verilen bir enerjide emisyon şiddetinin integrali olarak alttaki ifade ile verilmektedir.

$$G = \int_0^{\infty} \phi(E) dE = \int_0^{\infty} \frac{8\pi n_R^2 E^2 \alpha(E)}{h^3 c^2} \frac{dE}{e^{E/kT} - 1} = A^* \int_0^{\infty} \frac{8\pi n_R^2 E^2 (E - E_g)^{1/2}}{h^3 c^2} \frac{dE}{e^{E/kT} - 1} \quad (1.12)$$

Dış bir uyarma ile, toplam üretim hızı R alttaki gibi verilmektedir.

$$R = \frac{Gnp}{n_0 p_0} \equiv Bnp \quad (1.13)$$

Bu ifade de $B = G/(n_0 p_0)$. $p \approx p_0$ olan p -tipi yarıiletkenlerde düşük uyarılma seviyelerinde, ışınsal ömür (*lifetime*) $n \gg n_0$ durumu için,

$$\tau_r = \frac{n - n_0}{R} = \frac{n - n_0}{G/(n_0 p_0)} \frac{1}{np} \approx \frac{1}{Bp} \approx \frac{1}{Bp_0} \quad (1.14)$$

ya da

$$dn/dt = Bp_0 \Delta n \quad (1.15)$$

ifadesi ile verilmektedir. B ışınsal rekombinasyon katsayısı doğrusal bant yapısına sahip yarıiletkenler için 10^{-9} ve $10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ve doğrusal olmayan bant yapısına sahip yarıiletkenler için 10^{-13} ve $10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Aynı zamanda, verilen bir uyarma yoğunluğu için ışınsal rekombinasyon düşük enjeksiyon seviyeleri için katkılama seviyesinin artması ile arttığı gözlenebilir.

p -tipi yarıiletkenlere benzer olarak, $n \approx n_0$ durumundaki n -yarıiletkenlerde ışımsal ömür $p \gg p_0$ için,

$$\tau_r = \frac{p - p_0}{R} = \frac{p - p_0}{G/(n_0 p_0)} \frac{1}{np} \approx \frac{1}{Bn} \approx \frac{1}{Bn_0} \quad (1.16)$$

ya da

$$dp/dt = Bn_0 \Delta n \quad (1.17)$$

olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki denklemlerden, düşük enjeksiyon seviyelerinde azınlık taşıyıcılarının ışımsal ömrü tam aksine çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonuna orantılı olduğu özetlenebilir. Yüksek enjeksiyon seviyelerinde, ışımsal rekombinasyon hızı denklemi (1.13), $n = n_0 + \Delta n$, $p = p_0 + \Delta p$, $\Delta n = \Delta p \gg n_0$ ve p_0 kullanılarak alttaki ifade ile verilmektedir.

$$R = B\Delta n^2 \approx Bn^2 \quad (1.18)$$

Bu yüksek akım enjeksiyon seviyelerinde, ışımsal şiddet aşırı elektron ve deşik konsantrasyonuna veya ışımsal rekombinasyon katsayısının sabit kaldığını varsayarak aşırı elektron konsantrasyonunun karesine bağlıdır.

Yüksek enjeksiyon seviyesi durumunda, n elektron ve p deşik konsantrasyonu hemen hemen birbirine eşittir ve her ikisi de n_0 değerinden daha büyüktür. Dolayısıyla, $n = \Delta n + n_0 \approx \Delta n$ olacaktır. Sonuç olarak, *Auger* rekombinasyon hızı n^3 ile orantılı olacaktır. Kıyaslama için, yüksek enjeksiyon seviyelerinde [$U_{b-b} = B(pn - n_i^2)$] banttan banda ışımsal rekombinasyon hızı Bn^2 ile orantılı olacaktır, ve tuzaklarda meydana gelen $U_{SRH} \approx \tau_n^{-1}(n_p - n_{p0})$ SRH rekombinasyon hızı n ile orantılı olacaktır. Basit ifadeler ile, ışımsal olmayan *Auger* rekombinasyonu, banttan banda ışımsal rekombinasyon ve derin seviyelerde meydana gelen rekombinasyonlardan dolayı yüksek enjeksiyon seviyelerinde ki toplam rekombinasyon hızı $n = \Delta n + n_0 \approx \Delta n$ olduğunu varsayarak alttaki ifade ile verilmektedir.

$$U = -\frac{dn}{dt} = B_{d1}n + B_{b-b}n^2 + B_A n^3 \quad (1.19)$$

Burada B_{d1} , B_{b-b} ve B_A sırasıyla derin seviye rekombinasyon katsayısı (A), banttan banda ışınsal rekombinasyon katsayısı (B) ve ışınsal olmayan Auger rekombinasyon katsayısı (C) olup birimleri yine sırasıyla s^{-1} , cm^3s^{-1} ve cm^6s^{-1} şeklindedir. Foton yardımıyla uyarım ya da akım ile taşıyıcı enjeksiyonu gibi bir üretim var ise, G üretim terimi veya enjeksiyon terimi $\Delta J/(q)$ ya da duruma bağlı olarak her ikisi birden denklem (1.19)'un sağ kısmına eklenerek alttaki ifadeler elde edilir. J parametresi rekombinasyonun olduğu bölgedeki akım yoğunluğudur.

$$-\frac{dn}{dt} = B_{d1}n + B_{b-b}n^2 + B_A n^3 - (G) \quad (1.20)$$

$$-\frac{dn}{dt} = B_{d1}n + B_{b-b}n^2 + B_A n^3 - \left(\frac{\Delta J}{q}\right) \quad (1.21)$$

A, B ve C katsayıları kullanılarak akım yoğunluğuna karşılık verimlilik hesaplanabilmektedir. Rekombinasyon bölgesinin çift heteroeklem ve çoklu kuantum kuyulu LED yapılarıdaki gibi çok ince olduğunu varsayarsak, azınlık taşıyıcılarının uzaysal dağılımı lineer olarak düşünülebilir ve ortaya çıkan sabit difüzyon akımı alttaki ifade ile temsil edilebilir.

$$\Delta J/q = J/(qd) \quad (1.22)$$

Burada, d rekombinasyon bölgesinin kalınlığını temsil etmektedir. Tekrar belirtirsek, $x=d$ noktasında aşırı azınlık taşıyıcı konsantrasyonu sıfır sayılmaktadır. Bu durumda denklem (1.22),

$$-\frac{dn}{dt} = B_{d1}n + B_{b-b}n^2 + B_A n^3 - \frac{J}{qd} = An + Bn^2 + Cn^3 - \frac{J}{qd} \quad (1.23)$$

olarak yazılabilmektedir ki kararlı halde,

$$\frac{J}{qd} = An + Bn^2 + Cn^3 \quad (1.24)$$

ifadesine indirgenebilir. Bu durumda iç kuantum verimliliği,

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\tau_{\text{eff}}}{\tau_r} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \quad (1.25)$$

ifadesi ile verilmektedir. d ve denklem (1.24) bilinerek iç kuantum verimliliği enjekte edilen akım yoğunluğuna göre hesaplanabilmektedir.

2. Mg δ -KATKILI BARIYERLERE SAHİP InGaN LED YAPILARDA KUANTUM VERİMLİLİĞİ VE TAŞIYICI ENJEKSİYON SİMETRİSİNİNDEKİ GELİŞİM

Standart InGaN tabanlı heteroeklem veya kuantum kuyulu LED yapılarında, özellikle yüksek akım yoğunluklarında optik çıkış gücünün doğrusal olmayan davranışı literatürde “verim düşüşü” olarak adlandırılır [1]. Bu durum kendisini, bazı yapılarında 50 A/cm^2 akım yoğunluğundan daha düşük değerlerde dahi verimliliğin önce bir tepe yapmasına ve daha sonra akım yoğunluğu arttıkça da monoton bir şekilde düşmesi şeklinde kendini göstermektedir. Asimetrik taşıyıcı konsantrasyonunun sebep olduğu düşünülen bu verimlilik kaybını önlemek için yürütülen yaklaşımlardan biri de yapıda Mg δ -katkılı bariyerlerin kullanılmasıdır. Bu bölümde, bu konu hakkında yapılan çalışmalara yer verilecektir.

2.1 Genel Bakış

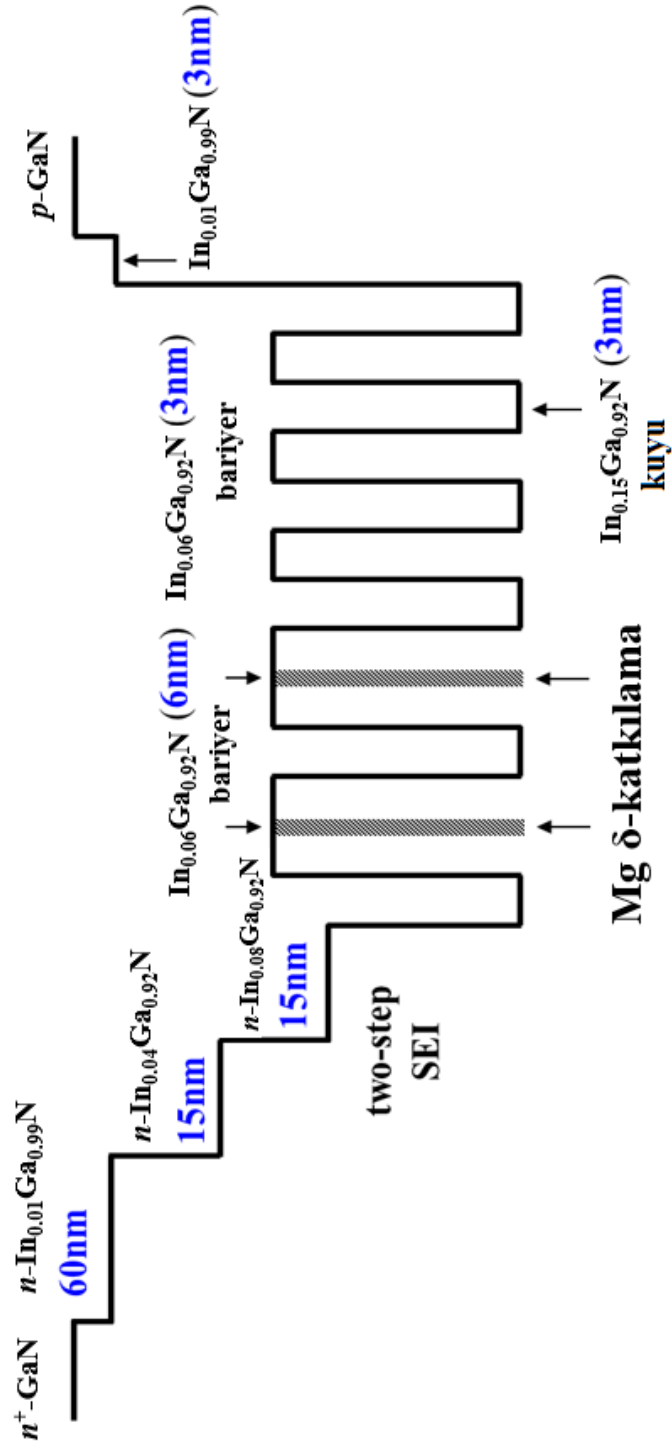
InGaN tabanlı LED’ler son zamanlarda genel aydınlatma için beyaz LED’lerin üretiminde önemli bir rol almaktadır [28]. Mavi LED’lerin gelişimindeki büyük başarılarla rağmen, yüksek enjeksiyon seviyelerinde ki verimlilik düşüşünün arkasında yatan mekanizmalar halen yoğun olarak tartışılan ve çalışılan konular arasındadır [29]. Yaşanılan bu verimlilik kaybının önemli sebeplerden biri olarak elektriksel enjeksiyon altında deşiklerin aktif bölgeye yeterli seviyede ulaşamaması gösterilmektedir. Deşiklerin aktif bölgeye ulaşımı elektronlara göre daha yavaş olmasından dolayı, enjeksiyon seviyesi arttıkça aktif bölgeye daha hızlı ulaşan elektronlar ile ışımsal rekombinasyon yapması beklenen seviyede olmamaktadır. Bu durum aynı zamanda aktif bölgedeki elektron birikimine (ki ileri taşıyıcı artmasına karşı iç gerilime sebep olur) veya rekombinasyon gerçekleşmeden elektronların p-GaN tabakasına kaçmasına sebep olmaktadır. Bunun yanısıra, çoklu kuantum kuyulu LED yapılarında, kuyuların n-GaN tabakasına daha yakın olmasından dolayı rekombinasyon zayıf deşik iletimi yüzünden verimsiz olmaktadır. Bu durum taşıyıcıların büyük oranla p-GaN yakın kuyularda ışımsal olmayan rekombinasyon

neden olmaktadır [30,31]. Bu problemin daha detaylı araştırılması için, çalışmalar çoklu kuantum kuyulu LED yapılarında bariyerlerin p-tipi katkılanması ve p-GaN yapısında deşik konsantrasyonunun artırılması üzerine yoğunlaşmıştır [32]. İlk yaklaşıma ilişkin olarak, aktif bölgedeki Mg miktarının artışı bant kenarı emisyonunun azalmasına yol açmaktadır, dolayısıyla LED verimliliğindeki azalma üzerinde doğrudan bir etkisi vardır [33]. Bu sorunu ortadan kaldırmak ve LED verimliliğini artırmak için bariyerlerin p-tipi δ -katkılanması önerilmiştir. Bu katkılama işleminde, Mg- δ -katkılı bariyerlerden aktif bölgeye olası Mg difüzyonunu azaltmak için bariyerlerin büyütülmesi esnasında büyütme durdurulur. Daha sonra, Mg katkı malzemesi kimyasal buhar olarak depolanır ve üzerine kalan katmanların büyütülmesine devam edilir. Deneysel sonuçlar LED yapılarının aktif bölgelerindeki elektron ve deşik konsantrasyonlarının sayısal simülasyonları ile desteklenmiştir.

2.2 Deneysel Detaylar

Yaklaşık olarak 430 nm de salınım yapan üç adet c-düzlem InGaN LED yapıları MOCVD tekniği ile $\sim 4 \mu\text{m}$ kalınlıkta n-tipi GaN üzerine büyütülmüştür. $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ ve $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ yapılarından oluşan 15+15 nm merdiven tipi elektron sürücü (*Staircase Electron Injector*, SEI) katmanları enjekte olan sıcak elektronların verimli bir şekilde yavaşlatılması için aktif bölge altına yerleştirilmiştir. SEI yapısı altına yerleştirilen 60 nm n-tipi ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ temel yapı, GaN'a kıyasla daha yumuşak bir örgü yapısına sahip olmasından dolayı aktif bölgedeki zorlamayı azaltmak için büyütülmüştür. Şekil 2.1 de görüldüğü gibi, bütün LED yapılar göreceli olarak GaN ve $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ yapılara göre daha düşük enerjili $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ bariyerler ile ayrılan hex (6x) 3-nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ çift heteroeklem aktif bölgelere sahiptir. Düşük enerjili bariyerler aktif bölge boyunca deşiklerin iletimlerini kolaylaştırılması açısından önemlidir. n-GaN yapısına yakın ilk iki $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ bariyer 6 nm kalınlığındadır ve kalan üç bariyer ise 3 nm kalınlığındadır. Mg δ -delta katkılama işlemi LED yapıların bir tanesi için sadece ilk 6 nm kalınlıktaki bariyer, diğer LED için ise ilk iki 6 nm kalınlıklı bariyerler için gerçekleştirilmiştir. Üçüncü LED yapısı bariyerlerde her hangi bir Mg δ -katkılanma olmadan referans olarak büyütülmüştür. n-GaN'a en yakın ilk iki $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ bariyerler aktif bölge içerisindeki p katkı bariyerlerden olası Mg difüzyonunu önlemek için diğer

bariyerlerden daha kalın tutulmuştur. Mg δ -katkılama şu şekilde uygulanmıştır: 6 nm kalınlıktaki bariyerlerin ilk 3 nm'lik kısmı büyütüldükten sonra büyütme durdurulmuş ve Cp₂Mg (Bis-cyclopentadienyl-Magnesium) kaynağı 20 sn boyunca büyüme haznesine gönderilmiştir. Daha sonra, 6 nm bariyerin kalan 3 nm'lik kısmı ile büyütme devam edilmiştir. Bu süreç sadece ilk iki 6 nm kalınlığa sahip bariyerler için gerçekleştirilmiştir. LED yapıları 100 nm kalınlıklı Mg katkı p-GaN yapıların büyütülmesi ile tamamlanmıştır. Hall ölçümlerinden, Mg δ -delta katkı bariyerlerde ve Mg katkı p-GaN yapılarda ki deşik konsantrasyonları sırasıyla, $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Kare düz model şekilleri (*square mesa patterns*) ($400 \times 400 \mu\text{m}^2$) fotolitografi ve klor tabanlı indüksiyon çiftlenim aşındırma (ICP *etching*) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. n-tipi omik kontaklar için 860 °C de 60 saniye boyunca uygulanan Ti/Al/Ni/Au (30/100/40/50 nm) metalizasyon kullanılmıştır. 5nm/5nm kalınlıkta Ni/Au elektrotlar p-kontak için biriktiren 40nm/50nm Ni/Au ile yarı transparan p-kontaklar elde edilmiştir.



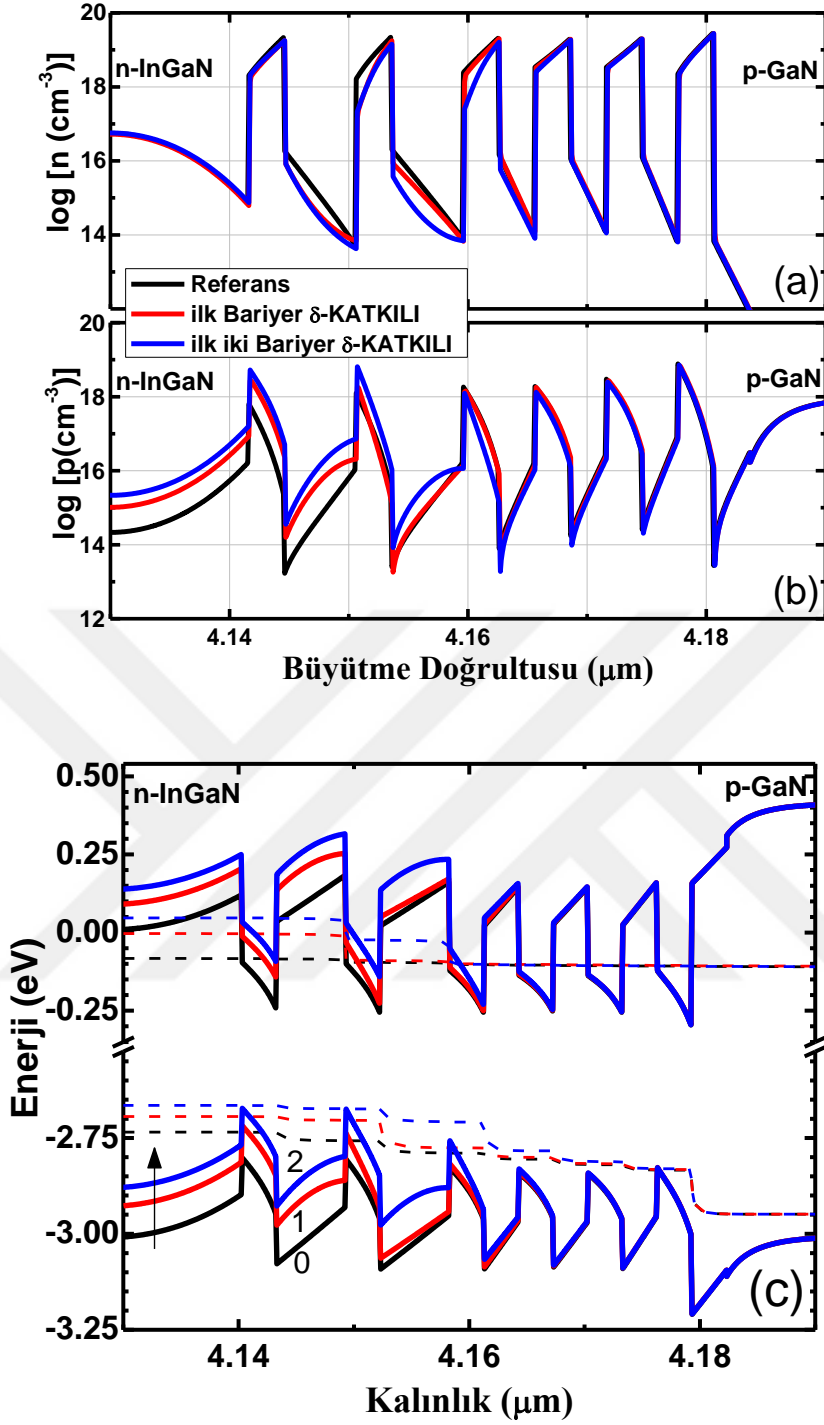
Şekil 2.1: Hex (6x) çift heteroeklem LED yapılarının iletim bandı şematığı. Mg δ -delta katkılama, n^+ -GaN tarafına yakın hem sadece 6 nm kalınlıklı ilk bariyer hem de ilk ve ikinci 6 nm kalınlık In_{0.06}Ga_{0.94}N bariyerler ile çalışılmıştır. Geri kalan tüm bariyerler katkısızdır ve 3 nm kalınlığa sahiptirler. Referans örnek olarak, Mg δ -delta katkılamanın yapılmadığı bariyerlere sahip LED yapısı kullanılmıştır.

2.3 Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalara ışık tutması ve bir karşılaştırma yapılabilmesi bakımından ilk olarak, deşiklerin enjeksiyon süreçlerinde Mg δ -katkının etkisini belirlemek için III-Nitrür materyal sistemine uygun simülasyon parametrelerini içeren Silvaco Atlas yazılımı kullanılmıştır. Simülasyon hesaplamalarında SRH rekombinasyon katsayısı $A=10^7 \text{ s}^{-1}$, ışınsal rekombinasyon katsayısı $B=10^{-10} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$, Auger rekombinasyon katsayısı $C= 10^{-30} \text{ cm}^6\text{s}^{-1}$ ve %40 teorik polarizasyon yk parametreleri kullanılmıştır [34].

şekil 2.2 (a) 100 A/cm^2 enjekte edilen akım yoğunluğu altında incelenen LED yapılarının aktif bölgelerinde ki elektron dağılımını göstermektedir. şekilde görüldüğü gibi SEI bölgesine enjekte edilen sıcak elektronların etkili bir şekilde soğutulmasından dolayı, elektron dağılımı göreceli olarak referans LED yapısında daha homojen bir görünümdedir. Bariyerlerin Mg δ -katkılanması, aktif bölgedeki elektron dağılımı üstünde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen, şekil 2.2 (b) de görüldüğü üzere n-bölgesine yakın kuyularda ki deşik dağılımı katkılamaadan dolayı önemli lde artmaktadır.

Deşiklerin aktif bölgelerin derinlerine doğru iletimi, göreceli olarak büyük etkin kütlelerinden ve düşük hareketliliklerinden dolayı gecikmektedir. Dolayısıyla, gerilim altında aktif bölge içindeki azınlık taşıyıcıları olan deşiklerin konsantrasyonu elektronların konsantrasyonuna göre daha düşük seviyede kalmaktadır. Bu durum ışınsal rekombinasyon verimliliğini azaltmaktadır.

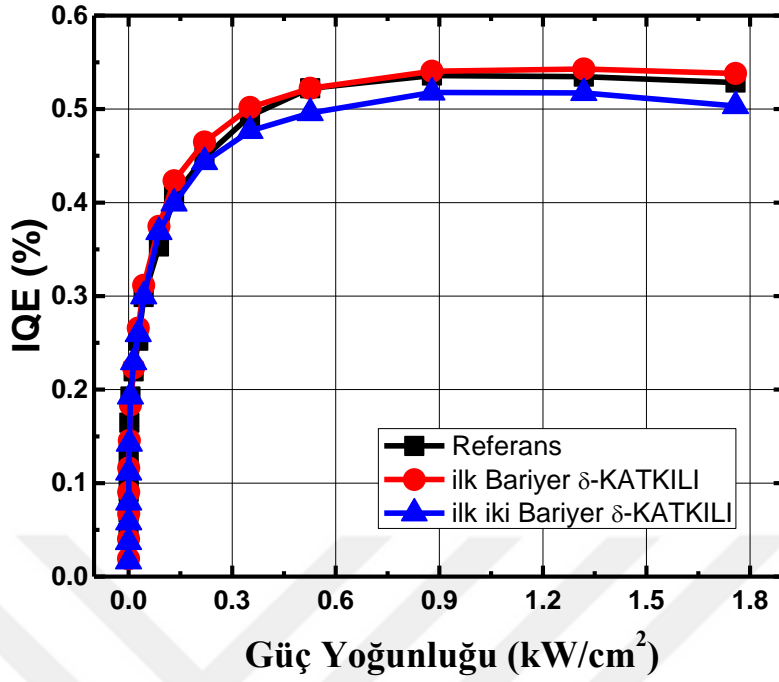


Şekil 2.2: Silvaco Atlas simülasyon programı ile 100 A/cm² akım enjeksiyonunun da simüle edilmiş referans LED yapısı (eğri 0), ilk bariyeri Mg δ-delta katkılı (eğri 1) ve ilk iki bariyeri Mg δ-delta katkılı (eğri 2) LED yapıları için (a) elektron konsantrasyonu (b) deşik konsantrasyonu ve (c) karşılık gelen enerji band yapılarının şematığı. Kesikli çizgiler quasi-Fermi seviyelerini göstermektedir. Sol taraf 15 + 15 nm SEI yapısına sahip n-GaN tarafıdır.

Referans örneği için Şekil 2.2 (b) de görüldüğü üzere, aktif bölge boyunca deşik dağılımı elektronlarda olduğu gibi homojen değildir. Deşik konsantrasyonu p -GaN bölgesine en yakın InGaN kuantum kuyusunda en yüksek olup LED yapısındaki n -bölgesine doğru hızlı bir şekilde azalmaktadır. Çoklu kuantum kuyulu LED yapıları için, elektron ve deşik rekombinasyonu başlıca p -GaN bölgesine yakın aktif tabakalarda meydana gelmekte iken, aktif bölgenin geri kalan kısımlarında deşik konsantrasyonu yetersiz olmaktadır. n -GaN bölgesine yakın InGaN bariyeri Mg ile δ -katkılama yapıldığı zaman, Şekil 2.2 (b) de görüldüğü gibi aktif bölgelere yakın deşik konsantrasyonu yaklaşık olarak bir merteye daha fazladır. Bu durum ayrıca elektron ve deşik konsantrasyonunun asimetric olmasını büyük ölçüde azaltmakta ve rekombinasyon verimliliğini artırmaktadır.

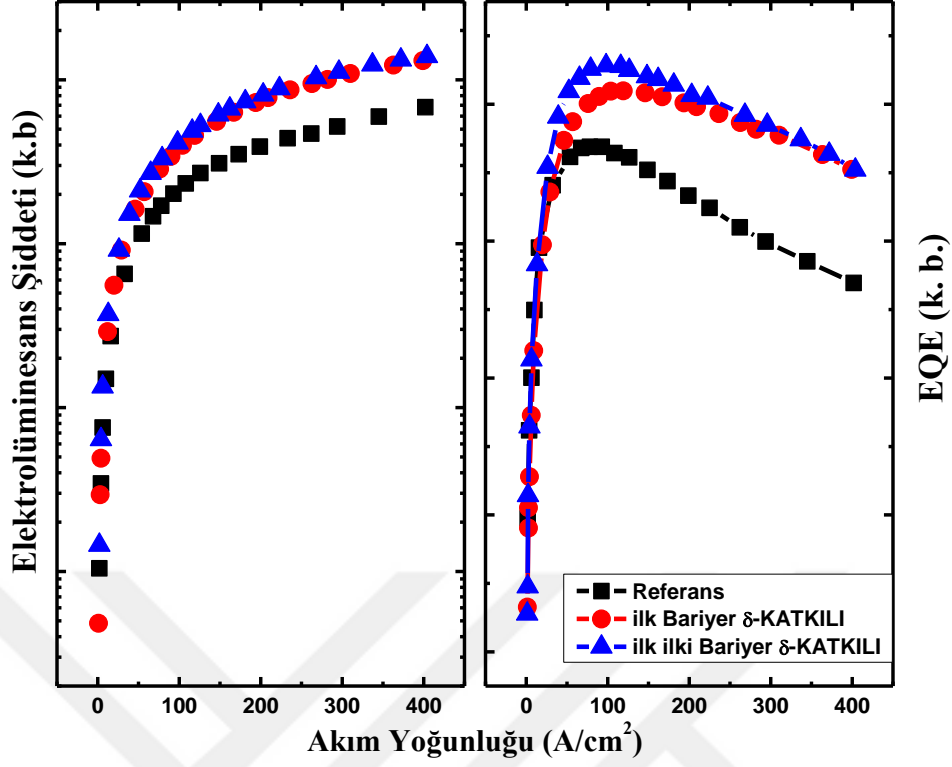
İlk iki 6 nm kalınlığa sahip InGaN bariyerler Mg ile δ -delta katkılama yapıldığı zaman, n -GaN bölgesine yakın aktif bölgelerde, özellikle ikinci kuantum kuyusundaki deşik konsantrasyonu daha fazla artmaktadır ve bu artıştan dolayı LED çıkış gücünü daha fazla olması beklenmektedir. Dahası, n -GaN bölgesine yakın bariyerlerin δ -delta katkılanması deşiklerin aktif bölgeye iletiminin kolaylaşmasına yol açan bant bükülmelerine yol açmaktadır. Şekil 2.2 (c) 100 A/cm² akım yoğunluğunda üç LED yapısı için de simüle edilen enerji bant yapılarını göstermektedir.

n -GaN bölgesine yakın In_{0,06}Ga_{0,94}N bariyerin δ -delta katkılanması, deşikler için etkin bariyer yüksekliğini p -GaN valans bandının maksimum noktasına göre referans LED yapısındaki 70 meV değerinden 40 meV değerine azaltmaktadır. İlk ve ikinci bariyerlerin δ -delta katkılanması bariyer yüksekliğini 80 meV değerine kadar azaltmaktadır.



Şekil 2.3 : Güç yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak iç kuantum verimliliği (IQE).

LED yapılarının iç kuantum verimi ve optiksel kalitelerini incelemek için rezonans PL şiddetinin uyarma yoğunluğuna bağlı olarak ölçülmesi 15 K ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. İkincil harmonik sistem ile frekansı ikiye katlanmış 380 nm Ti:Safir lazer kullanılarak LED yapılarının sadece aktif bölgelerin uyarılmasına özen gösterilmiştir. Şekil 2.3 LED yapılarının IQE değerlerini uyarma yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak oda sıcaklığındaki PL şiddetlerinin 15 K sıcaklığında PL şiddetlerine oranlanması ile elde edilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi bu model düşük sıcaklıklarda IQE değerinin %100 olarak kabul edilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 2.3 de gösterilen bütün LED yapıları için IQE değerlerinde kaydadeğer bir verim düşmesi gözlenmemiştir. En yüksek uyarma yoğunluğunda ki IQE değerleri referans örneği için %52, ilk bariyeri δ -katkılı LED yapısı için %53 ve ilk iki bariyeri δ -katkılı LED yapısı için %50 olarak ölçülmüştür ve her üç örnekte düşük uyarma yoğunluğunda IQE değeri monotonik olarak artmaktadır. Bu durum, tüm LED yapıların benzer optiksel kaliteye sahip olduklarını göstermektedir.



Şekil 2.4 : İncelenen LED yapıları için akım yoğunluğuna karşı (a) normalize edilmiş EL şiddeti ve (b) görelî EQE değerleri

Bariyerlerin Mg δ -katkılanmasının LED yapılarının performansları üzerindeki etkiyi göstermek için normalize edilmiş elektrolüminesans (EL) şiddetleri ve görelî EQE değerleri atma uyarım altında ölçülmüştür. Isınma etkisini ortadan kaldırmak için görev döngüsü % 0,1 olarak ayarlanmıştır. Şekil 2.4 (a) da gözlenildiği gibi, Mg δ -katkılı LED yapılar, 50 A/cm^2 değerinden daha büyük akım yoğunluklarında daha yüksek EL şiddeti göstermektedir. Bu durum, referans örneğine kıyasla Mg δ -katkılı LED yapıların aktif bölgelerinde ki Mg yerleşimiyle alakalı materyal bozulumu olmadığını bir göstergesi olarak yorumlanabilir.

Şekil 2.4 (b) de gözlenildiği üzere tek bariyeri δ -katkılı LED yapısı için EQE tepe değeri referans örneğine kıyasla \sim %20 daha yüksektir. LED yapılarının n-bölgesine yakın olan ilk iki bariyerin δ -katkılanması yüksek Mg miktarının sebep olduğu aktif bölgenin kalitesindeki hafif bozulmadan dolayı EQE tepe değerinde önemli derecede bir artış sağlanmamıştır. 400 A/cm^2 akım yoğunluğunda pik noktasına göre verimdeki azalma δ -katkılı LED yapılar için %14 olup referans LED yapısı için ise %23 şeklindedir. EQE tepe değerinde ki düşüşün başlangıç noktası ise

δ -katkılı LED yapılar için 120 A/cm^2 referans LED yapısı için ise 80 A/cm^2 şeklindedir gözlenmiştir. Verilen bir aktif bölge yapısı için, verimdeki düşüşün başladığı akım yoğunluğunda artış, deşik miktarındaki iyileşmenin bir göstergesidir. Çünkü deşiklerin aktif bölgeye olan enjeksiyonu, elektronların aktif bölgeye ulaşma hızına göre yavaş olmasından dolayı, elektronlar ışınsal rekombinasyona uğramadan verimliliği azaltarak aktif bölgeden kaçmaya başlarlar. EQE tepe değerindeki artışa ek olarak bu bulgular yüksek akım yoğunluğunda verimlilikteki azalmayı kısmen engelleyen deşik miktarındaki artışı göstermektedir.

Sonuç olarak, çok kuyulu LED yapılarda bariyerlerin Mg ile δ -katkılama yapılması aygıtın kuantum verimliliklerinin artırdığını gösterilmiştir. *n*-GaN tarafında ki ilk bariyerin Mg δ -katkılanması, görelî EQE pik değeri artırılmış deşik enjeksiyonundan ve sayısal simülasyon ile de desteklenmiş taşıyıcı-enjeksiyon asimetrisindeki azalmadan dolayı referans LED yapısına kıyasla %20 artmıştır. *n*-GaN tarafına Mg δ -katkılı bir bariyer eklenmesi, simülasyon sonuçlarına rağmen EQE pik değerinde marjinal bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum iki bariyerin Mg δ -katkılanma sonucu, yüksek Mg miktarının aktif bölgenin kalitesinde bozukluğa yol açarak beklenen ileri bir gelişimi engellediği düşünülmektedir.

3. SICAKLIĞA BAĞLI ZAMAN ÇÖZÜMLÜ FOTOLÜMINESANS ÖLÇÜMLERİNDEN InGaN LED YAPILARININ KUANTUM VERİMLİLİĞİ VE AKTİF BÖLGE BOYUTSALLIĞININ BELİRLENMESİ

3.1 Genel Bakış

InGaN tabanlı LED yapılar genel aydınlatmadaki geniş ölçekte kullanımlarından dolayı son yirmi yıldır yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Çevre dostu olmasının yanı sıra uzun çalışma ömrü ile önemli derecede enerji tasarrufu sağlamasından dolayı son zamanlarda katıhal aydınlatmasında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, InGaN LED yapıların verimlilikleri halen teorik limitlerin altındadır ve yüksek enjeksiyon seviyelerinde verim kaybına uğramaktadır [1]. Asimetrik katkılanmayı azaltmak için GaN yapılarında geliştirilmiş p tipi iletkenliğine ihtiyaç olduğu konusunda literatürde ortak bir görüş benimsenmiş olmasına rağmen, en yüksek EQE sağlayan optimum aktif bölge yapısı ile ilgili farklı görüşlerin önerilmesine ve çalışmaların yapılmasına halen yoğun bir şekilde devam edilmektedir.

Kuantum kuyular daha fazla taşıyıcı sınırlaması sağlarken, göreceli daha kalın kuyular (veya çift heteroeklemler) daha geniş rekombinasyon hacmi ve ışık şiddeti sağlamaktadır. Bunun yanı sıra polarizasyon alanı varlığında, aktif bölgenin boyutsallığı ışımsal rekombinasyon hızını belirlemede olup aygıtın kuantum verimliliği üzerinde büyük bir etkisi vardır [35]. Daha kalın kuyulara sahip c-düzlem InGaN/GaN LED yapılarında, daha büyük polarizasyon alanının yol açtığı elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının üst üste binme oranının azalmasından dolayı ışımsal yarı ömür daha uzundur [36]. Yaklaşık %11 IQE verimli yüksek In-katılım oranına ve 3 nm kuyu kalınlığına sahip InGaN/GaN LED yapı için oda sıcaklığında ölçülen ışımsal sönümlenme zamanı olarak 686 ns rapor edilmiştir [37]. Diğer bir çalışmada ise, 1,5 nm ve 2 nm kuyu genişliğine sahip $In_{0.23}Ga_{0.77}N/GaN$ LED yapılarında sırasıyla oda

sıcaklığında ölçülen ışınal sönüm zamanları 168 ns ve 242 ns olarak rapor edilmiştir [38].

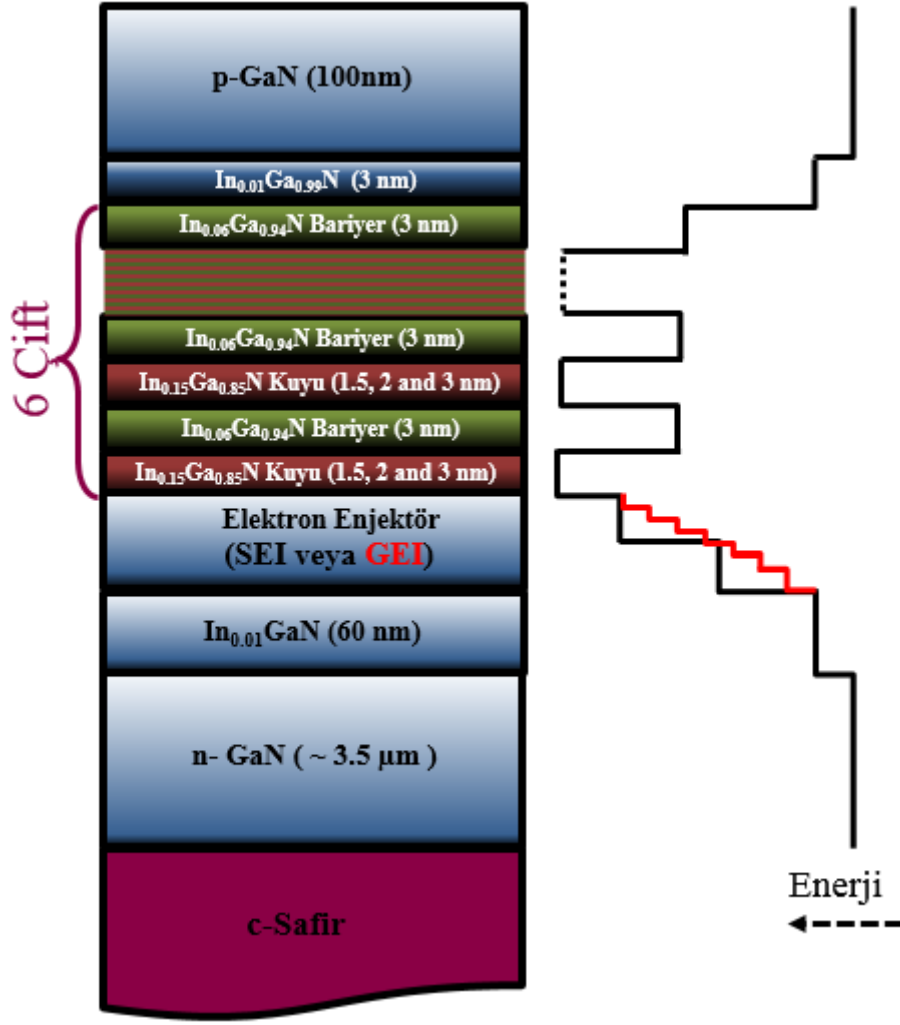
Aktif bölge boyutsallığı ve IQE, zaman-çözünümlü (*time resolved*) fotoluminesans spektroskopisi (TRPL) kullanılarak ölçülebilen rekombinasyon hızının sıcaklığa bağımlılığı ile belirlenebilmektedir. Kuantum kuyusu içerisinde iki boyutlu (2D) enerji seviyelerine hapsolan eksitonların ışınal sönüm zamanları sıcaklıkla (T) lineer olarak artmaktadır. Ancak, üç boyutlu (3D) yapılarda ışınal sönüm zamanı $T^{1/5}$ bağımlılığı göstermektedir [39]. Bu bölümde *Hex* (6x) 1.5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ LED yapıların sıcaklığa bağlı PL ve TRPL verileri incelenecek olup LED yapıların boyutsallığı ve IQE değerleri hesaplanacaktır.

3.2 Deneysel Detaylar

c-düzlem InGaN-GaN LED yapılar yatay düşük basınçlı MOCVD sistemi ve safir alt taş kullanılarak $\sim 4 \mu\text{m}$ kalınlıkta *n-GaN* üzerine büyütülmüştür. Ga için öncü kaynaklar olarak TMGa ve TEGa , In için öncül kaynak olarak TMin , *biscyclopentadienylmagnesium* (Cp_2Mg), NH_3 ve SiH_4 olup aynı zaman da *Mg*, *N* ve *Si* kullanılmıştır. Aktif tabakayı, 3 nm kalınlığında görel olarak daha düşük enerji bariyer yüksekliğine sahip $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ bariyerler ile ayrılmış 6 periyottan (*hexa*) oluşan 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kalınlığında $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ kuyular oluşturmaktadır. Düşük enerjili bariyerlerin kullanımında aktif tabaka boyunca deşik iletiminin artırılması hedeflenmiştir. Kullanılan LED yapılarının şematik gösterimi ve düz bant diyagramı Şekil 3.1 de gösterilmektedir. Bütün LED yapılar, elektronların aktif tabaka üstünden ışınal rekombinasyona uğramadan *p-GaN* bölgesini engellemek için 2 adımdan oluşan SEI sistemine sahiptirler [40]. 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısında 5 nm $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ ve 5 nm $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 'dan oluşan SEI bulunmaktadır. 1,5 nm ve 2 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları ise enerji aralığı kademeli olarak azalan (In oranı %4'ten %10'a) 21 nm kalınlıklı kademeli elektron yayıcı (GEI) yapısına sahiptir. Elektron yayıcı yapıların altına yerleştirilen 60 nm kalınlığındaki *n-tipi* ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ tabakası, *GaN*'a kıyasla daha yumuşak bir örgü yapısına sahip olduğundan aktif bölgedeki zorlamayı azaltmak için kullanılmıştır. LED yapıları 100 nm kalınlığındaki *Mg* katkılı *p-GaN* yapıların büyütülmesi ile

tamamlanmıştır. Hall ölçümlerinden, Mg katkılı *p*-GaN yapılarında ki deşik konsantrasyonu $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Kara adacık desenleme (Square mesa pattern) ($400 \times 400 \text{ } \mu\text{m}^2$) yöntemi ve klor tabanlı ICP yedirme yöntemi ile fotolitografi gerçekleştirilmiştir. n-tipi omik kontaklar için $860 \text{ }^\circ\text{C}$ de 60 saniye boyunca uygulanan Ti/Al/Ni/Au (30/100/40/50 nm) metalizasyon kullanılmıştır. 5nm/5nm kalınlıkta Ni/Au elektrotlar p-kontak için biriktiren 40nm/50nm Ni/Au ile yarı transparan p-kontaklar elde edilmiştir.

TRPL ölçümlerinde sadece aktif bölgedeki taşıyıcıların foto uyarılmasından emin olmak için 380 nm dalgaboylu frekansı ayarlanabilen *Ti:Safir* lazer kullanılmıştır. Lazer atma genişliği 100 fs olup tekrarlama hızı 10 MHz olarak ayarlanmıştır. $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ aktif bölgedeki soğurma katsayısı $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ varsayılarak foto uyarılan taşıyıcı yoğunluğu $3-4,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ aralığında tutulmuştur. LED yapıların üzerine yönlendiren lazer ışığının dairesel genişliği 50 μm çapa sahiptir. 15 – 300 K sıcaklıkları arasında ki ölçümler için kapalı-devir He *cryostat* kullanılmıştır ve LED yapılardan salınan lüminesans 30 ps çözünürlüğe sahip *Hamamatsu Streak* kameraya bağlı optik fiber kablo kullanılarak toplanmıştır. TRPL ölçümlerinde foton sayıcı mod kullanılmıştır.

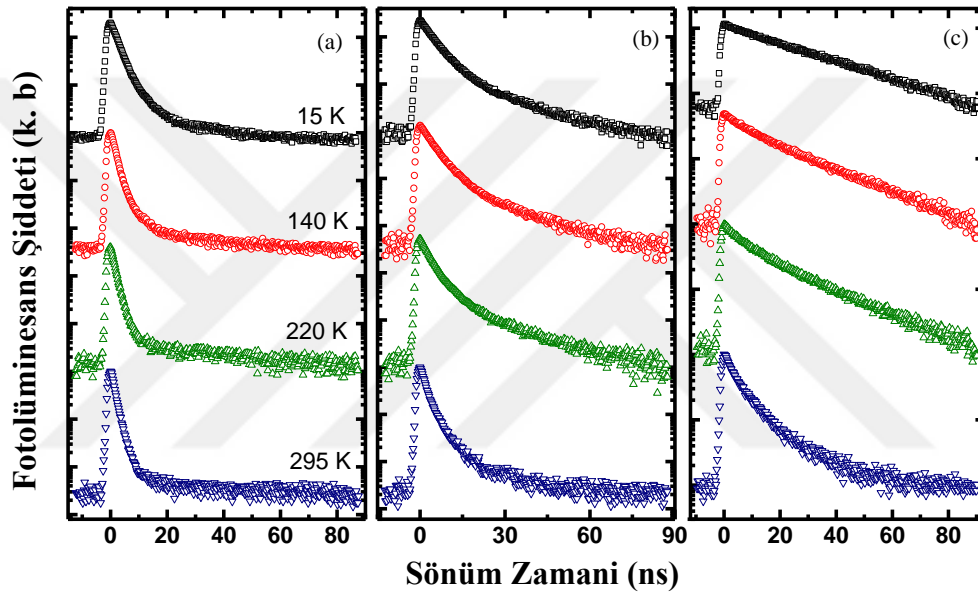


Şekil 3.1: İncelenen LED yapılarının şematik diyagramı.

3.3 Deneysel Sonuçlar

1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıların rekombinasyon dinamiklerini incelemek için, Şekil 3.2 de görüldüğü gibi 15 – 300 K sıcaklık aralığında TRPL ölçümleri gerçekleştirilmiştir. FL geçişlerini fit etmek için çift üstel sönüm fonksiyonu olan $A_1e^{-t/\tau_1} + A_2e^{-t/\tau_2}$ denklemi kullanılmıştır. τ_1 ve τ_2 zaman sabitleri sırasıyla hızlı ve yavaş sönüm zamanını gösteren değişkenlerdir. Bütün FL geçişleri için hızlı sönüm zamanının genliği yavaş olana kıyasla oldukça düşük bulunmuştur ($A_1 \ll A_2$), bundan dolayı yavaş sönüm genliği FL ömür süresi için geçerlidir ve aynı zaman da homojen olmayan eksiton yerelleşmesinin bir ölçüsüdür.

Şekil 3.2 de görüldüğü gibi 300 K oda sıcaklığında, 3 nm (13,9 ns) kuyu genişliğine sahip LED yapısı 1,5 nm (7,2 ns) ve 2 nm (8,6 ns) kuyu genişliğine sahip LED yapılarına kıyasla daha yavaş FL sönümü sergilemiştir. Kuyu genişliğinin artması ile sönüm zamanında ki artış elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının örtüşmesini azaltan ve aynı zamanda emisyonunda kızıla kaymaya sebep olan polarizasyon alanının sebep olduğu QCSE'ye bağlanabilir [41,42]. Dahası, daha kalın kuyular daha geniş In kompozisyonunda dalgalanmalara yol açabilir ve sonucunda oluşabilecek tuzak enerji seviyeleri sönüm zamanını daha fazla artırabilir [43].



Şekil 3.2: Hex (6x) 1,5 nm (a), 2 nm (b) ve 3 nm (c) kuyu genişliğine sahip LED yapılarının zaman çözünümlü FL geçilerinin sıcaklığa bağımlılığı.

Sıcaklığın azalması ile ışınsal olmayan rekombinasyon merkezlerinin azalmasından dolayı düşük sıcaklıklarda FL sönüm zamanları daha uzun olmaktadır. 15 K sıcaklıkta 1.5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için FL sönüm zamanı sırasıyla 14,2 ns, 16,6 ns ve 34,6 ns olarak bulunmuştur. Şekil 3.2 farklı sıcaklıklar da FL sönüm eğrilerini göstermektedir.

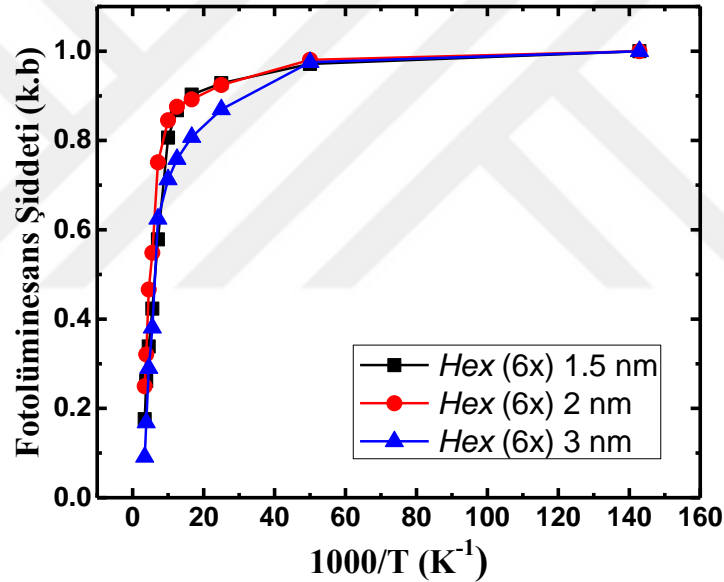
İşınsal ve ışınsal olmayan sönüm zamanlarını hesaplamak için çeşitli yaklaşımlar farklı gruplarca çalışılmıştır [44,45]. Uygulanan genel yaklaşım çok düşük sıcaklıklarda ışınsal olmayan rekombinasyon ışınsal rekombinasyondan çok

daha yavaş olduğudur. Bir başka deyişle FL verimliliği yaklaşık 15 K ve altı sıcaklıklarda %100 olduğu kabul edilmektedir.

Sıcaklığa bağlı ölçülen FL şiddeti $I(T)$, ışınsal rekombinasyon hızının 15 K de FL şiddeti ile çarpılan toplam rekombinasyon hızına oranlanması ile verilir:

$$\frac{I(T)}{I(15K)} = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}} \quad (3.1)$$

τ_r ve τ_{nr} sırasıyla sıcaklığa bağlı ışınsal ve ışınsal olmayan sönüm zamanlarıdır. Şekil 3.3 nitrür yarıiletkenler için tipik bir eğri olan FL şiddetindeki sıcaklığa bağlı sönümü göstermektedir. Bu durum taşıyıcı delokalizasyondan dolayı ışınsal olmayan rekombinasyon kanallarının ısıl aktivitesinden ileri gelmektedir.



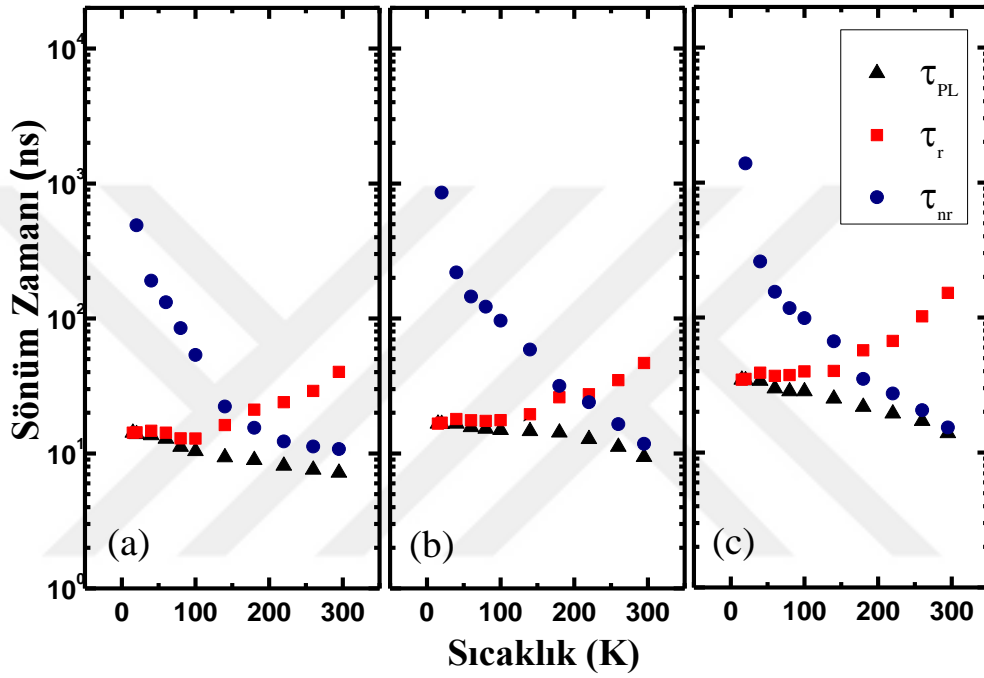
Şekil 3.3: Hex (6x) 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılarının FL şiddeti.

FL sönüm zamanı (τ_{PL}) ışınsal ve ışınsal olmayan sönüm zamanları cinsinden aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir:

$$\frac{1}{\tau_{PL}} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \quad (3.2)$$

Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak sıcaklığa bağlı ışınsal ve ışınsal olmayan sönüm zamanları deneysel verilerden elde edilebilir. Şekil 3.4 de görüldüğü gibi

ışınal rekombinasyon düşük sıcaklıklarda baskındır. 1,5 nm ve 2 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılar için, 100 K sıcaklığa kadar ışınsal sönüm zamanı hemen hemen sıcaklıktan bağımsızdır. Bunun sebebi olarak, bağlı ve yerleşmiş eksitonlardan gelen katkının ışınsal olmayan rekombinasyona göre daha baskın olmasına bağlanmıştır [46]. Bütün LED yapılar için 100 K üzeri sıcaklıklarda, taşıyıcılar ısıl olarak aktive olurlar ve ışınsal olmayan bir yol ile rekombinasyona uğrayacakları kusur noktalarına taşınırlar.



Şekil 3.4: Sıcaklığın fonksiyonu olarak Hex (6x) 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılarının FL (τ_{PL}), ışınsal (τ_r) ve ışınsal olmayan (τ_{nr}) sönüm zamanları.

İşınal olmayan rekombinasyon hızının ışınsal rekombinasyon hızını aştığı sıcaklık değeri, incelenen üç LED yapısı için hemen hemen aynıdır. Oda sıcaklığında denklemlerden elde edilen ışınsal rekombinasyon sönüm zamanı 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için sırasıyla 40 ns, 47 ns ve 152 ns olarak elde edilmiştir. Sıcaklığın artması ile ışınsal rekombinasyon zamanındaki artış, taşıyıcı delokalizasyonuna ve Coulomb etkileşimine ve buna bağlı olarak geçişlerde meydana gelen osilatör gücündeki azalmaya bağlanabilir.

Sıcaklığa bağlı ışınal rekombinasyon hızı ($R(T) = 1/\tau_r$) dalga vektörlerinin $E/\hbar c$ 'den daha küçük bir ışık konisindeki görelî eksiton sayısı ile orantılı olup aşağıda ki denklem ile tanımlanmaktadır [47]:

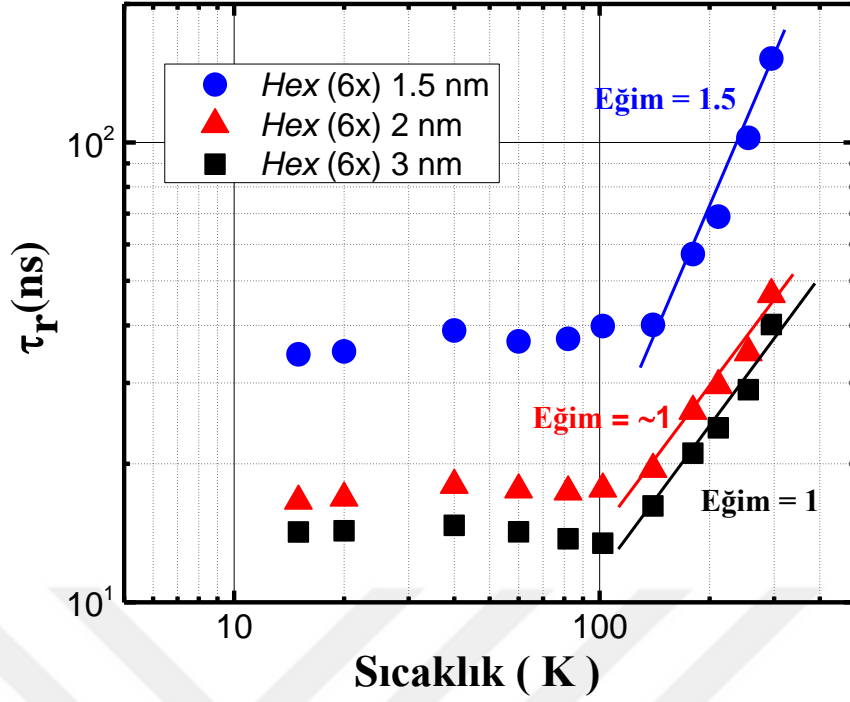
$$R(T) = \frac{1}{\tau_r} \alpha \frac{\int_0^{E/\hbar c} \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2M(k)k_B T}\right) d^N k}{\int_0^\infty \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2M(k)k_B T}\right) d^N k} \quad (3.3)$$

$d^N k$ k uzayında difransiyel hacim, Planck sabiti, k_B Boltzman sabiti ve $M(k)$ eksiton etkin kütesidir. Burada, N materyalin boyutsallığını temsil etmektedir ki kuantum nokta için $N=0$, kuantum tel için $N=1$, kuantum kuyu için $N=2$ ve bulk materyal için $N=3$ değerlerini almaktadır.

N boyutsallı bir sistem için, ışınal sönüm zamanı aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$\tau_r = \tau_0 T^{N/2} \quad (3.4)$$

τ_0 karakteristik bir sabittir. Şekil 3.5 logaritmik ölçekte ışınal sönüm zamanının sıcaklığa bağımlılığını göstermektedir. Denklem (3.4) kullanılarak elde edilen fit sonuçları 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için N boyutsallık değeri sırasıyla ~2, 2 ve 3 olarak elde edilmiştir. Bu değerler 1,5 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısının ideal bir kuantum kuyusu davranışına sahip olduğunu, 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısının ise bulk bir davranış sergilediğini göstermekteyken, 2 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısının 2 boyutlu bir yapıya yakın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, III-Nitrürlerin sahip olduğu büyük elektron etkin kütlelerinden dolayı kuantum sınırlama etkilerinin, InGaN/GaN yapıların kuyu kalınlıkları 3 nm'den küçük olduğu durumlarda gözlemlendiğine dair literatürde sunulan raporlar ile uyumludur [48, 49].



Şekil 3.5 : Hex (6x) 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ışımsal sönüm zamanlarının değişimi.

Daha önce elde edilen ışımsal ve ışımsal olmayan rekombinasyon zamanlarını kullanarak, IQE değerleri de alttaki denklemin yardımıyla elde edilebilir.

$$IQE = \frac{Bn^2}{An + Bn^2} = \frac{1}{1 + \frac{A}{Bn}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}} \quad (3.5)$$

$A = \tau_{nr}^{-1}$ terimi SRH ışımsal olmayan rekombinasyon katsayısı, $B = (n\tau_r)^{-1}$ terimi ışımsal rekombinasyon katsayısı ve n taşıyıcı konsantrasyonudur. C Auger rekombinasyon katsayısı $3 - 4,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğu seviyesinde ihmal edilmektedir.

Tablo 3.1: İncelenen LED yapıları için oda sıcaklığı rekombinasyon katsayıları ve IQE değerleri.

LED Yapısı	A (10^7 s^{-1})	B ($10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)	IQE (%)
Hexa 1,5 nm	9,2	8,8	21
Hexa 2 nm	8,5	6,6	20
Hexa 3 nm	6,5	1,4	10

1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için rekombinasyon katsayılarını ve bu katsayılar kullanılarak elde edilen IQE değerleri Tablo 3.1 de verilmektedir. 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısı en küçük A ışımsal olmayan rekombinasyon katsayısına sahip olmasına rağmen, aynı zaman da açıkara B ışımsal rekombinasyon katsayısı da en düşük olan yapıdır. Dolayısıyla, 1,5 nm ve 2 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılarına göre 2 kat daha düşük IQE değerine sahiptir. Daha kalın kuyularda B ışımsal rekombinasyon katsayısının düşük olması muhtemelen iç polarizasyon alanlarının sebep olduğu elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının geniş dağılımından kaynaklanmaktadır [50,51].

Sonuç olarak, hexa 1,5 nm, 2 nm ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapılarının optik özelliklerini incelemek için sıcaklığa bağlı TRPL ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sahip olduğumuz veriler, daha küçük IQE değerlerine yol açan kuantum kuyusunun artması ile ışımsal rekombinasyon hızının azaldığını doğrulamıştır. 1,5 nm ve 2 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları 2 boyutlu davranış sergilemişlerdir ve üç boyutlu bulk davranışı sergilediği belirlenen 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısına kıyasla iki kat daha fazla IQE değerine sahiptirler.

4. (11 $\bar{2}2$) YARI POLAR DOĞRULTUDA YÖNLENDİRİLMİŞ InGaN TABANLI LED YAPILARINDA In-KATILMA VERİMLİLİĞİ

4.1 Genel Bakış

Polar olmayan GaN yapılar arasında yarı polar doğrultulara sahip olanlar, kendiliğinden ve piezoelektrik polarizasyondan kaynaklanan iç elektrik alanı azaltma özelliklerinden dolayı GaN tabanlı LED tasarımlarında büyük ilgi görmektedir. Polarizasyonlardan kaynaklı bu iç elektrik alanlar, elektron ve deşiklerin dalga fonksiyonlarının uzaysal ayırımına sebep olduklarından aktif bölgedeki ışımsal rekombinasyon hızını arttırmaktadır [52]. Ayrıca, yeşil ışık salınımı yapan lazer ve LED'lerin performanslarını yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı olumlu yönde etkileyen bu yarı polar InGaN yapılarda In-katılma mekanizmasının daha etkili olduğu literatürde deneysel ve teorik çalışmalar ile gösterilmiştir [53,54]. Yapılan teorik çalışmalar, In-katılımının farklı düzlemler için aynı olmadığını ve belirli bir düzlemdeki katılımın atomik düzenleniş ile belirlendiği şeklinde rapor edilmiştir [53]. Maksimum In-katılımı c-düzleme göre yaklaşık 60° açığa sahip bir eğimde olan yarı polar düzlemler için tahmin edilmektedir. Teorik çalışmalara uygun olarak, yarı polar yüzeyler polar olmayan m-düzlemine kıyasla daha yüksek In-katılma oranı gösterdikleri rapor edilmiştir [55]. En yüksek In-katılma oranı (11 $\bar{2}2$) ve (20 $\bar{2}1$) yüzeyleri için gözlenmiştir. Literatürde c-düzlemine kıyasla (11 $\bar{2}2$) düzlemi için daha yüksek In-katılma verimliliği elde edilmiştir [56]. Diğer taraftan, (10 $\bar{1}0$) ve (20 $\bar{2}1$) yüzeyleri için yüksek In-katılma rapor edilirken, c-düzlemine kıyasla (11 $\bar{2}2$) düzlemi üstünde daha az In-katılma gözlenmiştir [57]. FL spektrumlarının pik enerji değerlerinden faydalanılarak yapılan bazı çalışmalarda, deneysel belirsizlikler içinde polar, yarı polar ve polar olmayan düzlemler için In-katılma oranlarının benzer seviyede oldukları gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak, farklı zor-enerji dağılımları ve elektrik alan kaynaklı *Stark* kaymaları gösterilmiştir [58]. (11 $\bar{2}2$) ve (0001) düzlemleri için de benzer In-katılım oranları da rapor edilmiştir [59]. Dolayısıyla, literatürde InGaN yapılara In-katılma oranlarının katılım mekanizmalarının ve

seviyelerinin belirlenmesi üzerine yapılan deneysel çalışmaların farklılık gösterdiği net olarak görülmektedir. Çalışmanın bu kısmında, literatürde halen tartışılmaya devam edilen bu konuya katkıda bulunmak için özel tasarlanan örneklerden elde edilen sonuçlar sunulacak ve yorumlanacaktır.

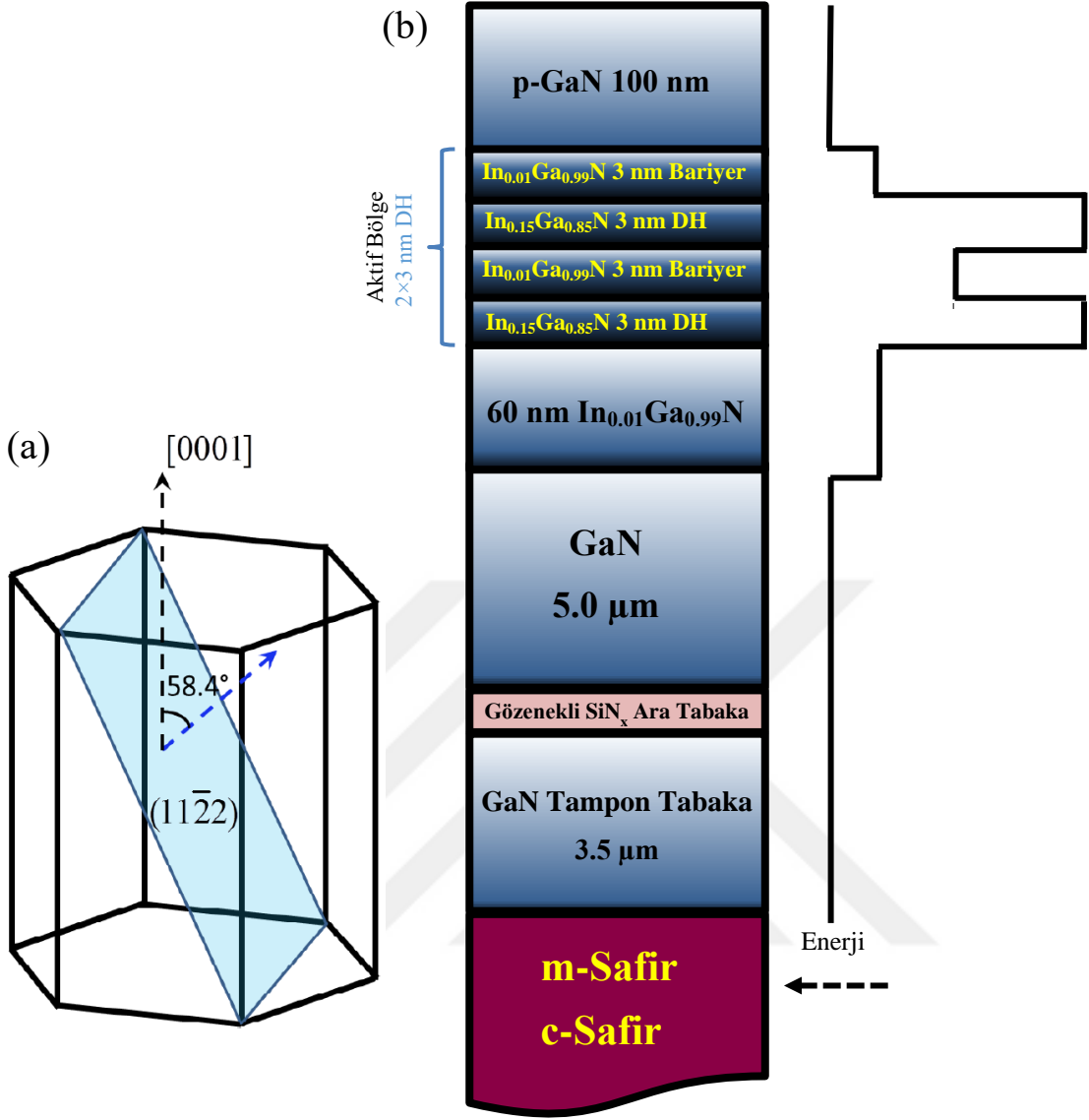
4.2 Deneysel Detaylar

Bu çalışma için, yarı polar (11 $\bar{2}2$) ve polar (0001) GaN/InGaN heteroyapılar yatay tasarıma sahip MOCVD sistemi ile büyütülmüştür. Ga, In, Mg- katkı maddesi ve N öncü maddeleri için sırasıyla TMG, TMI, CPMg, NH₃ ve taşıyıcı gaz olarak H₂ kullanılmıştır. *Triethylgallium* (TEG) ise düşük sıcaklık InGaN aktif tabakaların büyütülmesi için Ga öncü maddesi olarak kullanılmıştır.

In-katılma hızı büyüme sıcaklığına çok hassas olduğundan dolayı, benzer ısı iletkenliğe sahip c-düzlem ve m-düzlem safir alttaşlar sırasıyla c-düzlem ve (11 $\bar{2}2$) yarı polar yapıların büyütülmesi için kullanılmıştır. Dahası, yarı polar ve polar örnekler, c-düzlem ve (11 $\bar{2}2$) yönelimi arasındaki In-katılma verimliliğinin kıyaslanabilmesi için, MOCVD büyütme bölgesinde ki radyal sıcaklık değişmezliğini artırmak için örnek tutucu üstüne aynı radyal pozisyona yerleştirilmiştir [60].

Yarı polar ve polar GaN tampon tabakalar ayrı reçeteler ile hazırlanmıştır. (11 $\bar{2}2$) yarı polar GaN tampon tabaka 600 °C sıcaklıkta 20 nm kadar ince AlN çekirdeklenme tabakası kullanılarak m-düzlem safir alttaş üzerine büyütülmüştür. Daha sonra, iki adımlı bir büyütme yaklaşımı kullanılarak AlN tabaka üzerine GaN büyütülmüştür. İlk adım olarak 1080 °C sıcaklıkta ve 30 Torr basınçta 1,5 µm kalınlıkta GaN ve ikinci adım olarak ise optik kaliteyi artırmak için 1060 °C sıcaklıkta ve 200 Torr basınçta 1,5 µm kalınlıkta GaN büyütülmüştür. C-düzlem GaN tabakaların büyütülmesi için, düşük sıcaklık GaN büyütülmesi, tavlama ve yüksek sıcaklık GaN büyütmesi şeklinde geleneksel olan üç adım büyütme yöntemi kullanılmıştır [61]. Nano-gözenekli SiN_x ara tabakalar üst katmanların optik kalitesini geliştirmek ve kusur yoğunluğunu azaltmak için her iki tampon içinde uygulanmıştır. ELO tekniğinin detayları literatürde bulunabilir [62].

Sonraki adımda aktif tabakaların (InGaN LED yapılar) büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Bunun için ilk olarak, polar ve yarı polar düzlemlerle GaN tampon tabakalar MOCVD büyütme bölgesine yan yana konulmuştur. Aktif bölgenin kalitesini geliştirmek için öncelikli olarak 60 nm $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ tabaka büyütülmüştür. Aktif bölge, 3 nm kalınlıklı $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ bariyerler ile ayrılmış iki tane 3 nm kalınlığında çift heteroeklem InGaN yapıdan oluşmaktadır. Bunun üzerine ikinci bir $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ bariyer tabakasına büyütülmüştür. Son olarak, aktif bölge Mg ile katkılanmış 100 nm kalınlığında p -GaN tabaka ile büyütme süreci sonlandırılmıştır. Yarı polar LED yapısının kesitsel şematik ve düz bant gösterimi Şekil 4.1 (b) de gösterilmektedir. Polar ve yarı polar örneklerdeki In konsantrasyonu, ~ 2 μm spot genişliği ve 380 nm dalga boylu frekansı ayarlanabilen *Ti:Safir* lazer kullanılarak mikro-FL yöntemi ile elde edilen spektrumların pik pozisyonlarından belirlenmiştir.



Şekil 4.1: (a) Wurtzite GaN yapıda polar c-düzlemi ve yarı polar $(11\bar{2}2)$ kristalografik yönelim ve (b) tasarlanan edilen yarı polar $(11\bar{2}2)$ LED yapısının düz bant yapısı ve şematik gösterimi.

4.3 Deneysel Sonuçlar

Şekil 4.2 (a) ve (b) oda sıcaklığında sırasıyla yarı polar ve polar LED yapılarından elde edilen uyarma yoğunluğuna bağlı FL spektrum ölçümlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi her iki yönelim içinde FL spektrumlarının pik enerji değerlerinde, uyarma yoğunluğu arttıkça bir maviye kayma gözlenmektedir. Bunun sebebi olarak, polarizasyon alanının uyarma yoğunluğu ile artan serbest taşıyıcı perdelemesinin bant yapısında meydana getirdiği düzleşme gösterilebilir. Farklı uyarma yoğunluklarına karşılık gelen taşıyıcı konsantrasyonu n aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir:

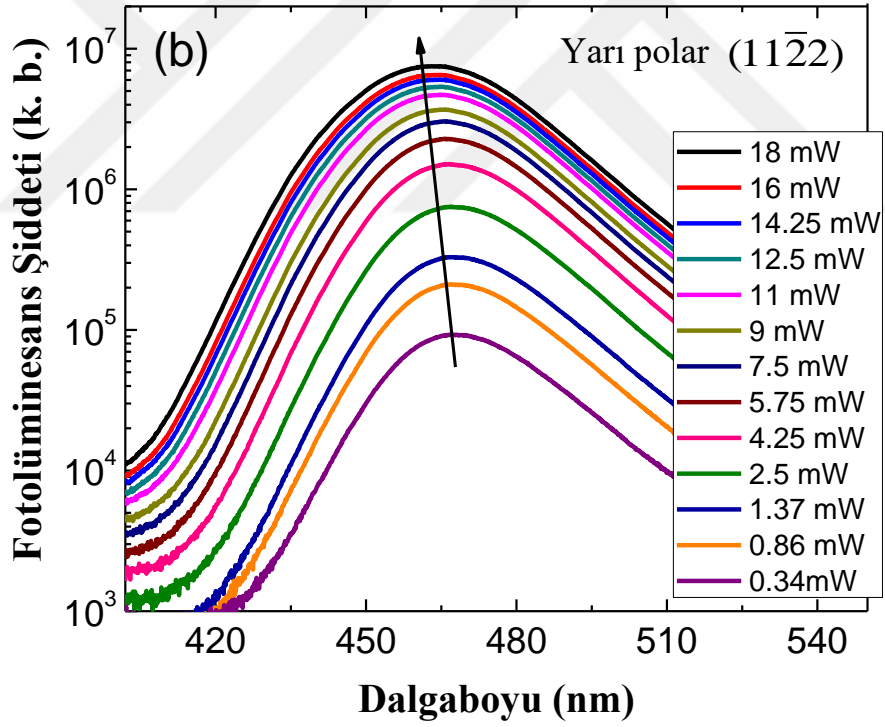
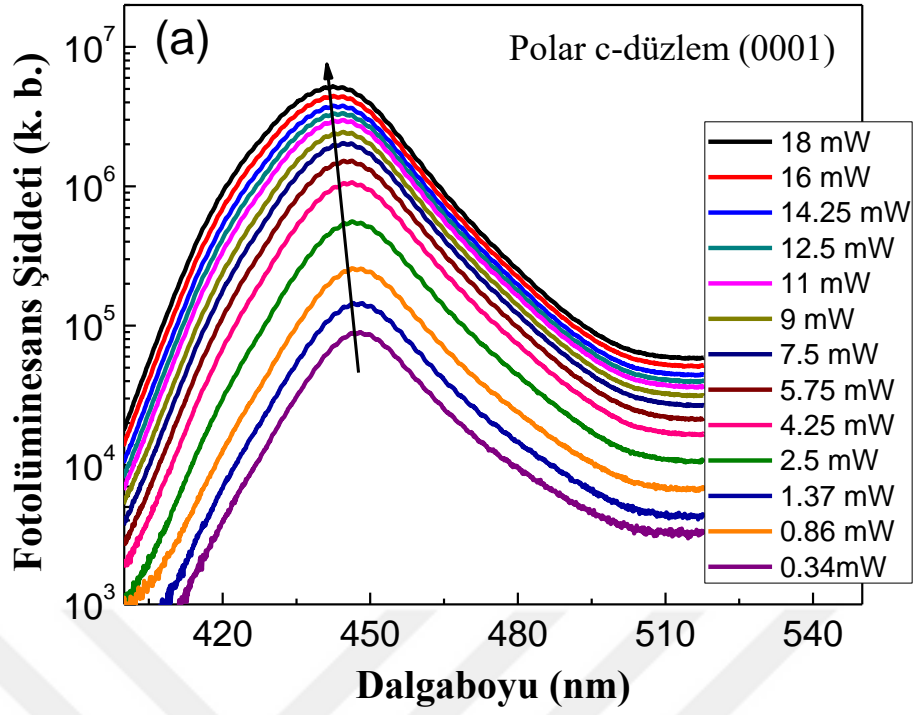
$$n = \frac{E \times (1 - R) \times \alpha}{h\nu} \quad (4.1)$$

E gelen ışık enerjisi yoğunluğu, R yansımaya katsayısı, α soğurma katsayısı ve ν foton frekansıdır. Enerji yoğunluğu atmalı Ti-Safir lazerin tekrarlama hızına bağlı olarak ifade edilebilir:

$$E = \frac{P}{f_{Ti:Sap}} \quad (4.2)$$

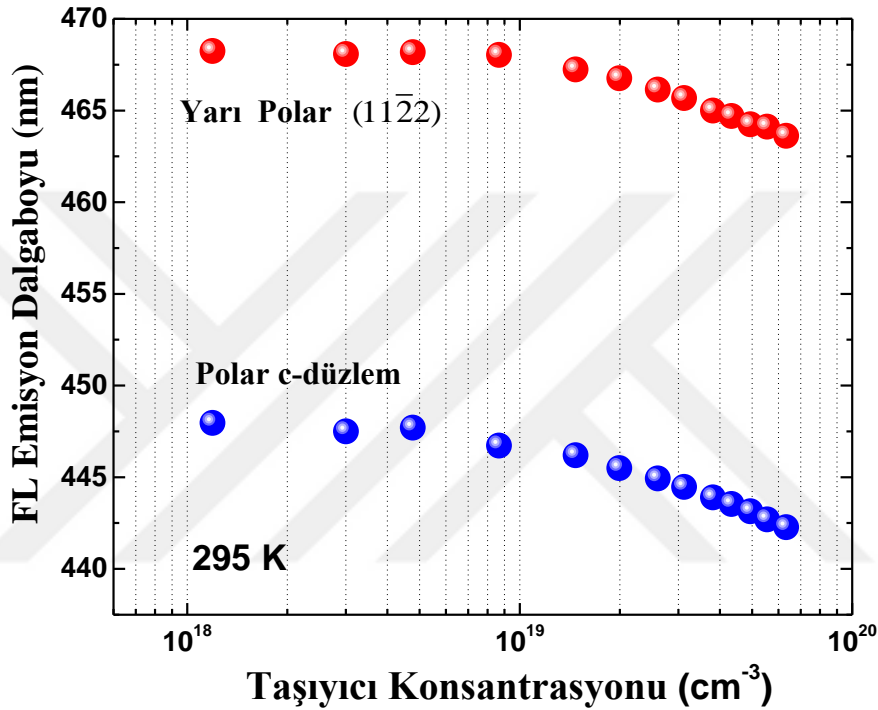
Burada P güç yoğunluğudur ve $P = p/(\pi r^2)$ ile verilir. r gelen lazer ışının dairesel çapıdır ve p lazer gücüdür. Daha önce bahsettiğimiz gibi, 2 μm dairesel genişliği sağlayan bir mikro objektif kullanılmıştır ve lazer dalga boyu 380 nm, tekrarlama hızı 80 MHz olarak ayarlanmıştır.

Polar ve yarı polar yapılar için uyarılan taşıyıcı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak emisyon dalga boyundaki değişim Şekil 4.3 de gösterilmektedir. Taşıyıcı yoğunluğunun artması ile maviye kayma açık bir şekilde görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, uyarma gücüne bakılmaksızın c-düzlem LED yapısına kıyasla yarı polar LED yapısı için emisyon pik değeri daha uzun dalga boyuna sahiptir. Optiksel olarak taşıyıcı yoğunluğunu $1,2 \times 10^{18}$ değerinden $6,3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ değerine artırılması ile FL pik pozisyonundaki maviye kayma miktarı c-düzlem LED yapısına kıyasla (5,7 nm) yarı polar LED yapısı için daha küçüktür (4,6 nm).



Şekil 4.2: Yan yana büyütülen (a) polar ve (b) yarı polar 2x3 nm çift heteroeklem LED yapılarının uyarma gücüne bağlı mikro-FL spectra ölçümleri. Ok işareti gücün arttığını simgelemektedir.

Bu durum teoriksel çalışmalar ile uyum içinde olup daha küçük polarizasyon alanının bulunduğunu göstermektedir. In miktarının (x) hesaplanmasında da denklem (1.1) kullanılmıştır. Bu hesaplamada eğrilik parametresi $b=1,73$ olarak alındı [63]. InN ve GaN enerji bant aralığı değerleri ise sırasıyla 0,7 eV [64] ve 3.42 eV [61] olarak kullanıldı. Bu hesaplamalardan, In-katılım oranını $(11\bar{2}2)$ yarı polar örnek için %18,2 ve polar örnek için ise %14,8 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar açık bir şekilde $(11\bar{2}2)$ yarı polar yönelim için daha yüksek In-katılımı desteklemektedir.



Şekil 4.3: $(11\bar{2}2)$ yarı polar ve c-düzlem polar LED yapıları için foto-uyarılmış taşıyıcı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak emisyon piklerinin dalga boyu değişimi.

Sonuç olarak, aynı MOCVD sürecinde yan yana büyütülen $(11\bar{2}2)$ yarı polar GaN ve (0001) polar GaN örnekler için In-katılımı karşılaştırılmalı olarak çalışılmıştır. Uyarma şiddetine bağlı FL verilerine dayanarak, yarı polar InGaN yapıdaki In konsantrasyonu polar yapıya kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durum yarı polar $(11\bar{2}2)$ GaN için daha yüksek In-katılma verimliliğini göstermektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda da, $(11\bar{2}2)$ yarı polar GaN yapılarının gelecek nesil verimli sarı ve yeşil InGaN ışık yayıcı tasarımlarında kullanılabileceğini öngörmektedir.

5. SiN_x NANO-GÖZENEK ARATABAKALARININ KULLANILMASI İLE (11 $\bar{2}$ 2) YARI POLAR GaN YAPILARIN OPTİK VE YAPISAL KALİTESİNİN ARTTIRILMASI

5.1 Genel Bakış

Bir önceki bölümde bahsettiğimiz gibi son zamanlarda polar c-düzlem yönelimler III-Nitrür teknolojisinin dayanak noktasını oluşturmaktadırlar [1, 65]. Ancak, c-düzlem oryantasyona sahip ışık yayıcı aygıtların verimliliği QCSE'ye sebep olan piezoelektrik ve kenliliğinden polarizasyondan dolayı kötü yönde etkilenmektedir [66]. Diğer yandan, polar olmayan ve yarı polar yönelimlere sahip düzlemlerin ışık yayan aygıtların aktif bölgelerindeki bu polarizasyonu tamamen ortadan kaldırma ya da azaltma eğilimi göstermelerinden dolayı bu alanda yapılan çalışmaları değerli kılmaktadır [67]. Ancak, çoklu veya tek epitaksi yöntemi ile bu yönelimlere sahip yapıların büyütülmesi oldukça zordur. GaN alt taşların sınırlı kullanılabilirliklerinden ve yüksek maliyetlerinden dolayı, silikon veya safir gibi düşük maliyetli ve yüksek kaliteli alttaşlar GaN yapıların yarı polar ve polar olmayan yönelimlerinin büyütülmesi için tercih edilmektedir [68]. Örneğin, (11 $\bar{2}$ 2) yarı polar yapı m-düzlem safir üzerine büyütülebilir ve benzer şekilde polar olmayan a-düzlem GaN, r-düzlem safir alt taşın üzerinde elde edilebilir [69]. Ancak, farklı alt taşların üzerine büyüyen tabakalar, düşük optik kaliteye sebep olan yüksek yoğunluklu dislokasyonlardan ve istiflenme hatasından dolayı istenilen özelliklerde olmamaktadır.

Tabakaların optik ve yapısal kalitesini artırmak için ELO tekniği kullanılabilir [56]. Bu yaklaşım gözenekli bir SiN_x ara tabakanın büyütülmesini içermektedir. Bu ara tabaka, üzerine büyütülecek yapılar için bir nano-maske olarak kullanılır. Büyüme nanometre boyutunda gözenekli yığınlar ile başlar ve standart ELO yönteminde olduğu gibi süreç yanal yönde büyüme ile devam eder. Dolayısıyla, SiN_x nano-maske, büyüme doğrultusunda ki istiflenme hatalarının ve vida

dislokasyonlarının yüzeye doğru ilerlemesini önemli oranda engellemektedir. SiN_x nano-maskeler, başarılı bir şekilde vida dislokasyonlarını engellemek suretiyle polar c-GaN tabakaların optik özelliklerini arttırmaktadır [62,70]. SiN_x ara tabakalar ile büyüyen polar olmayan a-düzlem GaN tabakalarda gözlenen kusur yoğunluğunda ki azalmalar literatürde yine farklı araştırma grupları tarafından rapor edilmiştir [71,72]. Ancak, yarı polar $(11\bar{2}2)$ GaN yapılarında uygulanan SiN_x nano-ELO yönteminin kusur yoğunluklarının azaltılmasında ki etkinliği ile ilgili literatürde çelişkili çalışmalar da bulunmaktadır [73,74].

c-düzlem nano-ELO yöntemi ile yapılan büyütmelerde, SiN_x ara tabaka gözeneklerin kalitesi güçlü bir şekilde depolama sıcaklığına ve zamana bağlı olduğu tespit edilmiştir [56]. SiN_x depolama süresi boyunca, sıcaklık genellikle sabit tutulurken, depolama zamanı değişkendir. SiN_x depolama zamanının uzun olması, gözenek yoğunluğunun düşük olması (veya çekirdek bölge alanının düşük olması) ve üst GaN alanın (kanat bölgeleri) geniş olması, potansiyel olarak istiflenme hatalarını ve vida dislokasyonlarını daha etkili bir şekilde azaltmaktadır.

Ancak, çok düşük gözenekli SiN_x uygulamalı yapılarda, yeni istiflenme hatalarının ve dislokasyonların SiN_x/GaN ara yüzeyinde oluşabildiği de literatürde vurgulanmaktadır. Dolayısıyla, engellenmiş ve/veya yeni oluşmuş kusurların yoğunluğuna bağlı olarak, kullanılan yöntemin GaN kalitesinde bir iyileştirmeye yol açıp açmayacağı tespit edilebilir. Buna ek olarak, GaN tabakaların birleşmesi için gerekli zaman, üretim maliyetini önemli bir şekilde artıran SiN_x ara tabakanın gözeneklerinin azaltılmasıyla artmaktadır. Bundan dolayı, oluşan kusurların engellenmesi, yeni kusurların meydana gelmesi ve tabakaların birleşmesi için gerekli zaman arasında bir ilişki yumağı bulunmaktadır.

5.2 Deneysel Detaylar

Yarı polar GaN tabakalar Al, Ga ve N öncülleri için sırasıyla TMAI, TMGa ve NH_3 kimyasallarının kullanımı ile yatay tasarıma sahip MOCVD tekniği ile büyütülmüşlerdir. Hidrojen taşıyıcı gaz olarak ve SiH_4 bileşiği ise Si-katkılama ve aynı zamanda SiN_x ara tabakaların depolamasında kullanılmıştır. Tek faz $(11\bar{2}2)$ GaN yönelim 20 nm kalınlık AlN tampon tabaka kullanılarak 2 inç m-düzlem safir alt taş üzerinde elde edilmiştir. Daha sonra, yaklaşık $\sim 3 \mu\text{m}$ kalınlıklı $(11\bar{2}2)$ GaN

tabakalar çift-adım büyütme yaklaşımı ile büyütülmüştür. İlk adımda, büyütme düzgün bir yüzey morfolojisinden emin olmak için 30 Torr değerinde düşük bir reaktör basıncında gerçekleştirilmiştir. Büyütmenin ikinci adım ise ilk adımı takiben yüksek optik kaliteyi sağlamak için 200 Torr değerinde yüksek bir basınçta yapılmıştır. (11 $\bar{2}$ 2) GaN/m-safir yapı 6 parça kesilmiştir ve her bir yapı SiN_x nano-ELO uygulamaları için kullanılmıştır.

Uygulanan nano-ELO yöntemi şu şekildedir. İlk olarak, 500 nm kalınlıklı GaN tabaka 200 Torr basınçta kesilen yapı üzerine büyütülmüştür. Takiben çok ince gözenekli SiN_x tabaka SiH₄ ve amonyak akışı altında depolanmıştır ve 1060 °C civarı sıcaklıkta 200 Torr reaktör basıncında GaN çekirdek tabakaların büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, büyütme 76 Torr basınçta ve yaklaşık 1080 °C sıcaklıkta (D örneği hariç) devam etmiştir. Son bölümde, yüksek optik kaliteyi sağlamak için, 200 Torr yüksek reaktör basıncında $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılı 5 µm kalınlıklı GaN tabakanın büyütülmesi gerçekleşmiştir. İncelenen örneklerin büyütme detayları Tablo 5.1 de listelenmiştir. SiN_x ara tabakanın sağlaması beklenen değişimi gözlemek ve c-düzlem değişkeniyle kıyaslamak için iki tane referans örneği kullanılmıştır. SiN_x ara tabaka olmaksızın m-safir üzerine büyütülen (11 $\bar{2}$ 2) yarı polar yönelimine sahip A örneği ve optimize edilmiş şartlar altında c-safir üzerine aynı nano-ELO tekniği ile büyütülmüş E örneği referans olarak kullanılmıştır [62]. Bu çalışmada büyütülen bütün örnekler 10-12 µm toplam kalınlığına sahiptir.

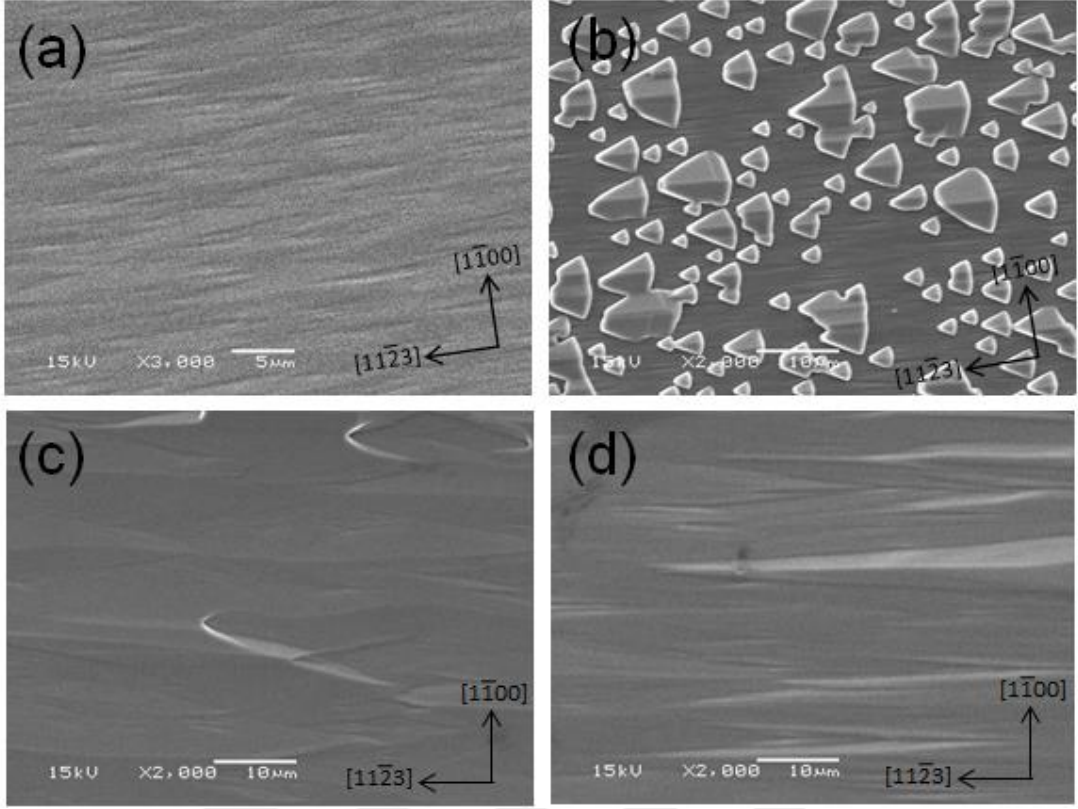
Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) tekniği yüzey morfolojisini karakterize etmek için kullanılmıştır. 325 nm dalga boyuna sahip HeCd lazer ile oda sıcaklığı ve düşük sıcaklık kararlı-hal FL ve *X-Ray Kırınımı* (XRD) çalışmaları örneklerin optik ve yapısal kalitelerini belirlemek için kullanılmıştır.

Tablo 5.1: İncelenen örnekler için büyütme şartları.

Örnek	SiN _x	Tohum GaN Tabakası Büyütme Zamaı (dk)	İyileştirme Basıncı (Torr)
	Depolama Zamanı (dk)		
A (11 $\bar{2}$ 2) Reference	0	--	--
B (11 $\bar{2}$ 2) nano-ELO	4,5	10	76+200
C (11 $\bar{2}$ 2) nano-ELO	5,0	20	76+200
D (11 $\bar{2}$ 2) nano-ELO	7,0	5	200
E c-plane nano-ELO	4,0	20	76+200

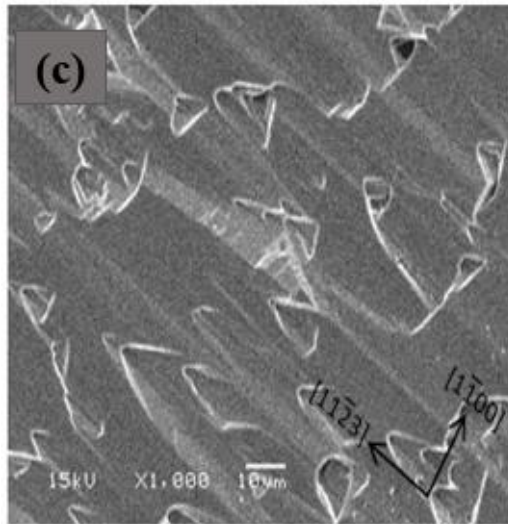
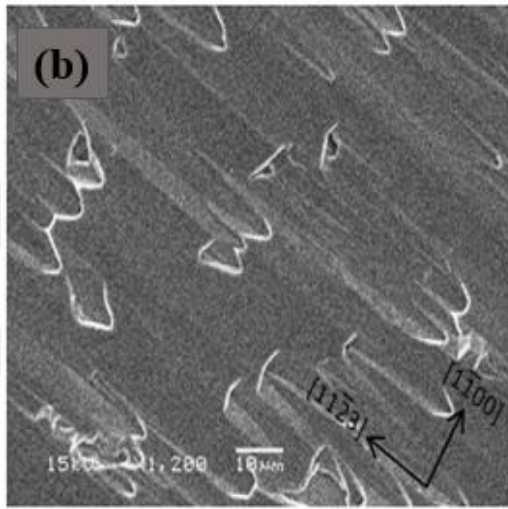
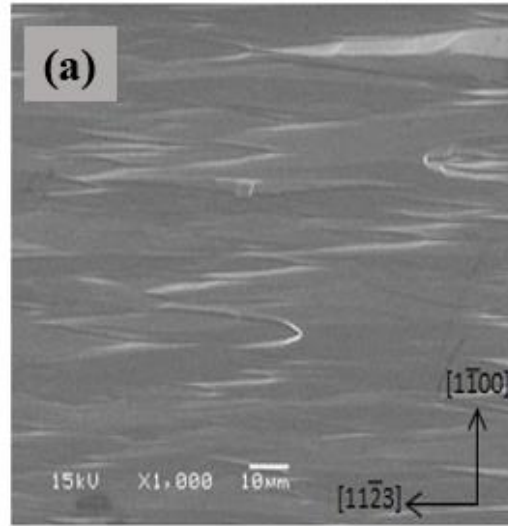
5.3 Deneysel Sonuçlar

B örneği için farklı büyütme evrelerinde yüzey morfolojisindeki değişim Şekil 5.1 de gösterilmektedir. Şekil 5.1 (a) da verilen GaN/m-safir yüzeyinin SEM görüntüsünden GaN'ın [11 $\bar{2}$ 3] doğrultusu boyunca yönelmiş karakteristik (11 $\bar{2}$ 2) [75] çizgili bir düz yüzeye sahip olduğu görülmektedir. GaN yüzey için 4,5 dakika boyunca SiN_x nano-maske uygulamasından sonra 10 dakika boyunca GaN çekirdek tabakasının depolanması sonucu elde edilen büyütmeden sonra elde edilen yüzey morfolojisi Şekil 5.1 (b) de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yüzey, farklı genişliklerde üçgen şeklinde GaN adacıkları ile kaplı olup büyütme sırasında dikey ve yatay olarak genişlemektedir. 76 Torr reaktör basıncında gerçekleşen büyütme süresi boyunca, Şekil 5.1 (b) de gözlenen adacıklar kaynaşmakta ve Şekil 5.1 (c) de görüldüğü gibi sürekli bir yapıya dönüşmektedir. Sonuç olarak, 200 Torr basıncında yapılan büyütmeden sonra, Şekil 5.1 (d) de ki gibi örnek yüzeyi ok-tarzı karakteristik düzgün bir şekil almaktadır. En son elde edilen yüzey morfolojisi Şekil 5.1 (a) gösterilen (11 $\bar{2}$ 2) GaN/m-safir yüzey morfolojisine oldukça benzemektedir. Ancak, [11 $\bar{2}$ 3] doğrultusu boyunca oluşan çizgiler daha uzun ve daha fazla öne çıkmaktadır.



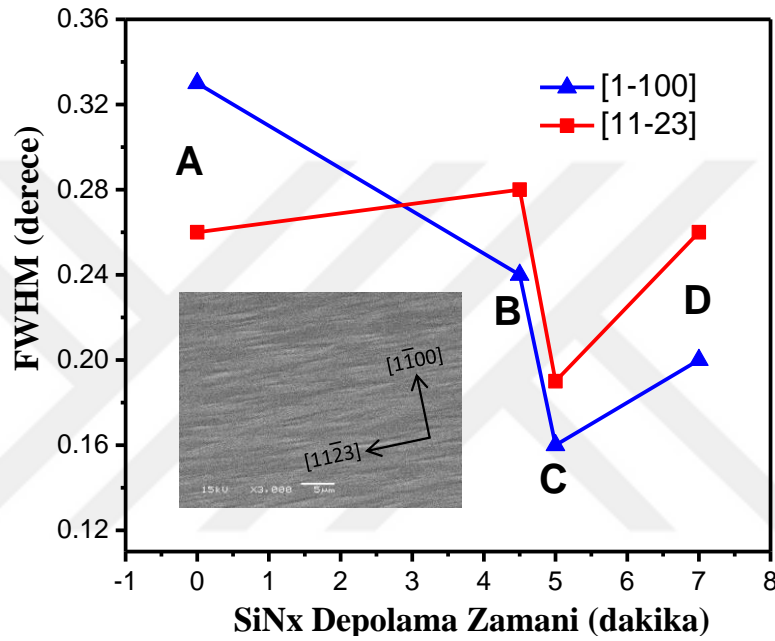
Şekil 5.1: Farklı büyüme evrelerinde B örneğinin SEM görüntüleri. (a) GaN/m-safir tampon tabaka (b) 4,5 dakika SiN_x ara tabaka depolama ve 10 dakika GaN çekirdek tabaka büyütülmesinden sonra (c) 76 Torr basınçta ek 1,5 saat büyütme sonrası ve (d) 200 Torr bas basınçta ek 1,5 saat büyütme sonrası.

Şekil 5.2’de, farklı SiN_x ara tabakaların depolama zamanına göre yarı polar yapıların yüzey morfolojileri kıyaslanmaktadır. 4,5 dakika SiN_x nano-maske depolama zamanı olan B örneği en yumuşak yüzeye sahipken diğer iki en örnek sığ çukurlardan ve V-şeklini almış hatlardan etkilenmektedir. Bu gözlem SiN_x depolama zamanının uzun olması, gözenek yoğunluğunun az olması ve GaN çekirdek adacıklarının arasındaki mesafenin geniş olması gerçeğiyle açıklanabilir. Buradan, yumuşak yüzeyli tam olarak birleşmiş bir tabaka elde etmek için daha uzun zamanın gerekli olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 5.2: (a) 4,5 dakika [B örneği] (b) 5 dakika [C örneği] ve (c) 7 dakika [D örneği] boyunca depolanan SiN_x ara tabakalar ile büyütülen $(11\bar{2}2)$ GaN filmlerin SEM görüntüleri.

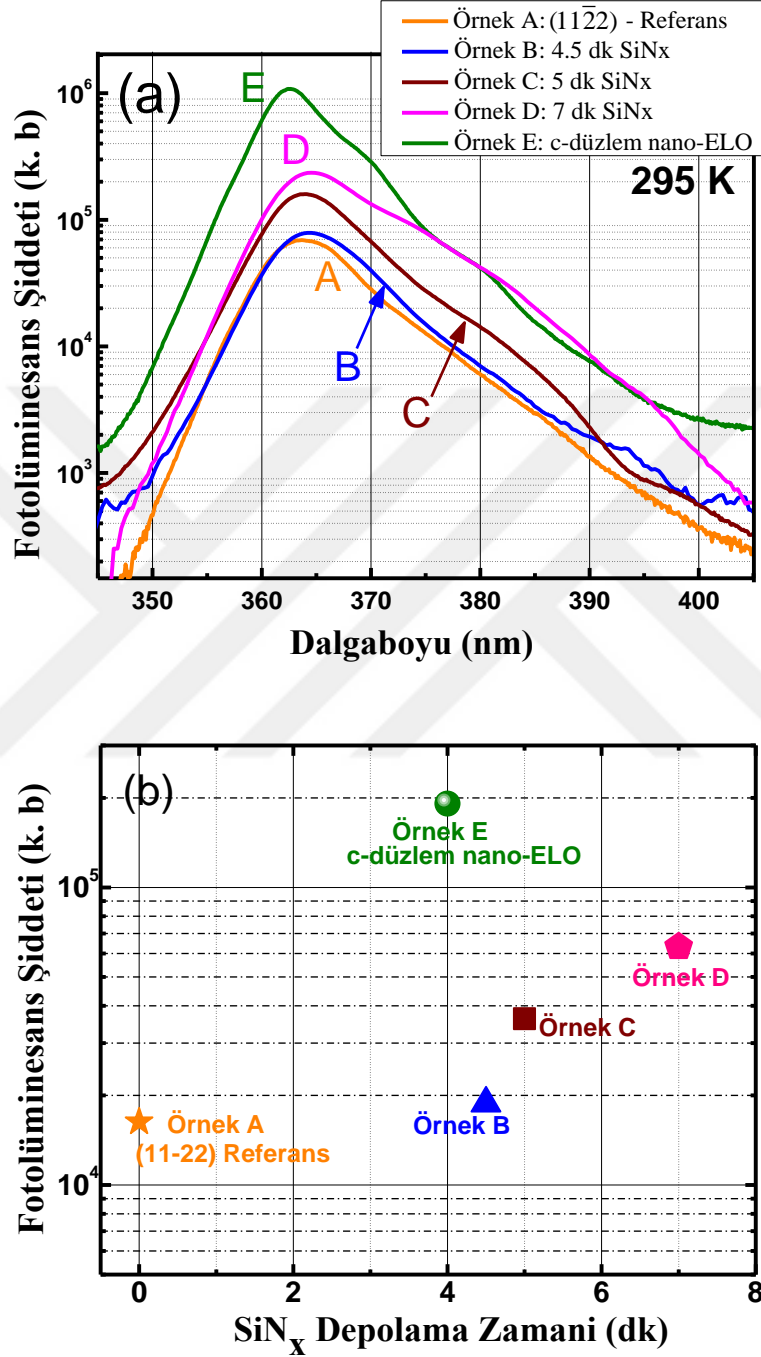
Yapısal kaliteyi incelemek için XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. $(11\bar{2}2)$ yansıma eğrileri Şekil 5.3 de gösterildiği gibi GaN yapısının $[11\bar{2}3]$ ve $[1\bar{1}00]$ doğruları boyunca ölçülmüştür. A, B, C ve D örnekleri için yarı çizgi genişliği (FWHM) değerlerini kıyaslamaktadır. Gözenekli SiN_x ara tabakaların eklenmesi ile $(11\bar{2}2)$ GaN ait yarı çizgi genişliğinde gözlenen azalma yapısal kalitede bir artışa işaret etmektedir. 5 dakika SiN_x depolama zamanı olan C örneği en düşük FWHM değerine sahip olup en küçük düzlem anizotropisi göstermektedir.



Şekil 5.3: SiN_x depolama zamanına karşılık $[11\bar{2}3]$ GaN ve $[1\bar{1}00]$ GaN doğrultuları boyunca ölçülen XRD eğrilerinin FWHM değerleri.

Oda sıcaklığı FL ölçümleri, nano-gözenekli SiN_x ara tabakaları ile büyüyen yarı polar $(11\bar{2}2)$ GaN yapıların optik kalitesinin gelişimini göstermektedir. Şekil 5.4 (a) 4.5 dakika (mavi), 5 dakika (kahverengi) ve 7 dakika (pembe) boyunca depolanan SiN_x ara tabakalı yarı polar yapıların FL spektrumlarını göstermektedir. Aynı grafik içerisinde SiN_x ara tabakanın uygulanmadığı yarı polar referans örneği (kırmızı) ile c-düzlem nano-ELO referans örneğinin (siyah) FL spektrumları da kıyaslama yapmak için verilmiştir. SiN_x ara tabakalı örneklerin FL şiddeti $(11\bar{2}2)$ GaN referans örneğinin FL şiddetinden daha büyüktür. FL şiddeti SiN_x depolama zamanı ile artmaktadır. 7 dakika SiN_x depolama zamanına sahip olan D örneğinin FL şiddetinde, referans örneğine göre (siyah) 4 kattan fazla artış gözlenmiştir. Daha önce belirttiği üzere, SiN_x depolama zamanının artması SiN_x ara tabaka gözeneklerinin daha düşük

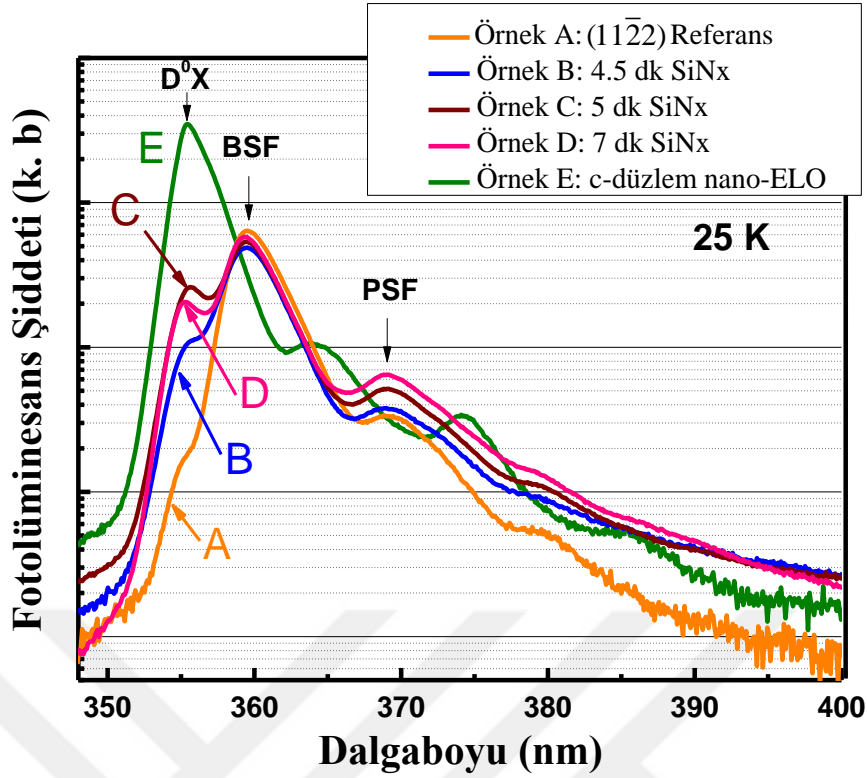
boyutlarda olmasına yol açmaktadır. Bu durum vida dislokasyon yoğunluğunun daha etkili bir şekilde azaltmaktadır. Dolayısıyla, ışınal verimlilik ve FL emisyon şiddeti artmaktadır. Şekil 5.4 (b)'de SiN_x depolama zamanına karşılık FL pik şiddetindeki değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.4: (a) Farklı SiN_x ara tabakalı (11 $\bar{2}2$) örnekler için oda sıcaklığı FL spektrumu. Aynı zamanda, (11 $\bar{2}2$) yarı polar (turuncu) ve c-düzlem nano-ELO (yeşil) örnekleri gösterilmektedir. (b) SiN_x depolama zamanının fonksiyonu olarak normalize edilmiş oda sıcaklığı FL Şiddeti.

Yarı polar örnekler için düşük sıcaklık FL spektrumları Şekil 5.5’de gösterilmektedir. (11 $\bar{2}$ 2) GaN referans örneği (kırmızı) için elde edilen spektrumun 360-390 nm dalga boyu aralığında baskın olarak gözlenen geçişler taban-düzlem istiflenme hataları (BPSFs) ve prizmatik istiflenme hatalarına (PSFs) karşılık gelen geçişlerdir. Benzer geçişler [76,77] referanslarda da rapor edilmiştir. Verici-bağlı eksiton ($D^{\circ}X$) emisyonuna ait pik 356 nm’de zayıf bir omuz olarak gözlenmiştir. BSF ve PSF ile ilgili piklerin yüksek şiddetli olması SiN_x ara tabakalar olmadan büyütülen (11 $\bar{2}$ 2) GaN/m-safir alt tabakaların optik olarak aktif istiflenme hatalarının yoğunlukta olduğunu göstermektedir.

SiN_x nano-maske ile büyüyen örnekler için $D^{\circ}X$ pik şiddeti BSF pik şiddetinden daha düşük olmasına rağmen, referans örneğine kıyasla pik şiddetinin kaydadeğer şekilde arttığı gözlenmiştir. 5 dakika SiN_x depolama zamanı ile büyütülen yapı en yüksek bant kenarı emisyon şiddetine sahiptir. Bu durum XRD sonuçları ile de uyumludur (en küçük dereceli yarı çizgi genişliğine sahip). Nano-ELO yarı polar örneklerden elde edilen BSF piklerine ait FL şiddetleri A referans örneğine kıyasla nispeten daha az oranda azalmasına rağmen, PSF tabanlı emisyon şiddeti daha fazla azalmıştır. Bu gözlemler, vida dislokasyon yoğunluğunda ve muhtemelen ışınal olmayan rekombinasyondan sorumlu olan ve toplam hacminde önemli derecede bir değişme olmayan istiflenme hataları ile ilişkili kısmi dislokasyonlarda önemli oranda azalma sağlandığına işaret etmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, GaN alt tabakada mevcut istiflenme hatalarının yayılımını engleyen SiN_x ara tabakaların etkisini fiilen azaltan tekrar büyütme süresince GaN/ SiN_x ara yüzeyde oluşan yeni istiflenme hatalarının olabileceği olasılığı ile uyumludur.



Şekil 5.5: 4,5 dakika (mavi), 5 dakika (kahverengi) ve 7 dakika (pembe) boyunca depolanan SiN_x ara tabakalı (11 $\bar{2}2$) GaN yapıları için 25 K düşük sıcaklık FL spektrumu. c-düzlem nano-ELO referans örneği (yeşil – E örneği) ve SiN_x uygulamasının bulunmadığı (11 $\bar{2}2$) GaN örneği (turuncu – A örneği) için elde edilen spektrumda gösterilmektedir.

Sonuç olarak, büyütme doğrultusunda ki kusurların yayılmasını engelleyen nano-gözenekli SiN_x ara tabakaların yerleştirilmesi ile (11 $\bar{2}2$) yarı polar GaN tabakaların optik ve yapısal kalitelerinde belirli bir iyileşme gözlenmiştir. Nano-ELO tabakalardan elde edilen oda sıcaklığında ki FL pik şiddeti nano-gözenekli SiN_x depolama zamanının artması ile artmaktadır. 7 dakika nano-ELO uygulanarak büyütülen örneğin FL şiddetinde, aynı kalınlık fakat SiN_x ara tabakanın olmadığı referans örneğine kıyasla 4 kat daha fazla artış gözlenmiştir. Optik kalitenin gelişmesi ile uyumlu olarak nano-ELO uygulanarak büyütülen örneklerin daha dar XRD eğrilerine sahip olmaları yapısal kalitede de bir iyileşmenin sağlandığını göstermektedir. Elde edilen bu veriler nano-gözenekli SiN_x ile büyüyen yarı polar yapılarda daha düşük vida dislokasyon yoğunluğu gösterirken, istiflenme hata yoğunluğu üzerindeki nano-ELO yönteminin etkilerine ışık tutulması için ilave çalışmaların yapılması gerekmektedir. Uzun SiN_x depolama zamanı uygulanan

örneklerin daha iyi optik ve yapısal özelliklere sahip olduğu gözlenirken, daha uzun SiN_x depolama zamanı daha kötü yüzey morfolojisine yol açmaktadır. Diğer taraftan, adacıkların tam olarak kaynaşması için daha uzun büyütme zamanına gereksinim duyulması, zamanın optimize edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Yarı polar GaN tabakaların yapısal ve optik gelişimi ile birlikte üretim maliyetini de dikkate alındığında en uygun SiN_x depolama zamanının 5 dakika civarında olması gerektiği tespit edilmiştir. Farklı alttaşlar üzerine GaN yapıların yarı polar ve polar düzlemlerinin büyütülmesinde bu tekniğin uygulanması, yüksek verimli ve performanslı gelecek nesil InGaN tabanlı ışık yayan diyotlar için oldukça umut vericidir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının ilk kısmında, hex (6x) 3 nm $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ aktif bölgeden oluşan mavi LED yapılarının kuantum verimliliği üzerine Mg δ -delta katkılı $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ bariyerlerin etkisi incelenmiştir. IQE ölçümlerine göre bütün LED'lerin hemen hemen aynı optik kaliteye sahip oldukları görülmüştür. EQE sonuçları incelendiğinde ise, n bölgesine yakın ilk bariyerin Mg δ -delta katkılanması ile elde edilen LED'in EQE pik değeri, komşu n bölgesinde ki artırılmış deşik konsantrasyonundan dolayı referans örneğine kıyasla %20 arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçların, aktif bölge boyunca taşıyıcı dağılımının sayısal simülasyonları ile de uyumlu olduğu görülmüştür.

İlk bariyere ek olarak ikinci bariyerin de katkılanması EQE değerinde kaydadeğer bir artışa sebep olmamıştır. Bunun olası sebebi olarak ikinci bariyerin Mg katkılanmasının yol açtığı aktif bölgenin kristal kalitesin bozulması gösterilebilir. Bu kalite bozulumu direkt olarak deşik enjeksiyonunun verimliliğini etkilemektedir. Mg δ -delta katkılı her iki LED'in yüksek akım yoğunluklarında verimlilik düşüş hızı referans örneğe kıyasla daha düşük olarak ölçülmüştür. Referans örneğinde 80 A/cm^2 olarak gözlenen EQE pik değeri düşüşün başlangıç noktası Mg δ -delta katkılı bariyerlere sahip LED'lerde 100 A/cm^2 değerine kaymıştır. Dolayısıyla, Mg δ -delta katkılı bariyerlere sahip LED'leri daha az verim düşüşü ile daha yüksek akım yoğunluklarına sürmemiz mümkün olacaktır.

İkinci bölümde 1,5, 2 ve 3 nm kuyu genişliği olan c-düzlem InGaN LED yapıların sıcaklığa bağlı rekombinasyon dinamikleri, aktif bölge boyutsallığı ve IQE üzerindeki etkilerini belirlemek için incelenmiştir. İncelenen bütün LED yapıların FL geçişlerinin düşük sıcaklıkta ışınsal rekombinasyon, oda sıcaklığında ise ışınsal olmayan rekombinasyon süreçleri ile yönetildiği doğrulanmıştır. Oda sıcaklığında ve $3-4,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ fotouyarılmış taşıyıcı yoğunluğunda, Shockley-Read-Hall (A) ve bimolüküler (B) rekombinasyon katsayıları hex (6x) 1,5, 2 ve 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapıları için sırasıyla ($9,2 \times 10^7 \text{ s}^{-1} - 8,8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$), ($8,5 \times 10^7 \text{ s}^{-1} - 6,6 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) ve ($6,5 \times 10^7 \text{ s}^{-1} - 1,4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) olarak elde edilmiştir.

Işınsal yarı ömrün sıcaklığa bağımlılığından, $\tau_{rad} \propto T^{N/2}$, aktif bölge boyutsallığının kuyu genişliğinin genişliğinin azalması ile azaldığı tespit edilmiştir. Örneğin, 3 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısı $\sim T^{1.5}$ bağımlılığı göstermektedir. Bu durum aktif bölgenin üç boyutlu bir yapıya sahip olduğunu önermektedir. Diğer yandan, 1,5 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısının iki boyutlu ($\sim T^1$) olduğu doğrulanırken, 2 nm kuyu genişliğine sahip LED yapısının iki boyutlu yapıya yakın olduğu anlaşılmıştır. Sıcaklığa bağlı FL ve zaman-çözümlü FL tekniklerinin birlikte değerlendirilmesiyle, aktif bölgenin boyutsallığı, InGaN LED yapılarda verimliliği sınırlayan süreçler ile aktif bölge tasarımı arasındaki ilişkilerin daha iyi anlaşılabilceği gösterilmiştir.

Üçüncü bölümde, MOCVD tekniği ile m-düzlem safir alt taş üzerine büyütülen yarı polar (11 $\bar{2}2$) GaN yapılar incelenmiştir. Yarı polar materyaller de ki In-katılma oranı, aynı tutucu üzerinde ve yanyana eş zamanlı olarak aynı şartlar altında büyütülen c-düzlem örnekler ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, polar ve yarı polar yönelime sahip attaşlar üzerine büyütülen InGaN aktif tabakaların optik kalitesini artırmak için ELO tekniği kullanılmıştır.

Polar ve yarı polar alttaşlar üzerine büyütülen örneklerdeki In-katılma verimliliği, emisyon dalga boyu üzerindeki QCSE etkisini azaltan yüksek uyarma yoğunluğunda ölçülen FL spektralarının detaylı analizlerinden elde edilmiştir. Uyarma şiddeti yoğunluğuna bağlı FL sonuçlarına göre, yarı polar InGaN yapılarda In konsantrasyonu $\sim\%18$ olarak bulunurken, polar InGaN yapılarda $\sim\%15$ bulunmuştur. Bu sonuçlar (11 $\bar{2}2$) yarı polar GaN yapıların daha verimli gelecek nesli yeşil ve sarı InGaN tabanlı ışık yayan diyotların tasarımlarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Son bölümde, MOCVD tekniği ile m-düzlem safir alt taş üzerine büyütülen yarı polar (11 $\bar{2}2$) GaN malzemelerin optik ve yapısal kalitelerinin artırılması için nanogözenekli SiN_x maskeler ELO tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nanogözenekli SiN_x ile büyütülen (11 $\bar{2}2$) örneklerinin oda sıcaklığı FL şiddeti, aynı kalınlığa sahip fakat SiN_x ara tabakaların olmadığı referans örneğine kıyasla 4 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu gelişmenin nedeni olarak, SiN_x ara tabaka ile tampon tabakada yoğun olan dislokasyonların ve istiflenme hatalarının yüzeye doğru yayılmasını etkili bir şekilde engellenmesi gösterilebilir.

Düşük sıcaklık FL ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre de SiN_x ara tabaka kullanılan örneklerin yapısal kalitelerinin iyileştiği, optiksel olarak verici bağlı eksiton emisyon pik şiddetinde gözlenen artışla desteklenmiştir. Optiksel verilerle uyumlu olarak, $(11\bar{2}2)$ yapıların XRD eğrilerinin FWHM değerleri düzlemde iki farklı $[11\bar{2}3]$ ve $[1\bar{1}00]$ doğrultu için ölçülmüştür. Bu sonuçlar, gelecek nesil yüksek verimli InGaN tabanlı ışık yayan diyotların tasarımında, farklı alttaşlar üzerine polar ve polar olmayan GaN yapılarının büyütülmesinde bu yöntemin uygulanmasını desteklemektedir.



7. Yayınlar

- ❖ Zhang, F., Can, N., Hafız, S., Monavarian, M., Das, S., Avrutin, V., Özgür, Ü. and Morkoç, H., “Improvement of carrier injection symmetry and quantum efficiency in InGaN light-emitting diodes with Mg delta-doped barriers”, *Appl. Phys. Lett.* 106 (18) 181105 (2015).
- ❖ Monavarian, M., Izyumskaya, N., Müller, M., Metzner, S., Veit, P., Can, N., Das, S., Özgür, Ü., Bertram, F., Christen J., Morkoc, H., and Avrutin, V., “Improvement of optical quality of semipolar (11 $\bar{2}$ 2) GaN on m-plane sapphire by in-situ epitaxial lateral overgrowth”, *J. Appl. Phys. Lett.* 119, 145303 (2016).
- ❖ Can, N., Okur, S., Monavarian, M., Zhang, F., Avrutin, V., Morkoc, H., Teke, A., Özgür, Ü., “Active region dimensionality and quantum efficiencies of InGaN LEDs from temperature dependent photoluminescence transients” *Proc. of SPIE* Vol. 9363, 93632U © 2015 SPIE.
- ❖ Monavarian, M., Metzner S., Izyumskaya, N., Müller, M., Okur, S., Zhang, F., Can, N., Das, S., Avrutin, V., Özgür, Ü., Bertram, F., Christen, J., and Morkoc, H., “Enhancement of optical and structural quality of semipolar (11 $\bar{2}$ 2) GaN by introducing nanoporous SiN_x interlayers”, *Proc. of SPIE* Vol. 9363, 93632I © 2015 SPIE.
- ❖ Monavarian, M., Metzner S., Izyumskaya, N., Okur, S., Zhang, F., Can, N., Das, S., Avrutin, V., Özgür, Ü., Bertram, F., Christen, J., and Morkoc, H., “Indium-incorporation efficiency in semipolar (11 $\bar{2}$ 2) oriented InGaN-based light emitting diodes”, *Proc. of SPIE* Vol. 9363, 93632P © 2015 SPIE.

8. KAYNAKLAR

- [1] Morkoç, H., *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*, Volume 3, Weinheim: Wiley-VCH., (2008).
- [2] Wang, X., Hsu, C. Y. and Jin, X. M., “Free-Space Laser Communication Technologies Xx”, (eds: Mecherle, S.), SPIE-Int Soc. Optical Engineering, Volume 6877, pp.87706, (2008).
- [3] Zhang, S., Watson, S., McKendry, J. J. D., Massoubre, A., Cogman, E., Gu, E., et al., “ High-bandwidth parallel data transmission using GaN/CMOS micro-LED arrays”, *In: Photonics Conference (IPC)*, pp.38-39, (2012).
- [4] Würtele, M. A., Kolbe, T., Lipsz, M., Külberg, M., Weyers, M., Kneissl, M., and Jekel, M., “Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes for water disinfection”, *Water Research*, 45 (3), 1481, (2011).
- [5] Jiao, J., “Stakeholders make progress on LED lighting horticulture standarts” Director of Regulations and Emerging Technologies Osram Opto Semiconductors, <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-6/features/standards/stakeholders-make-progress-on-led-lighting-horticulture-standards.html>, (2015).
- [6] Lingard, R., “Lifetime of White LEDs”, U.S. Department of Energy, “http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds.pdf”, (2014).
- [7] Cree News, “*First to Break 300 Lumen Per Watt Barrier*”, www.cree.com/News-and-Events, (March 26 - 2014).
- [8] Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M., “Candela-class high-brightness InGaN/GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 64, 1687 (1994).
- [9] Narukawa, Y., Ichika, M., Sanga, D., Sano, M., and Park, Y., “White light emitting diodes with super-high luminous efficacy”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (35), (2010).
- [10] Shimizu, Y., Sakano, K., Noguchi, Y., Moriguchi, T., “Light Emitting Diodes and Display”, Google Patents, (2009).

- [11] Nakamura, S., Mukai, T., Yamada, M., ‘‘Characteristic of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light Emitting Diodes’’, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, 3976 (1999).
- [12] Piprek, J., ‘‘Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes’’, *Phys. Status Solidi A*, 1-9 (2010).
- [13] Vurgaftman, I., Meyer, J. R., ‘‘Band parameters for nitrogen-containing semiconductors’’, *J. Appl. Phys.*, 94 (6), 3675, (2003).
- [14] Gibart, P., Beaumont, B., Vennegues, P., ‘‘Epitaxial Lateral Overgrowth of GaN’’ in ‘‘Nitride Semiconductors – Handbook on Materials and Devices’’ Wiley 2003.
- [15] Hiramatsu, K., Nishiyama, K., Motogaito, A., Miyake, H., Iyechika, Y., and Maeda, T., ‘‘Recent Progress in Selective Area Growth and Epitaxial Lateral Overgrowth of III-Nitrides: Effects of Reactor Pressure in MOVPE Growth’’, *Physica Status Solidi (a)*, 176, 535 (1999).
- [16] Xu, J., Wang, T., ‘‘Efficiency droop improvement for InGaN-based light-emitting diodes with gradually increased In-composition across the active region’’, *Physica E*, 52, 8-13 (2013).
- [17] Chen, J. R., Wu, Y. C., Ling, S. C., Ko, T. S., Lu, T. C., et al., ‘‘Investigation of wavelength-dependent efficiency droop in InGaN light-emitting diodes’’, *Appl. Phys.*, 98, 779, (2010).
- [18] Shen, Y. C., Mueller, G. O., Watanabe, S., Gardner, N. F., Munkholm, A., Krames, M. R., ‘‘Auger recombination in InGaN measured by photoluminescence’’, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 141101, (2007).
- [19] Choi, S., Ji, M., Kim, J., Kim, H. J., Satter, M., Yoder, P. D., et al., ‘‘Efficiency droop due to electron spill-over and limited hole injection in III-nitrides visible light-emitting diodes employing lattice-matched InAlN electron blocking layers’’, *Appl. Phys. Lett.*, 101, 161110 (2012).
- [20] Zhang, Y. Y., Zhu, X. L., Yin, Y. A., ‘‘Performance Enhancement of Near-UV Light-Emitting Diodes With an InAlN/GaN Superlattice Electron-Blocking Layer’’, *IEEE Electron Device Letters*, 33, 994 (2012)
- [21] Schubert, M. F., Xu J., Kim J. K., Schubert, E. F., Kim, M. H., Yoon S., et al., ‘‘Polarization-matched GaInN/AlGaInN multi-quantum-well light-emitting-diodes with reduced efficiency droop’’, *Appl. Phys. Lett.*, 93, 041102 (2008).

- [22] Xu, J., Schubert, M. F., Noemaun, A. N, Zhu, D., Kim, J. K., Schubert, E. F., et al., "Reduction in efficiency droop, forward voltage, ideality factor, and wavelength shift in polarization-matched GaInN/GaN multi-quantum-well light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 94, 011113 (2009).
- [23] Ni, X., Li, X., Lee, J., Avrutin, V., Özgür, Ü., Morkoç, H., et al., "InGaN staircase electron injector for reduction of electron overflow in InGaN light emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 97, 031110 (2010).
- [24] Xie, J., Ni, X., Fan, Q., Shimada, R., Özgür, Ü., Morkoç, H., "On the efficiency droop in InGaN multiple well blue light emitting diodes and its reduction with p-doped quantum well barriers", *Appl. Phys. Lett.*, 93, 121107 (2008).
- [25] Zhang, F., Hafiz, S., Monavarian, M., Das, S., Avrutin, V., Özgür, Ü., et al., "Improvement of carrier injection symmetry and quantum efficiency in InGaN light-emitting diodes with Mg-delta doped barriers", *Appl. Phys. Lett.*, 106, 181105 (2015).
- [26] Roosbroeck, W., Schokley, W., "Photon-radiation recombination of electrons and holes in germanium", *Phys. Rev.* 94, 1558-1560, (1954).
- [27] Pankove, J. I., *Optical Processes in Semiconductors*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1971).
- [28] Nakamura, S., Krames, M. R., "History of Gallium-Nitride-Based Light-Emitting-Diodes for Illumination", *Proceedings of the IEEE*, 101, 2211 (2013).
- [29] Li, X., Okur, S., Zhang, F., Özgür, Ü., Avrutin, V., Morkoç, H., "Improved quantum efficiency in InGaN light emitting diodes with multi-double-heterostructures active regions", *Appl. Phys. Lett.* 101, 041115 (2012).
- [30] Zhang, Y. Y., Fan, G. H., Zhang, T., "Correction to "Performance Enhancement of Blue Light-Emitting-Diodes Without an Electron Blocking Layer by Using p-Type Doped Barriers and a Hole-Blocking Layer of Low Al Mole Fraction", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 48, 1233 (2012).
- [31] Han, S. H., Cho, C. Y., Lee S. J., Park, T. Y., Kim, T. H., Park, S. H., et al., "Effect of Mg doping in the barrier of InGaN/GaN multiple quantum well on optical power of light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 96, 051113 (2010)
- [32] Kuo, Y. K., Tsai, M. C., Yen, S. H., Hsu, T. C., Shen, Y. J., "Effect of P-Type Last Barrier on Efficiency Droop of Blue InGaN Light-Emitting Diodes", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 46, 1214 (2010).

- [33] Rozhansky, I. V., Zakheim, D. A., ‘‘ Analysis of the causes of the decrease in the electroluminescence efficiency of AlGaInN light-emitting-diode heterostructures at high pumping density’’, *Semiconductors*, 40, 839 (2006).
- [34] Ni, X., Li, X., Lee, J., Avrutin, V., Matulionis, A., Özgür, Ü., Morkoç, H., ‘‘Privotal role of ballistic and quasi-ballistic electrons on LED efficiency’’, *Superlattice and Microstructures*, 48, 133 (2010).
- [35] Nardelli, M. B., Rapcewicz, K., Bernholc, J., ‘‘Polarization field effects on the electron-hole recombination dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells’’, *Appl. Phys. Lett.*, 71, 3135 (1997).
- [36] Lefebvre, P., Allegre, J., Gil, B., Mathieu, H., Grandjean, N., Leroux, J., et al., ‘‘Time-resolved photoluminescence as a probe of internal electric fields in GaN/(GaAl)N quantum wells’’, *Phys. Rev B.*, 59, 15363 (1999).
- [37] Liu, L., Wang, L., Liu, Y., Yang, W., Li, D., Chen, W. H., et al., ‘‘Investigations of the light emission properties and carrier dynamics in dual-wavelength InGaN/GaN multiple-quantum well light emitting diodes’’, *J. Appl. Phys.*, 112, 083101 (2012).
- [38] Sasaki, A., Nichizuka, K., Wang, T., Sakai, S., Kaneta, A., Kawakami, Y., et al., ‘‘Radiative carrier recombination dependent on temperature and well width of InGaN/GaN single quantum well’’, *Solid State Communications*, 129, 31 (2004).
- [39] Narukawa, Y., Kawakami, Y., Fujita, S., Nakamura, S., ‘‘Dimensionality of excitons in laser diodes structures composed of InGaN multiple quantum wells’’, *Phys. Rev. B*, 59, 10283 (1999).
- [40] Zhang, F., Hafiz, S., Okur, S., Avrutin, V., Özgür, Ü., Morkoç, F., et al., ‘‘The effect of stair case electron injector design on electron overflow in InGaN light emitting diodes’’, *Appl. Phys. Lett.*, 103, 051122 (2013).
- [41] Kuroda, T., Tackeuchi, A., ‘‘Influence of free carrier screening on the luminescence energy shift and carrier lifetime of InGaN quantum wells’’, *J. Appl. Phys.*, 92, 3071 (2002).
- [42] Feng, S. W., Cheng, Y. C., Chung, Y. Y., Yang, C. C., Lin, Y. S., Hsu, C., et al., ‘‘Impact of localized states on the recombination in InGaN/GaN quantum well structures’’, *J. Appl. Phys.*, 92, 4441 (2002).
- [43] Ko, T. S., Lu, T. C., Wang, T. C., Lo, M. H., Chen, J. R., Gao, R. C., et al., ‘‘Optical characteristics of a-plane InGaN/GaN multiple quantum wells with different well widths’’, *Appl. Phys.*, 90, 181122 (2007).

- [44] Kim, H., Shin, D. S., Ryu, H. Y., Shim, J. I., ‘‘Analysis of Time-resolved Photoluminescence of InGaN Quantum Wells Using the Carrier Rate Equation’’, *J. Appl. Phys.*, 49, 112401 (2010).
- [45] Chichibu, S., Onuma, T., Sota, T., DenBaars, S. P., Nakamura, S., Kitamura, T., et al., ‘‘Influence of InN mole fraction on the recombination processes of localized excitons in strained cubic InGaN/GaN multiple quantum wells’’, *J. Appl. Phys.* 93, 2051 (2003).
- [46] Berkowicz, E., Gershoni, G., Bahir, G., Lakin, E., Shilo, D., Zolotoyabko, E., et al., ‘‘Measured and calculated radiative lifetime and optical absorption of InGaN/GaN quantum structures’’, *Phys. Rev. B.* 61, 10994 (2000).
- [47] Andreani, L. C., *Confined Electrons and Photons*, NATO ASI Series, Plenum Press – New York and London, (1995).
- [48] Keller, S., Keller, B. P., Kapolnek, D., Abare, A. C., Masui, H., Coldren, L. A., et al., ‘‘Growth and characterization of bulk InGaN films and quantum wells’’, *Appl. Phys. Lett.* 68, 3147 (1996).
- [49] Blood, P., ‘‘On the dimensionality of optical absorption, gain and recombination in quantum-confined structures’’, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 36, 354 (2000).
- [50] Dai, Q., Schubert, M. F., Kim, M. H., Kim, J. K., Schubert, E. F., Koleske, D. D., et al., ‘‘Internal quantum efficiency and nonradiative recombination coefficient of GaInN/GaN multiple quantum wells with different dislocation densities’’, *Appl. Phys. Lett.* 94, 111109 (2009).
- [51] Özgür, Ü., Liu H., Li, X., Ni, X., Morkoç, H., ‘‘ GaN-Based Light-Emitting Diodes: Efficiency at High Injection Levels’’, *Proceeding of the IEEE*, 98, 1180 (2010).
- [52] Fiorentini, V., Bernardini, F., Della Sala, F., Di Carlo, A., Lugli, P., ‘‘Effects of macroscopic polarization in III-V nitride multiple quantum wells’’, *Phys. Rev. B.*, 60, 8849 (1999).
- [53] Strittmater, A., Northrup, J. E., Johnson, N. M., Kisin, M. V., Spiberg, P., et al., ‘‘Semi-polar nitride surfaces and heterostructures’’, *Phys. Status Solidi B*, 248, 561 (2011).
- [54] Northrup, J. E., ‘‘GaN and InGaN (1122) surfaces: Group-III adlayers and indium incorporation’’, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 133107 (2009).

- [55] Zhao, Y., Yan, Q., Huang, C. Y., Huang, S. C., Hsu, P. S., Tanaka, S., et al., ‘‘Indium incorporation and emission properties of nonpolar and semipolar InGaN quantum wells’’ *Appl. Phys. Lett.*, 100, 201118 (2012).
- [56] Palyakov, A. Y., Govorkov, A. V., Smirnov, N. B., Markov, A. V., Lee, I. H., Ju, J. W., et al., ‘‘Anisotropy of In incorporation in GaN/InGaN multiple quantum wells prepared by epitaxial lateral overgrowth’’, *Appl. Phys. Lett.*, 94, 142102 (2009).
- [57] Browne, D. A., Young, E. C., Lang, J. R., Hurni, C. A., and Speck, J. S., ‘‘Indium and impurity incorporation in InGaN films on polar, nonpolar, and semipolar GaN orientations grown by ammonia molecular beam epitaxy’’, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 30, 041512 (2012).
- [58] Jönen, H., Bremers, H., Rossow, U., Langer, T., Kruse, A., Hoffmann, L., et al., ‘‘Analysis of indium incorporation in non- and semipolar GaInN QW structures: comparing x-ray diffraction and optical properties’’, *Semicond. Sci. Technol.*, 27, 024013 (2012).
- [59] Sato, H., Tyagi, A., Zhong, H., Fellows, N., Chung, R. B., Saito, M., et al., ‘‘High power and high efficiency green light emitting diode on free-standing semipolar (1122) bulk GaN substrate’’, *Phys. Stat. Sol.*, 1, 162 (2007).
- [60] Bosi, M., Fornari, R., ‘‘A study of Indium incorporation efficiency in InGaN grown by MOVPE’’, *Journal of Crystal Growth*, 265, 434 (2004).
- [61] Morkoç, H., ‘‘Handbook of Nitride Semiconductors and Devices’’, Volume 2, Springer-Berlin (2008).
- [62] Xie, J., Özgür, Ü., Fu, Y., Ni, X., Morkoç, H., ‘‘Low dislocation densities and long carrier lifetimes in GaN thin films grown on a SiN_x nanonetwork’’, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 041107 (2007).
- [63] Moses, P. G., Miao, M., Yan, Q., Van de Walle, C. G., ‘‘Hybrid functional investigation of band gaps and band alignments for AlN, GaN, InN and InGaN’’, *J. Chem. Phys.*, 134, 084703 (2011).
- [64] Rinke, P., Scheffler, M., Qteish, A., Winkelkemper, M., Bimberg, D., Neugebauer, J., ‘‘Band gap and band parameters of InN and GaN from quasiparticle energy calculations based on exact-exchange density-functional theory’’, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 161919 (2006).

- [65] Nakamura, S., Fasol, G., Pearson, S. J., “*The Blue Laser Diode*”, Springer, New York (2000).
- [66] Langer, R., Simon, J., Ortiz, V., Pelekanos, N. T., Barski, A., Andre, R., et al., “Giant electric fields in unstrained GaN single quantum wells”, *Appl. Phys. Lett.* 74, 3827 (1999).
- [67] Takeuchi, T., Amano, H., Akasaki, I., “Theoretical Study of Orientation Dependence of Piezoelectric Effects in Wurtzite Strained GaInN/GaN Heterostructures and Quantum Wells”, *J. J. Appl. Phys.*, 39, 413 (2000).
- [68] Wu, Y. R., Huang, C. Y., Zhao, Y., Speck, J. S., “Nonpolar and semipolar LEDs”, *Woodhead* (2014).
- [69] Armitage, R., Hirayama, H., “m-plane GaN grown on m-sapphire by metalorganic vapor phase epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 092121 (2008).
- [70] Xie, J., Özgür, Ü., Fu, Y., Ni, X., Morkoç, H., et al., “I-V characteristics of Au/Ni Schottky diodes on GaN with SiN_x nanonetwork”, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 152108 (2006).
- [71] Hollander, J. L., Kappers, M. J., McAleese, C., Humphreys, C. J., “Improvements in a-plane GaN crystal quality by a two-step growth process”, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 101104 (2008).
- [72] Ko, T. S., Wang, T. C., Huang, H. M., Chen, J. R., Chen, H. G., et al., “Characteristics of a-plane GaN with the SiN_x insertion layer grown by metal-organic chemical vapor deposition”, *J. Cryst. Growth*, 310, 4972 (2008).
- [73] Jeong, J., Jang, J., Hwang, J., Jung, C., Kim, J., et al., “Improved performance of semi-polar (11-22) GaN-based light-emitting diodes grown on SiN_x interlayer”, *J. Cryst. Growth* 370, 114 (2013).
- [74] Dasilva, Y. A. R., Chauvat, M. P., Ruterana, P., Lahourcade, L., Monroy, E., et al., “Defect structure in heteroepitaxial semipolar (11-22)(Ga,Al)N”, *J. Phys. Condens. Matter.*, 22, 355802 (2010).
- [75] Ploch, S., Park, J. B., Stellmach, J., Schwaner, T., Frentrup, M., et al., “Single phase (11-22) GaN on (10-10) sapphire grown by metal-organic vapor phase epitaxy”, *J. Cryst. Growth* 331, 25 (2011).
- [76] Liu, R., Bell, A., Ponce, F., Chen, C. Q., Yang, J. W., et al., “Luminescence from stacking faults in gallium nitride”, *Appl. Phys. Lett.*, 86, 021908 (2005).

[77] Izyumskaya, N., Liu, S. J., Avrutin, V., Özgür, Ü., Morkoç, H., et al., ‘‘Epitaxial lateral overgrowth of non-polar GaN (1-100) on Si(112) patterned substrates by MOCVD’’, *J. Cryst. Growth* 314, 129 (2011).

