

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL ORGANİK KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME
TEKNİĞİYLE PİN YAPISINDA BÜYÜTÜLEN GALYUM
NİTRİT ESASLI IŞIK YAYAN DİYOTLARIN İNCELENMESİ

Hanife BAŞ

DOKTORA TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

Danışman
Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL ORGANİK KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME TEKNİĞİYLE PİN
YAPISINDA BÜYÜTÜLEN GALYUM NİTRİT ESASLI IŞIK YAYAN
DİYOTLARIN İNCELENMESİ**

Hanife BAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 28.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Fizik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Merih SERİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşe EROL, Üye
İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Kutsal BOZKURT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alp Osman KODOLBAŞ, Üye
TÜBİTAK/Marmara Araştırma Merkezi

Danışmanım Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Tekniğiyle pin Yapısında Büyütülen Galyum Nitrit Esaslı Işık Yayan Diyotların İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hanife BAŞ

İmza

Bu alışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü' nün FDK-2019-3525 numaralı doktora araştırma projesi, Yüksek Öğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Burs Programı ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı ile desteklenmiştir.

Asya'ya...

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca tüm bilgi ve deneyimlerinden tereddütsüz faydalanabildiğim, tez çalışmam sırasında her türlü destek, yönlendirme ve yardımlarıyla yanımda olan çok kıymetli danışanım Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR' e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Çalışma süresince karşılaştığım tüm zorlukları aşarken her zaman varlığını hissettiğim, yardımlarını bonkörce sunup, bana hem laboratuvar arkadaşı hem de çok iyi bir dost olan Araş. Gör. Dr. Neslihan AYARCI KURUOĞLU' na çok teşekkür ederim.

Tez İzleme Komitesi' nde yer alarak tez çalışmamın şekillenmesine katkı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Merih SERİN, Prof. Dr. Ayşe EROL ve ayrıca ofis desteği ile de çalışma ortamımı tamamlayan kıymetli hocam Prof. Dr. Kutsal BOZKURT' a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Fransa-CNRS' deki çalışmalarıyla aygıtların temini ile çalışmama katkıda bulunan Prof. Dr. Anderrahim RAMDANE ve Dr. Bandar ALSHEHRI' ye, ayrıca laboratuvar desteği aldığım başta Araş. Gör. Dr. Fahrettin SARCAN ve Mustafa AYDIN olmak üzere Prof. Dr. Ayşe EROL' un tüm ekibine çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmamı 100/2000 Doktora Burs Programı ile destekleyen Yüksek Öğretim Kurulu (YÖK)' na ve 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB)' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Desteğini her zaman sevgileriyle gösteren babam Zafer BAŞ, annem Saime BAŞ, ablam Havva BAŞ, ağabeyim Recep KARAGÖZ, ablam Ülkü BAŞ KARAGÖZ ve kardeşim Songül BAŞ' a varlıklarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bu zorlu ama kıymetli ve özel süreçte varlığıyla, gönülden desteğiyle ve yönlendirmeleriyle bana destek olan çok değerli doktorum Uzm. Dr. Ayşen COŞUT ÇAKMAK' a ayrıca teşekkür ederim.

Hanife BAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
TABLO LİSTESİ	xx
ÖZET	xxi
ABSTRACT	xxii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
2 GENEL BİLGİLER	5
2.1 III-V Nitrit Malzemeler	5
2.1.1 GaN	6
2.1.2 InGaN Alaşım	6
2.2 p-i-n Diyot	7
2.3 Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapı	9
2.4 p-i-n LED'in Uyarılması	9
2.5 Enerji Seviyeleri Arası Geçişler	12
2.6 LED Yapının Elektriksel Karakteristiği	13
2.6.1 Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği	13
2.6.2 Kapasitans-Gerilim (C-V) karakteristiği	16
2.7 LED Yapının Optik ve Optoelektronik Karakteristiği	18
2.7.1 Elektrolüminesans (EL)	18
2.7.2 Fotolüminesans (PL)	19
2.7.3 Fotoakım/Fotovoltaj (PC/PV)	19
3 DENEYSEL YÖNTEMLER	21

3.1	Aygıt Üretimi	21
3.1.1	InGaN SL LED Aygıt	21
3.1.2	InGaN/GaN MQW LED Aygıtlar	22
3.2	Aygıt Karakterizasyonu	22
3.2.1	Akım-Gerilim Ölçümleri	23
3.2.2	Kapasitans-Gerilim Ölçümleri	23
3.2.3	Elektrolüminesans Ölçümleri	24
3.2.4	Fotolüminesans Ölçümleri	25
3.2.5	Fotoakım/Fotovoltaj Ölçümleri	26
4	BULGULAR	27
4.1	%10 InGaN SL LED	27
4.1.1	%10 InGaN SL LED için I-V Ölçümleri	27
4.1.2	%10 InGaN SL LED için C-V Ölçümleri	28
4.1.3	%10 InGaN SL LED için EL Ölçümleri	29
4.1.4	%10 InGaN SL LED için PL Ölçümleri	30
4.1.5	%10 InGaN SL LED için PC/PV Ölçümleri	33
4.2	%10 InGaN/GaN MQW LED	36
4.2.1	%10 InGaN/GaN MQW LED için I-V Ölçümleri	36
4.2.2	%10 InGaN/GaN MQW LED için C-V Ölçümleri	40
4.2.3	%10 InGaN/GaN MQW LED için EL Ölçümleri	43
4.2.4	%10 InGaN/GaN MQW LED için PL Ölçümleri	46
4.2.5	%10 InGaN/GaN MQW LED için PC/PV Ölçümleri	52
4.3	%20 InGaN/GaN MQW LED	53
4.3.1	%20 InGaN/GaN MQW LED için I-V Ölçümleri	53
4.3.2	%20 InGaN/GaN MQW LED için C-V Ölçümleri	59
4.3.3	%20 InGaN/GaN MQW LED için EL Ölçümleri	61
4.3.4	%20 InGaN/GaN MQW LED için PL Ölçümleri	64
4.3.5	%20 InGaN/GaN MQW LED için PC/PV Ölçümleri	67
4.4	%30 InGaN/GaN MQW LED	69
4.4.1	%30 InGaN/GaN MQW LED için I-V Ölçümleri	69
4.4.2	%30 InGaN/GaN MQW LED için C-V Ölçümleri	74
4.4.3	%30 InGaN/GaN MQW LED için EL Ölçümleri	78
4.4.4	%30 InGaN/GaN MQW LED için PL Ölçümleri	80
4.4.5	%30 InGaN/GaN MQW LED için PC/PV Ölçümleri	83
5	SONUÇ ve ÖNERİLER	85
5.1	%10 InGaN SL LED - %10 InGaN/GaN MQW LED Sonuçları	85
5.2	%10 InGaN SL LED ve %10- %20- %30 InGaN/GaN MQW LED Sonuçları	87

KAYNAKÇA	90
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	99

SİMGE LİSTESİ

A	Sıcaklığa bağlı katsayı
α	Termal genleşme katsayısı
β	Debye sıcaklığı
B	Süseptans
b	Eğilme parametresi (bowing parameter)
C	Kapasitans
c	Işık hızı
C_0	Geometrik kapasitans
Δ	Termal aktivasyon enerjisi
ΔE_{FK}	Bant kuyruğu genişliği
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_g	Bant aralığı enerjisi
ϵ	Dielektrik sabiti
f	Frekans
Φ_B	Bariyer yüksekliği
γ	Elektrik alan katsayısı
G	İletkenlik
h	Planck Sabiti
$\hbar$	$h/2\pi$
I_0	Doyma akımı
I_r	Ters besleme akımı
J	Akım yoğunluğu
K	Kuvvet yasası sabiti

k_B	Boltzman
L	Işıma şiddeti
λ	Dalga boyu
μ_0	Sıfır alan mobilitesi
m^*	Etkin kütle
μ_e	Elektron mobilitesi
μ_h	Deşik mobilitesi
η	Diyot idealite faktörü
ω	Açısal frekans
P	Güç
R	Direnç
σ	Lokalizasyon etkisi
τ	Taşıyıcı serbest kalma süresi
T	Sıcaklık
w	İç bölge genişliği
V	Gerilim
Y	Admitans

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
AS	Admitans Spektroskopisi
BE	Bağlı Eksitonlar
CL	Katodolüminesans
C-V	Kapasite-Gerilim
DAP	Donör Akseptör Çifti
DC	Doğru Akım
DLTS	Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi
EBE	Elektron Demeti ile Biriktirme
EBL	Elektron Engelleme Katmanı
EDX	Enerji Dağılımlı X Işını Spektroskopisi
EL	Elektrolüminesans
FE	Serbest Eksitonlar
FWHM	Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik
GaN	Galyum Nitrit
HEMT	Yüksek Elektron Hareketli Transistörler
InGaN	İndiyum Galyum Nitrit
I-V	Akım-Gerilim
KL	Kırmızı Lüminesans
LED	Işık Yayan Diyot
LO	Boyuna Optik
LPE	Sıvı Fazı Biriktirme
MBE	Moleküler Işın Epitaksisi

MHVPE	Metal Halojenür Buhar Fazı Biriktirme
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
ML	Mavi Lüminesans
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MQW	Çoklu Kuantum Kuyuları
OMVPE	Organometalik Buhar Fazı Biriktirme
PL	Fotolüminesans
QCL	Kuantum Kademeli Laserler
QCSE	Kuantum Sınırlı Stark Etkisi
SCLC	Uzay Yüğü Sınırlamalı Akım
SL	Sarı Lüminesans
SL	Tek Tabaka
SPC	Yüzey Fotoakım
SPV	Yüzey Fotovoltaj
SRH	Shockley-Read-Hall
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
UVL	Ultraviyole Lüminesans
XRD	X Işını Kırınımı
VPE	Buhar Fazı Biriktirme
YL	Yeşil Lüminesans

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	III-V Nitrit malzemelerin örgü sabitlerine karşılık bant aralığı enerjileri [11]	5
Şekil 2.2	GaN molekülünün yapısı [61]	6
Şekil 2.3	p-i-n yapının şematik gösterimi	8
Şekil 2.4	MIS yapının eşdeğer devresinin şematik gösterimi	9
Şekil 2.5	MQW p-i-n yapının enerji bant diyagramının şematik gösterimi . . .	10
Şekil 2.6	Genel bir diyot davranışı [11]	13
Şekil 3.1	InGaN SL LED aygıtın şematik yapısı	21
Şekil 3.2	InGaN/GaN MQW LED aygıtların şematik yapısı, InGaN/GaN kuyu ve bariyer yapının bant diyagramı	22
Şekil 3.3	Sıcaklığa bağlı I-V ölçüm sistemi	23
Şekil 3.4	Sıcaklığa bağlı C-V ve C-T- ω ölçüm sistemi	24
Şekil 3.5	Sıcaklığa bağlı EL ölçüm sistemi	24
Şekil 3.6	Sıcaklığa bağlı PL ölçüm sistemi	25
Şekil 3.7	Sıcaklığa bağlı fotoakım/fotovoltaaj ölçüm sistemi	26
Şekil 4.1	(a) 300 K' daki $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı (b) LED'in I-V ölçümü sırasında ışıması	27
Şekil 4.2	Oda sıcaklığındaki $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için (a) 100 kHz'de kapasitans-gerilim davranışı, frekansın fonksiyonu olarak (b) Kapasitans-gerilim davranışı (c) AC iletkenlik-gerilim davranışı (d) Kapasitans-frekans davranışı	28
Şekil 4.3	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için değişen gerilim değerleriyle oda sıcaklığında alınan EL spektrumları	29
Şekil 4.4	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için EL spektrumunda tepelerin ayrıştırılması . .	30
Şekil 4.5	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları	31
Şekil 4.6	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için (a) T=30 K'da (b) T=300 K'da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) P=100 mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları	31

Şekil 4.7	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED aygıtın $T=30$ K' da (solda) ve $T=300$ K' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması	32
Şekil 4.8	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için (a) $T=30$ K' da (b) $T=80$ K' da (c) $T=150$ K' da (d) $T=300$ K'da tepelere ayrıştırılmış PL spektrumları	32
Şekil 4.9	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için PL spektrumundaki 3.06 eV'deki tepenin (a) Şiddetinin (b) Enerji değerinin sıcaklıkla değişimi	33
Şekil 4.10	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPV spektrumu (a) 30 K (b) 300 K, $(PV \times E)^2$ 'ye E grafiğinin lineer bölge fit eğrisi (c) 30 K (d) 300 K . .	34
Şekil 4.11	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPC spektrumu (daireler) ve exponansiyel fit eğrileri (kırmızı çizgiler), iç grafiklerdeki 2.5 eV civarındaki geniş tepe, enerji bant aralığı içindeki tuzak enerjisini gösterir (a) 30 K. (b) 300 K (c) Bant aralıkları ve kusur seviyelerini gösteren logaritmik skalada 80 K'deki SPC spektrumu ve türevi	35
Şekil 4.12	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPC ölçümlerinden elde edilen tepe enerjilerinin sıcaklığa bağımlılığı (daireler) ve modifiye Varshni eşitliğine göre fitleri (düz çizgiler)	36
Şekil 4.13	(a) 300 K' daki $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı (b) LED' in I-V ölçümü sırasında ışıması	37
Şekil 4.14	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışının sıcaklığa bağıllığı	37
Şekil 4.15	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için ileri besleme durumunda I-V davranışı	38
Şekil 4.16	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $0.6 < V < 1.5V$ aralığında (a) $I_0 - q/kT$ (b) $A - q/kT$ değişimi	38
Şekil 4.17	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $1.5 < V < 2.5V$ aralığında (a) $I_0 - q/kT$ (b) $A - q/kT$ değişimi	39
Şekil 4.18	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $3 < V < 5V$ aralığında (a) $I_0 - q/kT$ (b) $A - q/kT$ değişimi	39
Şekil 4.19	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $3 < V < 5V$ aralığında (a) $K - q/kT$ (b) $(m-1) - q/kT$ değişimi	40
Şekil 4.20	Oda sıcaklığındaki $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) Tüm frekanslarda (b) Seçilmiş frekanslarda kapasitans-gerilim davranışı (c) AC/DC iletkenlik-gerilim davranışı (d) Kapasitans-frekans davranışı	41
Şekil 4.21	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) -1 V (b) 0 V (c) 1 V (d) 3 V gerilim altında C-T davranışı	42
Şekil 4.22	$In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için sabit kapasitans değerlerinde frekans-sıcaklık ilişkisi	42

Şekil 4.23 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için akımın fonksiyonu olarak ölçülen 80-370 K sıcaklık aralığındaki EL spektrumları	43
Şekil 4.24 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED için (a) $T=170$ K' da (b) $T=300$ K' da enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak gösterilen (c) 9 mA enjeksiyon akımı uygulanmasıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen EL spektrumları	44
Şekil 4.25 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED'in seçilen 33 mA enjeksiyon akımındaki EL spektrumundan (a) 3.06 eV (b) 2.91 eV' deki tepe için tepe enerjisinin sıcaklıkla değişimi	45
Şekil 4.26 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED'in seçilen 33 mA enjeksiyon akımındaki EL spektrumundan (a) 3.06 eV (b) 2.91 eV' deki tepe için çizgi genişliğinin (FWHM) sıcaklıkla değişimi	45
Şekil 4.27 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED yapının EL spektrumundaki (a) 3.0 eV ve (b) 2.9 eV' deki tepe için (i) 80 K, (ii) 170 K ve (iii) 300 K sıcaklıklarında enjekte edilen akımın fonksiyonu olan İntegre EL spektrumu	46
Şekil 4.28 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları	47
Şekil 4.29 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED aygıtın $T=30$ K' da (solda) ve $T=300$ K' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması	47
Şekil 4.30 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30$ K'da (b) $T=300$ K'da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) $P=100$ mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları	48
Şekil 4.31 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30$ K'da (b) $T=300$ K'da PL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)	49
Şekil 4.32 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için InGaN ile ilişkili PL spektral tepelerinin ışıma şiddetlerinin sıcaklıkla ilişkisi (a) 3.03 eV tepesi (b) 2.89 eV tepesi	49
Şekil 4.33 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için InGaN ile ilişkili PL spektral tepelerinin enerji değişimlerinin sıcaklıkla ilişkisi (daireler) ve Modifiye Varshni eşitliğine göre fitleri (çizgiler) (a) 3.03 eV tepesi (b) 2.89 eV tepesi	50
Şekil 4.34 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için MQW içindeki katkısız ve p-katkılı GaN katmanlarından ML/KL/SL/YL emisyonu için önerilen geçişler	52
Şekil 4.35 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için SPV spektrumu (a) 30 K (b) 300 K, $(PV \times E)^2$ 'ye E grafiğinin lineer bölge fit eğrisi (c) 30 K (d) 300 K	53
Şekil 4.36 (a) 300 K' daki $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı (b) LED' in I-V ölçümü sırasında ışıması	54

Şekil 4.37 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışının sıcaklığa bağlılığı	54
Şekil 4.38 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için sabit gerilim altında ters akımın Arrhenius eğrisi	55
Şekil 4.39 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için ileri besleme durumunda I-V davranışı	55
Şekil 4.40 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $1.5 < V < 3.5$ V aralığında (a) $I_0 - q/kT$ (b) $A - q/kT$ değişimi	56
Şekil 4.41 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $3.5 < V < 6$ V aralığında (a) $I_0 - q/kT$ (b) $A - q/kT$ değişimi	57
Şekil 4.42 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $3.5 < V < 6$ V aralığında (a) $K - q/kT$ (b) $(m-1) - q/kT$ değişimi	57
Şekil 4.43 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $7.5 < V < 10$ V aralığında (a) $I_0 - q/kT$ (b) $A - q/kT$ değişimi	58
Şekil 4.44 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $7.5 < V < 10$ V aralığında (a) $K - q/kT$ (b) $(m-1) - q/kT$ değişimi	58
Şekil 4.45 Oda sıcaklığındaki $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) Kapasitans-gerilim davranışı (b) AC/DC iletkenlik-gerilim davranışı (c) Kapasitans-frekans davranışı	59
Şekil 4.46 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) -5 V (b) -1 V (c) 0 V (d) 1 V gerilim altında C-T davranışı	60
Şekil 4.47 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) Seçilen kapasitansın 0.3 kHz değerinde sıcaklığa bağlı davranışı (b) Sabit kapasitans değerlerinde frekans-sıcaklık ilişkisi	60
Şekil 4.48 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için akımın fonksiyonu olarak ölçülen 80-400 K sıcaklık aralığındaki EL spektrumları	61
Şekil 4.49 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (a) $T=80$ K' da (b) $T=300$ K' da enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak gösterilen (c) 36 mA enjeksiyon akımı uygulanmasıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen EL spektrumları (d) 56 mA enjeksiyon akımında sıcaklıkla enerjinin kayması	62
Şekil 4.50 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=80$ K'da (b) $T=300$ K'da EL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)	63
Şekil 4.51 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED'in seçilen 56 mA enjeksiyon akımındaki EL spektrumundan (a) 2.55 eV (b) 2.45 eV' deki tepe için tepe enerjisinin sıcaklıkla değişimi	64
Şekil 4.52 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları	64

Şekil 4.53 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED aygıtın $T=30\text{ K}$ ' da (solda) ve $T=300\text{ K}$ ' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması	65
Şekil 4.54 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (a) $T=30\text{ K}$ ' da (b) $T=300\text{ K}$ ' da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) 100 mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları (d) 100 mW gücünde sıcaklıkla enerjinin kayması	66
Şekil 4.55 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30\text{ K}$ 'da (b) $T=300\text{ K}$ 'da PL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)	67
Şekil 4.56 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (a) $T=30\text{ K}$ ' da gerilimin fonksiyonu olarak gösterilen (b) 0 V gerilimde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen SPC spektrumları	67
Şekil 4.57 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (solda) $T=30\text{ K}$ ' da SPC spektrumu ve spektrumda mevcut olan enerji seviyeleri ,(sağda) (1) ve (5) banttan banta geçişler, (6) banttan H1 tuzasına geçişler, (4) GaN için fonon replikası, (2) GaN'nin değerlik bandından QW'deki bir bağlı enerji seviyesine geçişler	68
Şekil 4.58 (a) 300 K' daki $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı (b) LED'in I-V ölçümü sırasında ışıması	69
Şekil 4.59 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için karanlık ortamda düz ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışının sıcaklığa bağlılığı	70
Şekil 4.60 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için sabit gerilim altında ters akımın Arrhenius eğrisi	70
Şekil 4.61 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için düz besleme gerilimi altında akım-gerilim davranışı	71
Şekil 4.62 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için 1.0-2.0 V aralığında (a) $A-q/kT$ (b) I_0-q/kT değişimi, 3.5-5 V aralığında (c) $A-q/kT$ (d) I_0-q/kT değişimi	72
Şekil 4.63 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için $3.5 < V < 5\text{V}$ gerilim aralığında (a) m (b) K nın sıcaklıkla davranışı	72
Şekil 4.64 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için sıcaklığın fonksiyonu olan J/E^2 ye $\sqrt{E}$ grafiği	73
Şekil 4.65 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için J/E^2 ye $\sqrt{E}$ grafiğinin (a) Eğiminden elde edilen elektrik alan katsayısı (γ) (b) Sıfır alan mobilitesini hesaplamak için eksenini kesen noktalar	74
Şekil 4.66 Oda sıcaklığındaki $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) Kapasitans-gerilim davranışı (b) AC/DC iletkenlik-gerilim davranışı (c) Kapasitans-frekans davranışı	74

Şekil 4.67 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) -3 V (b) -1 V (c) 0 V (d) 1 V gerilim altında C-T davranışı	75
Şekil 4.68 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) Seçilen kapasitansın 100 kHz değerinde sıcaklığa bağlı davranışı (b) Sabit kapasitans değerlerinde frekans-sıcaklık ilişkisi	76
Şekil 4.69 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) Farklı sıcaklıklarda 0 V değerinde G_{QW}/ω değerinin frekansa bağlılığı (b) $G_{QW}/\omega - \omega$ grafiğinin tepe noktalarından elde edilen frekans- sıcaklık grafiği . .	77
Şekil 4.70 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) çift logaritmik negatif diferansiyel süseptans eğirisi (b) $\sqrt{E'}$ nin fonksiyonu olarak elektron ve deşik mobilitesi	77
Şekil 4.71 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için akımın fonksiyonu olarak ölçülen 90-380 K sıcaklık aralığındaki EL spektrumları	78
Şekil 4.72 $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ MQW LED için (a) T=90 K' da (b) T=300 K' da enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak gösterilen (c) 45 mA enjeksiyon akımı uygulanmasıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen EL spektrumları (d) 45 mA enjeksiyon akımında sıcaklıkla enerjinin kayması	79
Şekil 4.73 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) T=90 K'da (b) T=300 K'da EL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)	80
Şekil 4.74 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları	81
Şekil 4.75 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED aygıtın T=30 K' da (solda) ve T=300 K' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması	81
Şekil 4.76 $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ MQW LED için (a) T=30 K' da (b) T=300 K' da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) 100 mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları (d) 100 mW gücünde sıcaklıkla enerjinin kayması	82
Şekil 4.77 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) T=30 K'da (b) T=300 K'da PL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)	83
Şekil 4.78 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için SPV spektrumu (a) 30 K (b) 300 K	83
Şekil 4.79 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için SPV spektrumunda GaN bant aralığı enerjisi (a) 30 K. (b) 300 K	84
Şekil 5.1 SL ve MQW LEDlerin sabit gerilim altında ışık şiddetlerinin karşılaştırılması	85
Şekil 5.2 SL LED - MQW LED için karanlık ortamda 300 K' da ileri ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışı	86

Şekil 5.3	SL LED - MQW LED için 300 K' da 6 V gerilim uygulamasıyla elde edilen EL ölçüm spektrumu	86
Şekil 5.4	SL LED - MQW LED için 30 K' da 100 mW gücünde ışık altında elde edilen PL ölçüm spektrumu	87
Şekil 5.5	(a)%10 InGa _N SL LED' in (b) %10 InGa _N /Ga _N MQW LED' in (c) %20 InGa _N /Ga _N MQW LED' in (d)	87

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPC ölçümü Varshni parametreleri	36
Tablo 4.2	$In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED için PL ölçümü Varshni parametreleri (i) Yüksek sıcaklık aralığı (ii) Düşük sıcaklık aralığı	51
Tablo 4.3	$In_{0.3}Ga_{0.7}N$ SL LED için I-V ve C-V ölçümleri sonucunda elde edilen AC ve DC mobiliteleri	78

Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Tekniğıyle pin Yapısında Büyütülen Galyum Nitrit Esaslı Işık Yayan Diyotların İncelenmesi

Hanife BAŞ

Fizik Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR

Bu çalışmada metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniğıyle büyütülen $In_xGa_{1-x}N/GaN$ filmlerden oluşan p-i-n yapıdaki ışık yayan diyotların (LED) içerdiği İndiyum (In) konsantrasyonunun değışimiyle (%10, %20 ve %30) açığa çıkan farklı dalga boylarındaki ışımaların elektriksel, optik ve opto-elektronik karakterizasyonu yapılmıştır. i-tabakasının tek tabaka (SL) ve çoklu kuantum kuyulu (MQW) yapıda olduğu bu diyotların elektrolüminesans (EL), fotolüminesans (PL) ve fotovoltaj/fotoakım (PV/PC) ölçümlerinden elde edilen spektrumların maksimum değer, şiddet, dalgaboyu ve yarı yükseklikteki tam genişlik (FWHM) değerlerinin sıcaklığa bağlı değışimleri incelenip ışıma merkezleri, optik/elektronik geçişler ve aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) uygulanmasıyla yapılan sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) ölçümleriyle de yapıda ortaya çıkan akım iletim mekanizmaları, iletkenlik aktivasyon enerjileri, elektron ve hol mobiliteleri gibi özellikleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LED, InGaN/GaN kompozit yapı, MQW, optik, opto-elektronik, fotolüminesans, elektrolüminesans, fotoiletkenlik, akım-gerilim, kapasite-gerilim

ABSTRACT

Investigation of Gallium Nitride based Light Emitting Diodes that Grown by Metal Organic Chemical Vapour Deposition Technique in pin Structure

Hanife BAŞ

Department of Physics
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR

In this study, the electrical, optical and opto-electronic characterization of the radiation of different wavelengths emitted by the change in the concentration of Indium (In) (%10, %20 ve %30) contained in the p-i-n structure LEDs consisting of InGaN films grown by the metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique was made. The spectra obtained from the electroluminescence (EL), photoluminescence (PL) and photovoltage / photocurrent (PV/PC) measurements of these diodes, where the i-layer is in a single layer (SL) and multiple quantum well (MQW) structure, radiation centers, optical / electronic transitions and activation energies were determined by examining the temperature-dependent changes of max value, intensity, wavelength and full width half maximum (FWHM) values. Current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements made by applying direct current (DC) and alternating current (AC) have also determined properties such as current transmission mechanisms, conductivity activation energies, electron and hall mobility

Keywords: LED, InGaN/GaN, MQW, opto-electronic, photoluminescence, electoluminescence, photoconductivity, current-voltage, capacity-voltage

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1.1 Literatür Özeti

Yeni buluşlar sayesinde bilimler, canlı hücreler gibi gelişip çoğalmaktadır. Yani yapılan araştırmalar her geçen gün bilimsel ve teknolojik gelişmeleri, yenilikleri beraberinde getirmektedir. Dünyanın her yerinde daha hızlı, daha güçlü, daha ekonomik, daha dayanıklı, verimi yüksek, daha küçük boyutlarda teknolojik ürünler elde edebilmek için binlerce bilim insanı çalışmalar yapmaktadır. Yapılan bu çalışmalara en çok sebebiyet veren konulardan biri de enerjidir. Hızla artan gelişmelerle birlikte enerjiye ihtiyaç da hızla artmaktadır. Tükenebilir enerji kaynaklarının dikkatli kullanımının gerekliliği gerçeği bilim insanlarını daha az enerji tüketimiyle çalışan aygıt yapımı konusundaki çalışmalara yöneltmiştir. LED'ler bu çalışmaların sonucunda elde edilmiş aygıtların en önemlileri arasındadır.

İlk LED'in üretimi 1891'de Eugene G. Acherson'un Silisyum Karbür (SiC) üretebilecek aşamaları tamamlamasıyla başlayıp [1], Round'un 1907'de SiC LED'i üretmesine kadar uzanan bir süreçtir [2]. 1960'lara kadar SiC filmlerin üretim süreçleri geliştirilmeye devam etti ve o yıllarda mavi LED'lere giden yolu açacak p-n eklemli aygıtlar üretildi ancak verimler %0.005 değerlerindeydi [3]. 1960'larda buhar fazı ile biriktirme (VPE) ve sıvı fazı ile biriktirme (LPE) yöntemleriyle Galyum Arsenit (GaAs) tabanlı kızılötesi (IR) LED'ler (870 nm-980 nm) [4-7], görünür bölgede kırmızı ışık yayan GaAsP LED'ler [8], GaAs üzerine büyütülmüş n-tipi GaAsP sarı LED'ler [9], %0.6 verim değerine sahip katkılı GaP:N yeşil LED'ler de [10] üretildi [11].

1960'ların sonlarına doğru renkli televizyon üretici firmaları katod ışın tüplü televizyonların yerine düz ekranlı televizyon üretmek istemeye başladılar. Bunun için kırmızı, mavi ve yeşil pixellere ihtiyaç vardı. Parlak ışık yayan GaAsP kırmızı LED ve GaP:N yeşil LED zaten mevcuttu. Parlak mavi LED için GaN filmleri üretme çalışmaları başladı ve 1969'da ilk tek kristal GaN film üretildi [12]. 1972'de Pankove ve ekibi katkısız n-tipi GaN üzerindeki Zn katkılı yalıtkan tabaka üzerine In kontağı yaparak metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyot yapısını oluşturdu ve böylece mavi

ve yeşil ışık yayan ilk yük enjeksiyonlu GaN diyot yapılmış oldu [13]. Aynı yıl metal-halojenür-buhar fazı biriktirme (MHVPE) yöntemiyle Mg katkılı GaN film büyütülerek 430 nm mavi MIS LED üretildi [14]. Mg katkılanmasına rağmen aygıt p-tipi iletkenlik sergilemiyordu ve bu da ışımanın azınlık taşıyıcılar tarafından azaltılmasına veya iyonizasyon etkisine sebep oluyordu [15, 16]. Bu yüzden 1989'a kadar GaN üzerine yapılan çalışmalar yok denecek kadar azaldı. 1989' da Isamu Akasaki ve ekibi elektron demeti ile biriktirme tekniğiyle (EBE) ilk p-tipi katkılı GaN filmi üretti [17]. p-tipi katkılama elde edildikten sonra 1992'de Akasaki ve ekip arkadaşları tarafından ilk GaN p-n homoelektronik LED üretildi [18]. Bu LED UV ve mavi bölgede ışıma spektrumuna sahipti, safir alttaş üzerine büyütülmüştü ve ~ %1 verimliydi. Daha sonra Shuji Nakamura ve Takashi Mukai'nin de yer aldığı bir grup araştırmacı uzun araştırmalar sonucunda organometalik buhar fazı biriktirme (OMVPE) yöntemiyle %10 verimli InGaN/GaN akım enjeksiyonlu mavi laser diyotu elde etti [19, 20]. Böylece beyaz LED üretimi için gerekli tüm yapılar tamamlanmış oldu [11].

III-Nitrit ailesinin bir üyesi olan GaN, elektronik ve optik özellikleri sayesinde kısa sürede devrim niteliğindeki malzeme haline geldi. GaN' in direk, esnek ve geniş bant aralığı, bu malzemeyi yüksek frekans, yüksek bant genişliği, yüksek güç ve yüksek verimli cihazlar sunan çok önemli bir aday haline getirdi. GaN araştırmasının ilk teması LED'ler olsa da bunu daha sonra UV fotodetektörler ve laser kaynakları izledi [21, 22]. GaN tabanlı dedektörler aslında tam renkli ekran, yüksek yoğunluklu bilgi depolama ve su altı iletişiminin kullanımına da uygundur [23]. Geleneksel yarıiletkenler olarak Si ve GaAs bu alanlarda kullanılamaz. Füze önleme ve uzay tabanlı optik iletişim araştırmaları yüksek hızlı fotodetektör gerektirir [24]. Ayrıca GaN, mikrodalga ve yüksek frekanslardaki RF güç amplifikatörleri ve yüksek voltajlı anahtarlama cihazları için de önemli bir malzemedir [11].

Sonraki yıllarda büyütme yöntemi ve parametreleri, katkı miktarı/katkı malzemesi değiştirilerek, aktif tabakaya ek tabakalar eklenerek... vb. yöntemlerle mevcut LED'lerin iyileştirmesine yönelik çalışmalar devam etti. LED'in aktif bölgesinin MQW yapılardan oluşması da bu yöntemlerden birtanesidir.

InGaN/GaN MQW LED'ler de tüm görünür aralık boyunca enerji aralığının ayarlanabilirliği ve geleneksel yapıdaki akkor ampullere kıyasla oldukça azaltılmış enerji tüketimi sebebiyle, ışık yayan uygulamalar için dikkat çekici bir noktadadır [25]. Görünür aralığın tamamı farklı In içeriklerde InGaN tabakasının, p-i-n yapısında aktif bir katman olarak kullanılmasıyla elde edilir. Buna ek olarak, InGaN tabanlı MQW kullanmak (tek bir katman yerine), kuyu içine enjekte edilen elektronların ve deşiklerin büyük ölçüde tutulmasına yol açar. Bu kazanım, daha yüksek miktarda

ışıklı yeniden birleşme sağlar. Bu nedenle, p-i-n eklemleri boyunca aynı akım için yayılan fotonların sayısı artar. Akasaki ve diğerlerinin [26] çalışmasının ardından parlak ve enerji tasarrufu sağlayan beyaz ışık kaynakları, InGaN tabanlı p-i-n yapısındaki MQW'deki In içeriği (%10-%30) değiştirilerek elde edilir [26]. Bununla birlikte, InGaN filminin kalitesi In miktarı artışıyla azalır. İndiyum/Galyum arasındaki atom boyutundaki büyük farklılık ve InN ve GaN arasındaki %11 den daha büyük örgü uyumsuzluğu nedeniyle InGaN kuyu katmanlarında bir faz ayrışması veya bileşim dalgalanması meydana gelir. Kuyudaki zengin bölgeler, taşıyıcıların ışımalı olmayan yeniden birleşme merkezlerine doğru akışını baskılamada yararlı olan lokalizasyon merkezleri (kuantum noktaları) olarak işlev görür [27–31]. Bu esnada, Auger yeniden birleşmesinin gerçekleştiği ışımalı olmayan yeniden birleşme merkezi olarak işlev gören yapısal kusur meydana gelmesi de bu durumdan kaynaklanır. Buna ek olarak, MQW bölgesindeki büyük piezoelektrik alanın kaynağı olan MQW'lerde InGaN kuyu katmanı ile GaN bariyer katmanı arasındaki büyük bir örgü ve termal uyumsuzluk nedeni ile büyük bir gerilim indüklenir. Bu büyük gerilim, Kuantum Sınırlı Stark Etkisine (QCSE) neden olur ve MQW'lerde taşıyıcıların ışımalı yeniden birleşmesinin verimliliğini azaltır. Genel olarak, In açısından zengin (>%20) InGaN/GaN MQW LED'leri yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı yeşil boşluk (green gap) sorunlarından muzdariptir. Bu sorunların üstesinden gelmek için farklı çözümler önerilmektedir. Örneğin, MQW yapı zengin InGaN kuantum noktaları [27–31] ile değiştirilebilir ya da geleneksel LED'deki InGaN ve p-GaN katmanı arasında tek veya çoklu elektron engelleme katmanları (EBL'ler) kullanılabilir [32, 33] ya da InGaN'nin geleneksel InGaN/GaN yerine InGaN/InGaN LED'i de bir bariyer olarak kullanmakta birer seçenektir. Bu önermeler, taşıyıcı lokalizasyonunu geliştirir ve dahili kuantum verimliliğini iyileştirir.

Admitans Spektroskopisi (AS) yük değişimlerine duyarlıdır. Frekansa bağlı kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) ölçülerek, yük doldurma/boşaltma işlemindeki enerji kaybından sorumlu olan QW'ler ile yapının kapasitansının/iletkenliğinin değişimi arasında doğrudan bağlantı elde edilebilir. QW'lerdeki taşıyıcı boşaltma süreci, admitans ölçümünde [34–39] kapasitansta (iletkenlik) bir adım (bağlantılı olan pik noktası) ile sonuçlanır. Bu duruma ek olarak bir LED aygıtının fiziksel mekanizması, geleneksel DC akım-voltaj analizi ile birlikte ileri AC ölçümüyle de araştırılabilir [40–44]. Örneğin, LED aygıttan ışığın ortaya çıkışının başlangıcı, elektriksel analizlerde kontak enjeksiyonuna, azınlık taşıyıcı enjeksiyona, enjekte edilen taşıyıcıların geçiş süresine (transition time), yük yakalamaya, arayüz durumlarına ve alt enerji bant aralığı tuzak durumlarına atfedilmiş bir indüktif etkiye (negatif kapasitansa) sahiptir.

InGaN/GaN MQW LED için büyütme yöntemi, alttaş seçimi, In katkı miktarı gibi parametreler yapıda kusurlara sebep olmaktadır ve kusurların karakterizasyonu

veya iyileştirilmesi konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [11, 45–48]. Bu çalışmalarda yöntem olan Katodoluminesans (CL), EL, PL, derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) ve SPV/SPC gibi yöntemler sonucunda elde edilen spektrumlar kusur merkezleri, bant aralıkları veya optik/electronik enerji geçişleri hakkında bilgi verir [47, 49–52]. Özellikle enjeksiyon akımı veya uyarma gücünün fonksiyonu olarak elde edilen sıcaklık taramalı EL, PL ve SPV/SPC spektrumlarındaki enerji değerleri ve FWHM değerindeki kaymalar bu analizler için en önemli verilerdir. [27, 31, 53, 54]

1.2 Tezin Amacı

Yüksek verimli LED teknolojisi enerji araştırmaları açısından önemli bir yere sahiptir. 2014 yılında Nobel ile ödüllendirilen I. Akasaki, H. Amano ve S. Nakamura' nın GaN tabanlı LEDler üzerine yaptığı araştırmalar sonucunda parlak ışık yayan mavi LED'in bulunmasıyla beyaz ışık yayan LEDlerin elde edilmesindeki eksik parça da tamamlanmış oldu. Bu önemli gelişme GaN tabanlı LED çalışmalarına yönelimi arttırdı. Araştırılmaya ve geliştirilmeye açık olan bu konudan yola çıkarak planlanan bu tez çalışmasında;

- MOCVD tekniğiyle büyütülen p-i-n yapıdaki $In_xGa_{1-x}N/GaN$ filmlerinden oluşan LEDlerin SL ve MQW örneklerinin elektriksel ve optik karşılaştırılması
- $In_xGa_{1-x}N/GaN$ MQW LEDlerin değişik In içerikli örneklerinde (%10, %20 ve %30) meydana gelen elektriksel, optik ve opto-elektronik değişimlerin araştırılması
- Bu değişimlerin analizi ile günlük hayatta yaygın olan floresan lambaların yerini alabilecek beyaz ışık yayan LEDlerin iyileştirilmesine ve geliştirilmesine ışık tutacak bilimsel verilerin literatüre ve endüstriye kazandırılması

amaçlanmıştır.

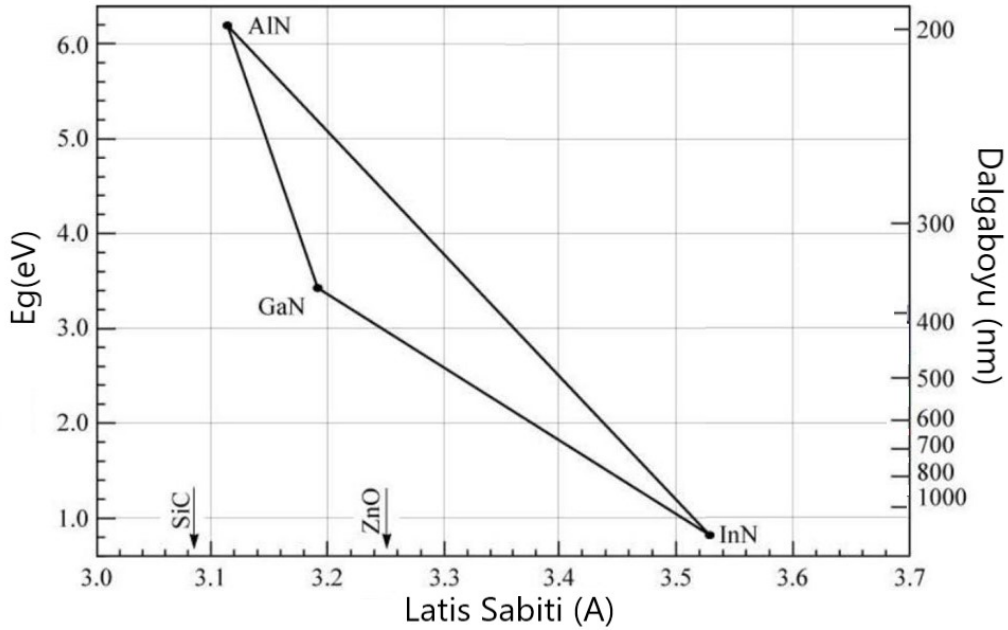
1.3 Hipotez

p-i-n yapıda aktif tabaka sayısı, tabakaların kalınlığı, yapıdaki katkı miktarı gibi parametreler açığa çıkan ışımanın şiddetini değiştirmektedir. Bu çalışmada aktif tabakadaki In içeriğinin değişmesiyle farklı renklerde ışımaya elde edilmesi ve MQW yapı sayesinde ışımanın keskin ve şiddetli olacağı öngörülmektedir. Ayrıca yapılacak olan elektriksel, optik ve optoelektronik karakterizasyonla yapıda mevcut olan yük iletim mekanizmalarının belirlenmesi ve kusur merkezlerinin tespiti ile gelecek çalışmalara yol gösterici olacak bilgilere ulaşılabileceği öngörülmüştür.

2 GENEL BİLGİLER

2.1 III-V Nitrit Malzemeler

III-V Nitrit bileşiklerinin esnek ve direk bant aralığı, tüm spektralde çeşitli uygulamalar için önemli bir avantaj sunar. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bir ayar spektrumu sağlayan 200 nm (AlN) derin ultraviyole ile yakın kızılötesi 1770 nm (InN) arasında değişir. Bu malzemelerin kullanımının diğer avantajları da dar bant aralıklı malzemelere kıyasla radyasyon sertlikleri, karanlık akımı ve beklenen daha düşük iç gürültüdür [11, 55, 56].

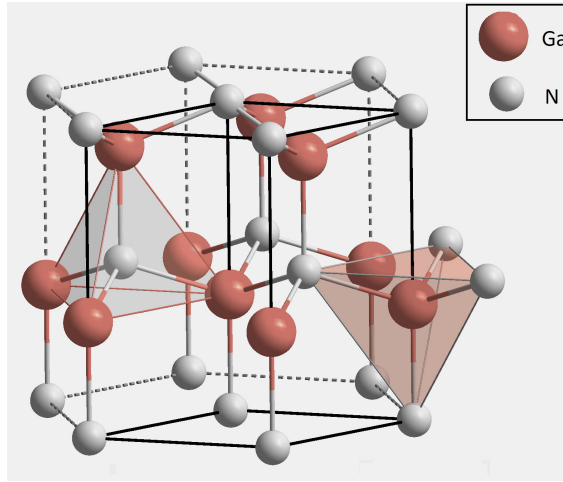


Şekil 2.1 III-V Nitrit malzemelerin örgü sabitlerine karşılık bant aralığı enerjileri [11]

III-Nitrit malzemelerinin önemli uygulamaları, LEDler, laser diyotlar, yüksek elektron hareketli transistörler (HEMT) ve fotodetektörler kullanan yüksek frekanslı ve yüksek güçlü elektroniklerdir [23, 57]. Terahertz (THz) uygulamaları içindeki kuantum kademeli laserler (QCL'ler) temel olarak III-Nitrit malzemelerine dayanır ve oda sıcaklığında çalışması için potansiyel bir aday olabilir [58]. Son deneysel veriler, etkili bir THz QCL gerçekleştirmeye yönelik fırsatlar sunmaktadır [56, 59]

2.1.1 GaN

Azaltılmış sistem akımı ve RF teknolojisindeki yüksek çalışma voltajı sayesinde GaN, yüksek verimliliğin yanı sıra yüksek güç ve kazanç sunabilmektedir. 3.4 eV' lik bant aralığı GaN' i, sırasıyla 1.4 ve 1.1 eV ile GaAs ve Si ile karşılaştırıldığında çok iyonik galyum-azot bağı ile bağlanmış atomları nedeniyle sağlam bir malzeme haline getirir (şekil 2.2) [60]. Bu özellik, çok daha yüksek voltajda çalışmasına izin verir. GaN, yüksek akım yoğunluğu sağlayabilen yüksek elektron doygunluk hızına sahiptir. Yüksek voltaj ve yüksek akım yoğunluğu, daha düşük maliyet, daha düşük kapasitans, daha hafif ve daha küçük cihazla yüksek RF gücü üretilebilmesini sağlar [56].



Şekil 2.2 GaN molekülünün yapısı [61]

GaN için büyütme tekniklerinin optimizasyonu, alttaşı ile örgü uyumsuzluğu nedeniyle birkaç on yıl ertelenmiştir. Yapısal kalite, dislokasyon yoğunluğu ve optik özellikler ile ilgili bilgiler hala oldukça yetersizdir. Genel olarak GaN filmler, MOCVD tekniği ile büyütülür. Son zamanlarda, plazma kaynaklı veya gaz kaynaklı moleküler demet epitaksi (MBE) ile büyütme de denendi [62]. GaN ile yaklaşık %16' lık büyük bir örgü uyumsuzluğuna bakılmaksızın elektronik ve optoelektronik cihazlara yönelik uygulamaları için genellikle safir alttaşı kullanılmaktadır [63].

2.1.2 InGaN Alaşım

0.7 eV ile 3.4 eV arasında değişen bir direk bant aralığına sahip wurtzite GaN ve InN'nin üçlü bir alaşımı olan InGaN, LED, fotovoltaiik hücre, laser vb. gibi optik cihazların üretimi için önemli bir yere sahiptir. Yüksek verimli InGaN sayesinde yakın UV, mor ve maviden yeşil emisyonlara kadar değişen bir optik spektrum sağlamıştır. $In_xGa_{1-x}N/GaN$ ' deki x, GaN ve InN molar fraksiyonunu tanımlar. 1989'da Nagatomo ve arkadaşları $In_{0.42}Ga_{0.58}N/GaN$ ' nin ilk epitaksiyel filmini metal organik buhar fazı epitaksisiyle (MOVPE) gerçekleştirmiştir [64]. InGaN bant aralığı

hesaplaması aşağıdaki ampirik denklem kullanılarak ifade edilir:

$$E_{In_xGa_{1-x}N}^g = xE_{InN}^g + (1-x)E_{GaN}^g - b_{InGaN}x(1-x) \quad (2.1)$$

Burada $E_{GaN}^g = 3.44$ eV, $E_{InN}^g = 0.75$ eV ve eğilme parametresi b_{InGaN} , InN ve GaN arasındaki doğrusal bir interpolasyondan sapmasıdır ve 1.43 eV değerindedir [56, 65]. Bununla birlikte, deformasyon, katkılama veya bileşimin dalgalanması gibi dış etkiler eğim parametresini değiştirebilir.

$In_xGa_{1-x}N$ alaşımları geniş bant aralığı ve yüksek soğurma katsayıları nedeniyle hem karasal hem de uzay tabanlı uygulamalar için çok çekicidir [65, 66]. Ayrıca bu alaşımlar radyasyon direnci, yüksek taşıyıcı hareketliliği, yüksek sıcaklık ve yüksek sürüklenme hızı gibi faydalara sahiptir, bu da güneş ışığı altında potansiyel kullanım için verimli bir cihazın gerçekleştirilmesine tamamen katkıda bulunarak [66–68] yüksek verimli fotovoltaiik hücrelerin gerçekleştirilmesi ve mevcut fotovoltaiik hücrelerin dönüşüm verimliliğini artırmak için umut verici bir teknolojidir [56, 67].

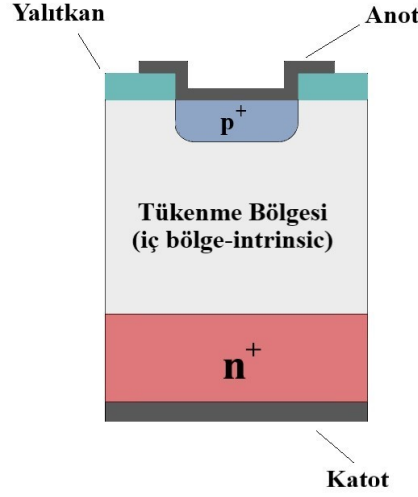
2.2 p-i-n Diyot

p ve n eklemi arasında yüksek dirençli bir iç tabakanın (i-bölgesi) yer aldığı diyotlardır. p-bölgesinde deşikler, n-bölgesinde elektronlar çoğunluk yük taşıyıcısıdır. İç bölge, serbest bir taşıyıcıya sahip değildir. Bu bölge, elektron akışının geçmesini engelleyen yüksek dirence sahiptir. p ve n bölgesi arasında büyük bir elektrik alan oluşmasını sağlar. Elektrik alanın yönü n bölgesinden p bölgesine doğrudur. i-bölgesi iki bölge arasında yalıtkan görevi görür. Bölgenin genişliği kapasitansıyla ters orantılıdır. İki bölge arasındaki mesafe artarsa kapasitansı azalır. Diyotun bu özelliği tepki sürelerini artırır [69].

Bir p-i-n diyot, şekil 2.3’de gösterildiği gibi iki uçlu bir aygıttır. Anot ve katot, p-i-n diyotun iki terminalidir. Anot, pozitif terminaldir ve katot, negatif terminalini temsil eder. Katot terminaline göre anot terminalindeki negatif voltajı bloke eder, ancak anoda pozitif voltaj uygulandığında akımı iletir. Dış p ve n katmanları genellikle çok yüksek oranda katkılıdır. Geniş iç katman, ters beslemede yüksek yıkım geriliminin benzersiz özelliklerini ve ileri beslemede yük depolamasını sağlar [69].

Diyot beslenmediğinde, yük taşıyıcıları difüze olur yani tükenme bölgesinin yük taşıyıcıları kendi bölgelerine hareket etmeye başlar. Difüzyon süreci, yükler tükenme bölgesinde denge haline gelene kadar devam eder [69–71].

Diyot ileri beslendiğinde, yükler sürekli olarak p ve n bölgesinden i bölgesine enjekte



Şekil 2.3 p-i-n yapının şematik gösterimi

edilir. Bu, diyotun ileri direncini azaltır ve değişken bir direnç gibi davranmasına neden olur. p ve n bölgesinden i bölgesine giren yük taşıyıcılar, iç bölgeyle hemen birleşmez. İç bölgede depolanan sonlu yük miktarı, dirençlerini azaltır. Q tükenme bölgesinde depolanan yük miktarı ve τ , yüklerin yeniden birleşmesi için kullanılan zaman olmak üzere, iç bölgede depolanan yüklerin miktarı, yeniden birleşme sürelerine bağlıdır. İleri besleme akımı i bölgesine akmaya başlar.

$$Q = I_f \times \tau \quad (2.2)$$

Burada I_f ileri beslemedeki akım değeridir.

İleri besleme akımının direnci (R_f), iç bölgede depolanan Q yükü ile ters orantılıdır.

$$R_f = \frac{w}{(\mu_e + \mu_h)I_f\tau} = \frac{w}{(\mu_e + \mu_h)Q} \quad (2.3)$$

Bu ifadede w iç bölgenin (i-bölgesi) genişliği, μ_e elektron mobilitesi, μ_h deşik mobilitesidir.

Eşitlik 2.3, iç bölgenin direncinin bölgenin genişliğine bağlı olduğunu göstermektedir [69–71].

Diyot ters beslendiğinde, tükenme bölgesinin genişliği, i bölgesindeki tüm yükler o bölgeden uzaklaşmaya kadar artar. Tüm yüklerin i bölgesinden çıkarılması için gereken ters besleme gerilimi, süpürme gerilimi olarak bilinir. Bu gerilim değeri malzemenin kritik elektrik alanı ve iç katmanın kalınlığı ile orantılıdır.

Ters beslemede, diyot bir kapasitör gibi davranır. p ve n bölgesi, kapasitörün pozitif

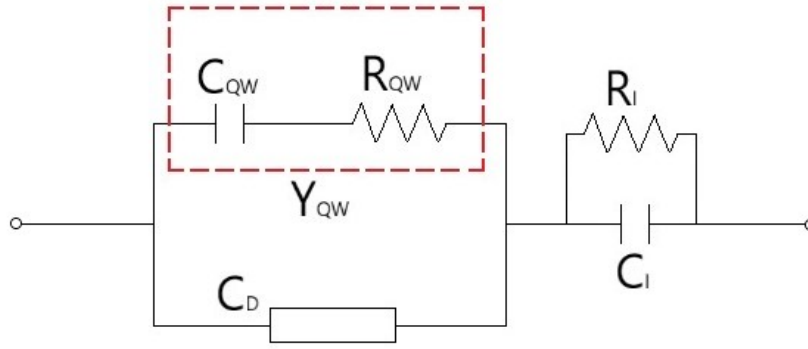
ve negatif plakaları ve iç bölge, plakalar arasındaki yalıtkan olarak işlev görür. Bu durumda kapasitans değeri ters besleme geriliminden bağımsızdır ve

$$C = \frac{\epsilon A}{w} \quad (2.4)$$

eşitliyle belirlenir. Bu eşitlikte w iç bölgenin genişliği, ϵ malzemenin dielektrik sabiti ve A eklem bölgesi alanıdır [69–71].

2.3 Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapı

İ-bölgesinin MQW yapıda olduğu p-i-n yapıya, şekil 2.4’ te gösterilen eşdeğer bir elektrik devresi modeli yardımıyla bir metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) diyot gibi muamele edilebilir [72].



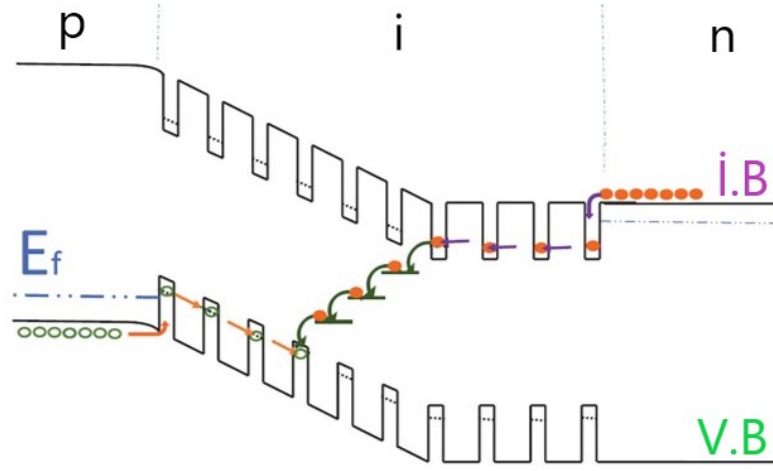
Şekil 2.4 MIS yapının eşdeğer devresinin şematik gösterimi

Burada C_D tükenmiş p-GaN bölgesinin kapasitansı, Y_{QW} MIS yapıdaki arayüz kusurlarına eşdeğer olan kuantum kuyusu admitansı ve C_I tükenme bölgesi ile seri bağlı kuyular/bariyerlerden oluşan ‘yalıtım’ tabakası olarak kabul edilebilen tabakanın kapasitansıdır.

Ayrıca i-bölgesinin MQW yapıda olduğu p-i-n yapının enerji bant diyagramı şematik olarak şekil 2.5’ te gösterilmiştir.

2.4 p-i-n LED’in Uyarılması

LED’in karakterizasyonu için aygıt elektriksel, optik veya termal olarak uyarılır. Bunun sonucunda yapı içerisinde enerji düzeyleri arası geçişler olur ve/veya enerji açığa çıkar. Bu süreç üç aşamada gerçekleşir [60, 73]:



Şekil 2.5 MQW p-i-n yapının enerji bant diyagramının şematik gösterimi

- *Uyarılma:* Aygıt optik, elektriksel veya termal olarak uyarılır. Uyarılma ile elektronlar değerlik bandından iletkenlik bandına geçer. Eğer uyarma enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığından (E_g) büyük ise elektron-deşik çiftleri oluşur.
- *Termalizasyon:* $h\nu \geq E_g$ durumunda oluşan elektron-deşik çiftleri sahip olduğu fazla enerjiyle çok kısa sürede ($\sim 0.2 - 100$ ps) ayrılırlar ve elektronlar iletim bandının minimumuna doğru deşikler ise değerlik bandının maksimumuna doğru hareket ederler. Böylece termal denge durumuna geçmiş olurlar.
- *Yeniden birleşme:* İletim bandında bulunan elektronlar değerlik bandına geri döner, elektron deşik çiftleri yeniden birleşir ve bu sırada açığa çıkan enerji ışımalı veya ışımasız olarak salınır.

p-i-n yapı için olası üç tip yeniden birleşme vardır:

İşımalı yeniden birleşmede; iletim bandından gelen bir elektron doğrudan değerlik bandındaki bir deşikle birleşir ve bir foton salınır. Salınan foton, bant aralığına yakın bir enerjiye sahiptir. Bu yüzden banttan banda yeniden birleşme olarak da ifade edilen ışımalı yeniden birleşme, daha çok direk bant aralıklı yarı iletkenlerde hakim olan yeniden birleşme mekanizmasıdır. LEDlerden üretilen ışık, ışımalı yeniden birleşmenin en bariz örneğidir.

Auger yeniden birleşmesinde; üç taşıyıcı rol alır. Bir elektron ve bir deşik yeniden birleşir, ancak enerjiyi ısı veya foton olarak yaymak yerine, iletim bandındaki bir elektron olan üçüncü bir taşıyıcıya verir. Bu elektron daha sonra ısı olarak iletim bandı kenarına geri döner. Auger yeniden birleşmesi, aşırı katkılama veya yüksek yük enjeksiyonunun neden olduğu yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında daha çok görülür. Örneğin, silikon tabanlı güneş pillerinde Auger yeniden birleşmesi aygıtın kullanım ömrünü ve verimini azaltır [74].

Shockley-Read-Hall (SRH) yeniden birleşmesinde; kusurların da rol aldığı bu yeniden birleşme iki aşamada gerçekleşir:

- Bir elektron (veya deşik), katkılamaadan kaynaklı veya istemsiz oluşmuş kusurlar tarafından yasak bölgedeki bir enerji seviyesinde yakalanır.
- Elektron (veya deşik) termal olarak iletim bandına yeniden salınmadan önce bir deşik (veya elektron) aynı enerji durumuna hareket ederse, o zaman yeniden birleşirler.

Bir taşıyıcının yasak enerji aralığına girme hızı, eklenen enerji seviyesinin bant kenarlarından herhangi birine olan mesafesine bağlıdır. Bu nedenle, bant kenarına yakın bir enerji yapıya verilirse, elektronun, değerlik bandından aynı enerji durumuna hareket eden bir deşikle yeniden birleşmek yerine iletim bandı kenarına yeniden yayılması muhtemel olduğundan yeniden birleşme daha az olasıdır. Bu nedenle, bant aralığının ortasına yakın enerji seviyeleri bu yeniden birleşme için çok etkilidir [4, 75].

LED aygıtın uyarılması sonucunda aygıttan salınan enerji, dalgaboyu spektrumundan;

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.5)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte h Planck sabiti, c ışık hızı ve λ salınanın fotonun dalgaboyudur. hc çarpımı 1240 nm eV değerindedir.

Açığa çıkan enerjinin spektrumundaki maksimum veya omuz değerleri bu geçişler hakkında bilgi verebileceği gibi doğrudan yarıiletkenin enerji bant aralığı (E_g) olarak da kendini gösterebilir. E_g ' in sıcaklıkla değişimi için Varshni bir eşitlik önerisinde bulunmuştur [27, 53, 76–79] ve bu öneri aşağıdaki şekildedir:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} - \frac{\sigma^2}{k_B T} \quad (2.6)$$

Eşitlikte $E_g(T)$ T sıcaklığındaki salınan enerji, $E_g(0)$ 0 K'deki enerji, α termal genleşmeye ve β Debye sıcaklığına karşılık gelen Varshni sabitleridir. Son terim, k_B 'nin Boltzmann sabiti olduğu ve σ lokalizasyon derecesini gösterdiği lokalize etkiyi tanımlar; büyük değer, daha güçlü lokalizasyon anlamına gelirken, daha küçük olan, zayıf lokalizasyon etkisini gösterir.

Uyarılma sonucu açığa çıkan ışımanın şiddetinin sıcaklıkla ilişkisi;

$$L(T) = L_0[1 + Ae^{(-E_a/k_B T)}] \quad (2.7)$$

ifadesine göredir. Bu eşitlikten aktivasyon enerjisi ve ışıma verimi hakkında bilgi edinilir.

Ayrıca ışıma şiddeti yeniden birleşme tipi hakkında

$$L \propto p^\beta \quad (2.8)$$

ilişkisi aracılığıyla bilgi verir. Burada L ışımının şiddetidir.

$\beta = 1$ olması koşulunda, ışımalı yeniden birleşme süreci gerçekleşirken, $\beta > 1$, ışımasız merkezlerin varlığına işaret eden SRH yeniden birleşmesini gösterir. Bununla birlikte, $\beta < 1$ olması, yeniden birleşme oranının azalması ile açıklanmaktadır [80, 81].

2.5 Enerji Seviyeleri Arası Geçişler

GaN esaslı p-i-n yapıda büyütme sırasında meydana gelen kusurların ve dislokasyonların varlığı bilinmektedir [11, 27, 60]. Bu kusurlar uyarılmalar sırasında yapı içerisinde donör veya akseptör gibi davranabilirler. Bunun sonucunda seviyeler arası içsel (internal) veya dışsal (external) geçişler görülür. Bu geçişlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır:

Safsızlık geçişleri: Yapıyı oluşturan katmanlarda büyütme sırasında istenmeden oluşan veya katkılamadan kaynaklı donör-akseptör seviyelerinin neden olduğu geçişlerdir. Bu geçişler nötr donör-deşik ($D^0 h$) veya elektron-nötr akseptör ($e A^0$) geçişleridir.

Donör-akseptör çifti (DAP) geçişleri: Yapıyı oluşturan yarıiletkenlere hiçbir katkılama yapılmamasına rağmen yapısında doğal olarak bulunan safsızlıklardan kaynaklı donör-akseptör çiftleri arasındaki geçişlerdir ($D^0 A^0$).

Banttın banda geçişler: Değerlik bandındaki serbest deşiklerle iletim bandındaki serbest elektronlar arası geçişlerdir ($e-h$). Uyarma enerjisinin çok yüksek olduğu durumlarda meydana gelirler.

Eksitonik geçişler: Eksitonlar birbirine Coulomb etkileşimi yoluyla küçük bir bağlanma enerjisi ile bağlı elektron-deşik ($e-h$) çiftleridir. Coulomb etkileşimi ile birbirine bağlı olan $e-h$ çiftleri başka hiçbir merkezle etkileşmiyorlarsa bunlara serbest eksitonlar (FE) denir. Bağlı eksitonlar (BE) ise nötr veya iyonize olmuş sığ ve derin safsızlık merkezleri ya da örgüdeki diğer kusurlar gibi merkezlere bağlıdırlar.

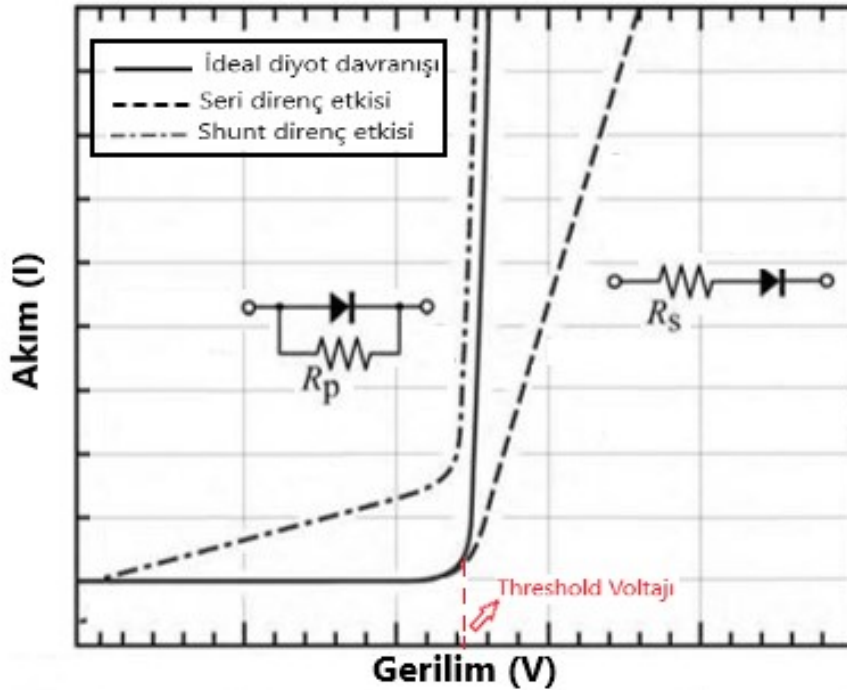
Bağlı eksitonların enerjisi eksitonun bağlı olduğu merkez tarafından düşürüldüğünden serbest eksitonun enerjisinden düşüktür ($E_{BE} < E_{FE}$). Bağlı eksitonlar bir kusur ya da safsızlık merkezine bağlı olduklarından kinetik enerjilerinden bahsedilmez ve çizgi genişliği doğal çizgi genişliğidir [11, 60, 73].

2.6 LED Yapının Elektriksel Karakteristiği

LED yapıda meydana gelen elektriksel olaylar, sıcaklığın fonksiyonu olan DC akım-voltaj analizi ile birlikte, gerilim, sıcaklık ve frekansın fonksiyonu olan AC kapasitans-gerilim analizleriyle araştırılabilir.

2.6.1 Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği

p-i-n yapıdaki LED için genel I-V karakteristiği şekil 2.6' da gösterilmiştir [11]. Logaritmik olarak gösterilen I-V karakteristiğiyle yapıda ohmik kontak bölgesi, exponansiyel bölge ve potansiyel bölgesi olarak da adlandırabilen voltajın kuvveti ($I \propto V^m$) bölgeleri olduğu görülür.



Şekil 2.6 Genel bir diyot davranışı [11]

Ohmik kontakta, tabakalar arası kontak direnci ihmal edilecek kadar küçüktür. Böylece ara yüzeyden serbest taşıyıcı geçişi kolayca gerçekleşir. Bu tip kontaklar metal-yarıiletken arası ise yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre oluşmaktadır. Metal/n-tipi yarıiletken ohmik kontak için $\phi_s > \phi_M$ ve metal/p-tipi yarıiletken ohmik

kontak için $\phi_S < \phi_M$ dir (ϕ_S : yarıiletkenin iş fonksiyonu, ϕ_M : metalin iş fonksiyonu) şeklinde olmalıdır. İki materyal arasındaki mesafe elektronların materyaller arası geçişine izin verecek kadar azaltılırsa arayüzeyde elektron akışı meydana gelir. Elektronlar metal tarafından yarıiletken tarafına geçtiğinde yarıiletken tarafında elektron yoğunluğunun fazla olduğu bir yığılma bölgesi oluşur. Metal tarafında ise karşıya geçen elektronların bıraktığı bir pozitif yük bölgesi oluşur. Böylece yarıiletken tarafında gerekli olan yük birikimi sağlanmış olur. Ohmik kontak bölgesi boyunca serbest taşıyıcılar Ohm Yasasına uyarlar.

Exponansiyel bölgede, klasik eklem düzeltmeli modele göre akım-gerilimin genel ifadesi;

$$I = I_0 \exp[A(T)V - 1] \quad (2.9)$$

şeklinde [73]. Burada I_0 doyma akımı ve A sıcaklığa bağlı bir sabittir. I_0 ve A ifadeleri yapıdaki mevcut ve hakim olan akım iletim mekanizmalarına bağlıdır.

Eğer bant aralığı boyunca akım **tünelleme** mekanizması ile kontrol ediliyorsa, A sıcaklıktan bağımsızdır yani sabit değer alır [82, 83] ve I_0 ın sıcaklıkla ilişkisi;

$$I_0(T) \propto \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right) \quad (2.10)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifadede k Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve E_A aktivasyon enerjisidir.

Eğer akım tükenme (deplasyon) bölgesi boyunca **yeniden birleşme** ile kontrol ediliyorsa A parametresi;

$$A = \frac{q}{\eta kT} \quad (2.11)$$

şeklinde [73]. Bu ifadedeki η ; 1 ve 2 arasında değerler alır. Diğer taraftan yeniden birleşmede $E_a = E_g/2$ olduğundan I_0 ın sıcaklıkla ilişkisi;

$$I_0(T) \propto \exp(-E_g/2kT) \quad (2.12)$$

şeklinde olur. Bu ifadelerde q elektronun yükü, η idealite faktörü ve E_g yeniden birleşmenin gerçekleştiği bölgenin enerji bant aralığıdır. Klasik $\eta = 2$ değeri elektronlar ve boşluklar için eş yakalanma durumunda bant aralığının tam ortasındaki yalnızca bir yeniden birleşme seviyesi için elde edilir. Bant aralığında sürekli bir tuzak dağılımının olduğu amorf yarıiletkenlerde $\eta < 2$ olması beklenir.

Akım **difüzyon** ile iletiliyorsa A ve I_0 ifadeleri;

$$A = q/kT \quad (2.13)$$

ve

$$I_0(T) \propto \exp(-E_g/kT) \quad (2.14)$$

şeklinde olur.

Termiyonik akımda A ifadesi değişmezken I_0 ;

$$I_0(T) \propto [\exp(-\Phi_B/kT)]kT^{3/2} \quad (2.15)$$

şeklinde olur. Burada Φ_B emisyonun meydana geldiği bariyer yüksekliğidir.

Voltajın kuvveti ($I \propto V^m$) **bölgesinde**, akım-gerilim;

$$J = KV^m \quad (2.16)$$

eşitliğine göre davranır. Bu tür bir davranış, K 'nin film kalınlığına, tuzak dağılımına ve iletkenliğe bağlı olduğu ve m 'nin 2'den büyük bir sabit olduğu uzay yükü sınırlı akımlar (SCLC) için tipiktir. m ve K parametreleri;

$$m = \frac{T_t}{T} + 1 \quad (2.17)$$

ve

$$K = C \exp(-E_A/kT) \quad (2.18)$$

bağıntıları ile ifade edilir [11, 73, 82–85]. Buradaki T_t tuzak dağılımını karakterize eden bir sıcaklık parametresi, C bir sabit ve E_A aktivasyon enerjisidir.

DC Mobilite

LED yapıların çalışma bölgesi SCLC bölgesine karşılık gelir. Bu yüzden mobilite hesabı SCLC bölgesi için yapılır. SCLC bölgesi için akım yoğunluğu ifadesi Mott-Gurney eşitliği ile verilir [84, 86]. Bu eşitlik;

$$J = \frac{9}{8} \mu \epsilon \frac{E^2}{L} \quad (2.19)$$

şeklindedir. Bu ifadede E elektrik alan, L filmin kalınlığı, ϵ dielektrik sabiti ve μ ise mobilitedir. Poole-Frenkel yaklaşımına göre mobilite;

$$\mu = \mu_0 e^{\gamma \sqrt{E}} = \mu_* e^{-\Delta/k_B T} e^{\gamma \sqrt{E}} \quad (2.20)$$

şeklindedir. Burada μ_0 sıfır alan mobilitesi, μ_* mobilite katsayısı, T sıcaklık, k_B Boltzman sabiti, Δ termal aktivasyon enerjisi ve γ elektrik alan katsayısıdır [81, 85,

87, 88]. Denklem 2.19 ve denklem 2.20 kullanılarak, mobilitenin elektrik alan ve sıcaklık bağımlılığından yararlanılarak, DC mobilite değerleri elde edilebilir.

2.6.2 Kapasitans-Gerilim (C-V) karakteristiği

MIS yapının paralel devre modelinden yola çıkarak (şekil 2.4) admitans verileri alınır, QW iletkenlik değeri, ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerlerinden aşağıdaki eşitliklerle elde edilir;

$$C_{QW} = \frac{C_m^2 - C_I(C_m^2 - C_m C_I)\omega^2}{C_m^2 + (C_m - C_I)^2\omega^2} \quad (2.21)$$

ve

$$\frac{G_{QW}(\omega)}{\omega} = \frac{G_m C_I^2 \omega}{G_m^2 + (C_m - C_I)^2\omega^2} \quad (2.22)$$

Öte yandan, p-i-n yapısındaki kuantum kuyuları iki boyutlu (2D) tuzak olarak düşünürsek, taşıyıcıların emisyon-yeniden birleşme mekanizmaları;

$$A \frac{d\rho_{QW}}{dt} = c_n n_{3D} - e_n A \rho_{QW} \quad (2.23)$$

şeklindedir. Burada n_{3D} 3 boyutlu (3D) taşıyıcı dağılımı, e_n (s^{-1}) kuyulardan termal emisyon oranı ve c_n ($cm^3 s^{-1}$) kuyuların yakalama katsayısıdır [43, 89, 90]. Termal denge durumunda, küçük AC uyarımlarında admitans terimi;

$$Y_{QW} = \frac{q^2 A}{kT} \rho_{eq} \frac{j\omega}{1 + j\omega\tau} \quad (2.24)$$

ifadesi ile verilir. Burada τ geçiş süresi;

$$\tau = \frac{A \rho_{eq}}{c_n n_{eq}} \quad (2.25)$$

şeklindedir.

Admitans gerçek (iletkenlik) ve sanal (kapasitans) kısımlarına ayrıştırılırsa;

$$\frac{G_{QW}(\omega)}{\omega} = C_T \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.26)$$

ve

$$C_T = \frac{q^2 i m^*}{\pi \hbar^2} \exp\left(\frac{E_F + qV_{QW} - E_1}{kT}\right) \quad (2.27)$$

eşitlikleri elde edilir.

Deneyssel olarak elde edilen $G_{QW}(\omega)/\omega$ ya ω eğrisi teorik olanla karşılaştırıldığında, tekli veya çoklu kusur durumlarında gerçekleşen aktivasyon enerjisi ve emisyon-yeniden birleşme süreci MQW LED yapısının dinamik özellikleri için araştırılabilir [72, 91].

SCLC Bölgesinde Admitans Analizi

Negatif kapasitans durumu, uygulanan ön gerilimin değiştirilmesinden kaynaklanan akımın bir sonucudur ve frekansa bağlı bir elektriksel tepkiye yol açar. Literatürde bu AC yanıtı, düşük mobilité problemlı malzemeler için ileri besleme yönünde SCLC bölgesinde iyi açıklanır (Bu yüzden SCLC modeli olarak adlandırılır) ve bu açıklamaya göre admitans eşitliği şöyle tanımlanır [80, 81, 92];

$$Y(\Omega) = \frac{\epsilon A}{\tau_t L} \times \frac{\Omega^3}{2i(\tilde{\mu}(\Omega))^2[1 - e^{-i\Omega/\tilde{\mu}(\Omega)}] + 2\tilde{\mu}(\Omega)\Omega - i\Omega^2} \quad (2.28)$$

Bu eşitlikte $\Omega(= \omega\tau)$ normalize edilmiş frekans, $\tilde{\mu}(\Omega/\mu)$ normalize mobilitedir. Scher ve Montroll (SM) teorisine göre [87], taşıyıcıların dispersiyonu, mobilité ifadesinde aşağıdaki şekilde görünür:

$$\tilde{\mu}(\Omega) = \frac{\mu(\Omega)}{\mu_{dc}} = 1 + M(i\Omega)^{1-\alpha} \quad (2.29)$$

M orantı sabiti, α ise bir dağılım parametresidir ve 0 ile 1 arasında değişir. Bu ifade Ehrenfreund düzeltmesiyle [80, 81, 91];

$$\Delta C_r(\omega) = \frac{-XC_g}{1 + \omega^2\tau_r^2} \quad (2.30)$$

şeklini alır. Burada X boyutsuz bir sabittir. Bu şartlarda ölçülen kapasitans değeri;

$$C_m(\omega) = Im(Y/\omega) + \Delta C_r(\omega) \quad (2.31)$$

eşitliği ile ifade edilir [32, 72, 91].

AC Mobilité

Admitans spektroskopisi, yarıiletken aygıtlarda yük geçiş süreci ve serbest kalma süresini araştırmak için kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte admitans (Y), sıcaklık, gerilim ve frekansın fonksiyonu olarak incelenir. Yapılan ölçümlerle, aygıtın AC iletkenliği $G(= Re(Y))$ ve kapasitans değeri $C(= Im(Y/\omega))$ elde edilir [81, 91].

Admitans (Y),

$$Y = \frac{J_{AC}}{V_{AC}} = G + i\omega = G + iB \quad (2.32)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte B süseptans ve $\omega = 2\pi f$ açısal frekanstır. Süseptans B ,

$$-\Delta B = -\omega(C - C_{geo}) \quad (2.33)$$

şeklindedir. Bu ifadedeki C_{geo} geometrik kapasitans değeridir. AC mobilite, $-\Delta B$ 'nin, frekansa bağlılığından türetilir. $-\Delta B - \log f$ grafiğinde elektron ve holler için ayrı ayrı görülen iki tepe noktasına karşılık gelen frekans değerlerinden ω elde edilir. $\omega \approx \tau^{-1}$ ve $\tau = 0.29\tau_t$ 'dir [73, 81, 93]. . Buradan elde edilen τ_t kullanılarak ve;

$$\mu = \frac{L^2}{\tau_t V} \quad (2.34)$$

eşitliği ile AC mobilite elde edilir. Bu eşitlikte L , yapının kalınlığıdır [81, 91].

2.7 LED Yapının Optik ve Optoelektronik Karakteristiği

LED yapıda meydana gelen optiksel ve optoelektronik olaylar, sıcaklığın, enjeksiyon akımının veya gücün fonksiyonu olan EL ve PL analizi ile birlikte, gerilim ve sıcaklığın fonksiyonu olan PC/PV analizleriyle araştırılabilir.

2.7.1 Elektrolüminesans (EL)

"Elektrolüminesans" terimi kısaca, elektriksel olarak uyarılan yapının foton yayınlamasını ifade eder. Elektriksel olarak harici gerilim uygulanmasıyla (veya akım enjeksiyonu) uyarılan yapıda elektron-deşik çiftleri oluşur. Daha sonra bu çiftler ışımalı yeniden birleşmeden dolayı foton salınımıyla yok olurlar.

Taşıyıcıların ışımalı yeniden birleşmesi, bir külçe malzemenin direk bant aralığı boyunca gerçekleşebilir veya daha verimli bir şekilde, bir QW, disk veya nokta sisteminde kuantum sınırlamasının sağladığı elektron-deşik çiftlerinin lokalizasyonundan faydalanabilir. Ayrıca, kusur durumları veya bir heteroeklem boyunca olduğu gibi başka ışımalı yeniden birleşme kanalları da mümkündür [94].

Elektrolüminesans spektroskopisiyle, yapı elektriksel olarak uyarılır ve yapıdan çıkan ışık şiddetinin dalgaboyuna bağlılığı bir spektrometre yardımıyla ölçülür. Ölçüm sonuçlarından, ışık şiddeti, ışığın yayıldığı dalga boyu (enerji) ve FWHM değeri sıcaklığın ve gerilimin (veya enjeksiyon akımının) fonksiyonu olarak incelenebilir.

2.7.2 Fotolüminesans (PL)

"Fotolüminesans" terimi kısaca, fotonla uyarılan yapının foton yayınlamasını ifade eder. Bu olay, ışığın bir yapı tarafından absorbe edildiği, yapıda daha yüksek bir enerji düzeyinde uyarılmış bir durum oluşturduğu, uyarılmış durumda elektron-deşik çiftlerinin exitonlar şeklinde oluştuğu ve ardından bu exitonların yok olup, elektronların daha düşük bir enerji durumuna dönerken bir foton yaydığı süreci tanımlar [95, 96].

Fotolüminesans spektroskopisiyle, yapı ışık kaynağı ile uyarılır ve yapıdan çıkan ışık şiddetinin dalgaboyuna bağlılığı bir spektrometre yardımıyla ölçülür. Ölçüm sonuçlarından, ışık şiddeti, ışığın yayıldığı dalga boyu (enerji) ve FWHM değeri sıcaklığın ve uyarma gücünün fonksiyonu olarak incelenebilir.

2.7.3 Fotoakım/Fotovoltaj (PC/PV)

Yüzey fotovoltaj spektroskopisi (SPV) ve spektral fotoakım (SPC) yöntemlerine dayanan fiziksel mekanizma, fotonların dışsal veya içsel absorpsiyonudur. Her iki teknik de, foton kaynaklı geçişlerin ardından iletim ve değerlik bandındaki taşıyıcıların varyasyonundan kaynaklanan elektrik sinyallerini analiz eder. Fotoelektrik etkiye benzer şekilde, ışıkla uyarılan geçişlere neden olan bu süreçte, bir fotonu absorbe eden bağlı yük, serbest kalıp ana bantlara geçecek kadar enerji elde edebilir [97–99]. Bant aralığı değerinden daha yüksek veya ona eşit foton enerjisi için içsel soğurma meydana gelir, böylece her iki tipte taşıyıcılar üretilir. Buna karşılık, dışsal soğurma, bant aralığı altındaki enerji tarafından üretilir ve taşıyıcıların derin seviyelerden her iki banda geçişlerini harekete geçirebilir.

PV ve PC yöntemleri, ilgili spektrumların karşılaştırılmasıyla yüzey veya yığın durumlarının ayırt edilmesine izin verebilir. Alt bant aralıklı ışığın neden olduğu spektral foto akım, yüzey etkilerine karşı daha az duyarlıdır çünkü foto akım yapının tüm yüzeyinde toplanır. Bu nedenle, her iki spektrum tipinde ortaya çıkan geçişler genellikle toplu geçişlere atfedilirken, tek başına SPV spektrumlarında görünen geçişler yüzey durumlarına atanır [52]. Geçişlerin varlığı, SPV'deki $h\nu$ grafiğine karşı yüzey potansiyeli değişimi (PV) grafiğinde veya SPC sinyalinin bir optik absorpsiyonla orantılı olduğu SPC ölçümüyle belirlenir ve aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$SPC \sim \alpha \sim \exp[h\nu/\Delta E_{FK}] \quad (2.35)$$

$$\alpha(h\nu) \sim \exp \left[- \left| \frac{h\nu - E_{GaN}^g}{\Delta E_{FK}} \right|^{3/2} \right] \quad (2.36)$$

$$\Delta E_{FK} = \frac{2(e\hbar F)^{2/3}}{3(m^*)^{1/3}} \quad (2.37)$$

Burada F elektrik alan, m^* etkin kütle, e elektronun yükü ve $\hbar$ Planck sabitidir ($\hbar/2\pi$). ΔE_{FK} , bant kuyruğu genişliğine atfedilir. Yasak bant bölgesi boyunca foton destekli tünelleme olarak yorumlanır ve **Franz-Keldysh Etkisi** olarak bilinir. Franz-Keldysh Etkisi elektrik alanın varlığında optik absorpsiyonun ve/veya enerji bandının bant aralığı kenarına yakın değişmesi olayıdır.

3

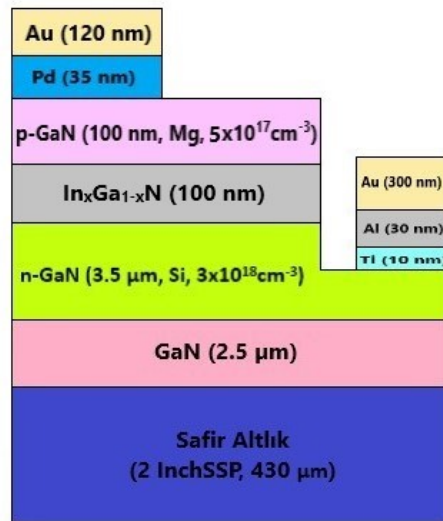
DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde MOCVD yöntemiyle p-i-n yapısında büyütülen %10 In içerikli InGaN SL LED ve %10, %20 ve %30 In içerikli InGaN/GaN MQW LED aygıtların sıcaklığa bağlı akım-gerilim, kapasitans-gerilim, elektrolüminesans, fotolüminesans ve fotoakım-fotovoltaj ölçümlerinde kullanılan deneysel yöntemler ve ölçüm parametreleri yer almaktadır.

3.1 Aygıt Üretimi

Çalışmada kullanılan LED aygıtlar Fransa'daki Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies C2N (CNRS)' de Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) büyütme tekniğiyle, litografi, metalizasyon, aşındırma ve pasivasyon işlem basamaklarının sonucunda üretilmiştir [56].

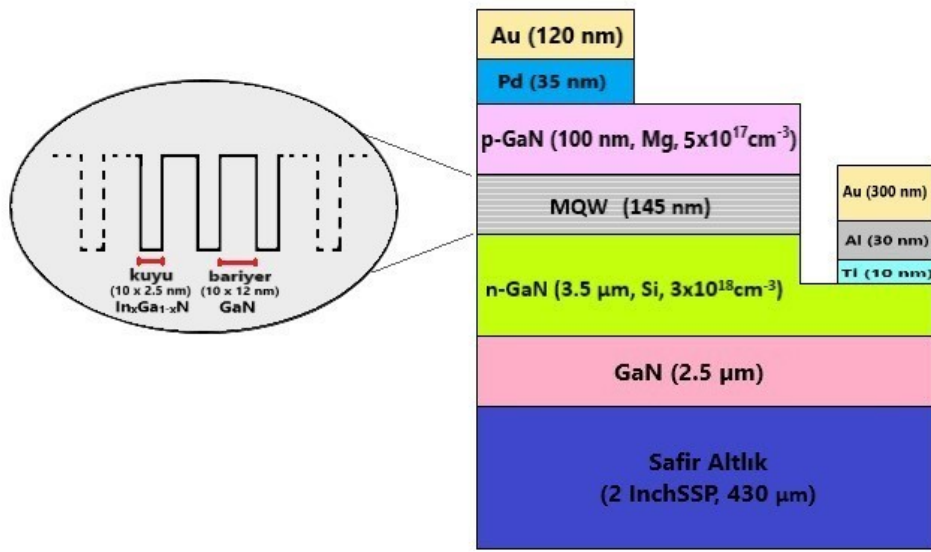
3.1.1 InGaN SL LED Aygıt



Şekil 3.1 InGaN SL LED aygıtın şematik yapısı

Üretilen yapıda safir altlık üzerinde $2.5 \mu\text{m}$ katkısız GaN tampon tabakası, üzerinde $3.5 \mu\text{m}$ kalınlıklı ve $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılı n-tipi GaN tabakası bulunmaktadır. n-tipi GaN tabakası üzerinde %10 In içerikli 100 nm kalınlıklı InGaN (tek tabaka-SL) tabakası bulunmaktadır. Yapının p-tabakası olarak 100 nm kalınlıklı ve $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Mg katkılı p-tipi GaN tabakası büyütülmüştür. p-i-n yapının üst kontağı p-tipi GaN tabakası üzerine Pd/Au (35 nm/120 nm) ve alt kontağı n-tipi GaN tabakası üzerine Ti/Al/Au (10 nm/30 nm/300 nm) şeklindedir (şekil 3.1). [100, 101].

3.1.2 InGaN/GaN MQW LED Aygıtlar



Şekil 3.2 InGaN/GaN MQW LED aygıtların şematik yapısı, InGaN/GaN kuyu ve bariyer yapının bant diyagramı

InGaN MQW yapının tampon tabakası, p/n tabakaları ve kontak tabakaları InGaN/GaN SL yapı ile aynı boyutlarda ve aynı şartlarda büyütülmüştür. SL yapıdan farklı olarak; yapıda n-tipi GaN tabakası üzerinde büyütülen toplamda 145 nm kalınlıklı MQW tabakası yer almaktadır. MQW tabakası on çift InGaN/GaN tabakalarından oluşmaktadır. InGaN/GaN çiftlerindeki InGaN kalınlığı 2.5 nm ve GaN kalınlığı 12 nm dir (şekil 3.2) [100, 101].

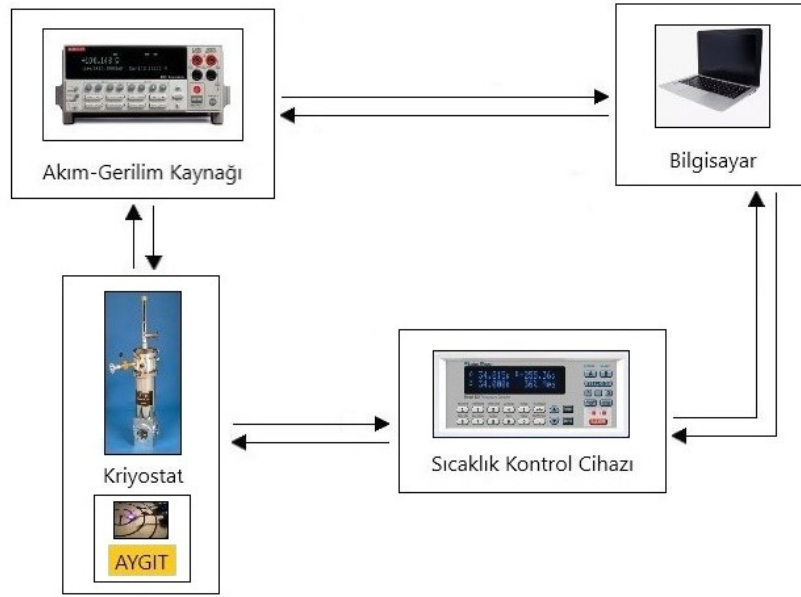
3.2 Aygıt Karakterizasyonu

Elektriksel karakterizasyon için sıcaklığa bağlı I-V, C-V ve C-T- ω ölçümü, optik ve opto-elektronik karakterizasyon için sıcaklığa bağlı EL, PL ve PC/PV ölçümü yapılmıştır. Tüm ölçümlerde aygıt kriyostat içine yerleştirilmiş ve iki iğne uç yardımıyla elektrik kontaktarı sağlanmıştır. Ölçüm parametreleri Labview programı ve/veya

spektrometre programı aracılığıyla bilgisayarda ayarlanıp ölçüm sonuçları yine bu programlar aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Oda sıcaklığından düşük sıcaklıklar için alınan ölçümlerde LN_2 kullanılmıştır.

3.2.1 Akım-Gerilim Ölçümleri

Sıcaklığa bağlı I-V ölçümlerinde Keithley 2400 source metre, Lakeshore 335 sıcaklık kontrol cihazı ve Janis-ST-100 optik kriyostat kullanılmıştır (şekil 3.3).



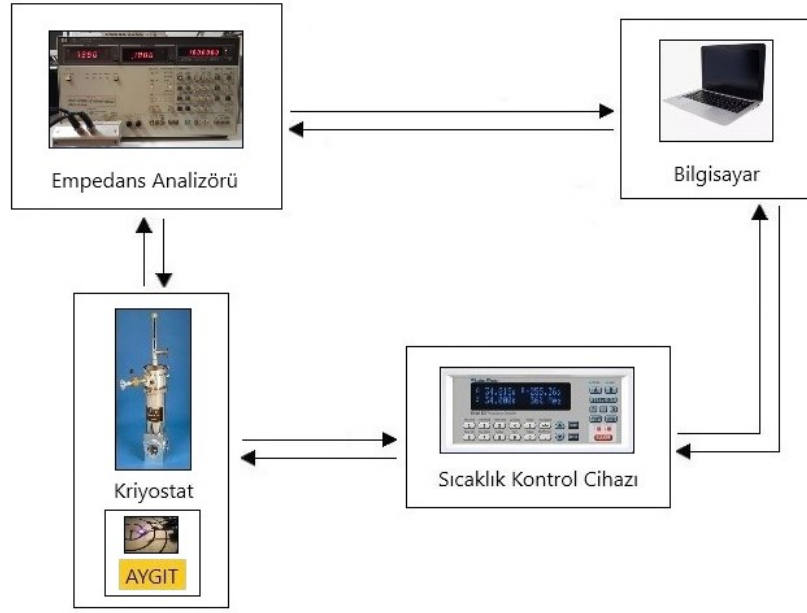
Şekil 3.3 Sıcaklığa bağlı I-V ölçüm sistemi

Tüm örnekler için I-V ölçümleri -5 V ve +5 V arası gerilim uygulanarak 80 - 375 K sıcaklık aralığında alınmıştır.

3.2.2 Kapasitans-Gerilim Ölçümleri

C-V ve sıcaklığa bağlı C-T- ω ölçümlerinde Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü, Lakeshore 335 sıcaklık kontrol cihazı ve Janis-ST-100 optik kriyostat kullanılmıştır (şekil 3.4).

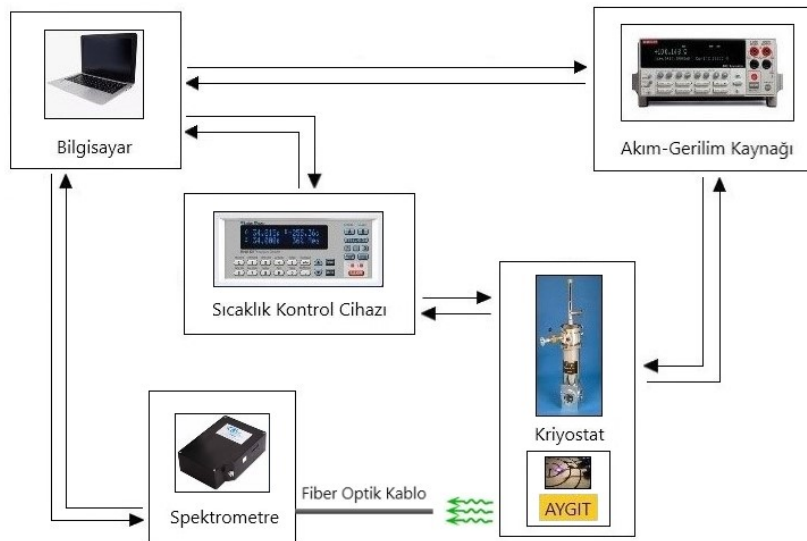
Tüm örnekler için C-V ölçümleri 5 Hz - 10 MHz arası değişen frekanslarda -5 V ve +5 V arası gerilim uygulanarak oda sıcaklığında ve C-T- ω ölçümleri 100 Hz - 1000 kHz arası değişen frekanslarda -5 V ve +5 V arası gerilim uygulanarak 80 - 375 K sıcaklık aralığında alınmıştır.



Şekil 3.4 Sıcaklığa bağlı C-V ve C-T- ω ölçüm sistemi

3.2.3 Elektrolüminesans Ölçümleri

Sıcaklığa bağlı EL ölçümlerinde Oceanoptics HR2000+ yüksek çözünürlüklü spektrometre, Keithley 2400 source metre, Lakeshore 335 sıcaklık kontrol cihazı, Janis-ST-100 optik kriyostat kullanılmıştır (şekil 3.5). Fiber optik kablo yardımıyla yük enjeksiyonu ile aygıttan açığa çıkan ışımının spektrometrede toplanması sağlanmıştır. Tüm örnekler için ölçülen EL spektrumları 120 - 1200 nm dalgaboyu aralığındadır



Şekil 3.5 Sıcaklığa bağlı EL ölçüm sistemi

- %10 In içerikli örnek için EL ölçümleri 0.04 - 0.4 - 9 - 33 - 100 mA yük enjeksiyonu ile
- %20 In içerikli örnek için EL ölçümleri 3 - 6 - 16 - 36 - 56 mA yük enjeksiyonu ile
- %30 In içerikli örnek için EL ölçümleri 1 - 5 - 15 - 25 - 35 - 45 mA yük enjeksiyonu ile yapılmıştır.

[illegible]

Sıcaklığa bağlı PL ölçümlerinde Oceanoptics HR2000+ yüksek çözünürlüklü spektrometre, Oxford ITC4 sıcaklık kontrol cihazı, kriyostat, 365 nm dalga boylu LED (Thorlabs M365L2) kullanılmıştır (şekil 3.6). 400 nm alçak geçirgen filtre ile gelen ışığın filtrelemesi yapılmıştır. Gelen ışık ve örneklerden çıkan ışımının optik hizalanması için 3 adet mercekle (CaF_2 /kuvartz) ve iris kullanılmıştır.

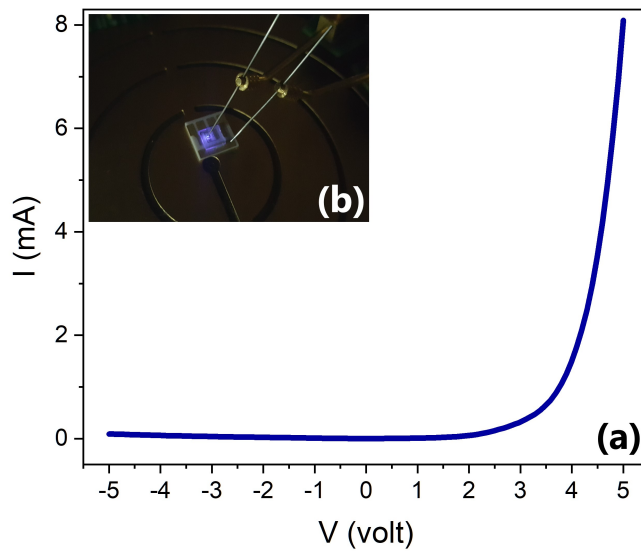
Bu bölümde %10 In içerkli InGaN SL LED ve %10, %20 ve %30 In içerkli InGaN/GaN MQW LED aygıtların sıcaklığa bağı akım-gerilim, kapasite-gerilim, elektrolüminesans, fotolüminesans ve fotoakım-fotovoltaj ölçümlerinin sonuçları yer almaktadır.

4.1 %10 InGaN SL LED

%10 InGaN SL LED için oda sıcaklığında I-V C-V, EL ve sıcaklığa bağı PL, PC/PV ölçümleri alınmıştır.

4.1.1 %10 InGaN SL LED için I-V Ölçümleri

Şekil 4.1' de %10 InGaN SL LED için 300 K' de karanlık ortamdaki I-V davranışı görölmektedir. Davranış ideal diyot davranışına uygundur.

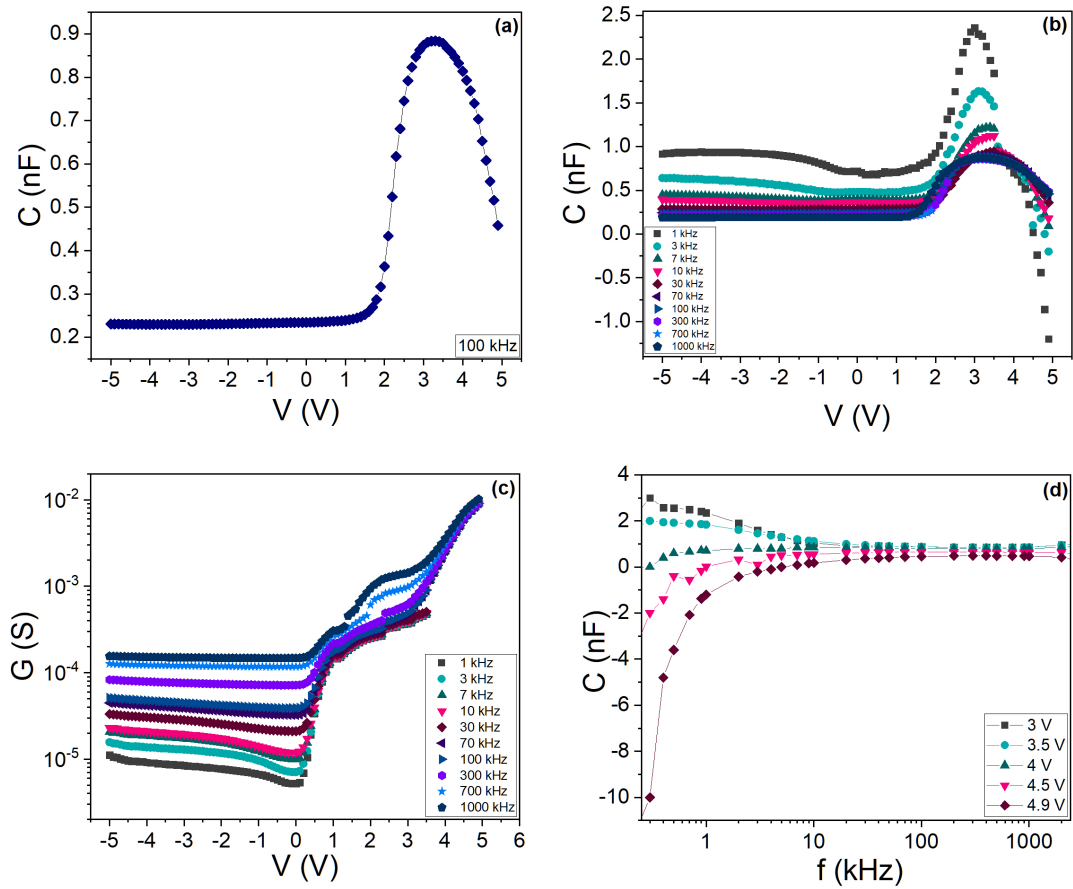


Şekil 4.1 (a) 300 K' daki $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı **(b)** LED'in I-V ölçümü sırasında ışıması

I-V davranışına göre LED'in çalışma gerilimi (threshold gerilimi) ~ 3.4 V değerindedir. Bu gerilim değerinden yüksek gerilimlerde LED'in ışıması gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 4.1(b)).

4.1.2 %10 InGaN SL LED için C-V Ölçümleri

Frekansın fonksiyonu olarak alınan oda sıcaklığı C-V ölçüm sonuçları Şekil 4.2' de verilmiştir.



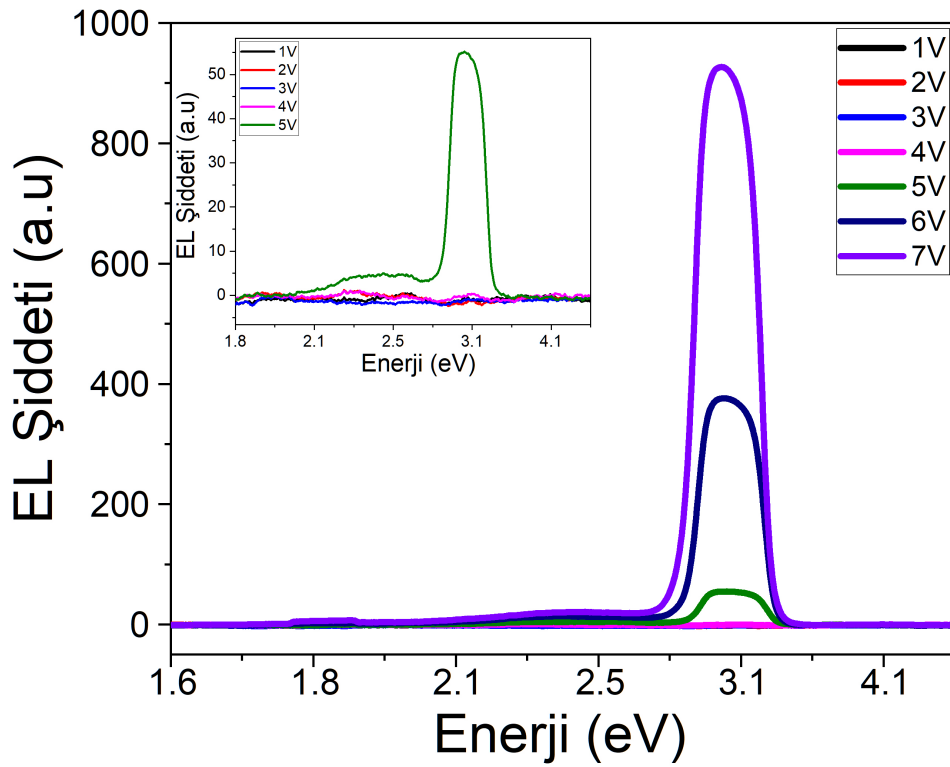
Şekil 4.2 Oda sıcaklığındaki $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için (a) 100 kHz'de kapasitans-gerilim davranışı, frekansın fonksiyonu olarak (b) Kapasitans-gerilim davranışı (c) AC iletkenlik-gerilim davranışı (d) Kapasitans-frekans davranışı

İleri beslemedeki artışla kapasitans değeri artmaya başlamış ve bu artış threshold voltajı civarına kadar (~ 3.4 V) devam etmiştir. Threshold voltajı sonrasında kapasitans azalmaya başlamış düşük frekans değerlerinde negatif kapasitans değerlerine doğru yönelmiştir (şekil 4.2 (a-b)). AC iletkenlik-gerilim davranışına göre (şekil 4.2 (c)) ileri besleme artışıyla iletkenlik artmaktadır ve treshold voltajından sonra eğimin de değişmesiyle iletim mekanizmasının değiştiği açıkça görülmektedir.

C - log f davranışının verildiği şekil 4.2 (d)' de görüldüğü gibi yüksek frekans değerlerinde kapasitans frekanstan bağımsızdır. Bu sabit değer geometrik kapasitansa (C_0) karşılık gelir (0.58 nF). Ayrıca gerilimin 4 V üzerindeki değerlerinde negatif kapasitans olarak da bilinen indüktif etki başlar ve gerilim değeri arttıkça bu etkinin başlangıç değeri yüksek frekanslara doğru kayar.

4.1.3 %10 InGaN SL LED için EL Ölçümleri

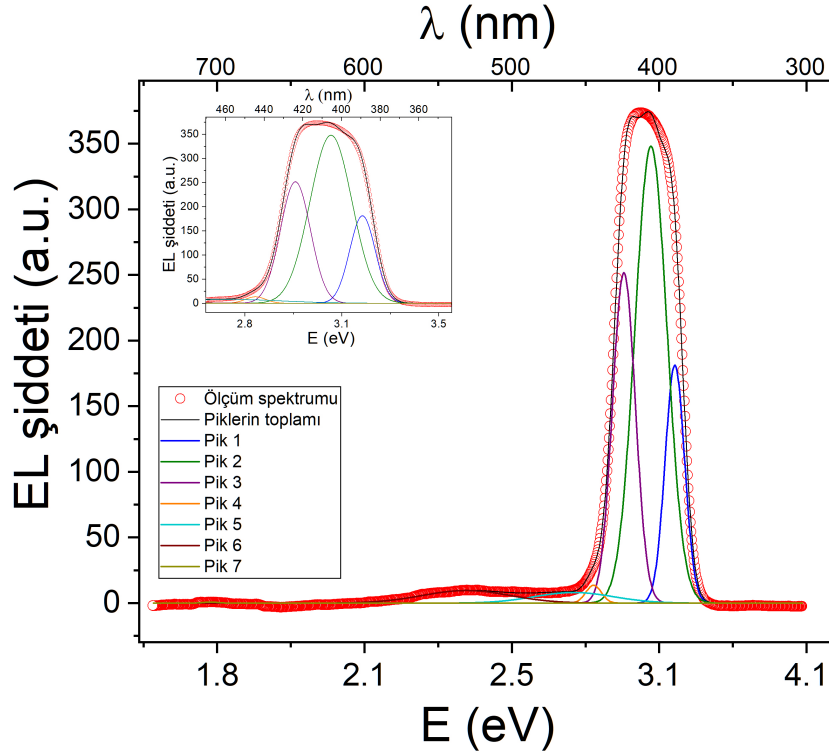
Gerilimin fonksiyonu olarak alınan oda sıcaklığı EL ölçüm sonuçları Şekil 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.3 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için değişen gerilim değerleriyle oda sıcaklığında alınan EL spektrumları

SL yapının düşük ışıma şiddeti spektrometrenin ölçüm sınırları altında kaldığından ışıma 4 V gerilim değerinden sonra spektrumda görünür hale gelmiştir. Artan besleme gerilimiyle ışıma şiddeti artmaktadır.

Spektrumda birden fazla tepe olduğu gözlenmiştir ve bu sebeple spektrum bilgisayar programı ile uygulanan tepe ayırıştırma işlemiyle tepelerine ayrılmıştır (şekil 4.4). Spektrumda 389 nm (3.18 eV), 405 nm (3.06 eV), 423 nm (2.91 eV), 444 nm (2.79 eV), 457 nm (2.71 eV), 530 nm (2.33 eV) ve 704 nm (1.76 eV) noktalarında tepeler



Şekil 4.4 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için EL spektrumunda tepelerin ayrıştırılması

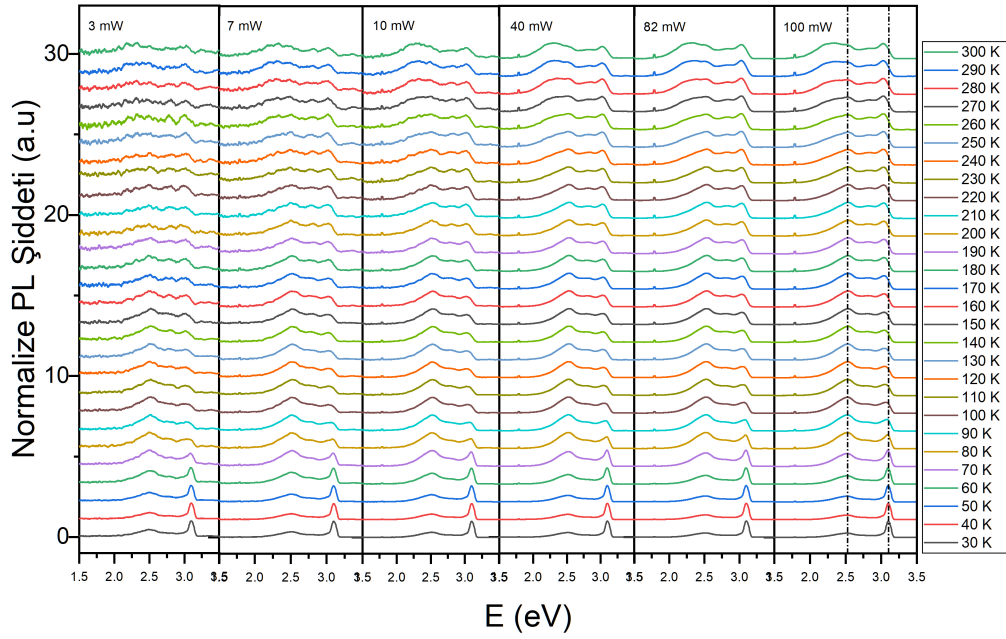
bulunmaktadır. Birden fazla tepe bulunması yapının homojensizliğine ve/veya yapıda kusurların bulunabileceğine işaret eder.

Yapının InGaN tabakasındaki In içeriğinin homojensizliği XRD, EDX ve TEM analizleriyle belirlenmiştir. In içeriği XRD analizleriyle $\sim 11\%$, EDX ve TEM analizleriyle $\sim 9-10\%$ olarak belirlenmiştir [56]. Bu verilerden yola çıkarak ve eşitlik 2.1 ile de hesaplanan değerleri referans olarak 3.06 eV ve 2.91 eV tepeleri InGaN'ın bant aralığı enerjisine atfettiler. Diğer enerji seviyeleri ise alt bant aralıkları olarak kabul edilebilir.

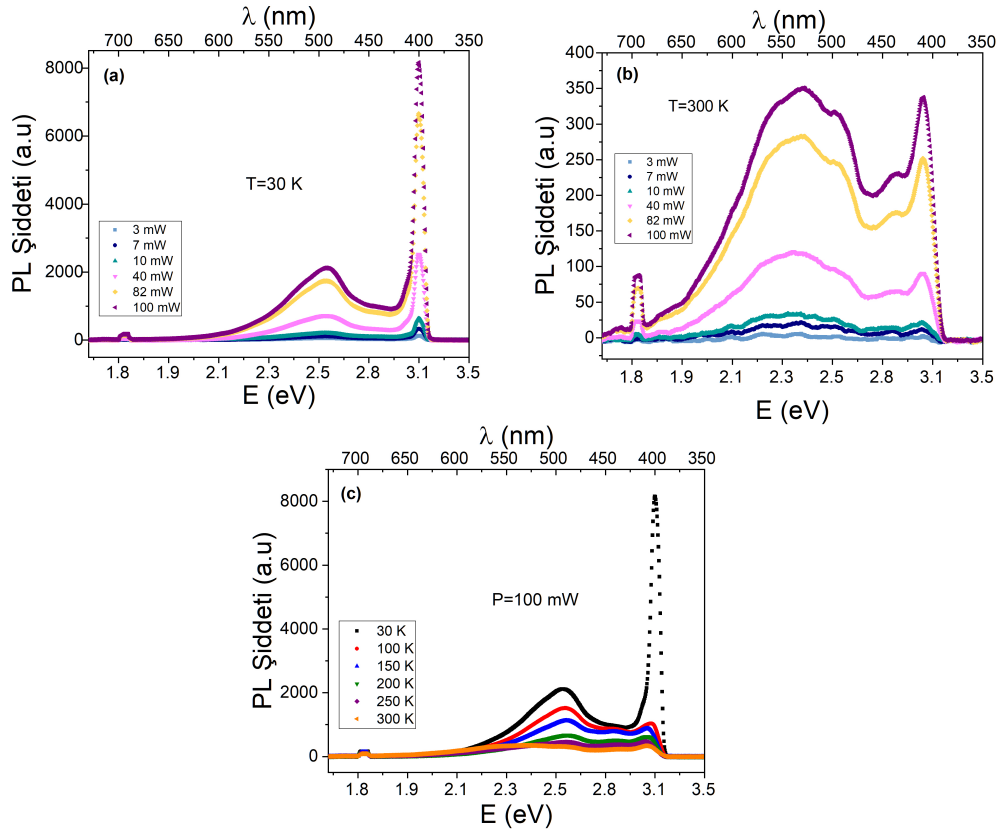
4.1.4 %10 InGaN SL LED için PL Ölçümleri

Gücün fonksiyonu olarak 30-300 K sıcaklık aralığında alınan PL ölçüm sonuçları şekil 4.5' de verilmiştir.

Aygıt üzerine düşen ışığın gücü 3 mW, 7 mW ve 10 mW iken düşük sıcaklıklarda PL sinyali görülür ancak oda sıcaklığına doğru bu sinyal spektrometre sınırlarına doğru zayıflar. Orta ve yüksek güçlü ışık altında (40 mW, 82 mW ve 100 mW) ölçüm skalasındaki tüm sıcaklık aralığında 2.4-2.6 eV ve 3.0-3.10 eV değerlerinde iki luminesans merkezi görülür. Artan sıcaklıkla iki luminesans merkezi de daha düşük enerjilere doğru kayar (kırmızıya kayma-red shift).



Şekil 4.5 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları

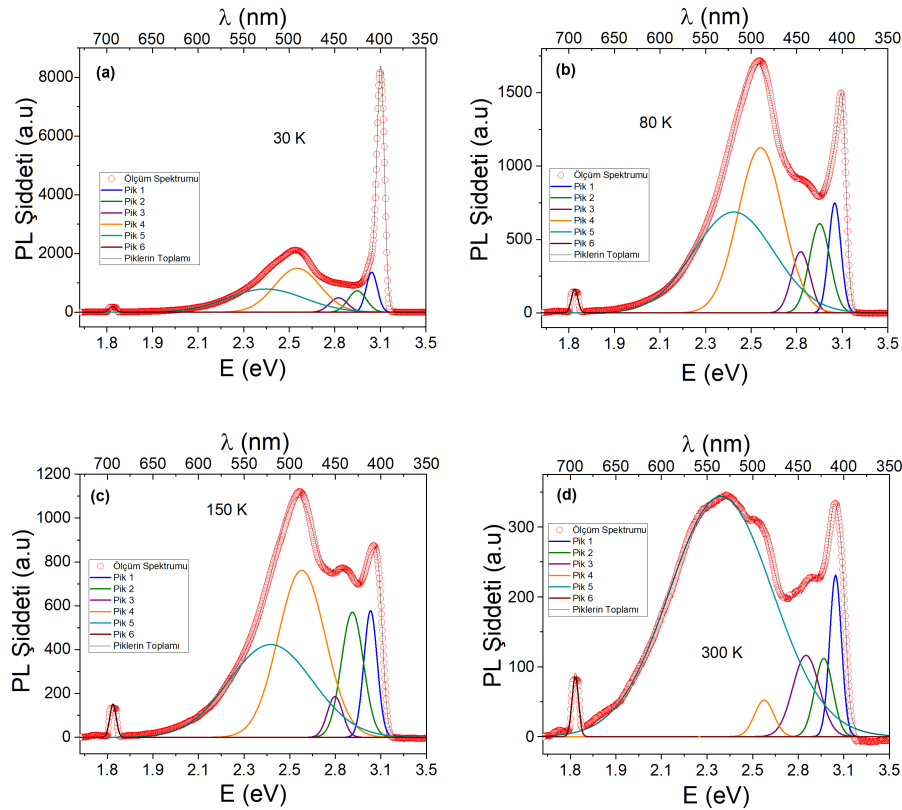


Şekil 4.6 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için (a) $T=30$ K'da (b) $T=300$ K'da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) $P=100$ mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları



Şekil 4.7 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED aygıtın $T=30\text{ K}$ ' da (solda) ve $T=300\text{ K}$ ' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması

Aygıttan çıkan ışık şiddeti aygıt üzerine düşen ışığın gücünün fonksiyonu olarak şekil 4.6 (a)-(b)' de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan güç ile ışıma şiddetinin arttığı görülmüştür. Ayrıca sabit güç değerinde sıcaklık değişimiyle spektrumun değişiminin gösterildiği şekil 4.6 (c) ile de sıcaklık arttıkça ışıma şiddetinin azaldığı gösterilmiştir.



Şekil 4.8 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için (a) $T=30\text{ K}$ ' da (b) $T=80\text{ K}$ ' da (c) $T=150\text{ K}$ ' da (d) $T=300\text{ K}$ 'da tepelere ayrıştırılmış PL spektrumları

30 K ile başlanan ölçümde aygıtın %10 In konsantrasyonlu yapı için beklenene uygun şekilde mavi ışıma yaptığı ancak aygıt oda sıcaklığına doğru ısıtıldığında rengin yeşile kaydığı görülmüştür (şekil 4.7). Bu durum şekil 4.6 (a)-(b)' ile de desteklenir

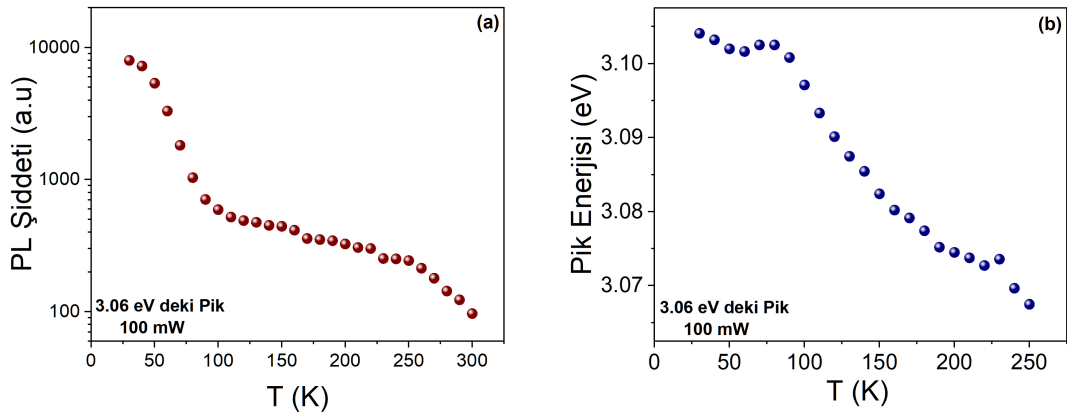
niteliktedir çünkü 300 K sıcaklıktaki spektrumda (şekil 4.6 (b)) 3.0-3.1 eV aralığındaki tepenin ışıma şiddeti 30 K sıcaklıktakine göre (şekil 4.6 (a)) 10 kattan fazla azalmıştır.

30 K' da baskın olan 3.0-3.1 eV aralığındaki tepe (mavi) iken 300 K' da 2.4-2.6 eV aralığındaki tepe (yeşil) baskın hale gelmiştir.

Spektrumda mevcut olan enerji seviyelerini tespit etmek amacıyla spektrum tüm sıcaklıklar için tepelerine ayrılmıştır ve seçilen sıcaklıklar için şekil 4.8' de gösterilmiştir.

300 K' da spektrumda EL ölçümleriyle de örtüşen 3.06 eV, 3.0 eV, 2.86 eV, 2.74 eV, 2.33 eV ve 1.78 eV enerji düzeyleri tespit edilmiştir. 3.06 eV enerji düzeyi InGaN için bant aralığı enerji düzeyine karşılık gelir. Diğer enerji seviyeleri ise tuzak seviyelerine atfedirilen alt bantlardır.

InGaN için bant aralığı enerjisi olarak atfedilen 3.06 eV enerji düzeyinin ve bu enerji düzeyindeki ışıma şiddetinin sıcaklıkla değişimi şekil 4.9 ile verilmiştir.

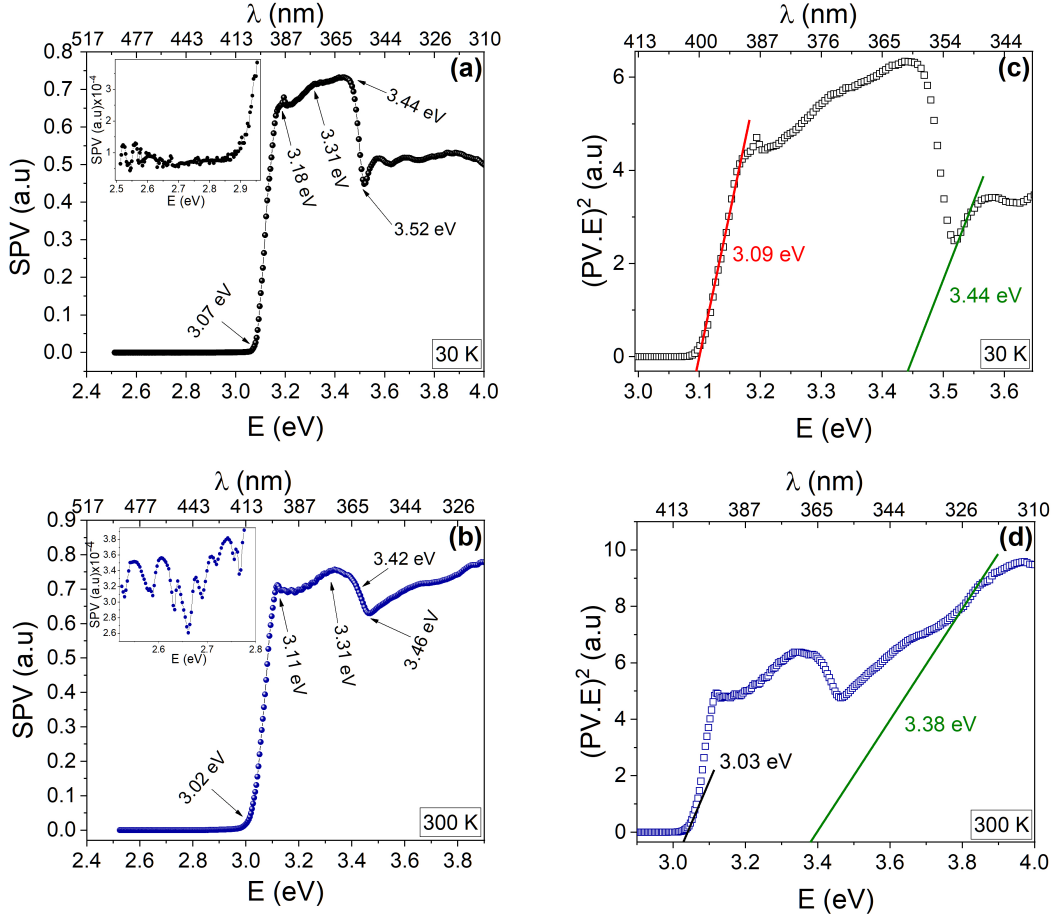


Şekil 4.9 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için PL spektrumundaki 3.06 eV'deki tepenin (a) Şiddetinin (b) Enerji değerinin sıcaklıkla değişimi

Artan sıcaklıkla ışıma şiddetinde bir azalma meydana geldiği gibi enerjide de daha düşük enerjilere doğru kayma (red shift) görülür.

4.1.5 %10 InGaN SL LED için PC/PV Ölçümleri

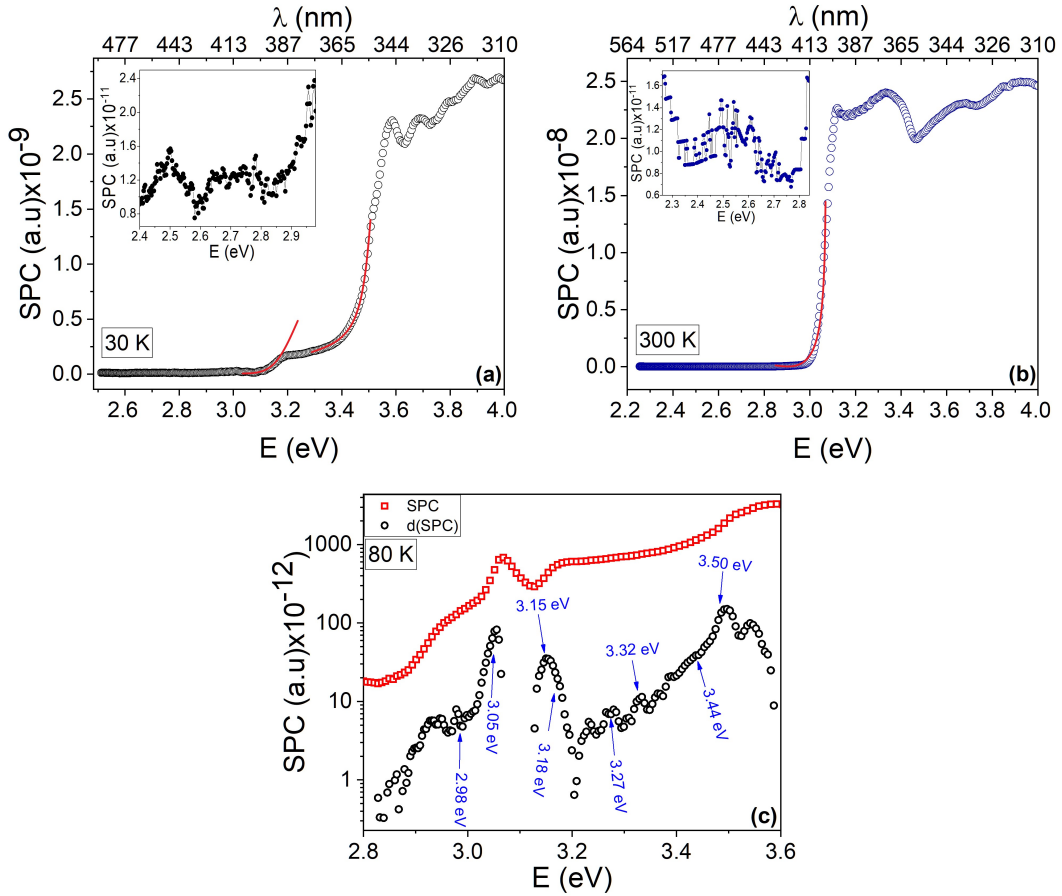
%10 InGaN SL LED aygıt yapısındaki GaN ve InGaN katmanlarının bant aralıklarının belirlenebilmesi, hem PL hem de EL ölçümleri sonucunda görülen alt bantların tanımlanabilmesi ve kusur seviyelerinin tespit edilebilmesi için şekil 3.7' de verilen ölçüm düzeneği 30-300 K sıcaklık aralığında uygulanmış, 30 K ve 300 K sıcaklıklarındaki spektrumlar şekil 4.10 ve 4.11' de verilmiştir.



Şekil 4.10 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPV spektrumu (a) 30 K (b) 300 K, $(PV \times E)^2$ 'ye E grafiğinin lineer bölge fit eğrisi (c) 30 K (d) 300 K

30 K ve 300 K'de kaydedilen SPV ve SPC spektrumlarına göre bant aralıkları GaN katmanı için 30 K'de (300 K) 3.52 eV (3.46 eV), InGaN katmanı için sırasıyla 30 K'de (300 K) 3.07 eV (3.02 eV) olarak görülmektedir (şekil 4.10 (a)-(b)). GaN'nin bant aralığı enerji değeri E_{GaN}^g ayrıca $h\nu$ 'nun bir fonksiyonu olarak $(PV \times h\nu)^2$ 'nin doğrusal bölge eğiminin E eksenine ile kesişmesinden de değerlendirilir ve sırasıyla 30 K'de (300 K) 3.44 eV (3.38 eV) olarak görülür. Benzer şekilde E_{InGaN}^g , 30 K'da (300 K) 3.09 eV (3.03 eV) olarak belirlenmiştir (şekil 4.10 (c)-(d)).

3.38 eV değeri GaN katmanı için ve 3.03 eV değeri InGaN katmanı için SPV ölçümlerindeki bant kuyruklarından dolayı en düşük enerji bandından banda geçiş olarak yorumlanır. Öte yandan, SPC spektroskopisinde kuyruk genişliği, ΔE_{FK} , SPC'ye karşı $h\nu$ grafiğine göre çıkarılır (Şekil 4.11) ve GaN ve InGaN bantları için sırasıyla 40 meV ve 30 meV olarak belirlenir. Ayrıca, SPV / SPC ölçümlerinde 3.518 eV'de çıkan tepe enerjileri, MOCVD GaN için Γ_7^V (alt bant)- Γ_7^C eksitonik bantlar arası geçişlere atanır. Bu arada, 3.420 eV ve 3.428 eV, oda sıcaklığında GaN'deki diğer geçişlerdir ve sırasıyla Γ_9^V - Γ_7^C ve Γ_7^V (üst bant) - Γ_7^C geçişlerine atanır. 3.276 eV ve 3.184 eV'deki



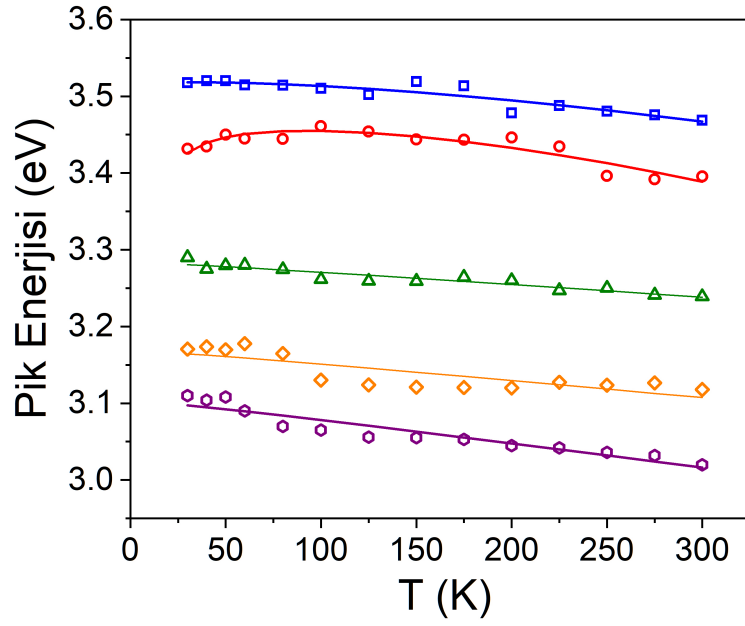
Şekil 4.11 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPC spektrumu (daireler) ve exponansiyel fit eğrileri (kırmızı çizgiler), iç grafiklerdeki 2.5 eV civarındaki geniş tepe, enerji bant aralığı içindeki tuzak enerjisini gösterir (a) 30 K. (b) 300 K (c) Bant aralıkları ve kusur seviyelerini gösteren logaritmik skalada 80 K'deki SPC spektrumu ve türevi

diğer iyi çözümlenmiş tepeler, sırasıyla Mg katkılı ($< 10^{19} cm^{-3}$) GaN ve ilk fonon replika (DAP geçişinden ~ 90 meV daha az) için verici alıcı çifti (DAP) geçiş enerji seviyesine atfedilir [102–104]. 3.31 eV'deki tepe noktası, iletim bandından Mg ile ilgili kusur seviyesine (~ 200 meV) geçiş için atanır [102–104].

Ayrıca, tepe enerjilerinin sıcaklık değişimi, bant kuyruk modelini dikkate alarak modifiye edilmiş Varshni ilişkisi aracılığıyla (eşitlik 2.6) analiz edildi (şekil 4.12) ve analiz parametreleri tablo 4.1'da tablo haline getirildi.

InGaN katmanı için, Varshni fitlerinden ve SPC/SPV ölçümleriyle elde edilen bant kuyruğunun genişliği, Franz Keldysh etkisinin varlığına işaret eder. Son olarak, GaN ve InGaN katmanları arasındaki toplam bant kaymasının, literatür ile örtüşen 0.3-0.4 eV olduğu bulunmuştur [43, 105, 106].

Ayrıca hem SPV hem de SPC ölçümlerinde 2.5-2.6 eV civarında tuzak seviyesi tespit edildi ve olası bant aralığı altı ışıması olarak kabul edildi [107–109]. ~ 2.5 eV değeri,



Şekil 4.12 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPC ölçümlerinden elde edilen tepe enerjilerinin sıcaklığa bağımlılığı (daireler) ve modifiye Varshni eşitliğine göre fitleri (düz çizgiler)

Tablo 4.1 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ SL LED için SPC ölçümü Varshni parametreleri

Tepe Enerjisi (eV)	E_g (0 K) (eV)	α (meV/K)	β (K)	σ (meV)
3.11	3.10	0.32	40	1.03×10^{-3}
3.17	3.17	0.23	40	1.15×10^{-3}
3.28	3.287	0.17	40	1.057×10^{-3}
3.43	3.48	1.8	1498.2	12
3.51	3.52	0.62	725	2.7

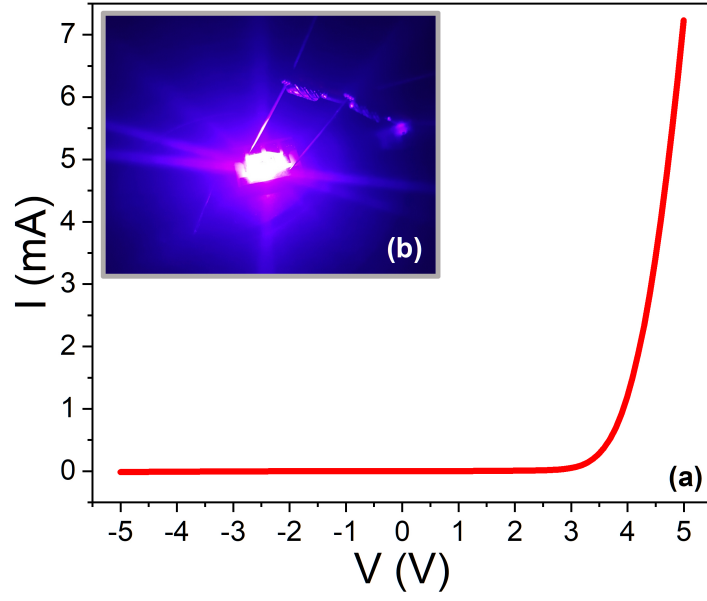
derin donor tuzak seviyesinden (~ 0.75 eV) sıg akseptor (200 meV) seviyesine geçişi gösterir [102–104].

4.2 %10 InGaN/GaN MQW LED

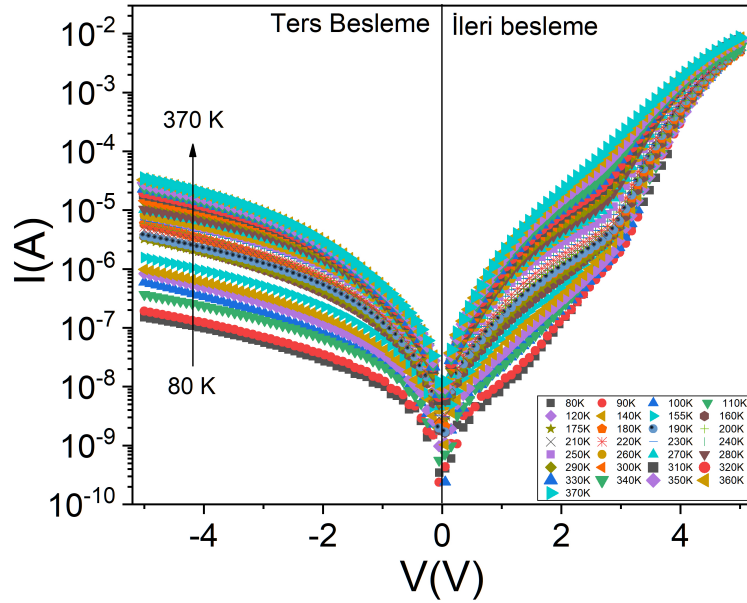
%10 InGaN/GaN MQW LED için sıcaklığa bağlı I-V C-V, EL, PL ve PC/PV ölçümleri alınmıştır.

4.2.1 %10 InGaN/GaN MQW LED için I-V Ölçümleri

Şekil 4.13' de %10 InGaN MQW LED için 300 K' de karanlık ortamdaki I-V davranışı görülmektedir. Davranış ideal diyot davranışına uygundur. Davranışına göre LED'in çalışma gerilimi (threshold gerilimi) ~ 3.4 V değerindedir. Bu gerilim değerinden



Şekil 4.13 (a) 300 K' daki $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı (b) LED' in I-V ölçümü sırasında ışınması

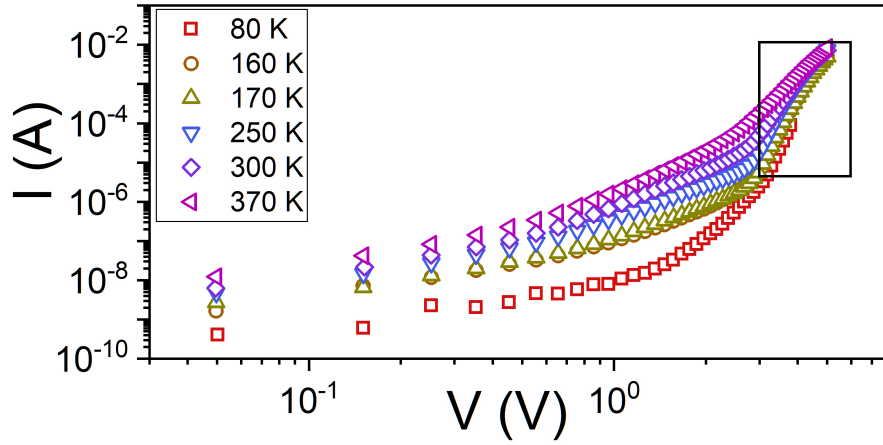


Şekil 4.14 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışının sıcaklığa bağlılığı

yüksek gerilimlerde LED'in ışıması gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 4.13(b)).

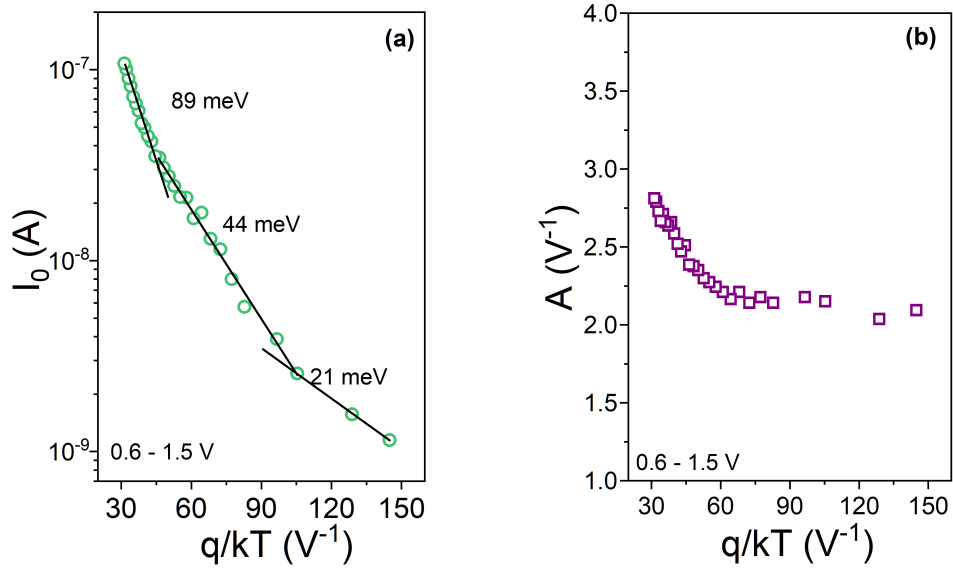
Şekil 4.14' de $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED' in hem ileri hem de ters besleme durumlarında, 80 - 370 K aralığında değişen sıcaklık değerlerinde elde edilen akım-gerilim davranışı görülmektedir.

Taşıyıcı iletim mekanizmalarının tespiti için logaritmik eksenlerle gösterilen ileri besleme I-V davranışı (şekil 4.15), eşitlik 2.9 ve eşitlik 2.10' ye göre fit edildi ve üç ayrı eğim bölgesi tespit edildi. Fit parametreleriyle E_A , I_0 ve A değerleri belirlendi.



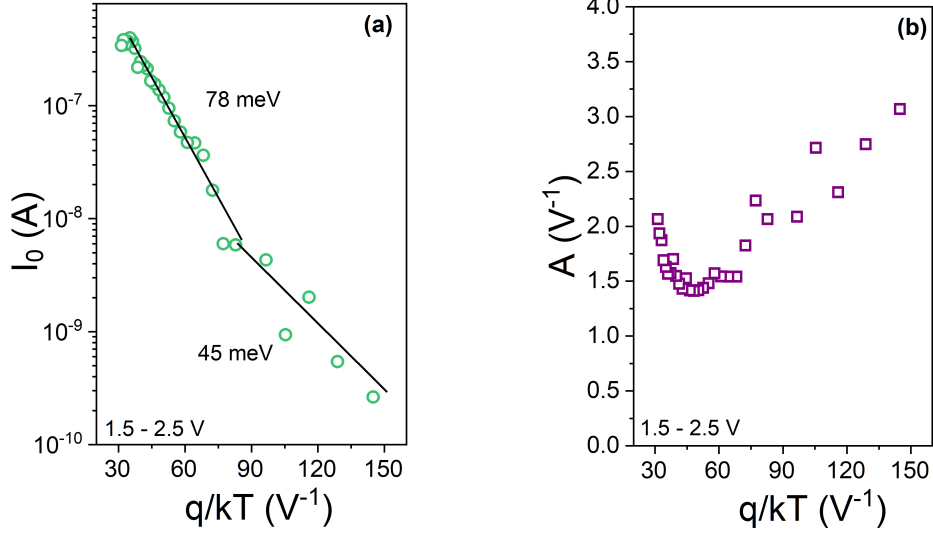
Şekil 4.15 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için ileri besleme durumunda I-V davranışı

0.6 < V < 1.5V ve 1.5 < V < 2 ileri besleme gerilimi aralıklarında; I_0 ve A sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi (şekil 4.16 ve şekil 4.17).



Şekil 4.16 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için 0.6 < V < 1.5V aralığında (a) I_0 -q/kT (b) A-q/kT değişimi

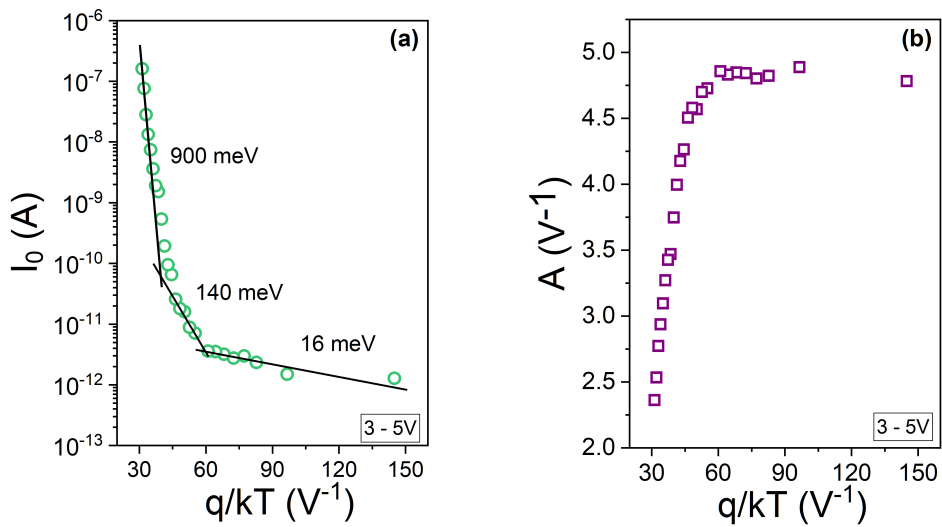
I_0-q/kT grafiğinden aktivasyon enerjileri belirlendi. A değerleri neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır ve eşitlik 2.11' ten yola çıkılarak $A - q/kT$ grafiğinin fit edilmesiyle belirlenen idealite faktörü beklenenden farklıdır ($\eta \gg 2$).



Şekil 4.17 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $1.5 < V < 2.5V$ aralığında (a) I_0-q/kT (b) $A-q/kT$ değişimi

Bu iki durum akım iletim mekanizmasının tünelleme tipi olabileceğine işaret eder.

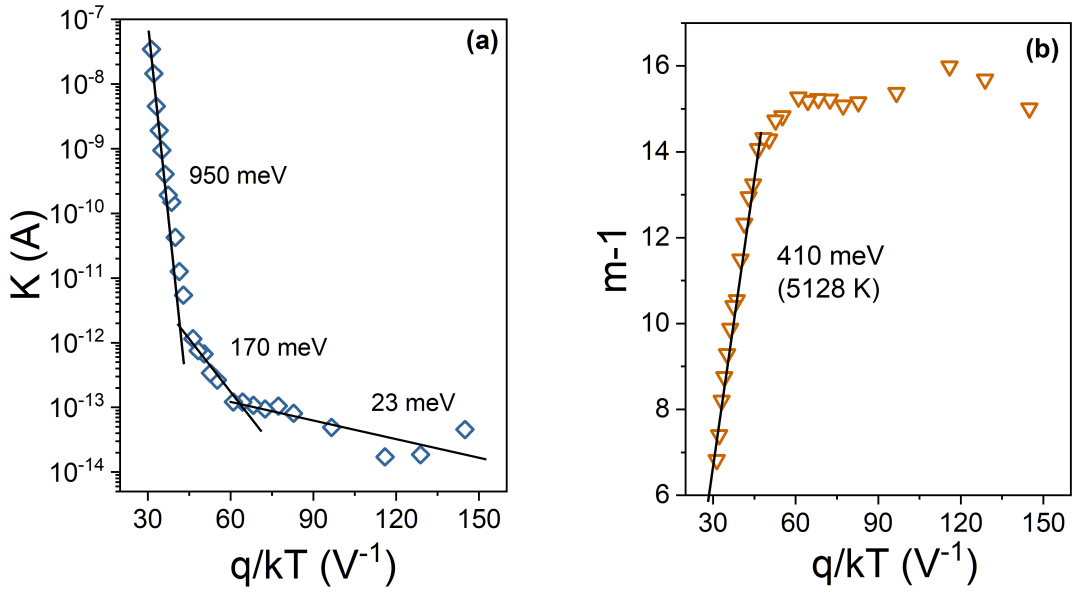
LED yapıda ışımının da başladığı SCLC iletim mekanizması bölgesine karşılık gelen **$3 < V < 5V$ besleme aralığında**; aynı süreç daha büyük E_A değerlerinin varlığıyla gerçekleşir (şekil 4.18).



Şekil 4.18 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $3 < V < 5V$ aralığında (a) I_0-q/kT (b) $A-q/kT$ değişimi

SCLC bölgesinde üç farklı E_A değeri elde edildi: 16 meV, 140 meV ve 900 meV. 16 meV için sıcaklık aralığı 80-170 K iken 140 meV için orta sıcaklık aralığıdır (170 - 250 K) ve 900 meV için bu aralık 270-375 K' dır. Diğer yandan, A' nın sıcaklığa duyarsızlığı düşük sıcaklıkta olurken orta ve yüksek sıcaklık aralıklarında keskin bir değişim meydana gelmiştir.

SCLC bölgesinin akım-gerilim davranışı eşitlik 2.16' ya göredir. Bu bölgenin eşitlik 2.16' ya göre fit edilmesiyle elde edilen K ve m değerleri şekil 4.19' da sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi.



Şekil 4.19 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için $3 < V < 5V$ aralığında (a) $K-q/kT$ (b) $(m-1)-q/kT$ değişimi

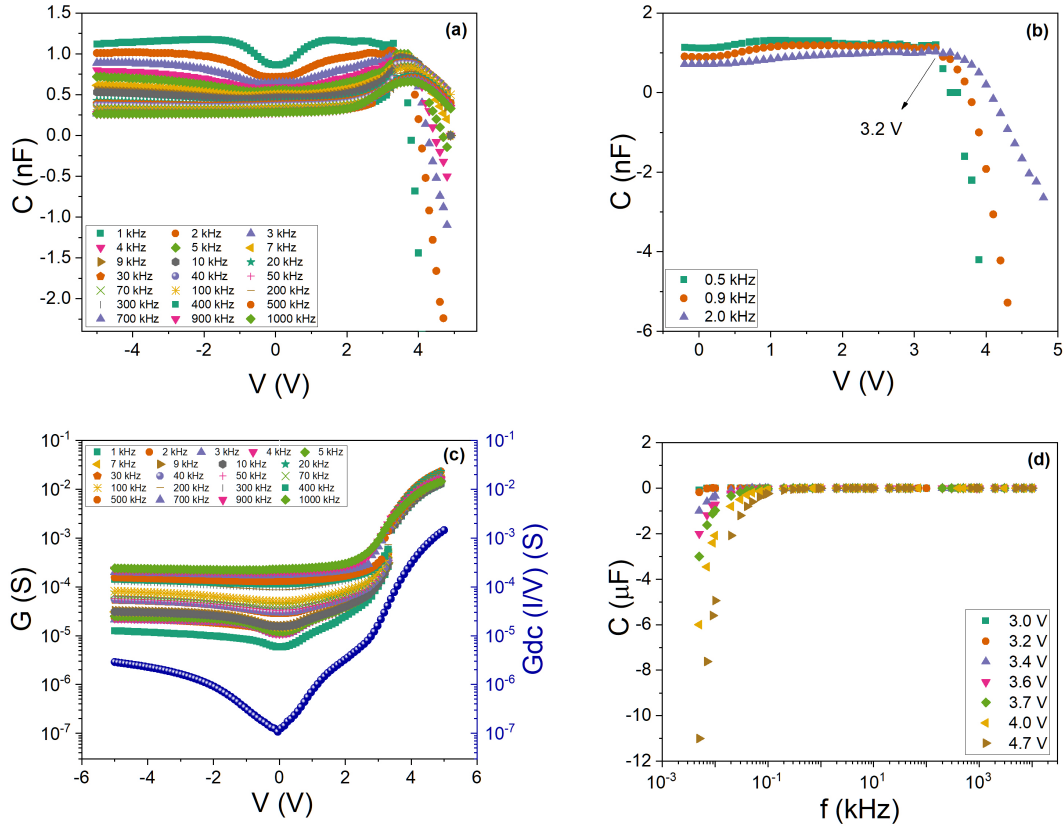
$K-q/kT$ grafiği eşitlik 2.18'ya göre fit edildi ve E_A değerleri belirlendi. Benzer şekilde $(m-1)-1/kT$ grafiği eşitlik 2.17' ye göre fit edildi ve $T_t = 5128$ K olarak belirlendi.

Aslında InGaN/GaN tabanlı MQW LED yapıdaki tünelleme mekanizması taşıyıcıları olan elektron ve boşlukların bu bariyer enerjileri kapasitans-sıcaklık (C-T) taraması ile de belirlenebilir [72].

4.2.2 %10 InGaN/GaN MQW LED için C-V Ölçümleri

Kapasitans/iletkenlik-gerilim değişimi frekansın fonksiyonu olarak ölçülmüştür ve şekil 4.20' da gösterilmiştir.

İleri beslemedeki artışla yüksek frekanslarda kapasitans değeri artmaya başlamış ve bu artış threshold voltajı civarına kadar (3.2 V) devam etmiştir. Threshold



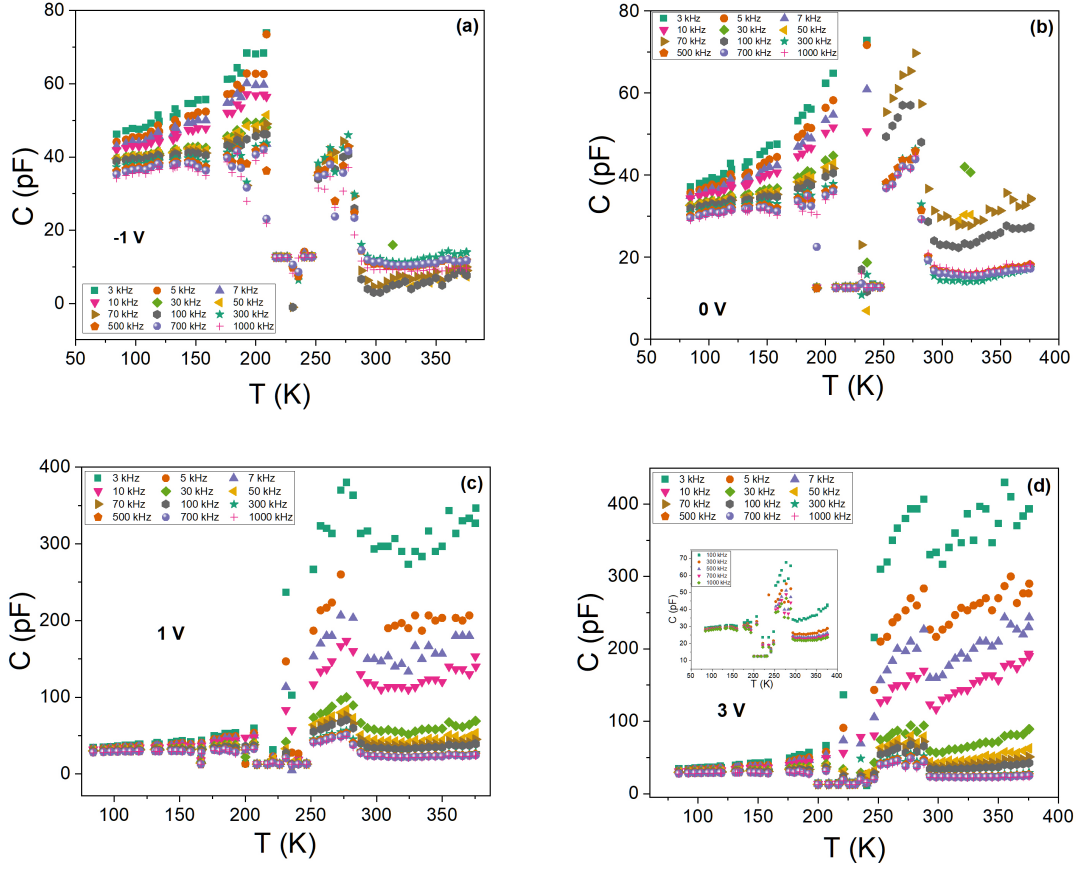
Şekil 4.20 Oda sıcaklığındaki $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) Tüm frekanslarda (b) Seçilmiş frekanslarda kapasitans-gerilim davranışı (c) AC/DC iletkenlik-gerilim davranışı (d) Kapasitans-frekans davranışı

voltajı sonrasında kapasitans azalmaya başlamış düşük frekans değerlerinde indüktif etkinin başlamasıyla negatif kapasitans değerlerine doğru yönelmiştir ve gerilim değeri arttıkça bu etkinin başlangıç değeri yüksek frekanslara doğru kaymıştır (şekil 4.20 (a-b)). AC iletkenlik-gerilim davranışına göre (şekil 4.20 (c)) besleme artışıyla iletkenlik artmaktadır ve threshold voltajından sonra eğimin de değişmesiyle iletim mekanizmasının değiştiği açıkça görülmektedir.

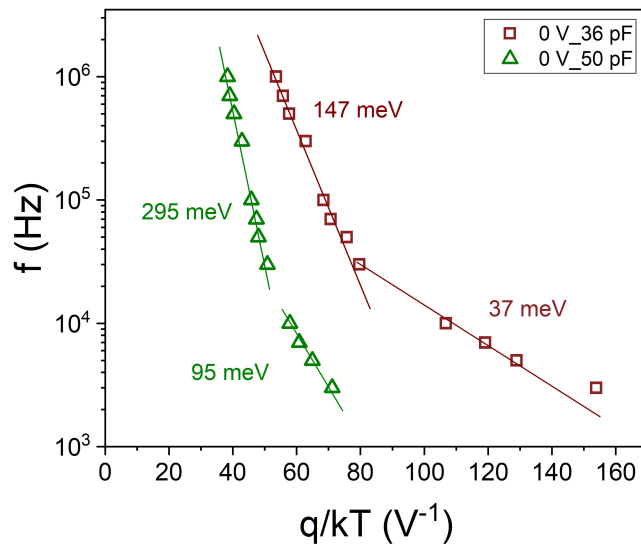
Şekil 4.20 (d)' den de görüleceği gibi yüksek frekans değerlerinde ve sıfır gerilimde kapasitans frekanstan bağımsızdır. Bu sabit değer geometrik kapasitansa karşılık gelir ($C_0 = 0.58$ nF).

Değişen gerilimler uygulanmasıyla frekansın fonksiyonu olarak C-T taraması yapılmış ve şekil 4.21 ile gösterilmiştir. Ayrıca C-T verilerinden elde edilen şekil 4.22 ile de aktivasyon enerjileri belirlenmiştir.

Kontak yüzeyindeki aşınmadan dolayı temas alanının azalmasıyla geometrik kapasitans değeri azalsa da davranış değişmemiştir.



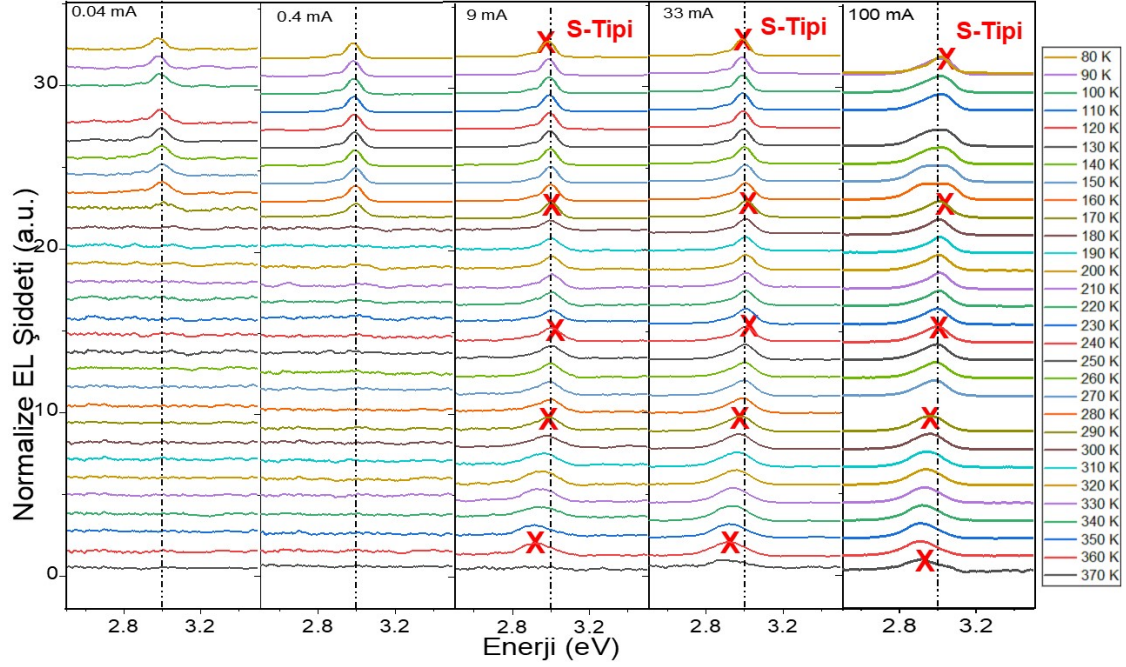
Şekil 4.21 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) -1 V (b) 0 V (c) 1 V (d) 3 V gerilim altında C-T davranışı



Şekil 4.22 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için sabit kapasitans değerlerinde frekans-sıcaklık ilişkisi

4.2.3 %10 InGaN/GaN MQW LED için EL Ölçümleri

Enjeksiyon akımının fonksiyonu olan 80-370 K sıcaklık aralığında alınan EL ölçüm sonuçları şekil 4.23’ de verilmiştir.

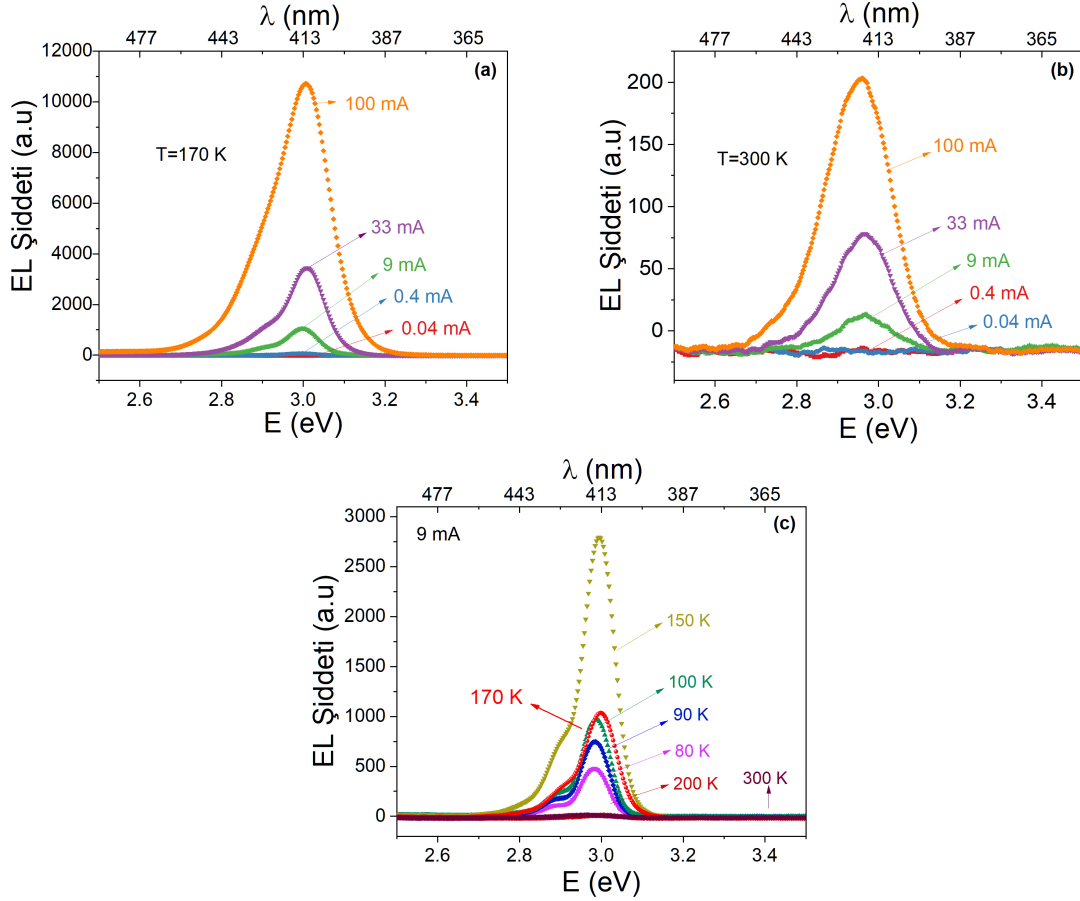


Şekil 4.23 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için akımın fonksiyonu olarak ölçülen 80-370 K sıcaklık aralığındaki EL spektrumları

0.04 mA ve 0.4 mA akım enjeksiyon durumlarında düşük sıcaklık aralığında (80-170 K) 2.9 eV ve 3.0 eV değerlerinde iki luminesans merkezi görülür. Sıcaklık arttığında 3.0 eV deki tepe noktası yüksek enerjilere (maviye) doğru kayar (şekil 4.23). 170 K üzerindeki sıcaklıklarda, EL sinyali cihazımızın sınırlarına doğru zayıflar. Yüksek enjeksiyon durumlarında (9, 33 ve 100 mA) düşük sıcaklıklarda ($T < 170$ K) benzer kaymalar görülür. Bu enjeksiyon değerlerinde düşük enjeksiyon durumunun aksine 170 K’da EL sinyali halen görülmektedir. Orta sıcaklık aralığında ($180 < T < 250$ K) 3.0 eV’deki tepe pozisyonu neredeyse sabitken 250 K üzerindeki sıcaklık değerleriyle tepe pozisyonu düşük enerjilere (kırmızıya) doğru kayar.

Aygıttan çıkan ışık şiddeti seçilen iki sıcaklık için (170 K ve 300 K) enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak şekil 4.24 (a)-(b)’de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan akım ile ışıma şiddetinin arttığı görülmüştür.

Ayrıca 9 mA sabit enjeksiyon akımı değerinde sıcaklık değişimiyle spektrum değişiminin gösterildiği şekil 4.24 (c) ile de 170 K sıcaklığa kadar artan sıcaklıkla ışıma şiddetinin arttığı, $T > 170$ K için artan sıcaklıkla azaldığı hatta oda sıcaklığına

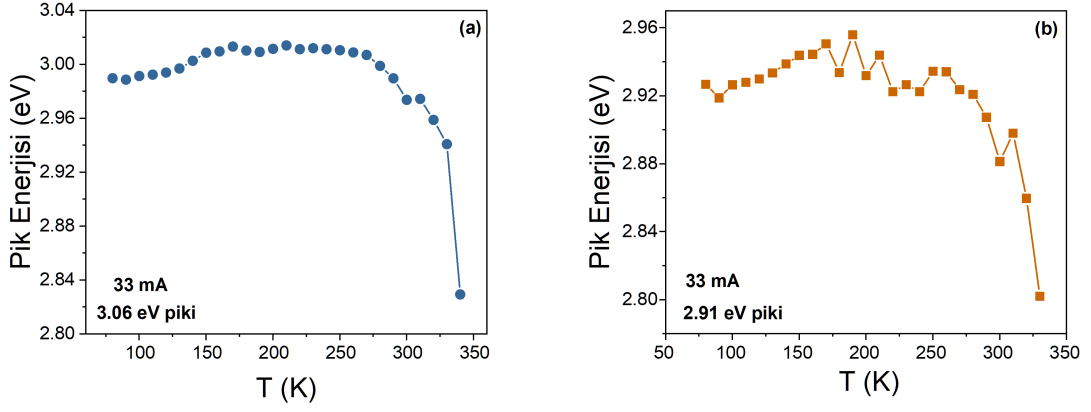


Şekil 4.24 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED için (a) $T=170$ K' da (b) $T=300$ K' da enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak gösterilen (c) 9 mA enjeksiyon akımı uygulanmasıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen EL spektrumları

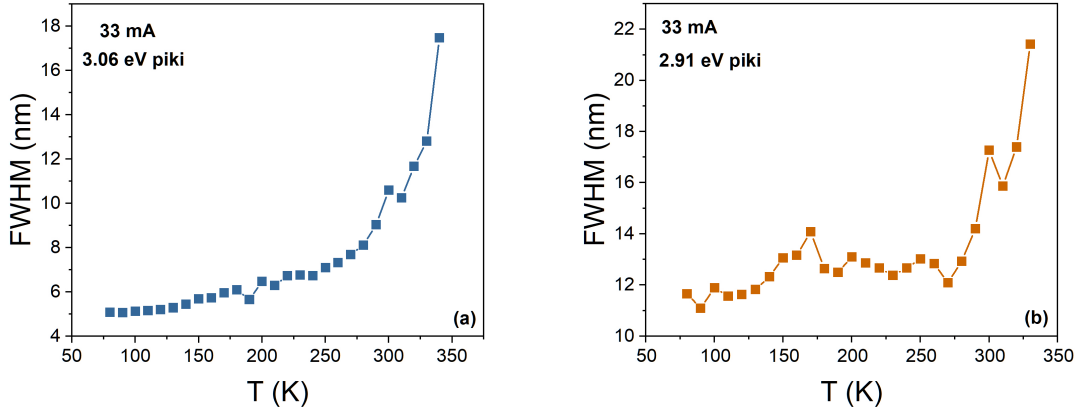
doğru 2.9 eV' daki tepenin zamanla kaybolduğu gözlenmiştir.

Spektrumda mevcut olan enerji seviyelerini tespit etmek amacıyla spektrum tüm sıcaklıklar için tepelerine ayrılmıştır. Tepe ayrıştırma süreciyle 3.06 eV ve 2.91 eV enerjilerinde iki lüminesans merkezi tespit edilmiştir. Bu merkezlerin tepe enerjisi ve spektrumun çizgi genişliği (FWHM) sabit enjeksiyon akımı değerlerinde (33 mA) sıcaklığın fonksiyonu olarak şekil 4.25 ve şekil 4.26' da gösterildi.

Sıcaklık 80 K' dan 170 K'ya yükselirken tepe enerjisinde maviye kayma (blue shift) gözlenir. Maviye kayma süreci indiyum miktarındaki dalgalanmadan kaynaklanan yüksek enerjili lokalize (sınırlı) seviyelerin bant doldurma etkisine (band filling effect) dayanır [108, 110–115]. Burada bantlar EL FWHM değerinin genişlemesine de öncülük ederek enjekte edilen yükler tarafından hopping mekanizmasıyla dolar. Orta sıcaklık bölgesi için (170 - 250 K) çizgi genişliği artmaya devam ederken tepe pozisyonunda hafif (neredeyse sıfır) kayma gözlenir. Taşıyıcı iletim mekanizması olarak, aktivasyon enerjisinden anlayabildiğimiz (140 meV) elektronların tünellemesi



Şekil 4.25 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED'in seçilen 33 mA enjeksiyon akımındaki EL spektrumundan (a) 3.06 eV (b) 2.91 eV' deki tepe için tepe enerjisinin sıcaklıkla değişimi

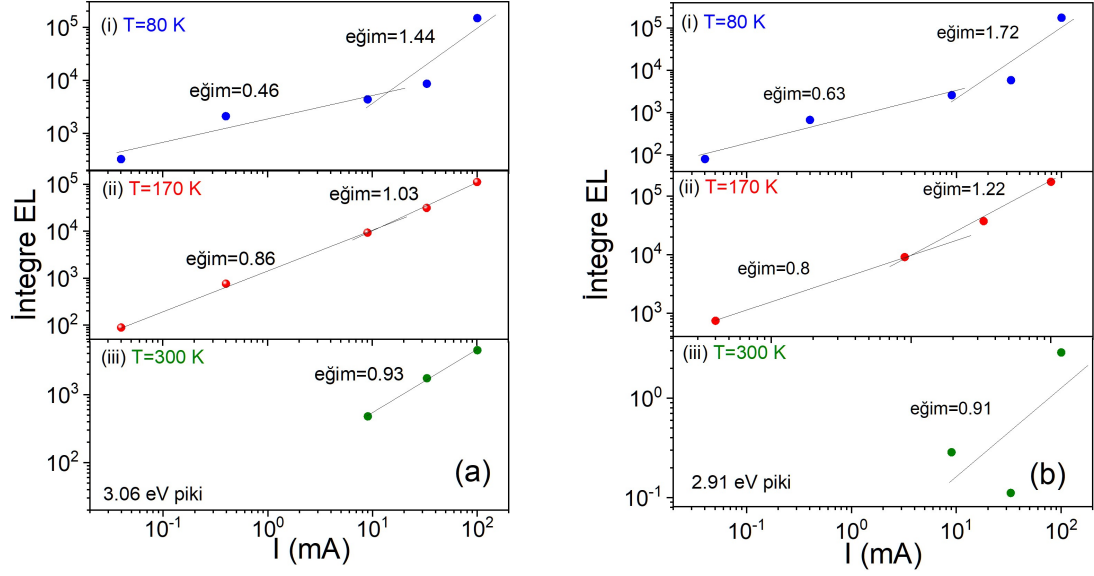


Şekil 4.26 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED'in seçilen 33 mA enjeksiyon akımındaki EL spektrumundan (a) 3.06 eV (b) 2.91 eV' deki tepe için çizgi genişliğinin (FWHM) sıcaklıkla değişimi

meydana gelir [31, 79, 116]. Son olarak; son sıcaklık aralığı için (250 - 375 K) büyük bir çizgi genişlemesiyle beraber EL spektrumunda kırmızıya kayma (red shift) meydana gelir. Bunun sebebi ışımasız (non-radiative) yeniden birleşme merkezlerinin sıcaklıkla aktive olmasıdır ve sonrasında yeniden birleşme sürecinin ışımasız yeniden birleşme süreciyle ilişkili nokta kusurlardan kaynaklı baskın olmasıdır.

Diğer taraftan entegre EL şiddeti (L) enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak seçili sıcaklıklarda gösterildiğinde, farklı bir tür yeniden birleşme sürecinin olduğu görülür (şekil 4.27).

Şekil 4.27' de görüldüğü gibi β düşük enjeksiyon akımı bölgesinde 2.9 eV ve 3.0 eV için seçilmiş sıcaklıklarda (80 K ve 170 K) 1' den küçüktür çünkü enjekte edilen taşıyıcılar tarafından bant doldurma merkezleri meydana gelir ve bu tepe pozisyonunda blue



Şekil 4.27 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED yapının EL spektrumundaki (a) 3.0 eV ve (b) 2.9 eV’deki tepe için (i) 80 K, (ii) 170 K ve (iii) 300 K sıcaklıklarında enjekte edilen akımın fonksiyonu olan İntegre EL spektrumu

shift ortaya çıkar. Sonuç olarak, ışımalı yeniden birleşme bant doldurma etkisi süresince zayıflar. Yüksek enjeksiyon bölgesinde (yüksek voltaj bölgesinde) $\beta > 1$ durumunda, H1 tuzak seviyesinin ışımasız yeniden birleşme tipini tetiklediği, SRH yeniden birleşme süreci olarak atfedilir.

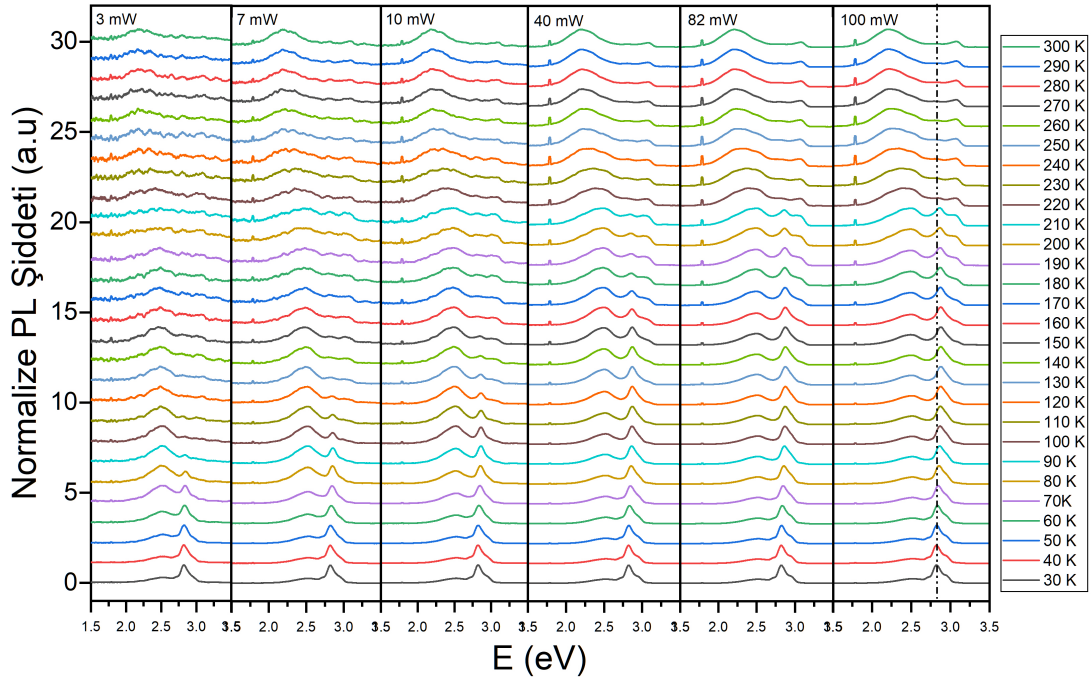
4.2.4 %10 InGaN/GaN MQW LED için PL Ölçümleri

Gücün fonksiyonu olan 30-300 K sıcaklık aralığında alınan PL ölçüm sonuçları şekil 4.28’de verilmiştir.

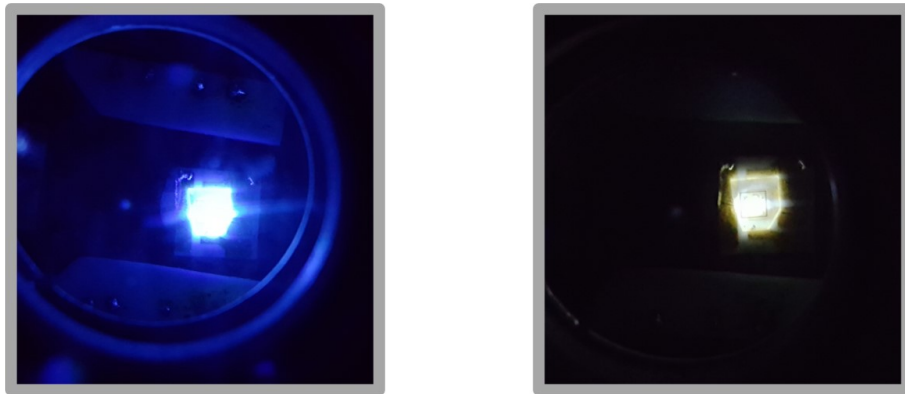
Aygıt üzerine düşen ışığın gücü 3 mW ve 7 mW iken düşük sıcaklıklarda PL sinyali görülür ancak oda sıcaklığına doğru bu sinyal spektrometre sınırlarına doğru zayıflar. Orta ve yüksek güçlü ışık altında (10 mW, 40 mW, 82 mW ve 100 mW) ölçüm skalasındaki tüm sıcaklık değerlerinde 2.2-2.5 eV ve 2.8-3.00 eV enerji aralıklarında iki lüminesans merkezi görülür. Artan sıcaklıkla iki lüminesans merkezinde de enerjide kaymalar meydana gelir.

30 K ile başlanan ölçümde aygıtın %10 In konsantrasyonlu yapı için beklenene uygun şekilde mavi ışıma yaptığı ancak aygıt oda sıcaklığına doğru ısıtıldığında rengin sarımsı yeşile dönüştüğü görülmüştür (şekil 4.29).

Aygıttan çıkan ışık şiddeti aygıt üzerine düşen ışığın gücünün fonksiyonu olarak şekil 4.30 (a)-(b)’de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan güç ile ışıma şiddetinin

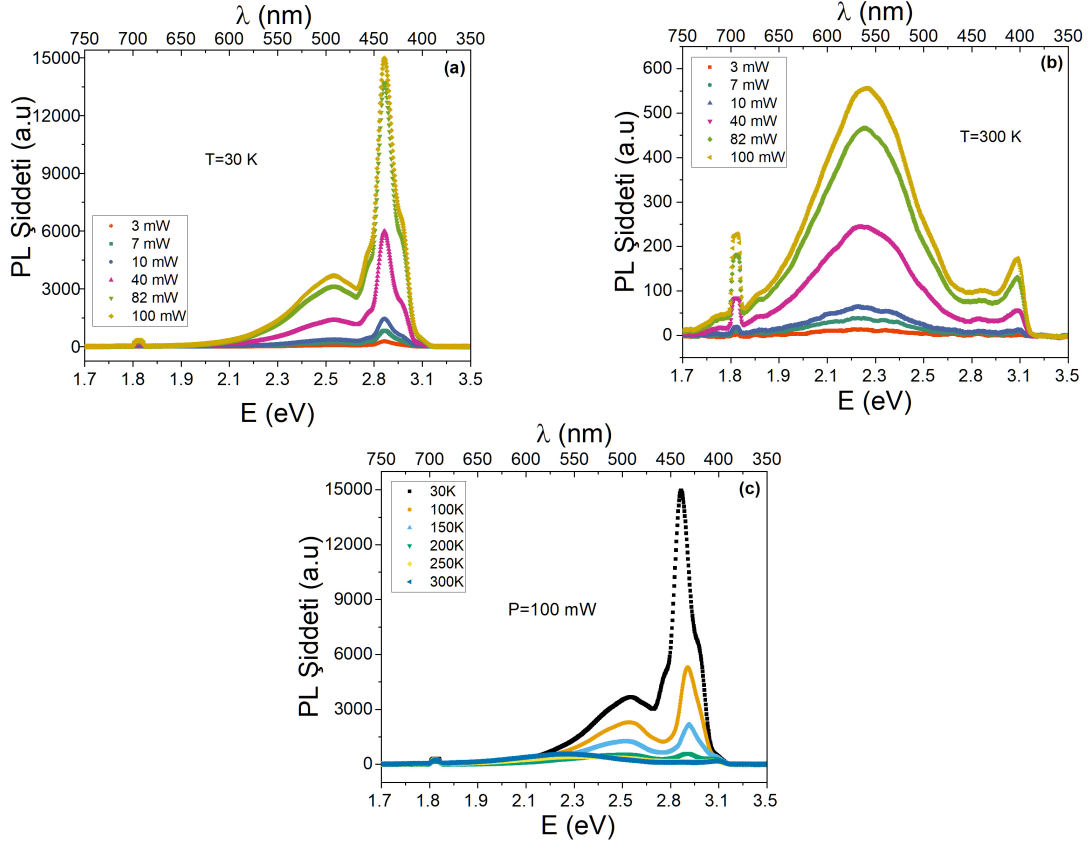


Şekil 4.28 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları



Şekil 4.29 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED aygıtın $T=30$ K' da (solda) ve $T=300$ K' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması

arttığı görülmüştür. Ayrıca sabit güç değerinde sıcaklık değişimiyle spektrumun değişiminin gösterildiği şekil 4.30 (c) ile de sıcaklık arttıkça ışıma şiddetinin yüksek oranda azaldığı gösterilmiştir.

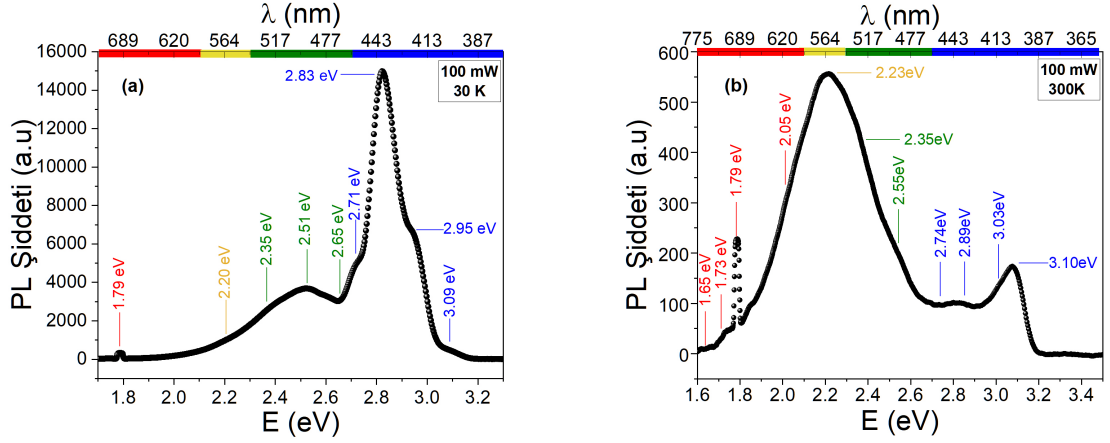


Şekil 4.30 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30$ K’da (b) $T=300$ K’da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) $P=100$ mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları

Şekil 4.29’ de görülen 30 K’ da güçlü ve mavi olan ışımanın 300 K da zayıf ve sarımsı-yeşile dönüşmesi olayı şekil 4.30 (a)-(b)’ ile de desteklenir niteliktedir çünkü 300 K sıcaklıktaki spektrumda (şekil 4.30 (b)) 3.0-3.1 eV aralığındaki tepenin ışıma şiddeti 30 K sıcaklıktakine göre (şekil 4.30 (a)) 10 kattan fazla azalmıştır. Başka bir deyişle 30 K’ da baskın olan 3.0-3.1 eV aralığındaki tepe (mavi) iken 300 K’ da 2.4-2.6 eV aralığındaki tepe (yeşil) baskın hale gelmiştir.

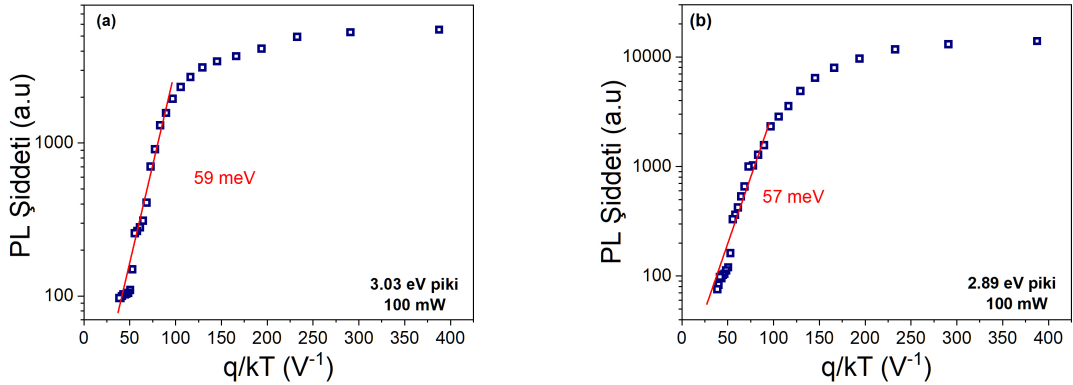
Spektrumda mevcut olan enerji seviyelerini tespit etmek amacıyla spektrum tüm sıcaklıklar için bilgisayar programı aracılığıyla Gauss tepelerine ayrılmıştır ve tüm ışıma merkezlerine karşılık gelen enerji değerleri, 30 K ve 300 K’ da PL spektrumunda oklarla gösterilmiştir (şekil 4.31). Taranan geniş sıcaklık aralığında, emisyon merkezlerinin sayısı değişmese de, güçleri büyük oranda azalmıştır; tepe enerji değerleri kırmızı (1.8-2.0 eV)/sarı(2.2-2.4 eV)/yeşil(2.4-2.6 eV)/mavi(2.8-3.1 eV) bantlar ile örtüşmektedir.

300 K' da spektrumda 1.65 eV, 1.73 eV, 1.79 eV, 2.05 eV, 2.23 eV, 2.35 eV, 2.55 eV, 2.74 eV, 2.89 eV, 3.03 eV, 3.10 eV enerji düzeyleri tespit edilmiştir. Beklenmeyen kırmızı, yeşil ve sarı bantların yanı sıra, 3,03 eV ve 2,89 eV tepe enerjideki mavi emisyonlar, XRD, TEM ve EDX analizleri sonuçlarına göre [56] %10-13 oranında In katkılı olduğu tespit edilen InGaN katmanıyla ilişkilidir ve bu durum eşitlik 2.1 ile de destelenir.



Şekil 4.31 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30$ K'da (b) $T=300$ K'da PL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)

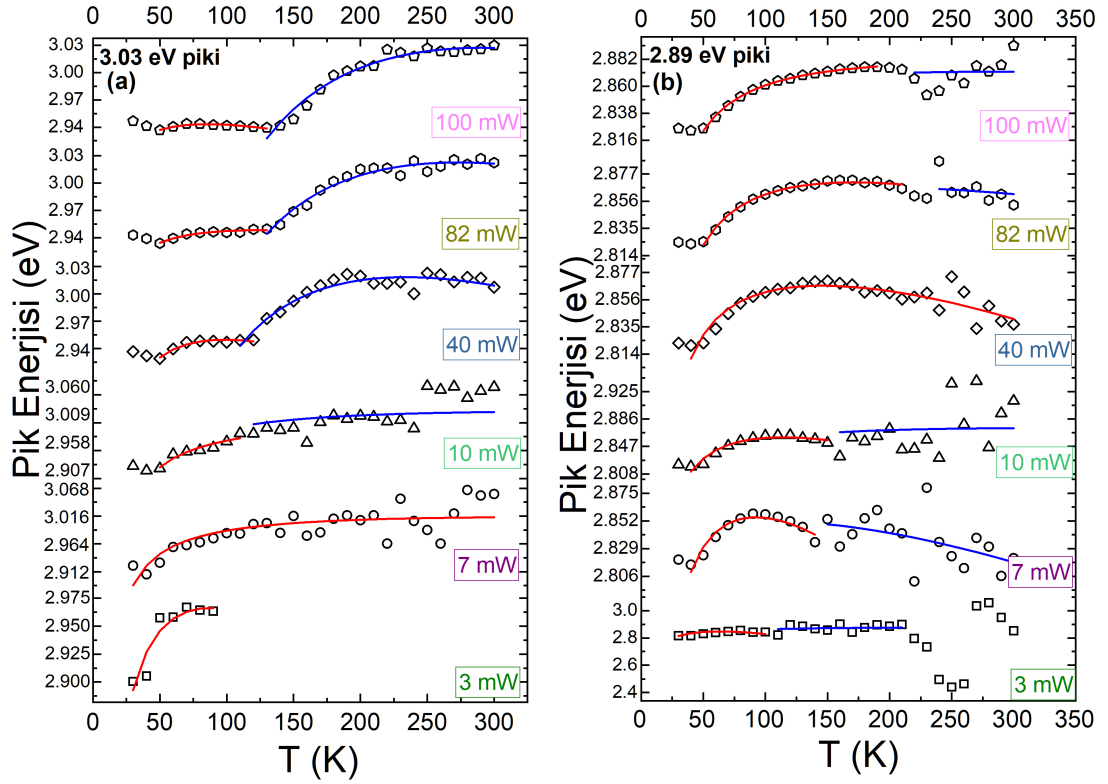
InGaN için bant aralığı enerjisi olarak atfedilen 3.03 eV ve 2.89 eV enerji düzeyinin ışıma şiddetinin sıcaklıkla değişimi şekil 4.32' deki Arrhenius analizi ile verilmiştir.



Şekil 4.32 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için InGaN ile ilişkili PL spektral tepelerinin ışıma şiddetlerinin sıcaklıkla ilişkisi (a) 3.03 eV tepesi (b) 2.89 eV tepesi

$I_{PL} - q/kT$ eğimi ışıma verimliliğini gösterir; düşük sıcaklık bölgesinde, ışıma sıcaklıktan oldukça bağımsızdır, bu da lokalize eksitonların karakteristik özelliğini gösterirken, yüksek sıcaklıkta yoğunlukta hızlı bir düşüş gözlemlenir ve ışıma yoğunluğunun termal sönmesini gösterir. Termal işlemin aktivasyon enerjisi (E_a), eşitlik 2.7 aracılığıyla 3.03/2.89 eV'deki tepeler için bize maksimum değerini 59/57 meV olarak verir.

Şekil 4.33, InGaN ile ilgili PL spektral tepe konumlarının sıcaklık taraması ile değişimlerini ve bu değişimlerin Varshni ilişkisine göre fit eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.33 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için InGaN ile ilişkili PL spektral tepelerinin enerji değişimlerinin sıcaklıkla ilişkisi (daireler) ve Modifiye Varshni eşitliğine göre fitleri (çizgiler) (a) 3.03 eV tepesi (b) 2.89 eV tepesi

InGaN ile ilgili emisyon bantları, artan sıcaklıkla emisyon enerjisinin kırmızı-mavi-kırmızı kaymasını (S-tipi davranış) göstermiştir. Bu kaymalar Varshni ilişkisine göre fit edilmiş ve elde edilen katsayılar tablo 4.2 de tablo haline getirilmiştir.

$E_g(0)$ ve σ değerleri, mavi lüminesans için PL' ın uyarma gücündeki artışla artmıştır ve %10 InGaN/GaN MQW LED için literatürdeki verilerle çelişkili sonuçlara sahiptir. Ayrıca, artan uyarma güçleri altında, 3.03 eV'deki tepe noktası için elde edilen $E_g(0)$ değerleri, 3.22 eV' ye kadar artmıştır. Bu nedenle, fit prosedürü yüksek sıcaklık (150-300 K) yerine düşük sıcaklık aralığı ($T < 100K$) için tekrarlanmış ve durum (ii) olarak tablo 4.2' de yeni bir sütun olarak gösterilmiştir.

Beklendiği gibi, lokalize durumların daha yüksek enerjisi, küçük lokalizasyon etkisi (düşük sigma değeri) ile birlikte büyük uyarma gücü altında yanıt verir. Başka bir deyişle, PL' deki yüksek uyarma gücü, mevcut örnekte dar bir kuyu genişliği (2.5 nm) içindeki yüksek enerjili lokalize durumların küçük yoğunluğu nedeniyle daha zayıf bir lokalizasyon etkisi sağlar. PL' deki düşük uyarma gücündeki güçlü lokalizasyon

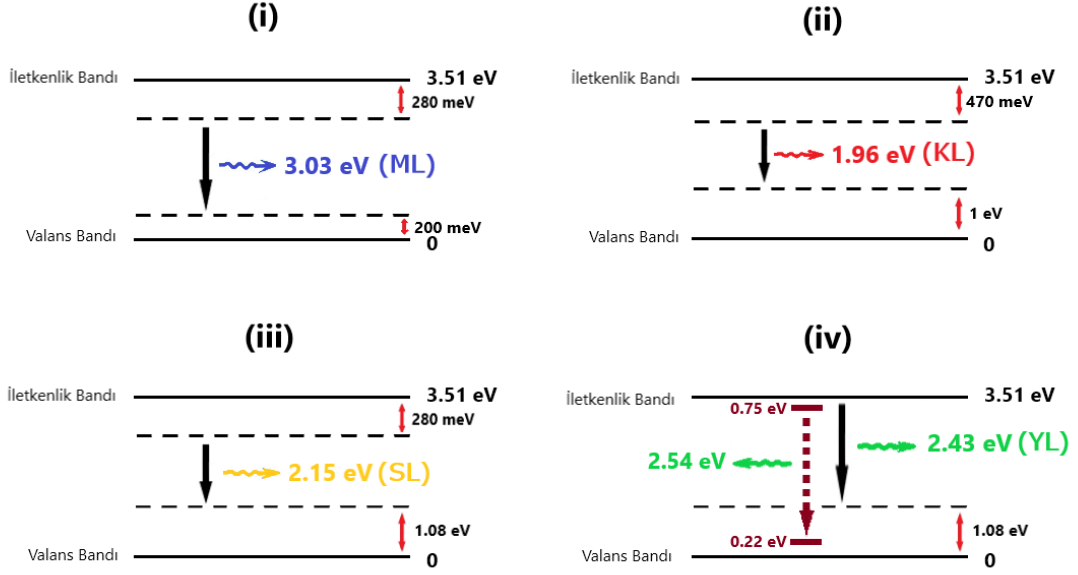
Tablo 4.2 $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ MQW LED için PL ölçümü Varshni parametreleri (i) Yüksek sıcaklık aralığı (ii) Düşük sıcaklık aralığı

Uyarma Gücü (mW)	$E_g(0)$		α		β		σ	
	(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)
3.03 eV PL tepesi								
3	3.04	3.04	3.2	3.2	849	849	19.5	19.5
7	3.03	3.03	0.1	0.1	1500	1500	19.5	19.5
10	3.05	3.03	0.1	0.1	1500	1500	21.4	20.6
40	3.19	3.10	1.1	1.7	757	847	46.5	16.8
82	3.20	2.97	0.9	0.6	737	1286	52.2	11.8
100	3.22	2.97	1.1	1.3	984	1036	55.8	11.1
2.89 eV PL tepesi								
3	2.89	2.96	0.1	5	1500	612	15.5	21.4
7	2.88	2.94	0.8	2.6	1032	705	13.2	20.3
10	2.89	2.91	0.1	1.5	1500	950	16.4	18.6
40	2.91	2.91	1	1	1457	1457	18.1	18.1
82	2.91	2.89	0.6	0.3	1201	1500	19.2	14.3
100	2.90	2.88	0.2	0.1	1451	1500	18	14

etkisi, daha yüksek In içeriğinin neden olduğu daha büyük In dalgalanmalarından kaynaklanır ve bu nedenle sıcaklığa bağlı S-tipi kayma gerçekleşir.

Şekil 4.34'de gösterilen geçişler, sarı lüminesans (SL), yeşil lüminesans (YL), mavi lüminesans (ML) ve kırmızı lüminesans (KL) olarak ışık yayılımını ifade eder. Bunlar ya MQW ve p-i-n yapısındaki bariyer tabakası içinde ya/ya da kasıtsız olarak/hafif katkı katmanların yeniden birleşme işleminde ya da p-GaN katmanının kendisinde gerçekleşir.

GaN için 3.51 eV'lik bant aralığı enerjisi göz önüne alındığında, YL (her zaman mevcuttur ve izole edilmiş nitrojen ve galyum boşluklarının nokta kusurları ile ilişkilidir), sık donör (GaN'nin iletim bandının 280 meV altında) ile derin akseptör (yaklaşık GaN'nin valans bandının 1.08 eV üzerinde) veya derin bir donör ile sık bir akseptör arasındadır. 1 eV ve 0.17-0.22 eV civarındaki derin ve sık akseptör seviyeleri Mg ile ilgili kusurlarla açıklanır; ilki Ga boşluğuna, ikincisi ise Ga ve N boşluklarına karbon (C) ve oksijen (O) atomlarının yerleşmiş olmasına atfedilir. Böylece, 2.2 eV civarında tepe yapan SL, GaN'nin (3.51 eV) sık donör seviyesine (0.29 eV) ve derin akseptör seviyesine (1.08 eV) indirgenmiş bant enerji aralığıdır. Diğer yandan, diğer donör seviyelerinin (0.75 eV, 0.47 eV, 0.33 eV) 0.22 eV akseptör seviyesine geçişleri, sırasıyla 2.52 eV, 2.80 eV ve 2.94 eV'de emisyonlara yol açar. 2.52 eV, YL'ye atfedilirken, 2.80 eV, 2.94 eV ile birlikte ML'ye atfedilir. 2.4-2.5 eV civarında tepe yapan YL bandı, kasıtsız olarak katkı GaN veya hafif p-tipi



Şekil 4.34 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için MQW içindeki katkısız ve p-katkılı GaN katmanlarından ML/KL/SL/YL emisyonu için önerilen geçişler

katkılı GaN'deki nitrojen boşluğundan kaynaklanan Mg ile ilgilidir. 2.9 eV civarında tepe yapan mavi ışığa derin donör seviyesinin (0.4 eV) ve sığ akseptör seviyesinin (0.22 eV) dahil olduğu $V_N Mg_{Ga}$ kompleksine atfedilir. 3.2 eV' de tepe yapan ultraviyole lüminesans (UVL), GaN'nin iletim bandının sığ akseptör seviyesine (0.22 eV) geçişinden kaynaklanmaktadır. Son olarak, kırmızı lüminesans bandı (1.96-2.05 eV), derin donör seviyesinden (0.47 eV) derin akseptör seviyesine (1.08 eV) geçişten kaynaklanmaktadır.

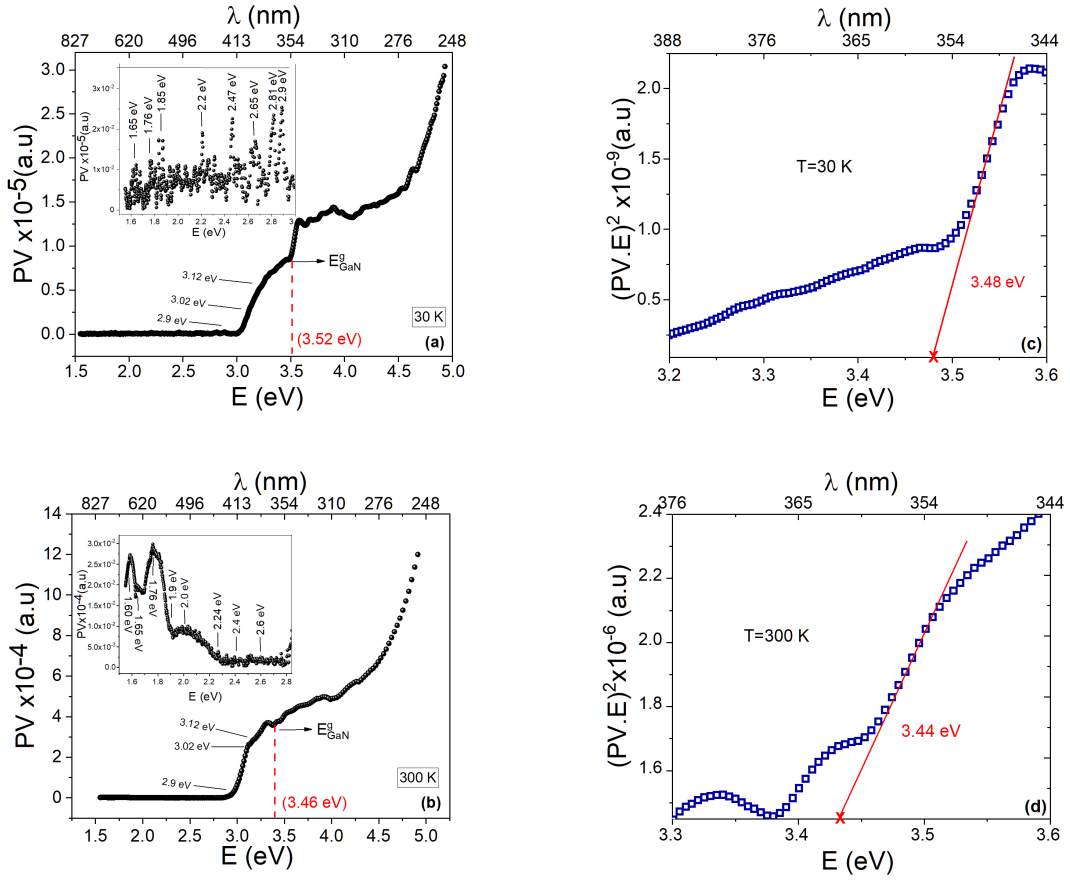
4.2.5 %10 InGaN/GaN MQW LED için PC/PV Ölçümleri

%10 InGaN/GaN MQW LED için şekil 3.7' de verilen ölçüm düzeneği 30-300 K sıcaklık aralığında uygulanmış, seçilen 30 K ve 300 K sıcaklıklarındaki spektrumlar şekil 4.35' te verilmiştir.

30 K ve 300 K'de kaydedilen SPV spektrumlarına göre bant aralıkları GaN katmanı için 30 K'de (300 K) 3.52 eV (3.46 eV) olarak görülmektedir (şekil 4.35 (a)-(b)). GaN'nin bant aralığı enerji değeri E_{GaN}^g ayrıca $h\nu$ 'nun bir fonksiyonu olarak $(PV \times h\nu)^2$ 'nin doğrusal bölge eğiminin E ekseni ile kesişmesinden de değerlendirilir ve sırasıyla 30 K'de (300 K) 3.48 eV (3.44 eV) olarak görülür (şekil 4.35 (c)-(d)).

30 K' da belirgin olmayıp 300 K' da kendini gösteren 3.02 eV' deki omuz ise InGaN katmanı bant aralığı enerji değerine atfettirilebilir (şekil 4.35 (a)-(b)).

Mavi enerji bantlarının yanı sıra kırmızı, yeşil ve sarı enerji bantlarının da yer aldığı



Şekil 4.35 $In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN$ MQW LED için SPV spektrumu (a) 30 K (b) 300 K, $(PV \times E)^2$ 'ye E grafiğinin lineer bölge fit eğrisi (c) 30 K (d) 300 K

PV spektrumları hem bu çalışmanın diğer kısımlarıyla hem de literatürle uyumludur.

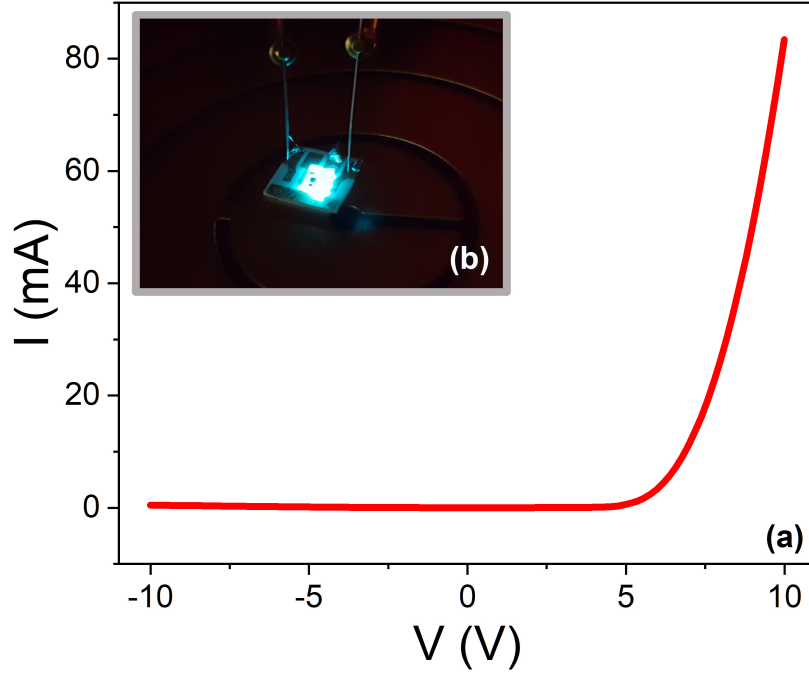
4.3 %20 InGaN/GaN MQW LED

%20 InGaN/GaN MQW LED için sıcaklığa bağlı I-V C-V, EL, PL ve PC/PV ölçümleri alınmıştır.

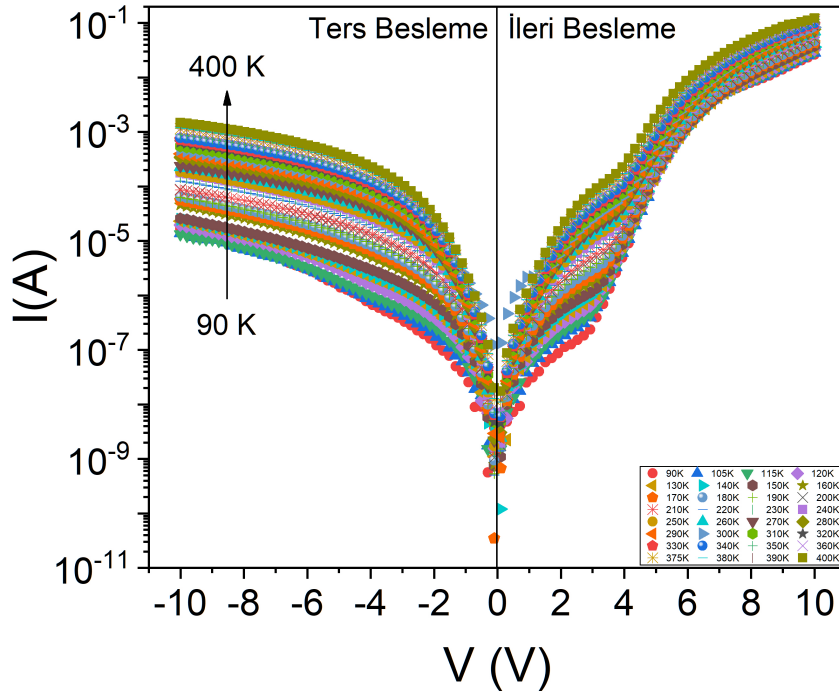
4.3.1 %20 InGaN/GaN MQW LED için I-V Ölçümleri

Şekil 4.36' da %20 InGaN MQW LED için 300 K' de karanlık ortamdaki I-V davranışı görülmektedir. Davranış ideal diyot davranışına uygundur. Davranışına göre LED'in çalışma gerilimi (threshold gerilimi) ~ 4 V değerindedir. Bu gerilim değerinden yüksek gerilimlerde LED'in ışınması gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 4.36 (b)).

Şekil 4.37' de $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED' in hem ileri hem de ters besleme durumlarında, 90 - 400 K aralığında değişen sıcaklık değerlerinde elde edilen akım-gerilim davranışı görülmektedir.

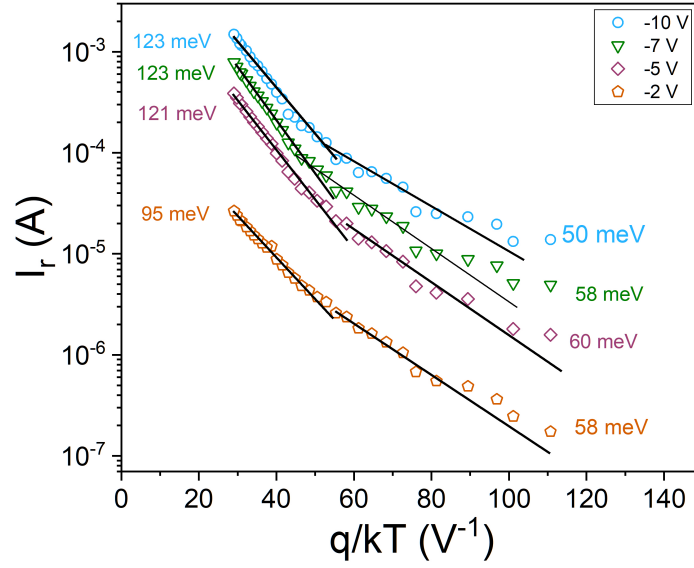


Şekil 4.36 (a) 300 K' daki $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı (b) LED' in I-V ölçümü sırasında ışınması



Şekil 4.37 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışının sıcaklığa bağlılığı

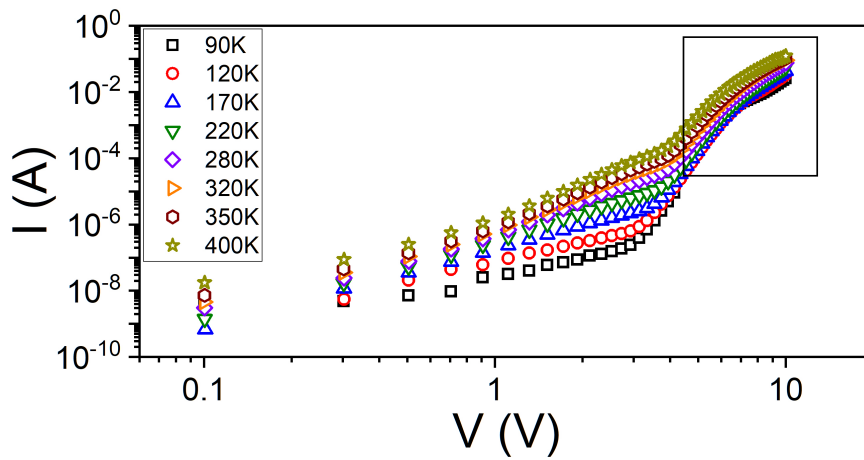
4.3.1.1 Ters Besleme Durumu



Şekil 4.38 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için sabit gerilim altında ters akımın Arrhenius eğrisi

Sabit ters besleme durumunda ters akım (I_r), sıcaklığın ters fonksiyonu olarak grafikte gösterilip eşitlik 2.9 ye göre fit edildiğinde aktivasyon enerjisi farklılığından dolayı iki süreç olduğu anlaşılır (Şekil 4.38). Bu süreçlerde aktivasyon enerjileri yüksek sıcaklıkta $\sim 100 - 120$ meV değerlerindedir. Düşük sıcaklıkta ise $\sim 50 - 60$ meV değerlerindedir.

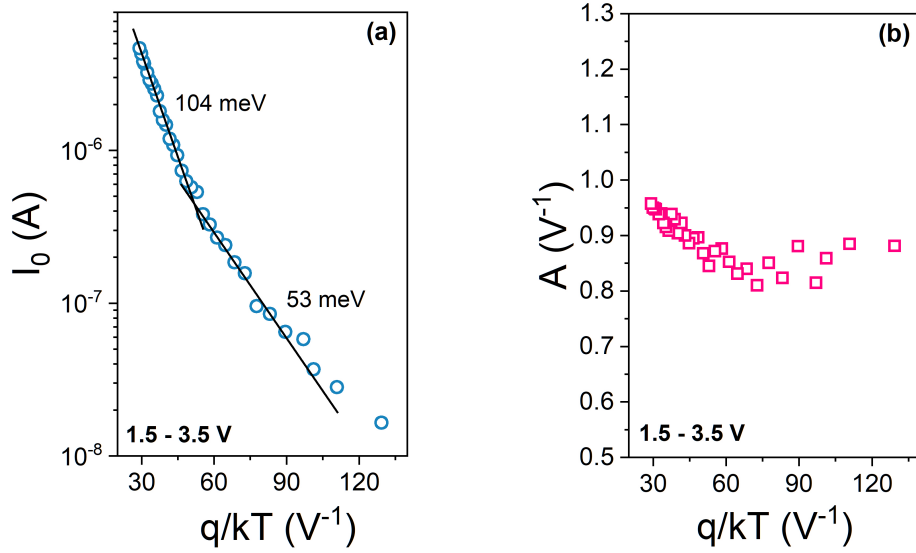
4.3.1.2 Düz Besleme Durumu



Şekil 4.39 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için ileri besleme durumunda I-V davranışı

Taşıyıcı iletim mekanizmalarının tespiti için logaritmik eksenlerle gösterilen ileri besleme I-V davranışı (şekil 4.39), denklem 2.9 ve denklem 2.10' a göre fit edildi ve $1.5 < V < 3.5$ V, $3.5 < V < 6$ V, $7.5 < V < 10$ V aralıklarında üç ayrı eğim bölgesi tespit edildi. Fit parametreleriyle E_A , I_0 ve A değerleri belirlendi.

1.5 < V < 3.5 V ileri besleme gerilimi aralığında; I_0 ve A sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi (şekil 4.40).



Şekil 4.40 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $1.5 < V < 3.5$ V aralığında (a) I_0 - q/kT (b) A - q/kT değişimi

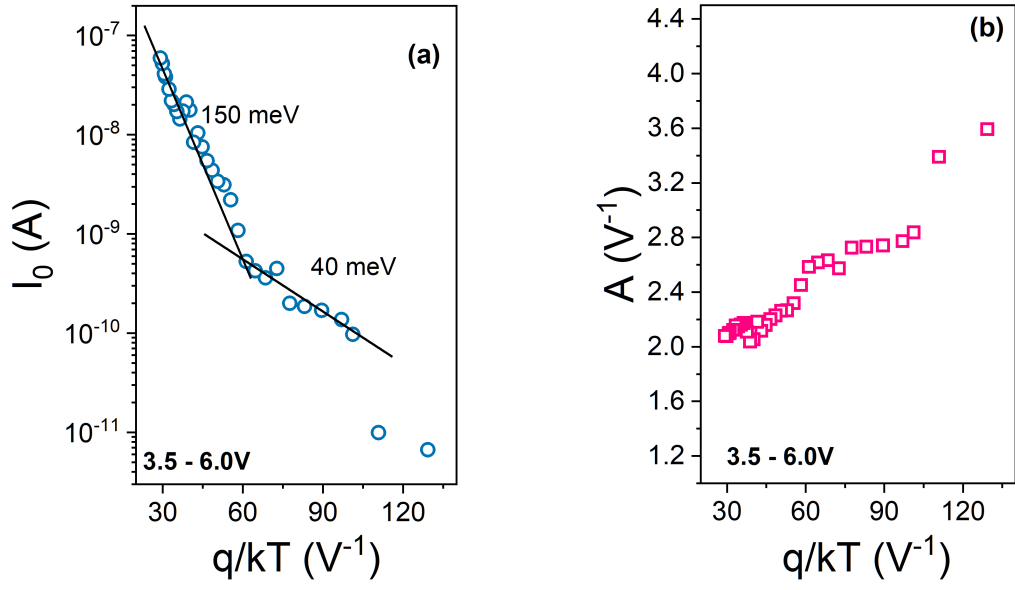
I_0 - q/kT grafiğinden aktivasyon enerjileri belirlendi. A değerleri neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır ve Eşitlik 2.11' ten yola çıkılarak $A - q/kT$ grafiğinin fit edilmesiyle belirlenen idealite faktörü beklenenden farklıdır ($\eta \gg 2$).

3.5 < V < 6 V ileri besleme gerilimi aralığında; I_0 ve A sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi (şekil 4.41).

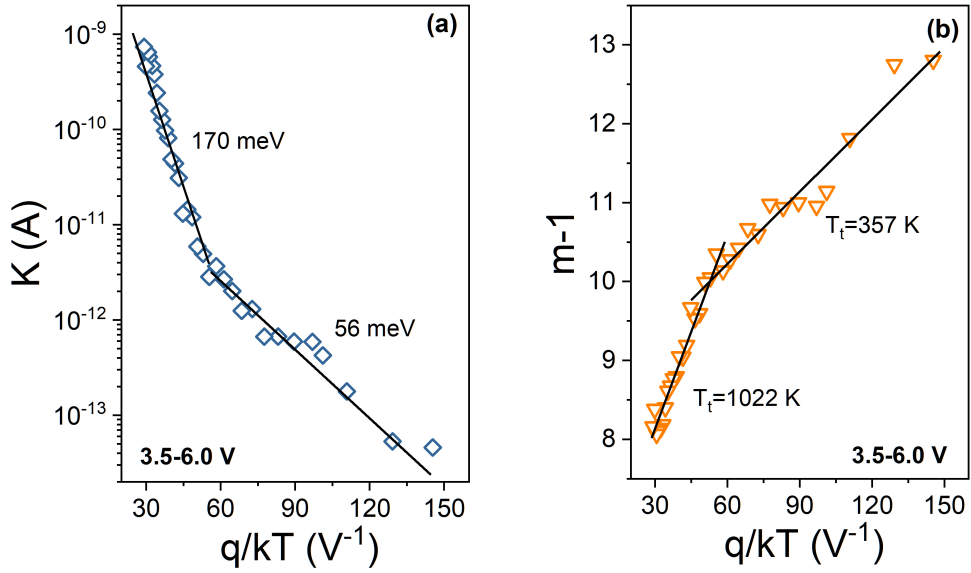
I_0 - q/kT grafiğinden aktivasyon enerjileri belirlendi. A değerleri sıcaklıkla değişmeye başlamıştır ve eşitlik 2.11' ten yola çıkılarak $A - q/kT$ grafiğinin fit edilmesiyle belirlenen idealite faktörü beklenenden farklıdır ($\eta \gg 2$).

SCLC bölgesinin eşitlik 2.16' ye göre fit edilmesiyle elde edilen K ve m değerleri şekil 4.42' de sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi.

$K - q/kT$ grafiği eşitlik 2.18' e göre fit edildi ve iki farklı E_A değeri belirlendi: 170 meV, 56 meV. Benzer şekilde $(m - 1) - 1/kT$ grafiği eşitlik 2.17' ye göre fit edildi ve T_t yüksek sıcaklıklar için 1022 K düşük sıcaklıklar için 357 K olarak belirlendi.

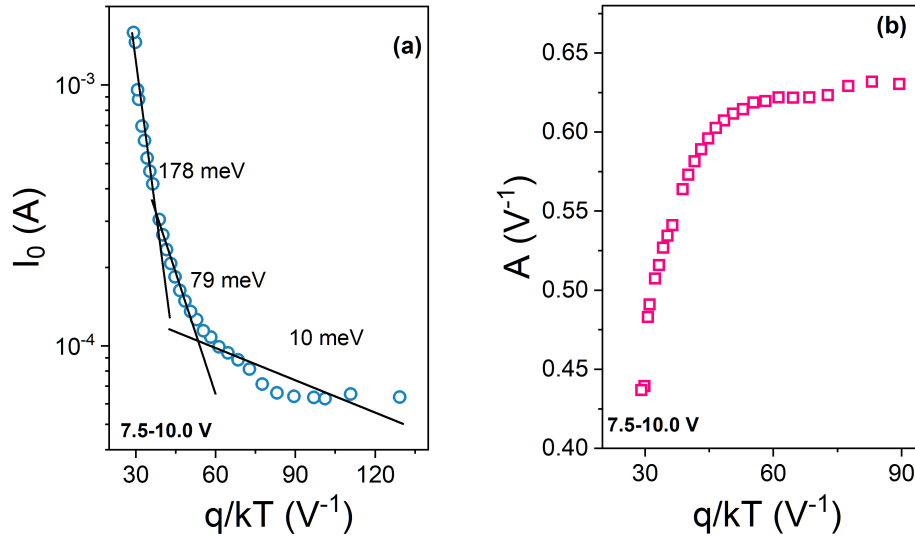


Şekil 4.41 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $3.5 < V < 6$ V aralığında (a) I_0 - q/kT (b) A - q/kT değişimi



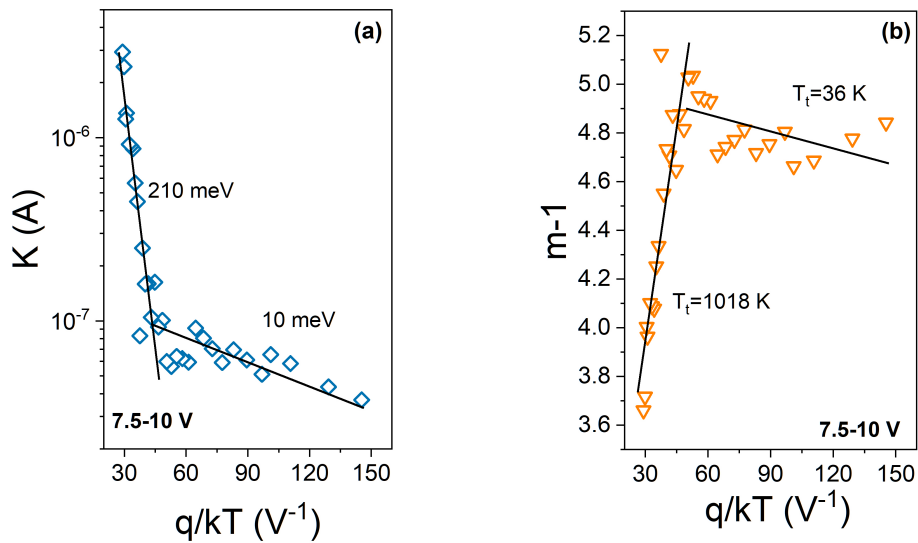
Şekil 4.42 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için $3.5 < V < 6$ V aralığında (a) K - q/kT (b) $(m-1)$ - q/kT değişimi

7.5<V<10 V ileri besleme gerilimi aralığında; I_0 ve A sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi (şekil 4.43).



Şekil 4.43 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için 7.5<V<10 V aralığında (a) I_0 -q/kT (b) A-q/kT değişimi

Bu bölgede üç farklı E_A değeri elde edildi: 10 meV, 79 meV ve 178 meV. 10 meV için sıcaklık aralığı 90-180 K iken 79 meV için orta sıcaklık aralığıdır (180 - 250 K) ve 178 meV için bu aralık 270-400 K' dır. Diğer yandan, A' nın sıcaklığa duyarsızlığı düşük sıcaklıkta olurken orta ve yüksek sıcaklık aralıklarında keskin bir değişim meydana gelmiştir.

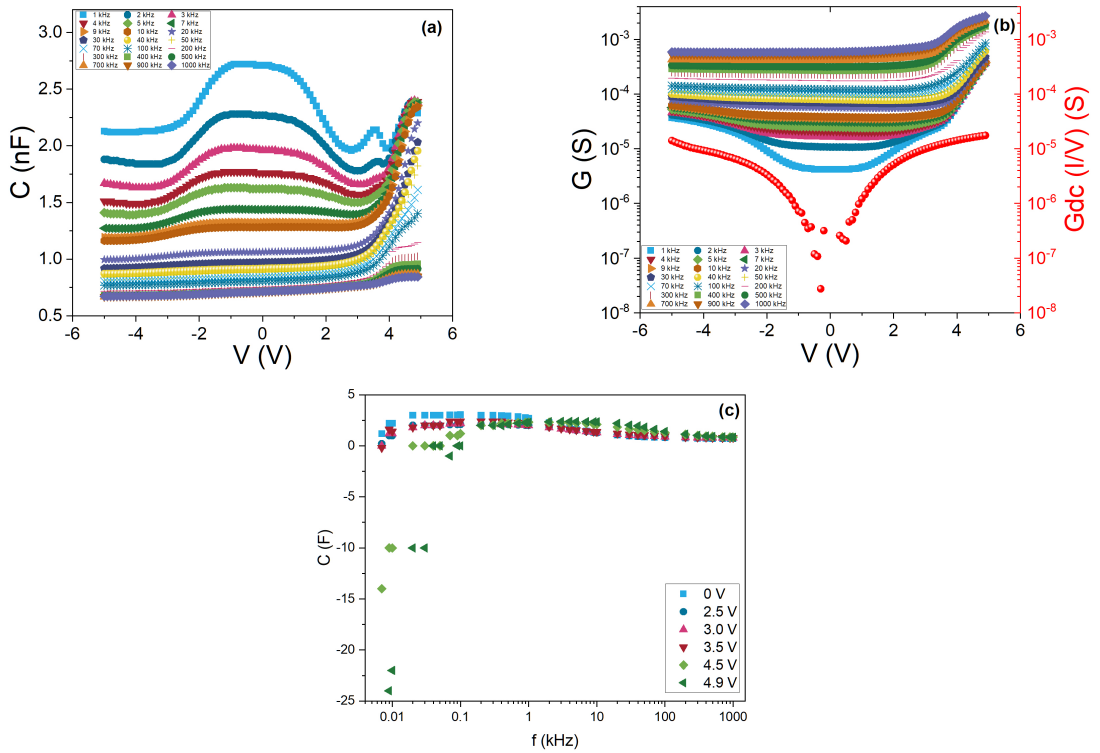


Şekil 4.44 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için 7.5<V<10 V aralığında (a) K-q/kT (b) (m-1)-q/kT değişimi

SCLC bölgesinin akım-gerilim davranışının eşitlik 2.16' ya göre fit edilmesiyle elde edilen K ve m değerleri şekil 4.44' de sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildi. $K-q/kT$ grafiği 2.18' e göre fit edildi ve E_A değerleri belirlendi. Benzer şekilde $(m-1)-1/kT$ grafiği eşitlik 2.17' ye göre fit edildi ve T_t yüksek sıcaklıklar için 1018 K düşük sıcaklıklar için 38 K olarak belirlendi.

4.3.2 %20 InGaN/GaN MQW LED için C-V Ölçümleri

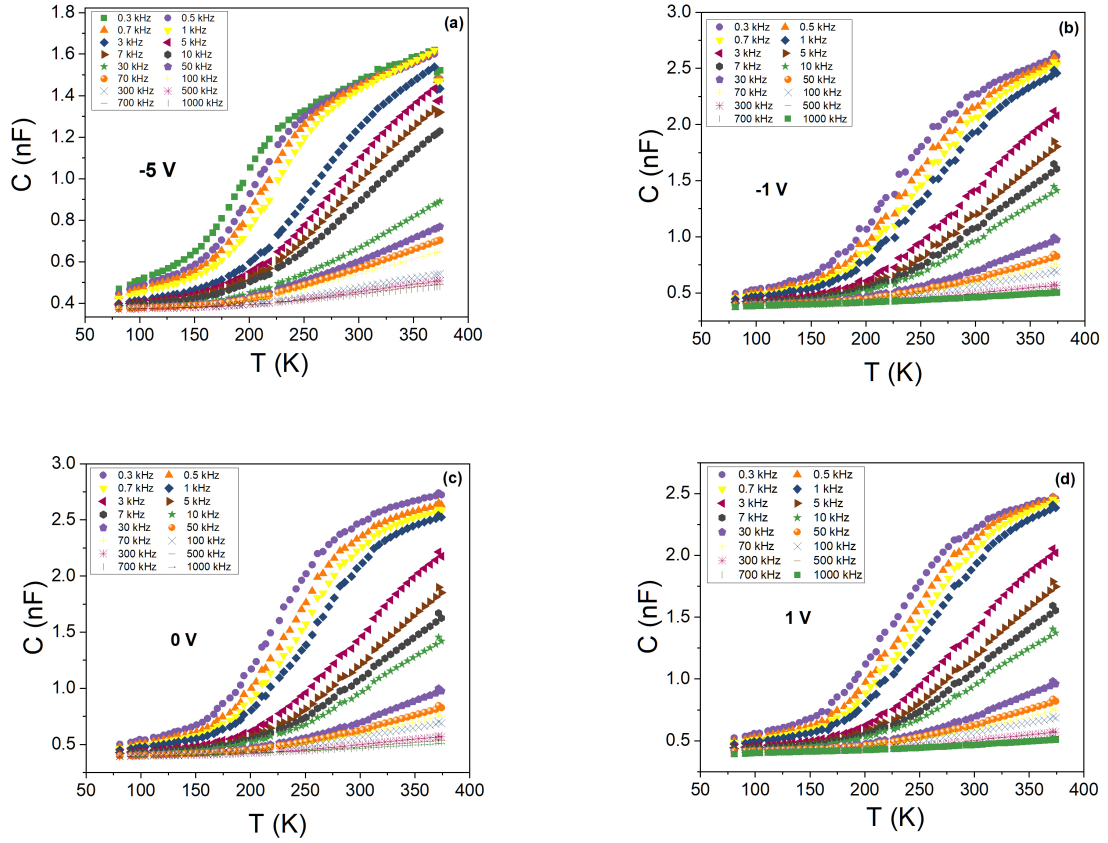
Kapasitans/iletkenlik-gerilim değişimi frekansın fonksiyonu olarak ölçülmüştür ve şekil 4.45' da gösterilmiştir.



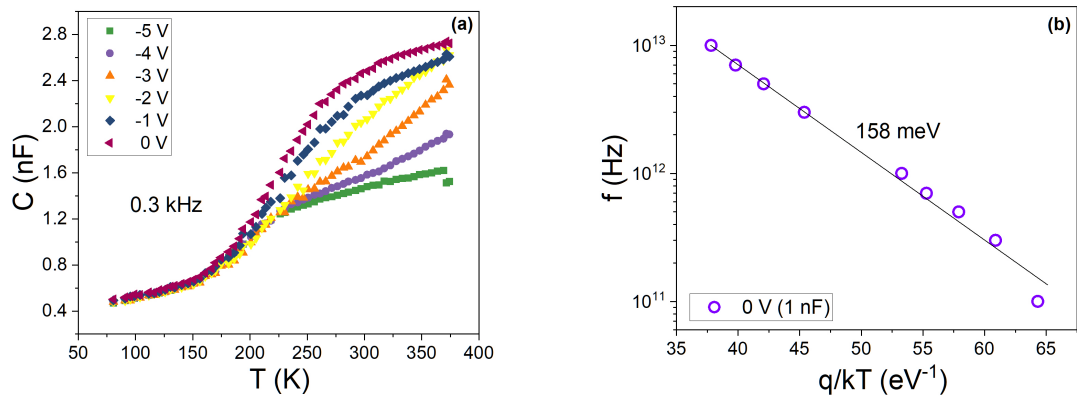
Şekil 4.45 Oda sıcaklığındaki $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) Kapasitans-gerilim davranışı (b) AC/DC iletkenlik-gerilim davranışı (c) Kapasitans-frekans davranışı

İleri beslemedeki artışla kapasitans değeri artmaya başlamış ve bu artış ölçüm sınırlarına kadar devam etmiştir. Threshold voltajı sonrasında kapasitans azalmaya başlamış düşük frekans değerlerinde negatif kapasitans değerlerine doğru yönelmiştir (şekil 4.45).

AC iletkenlik-gerilim davranışına göre (şekil 4.45 (b)) ileri besleme artışıyla iletkenlik artmaktadır ve treshhold voltajından sonra eğimin de değişmesiyle iletim mekanizmasının değiştiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.46 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) -5 V (b) -1 V (c) 0 V (d) 1 V gerilim altında C-T davranışı



Şekil 4.47 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) Seçilen kapasitansın 0.3 kHz değerinde sıcaklığa bağlı davranışı (b) Sabit kapasitans değerlerinde frekans-sıcaklık ilişkisi

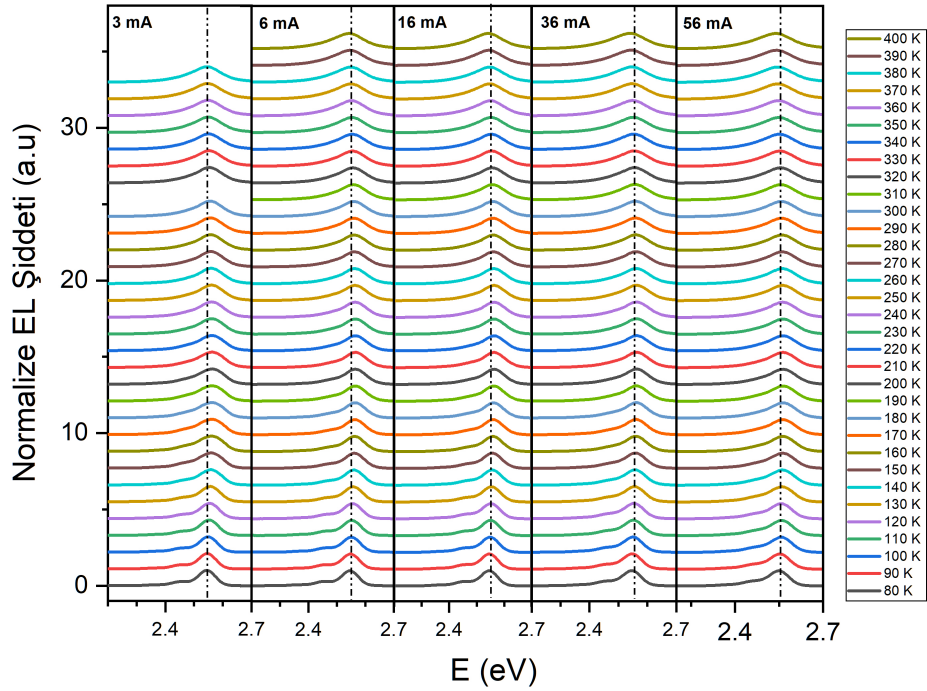
C - log f davranışının verildiği şekil 4.45 (c)' de görüldüğü gibi yüksek frekans değerlerinde kapasitans frekanstan bağımsızdır. Bu sabit değer geometrik kapasitansa (C_0) karşılık gelir (0.58 nF). Ayrıca gerilimin 4 V üzerindeki değerlerinde negatif kapasitans olarak da bilinen indüktif etki başlar ve gerilim değeri arttıkça bu etkinin başlangıç değeri yüksek frekanslara doğru kayar.

Değişen gerilimler uygulanmasıyla frekansın fonksiyonu olarak C-T taraması yapılmış ve şekil 4.46 ile gösterilmiştir. Tüm gerilim değerlerinde kapasitansın azalan frekansla arttığı açıkça görülmektedir.

C-T ölçümünde özel bir kapasitans değerini kullanarak (1 nF) Arrhenius analizleri yapıldığında aktivasyon enerjisi 158 meV olarak belirlendi (şekil 4.47 (b)).

4.3.3 %20 InGa_{0.8}N/GaN MQW LED için EL Ölçümleri

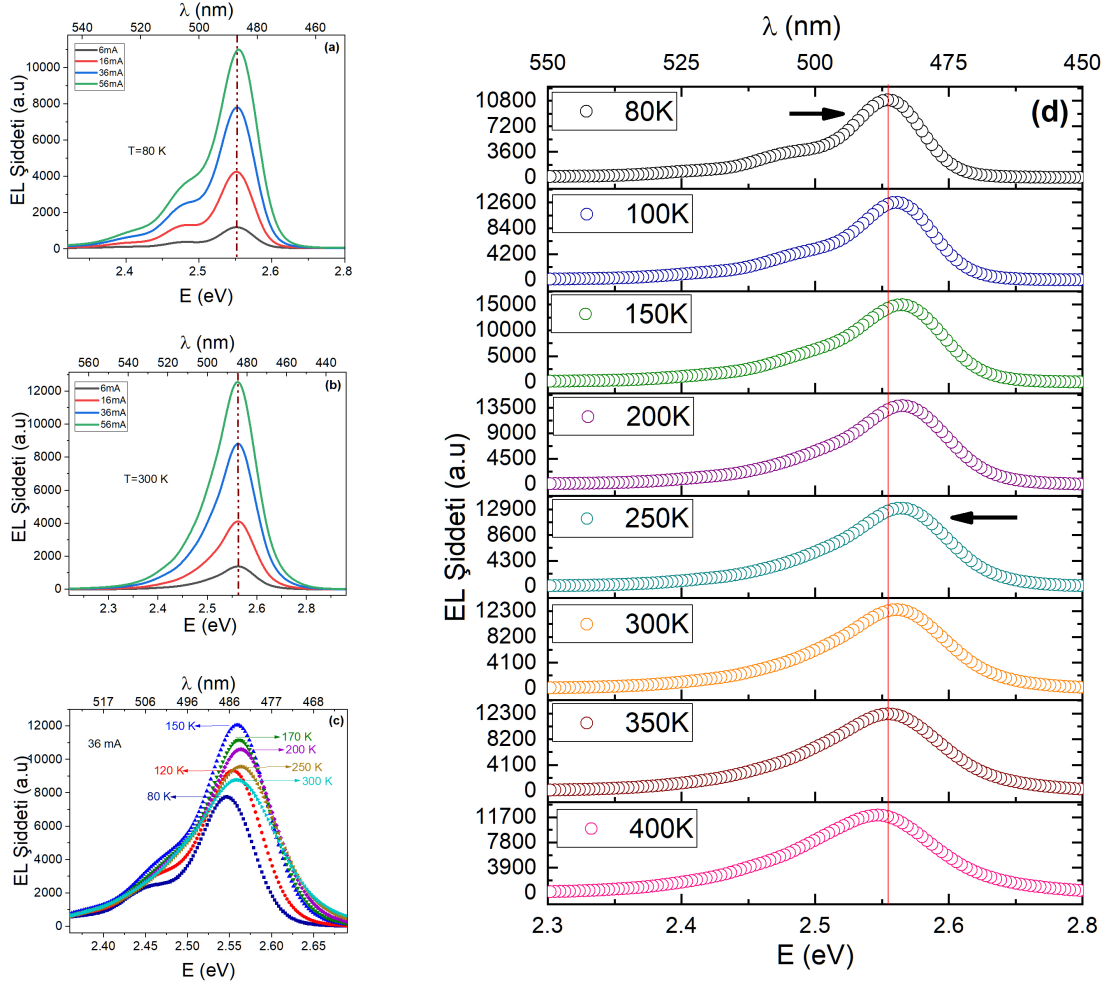
Enjeksiyon akımının fonksiyonu olan 80-400 K sıcaklık aralığında alınan EL ölçüm sonuçları şekil 4.48' de verilmiştir.



Şekil 4.48 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için akımın fonksiyonu olarak ölçülen 80-400 K sıcaklık aralığındaki EL spektrumları

Tüm akım enjeksiyon durumlarında düşük sıcaklıklarda (80-170 K) 2.55 eV ve 2.45 eV değerlerinde iki lüminesans merkezi görülür. Sıcaklık arttığında 2.55 eV' deki

tepe noktası yüksek enerjilere doğru kayar (maviye) ve 2.45 eV’deki tepe noktası görünürlüğünü kaybeder. 250 K üzerindeki sıcaklık değerleriyle 2.55 eV’deki tepe pozisyonu düşük enerjilere (kırmızıya) doğru kayar (şekil 4.48 ve şekil 4.49).



Şekil 4.49 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (a) $T=80\text{ K}$ ’da (b) $T=300\text{ K}$ ’da enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak gösterilen (c) 36 mA enjeksiyon akımı uygulanmasıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen EL spektrumları (d) 56 mA enjeksiyon akımında sıcaklıkla enerjinin kayması

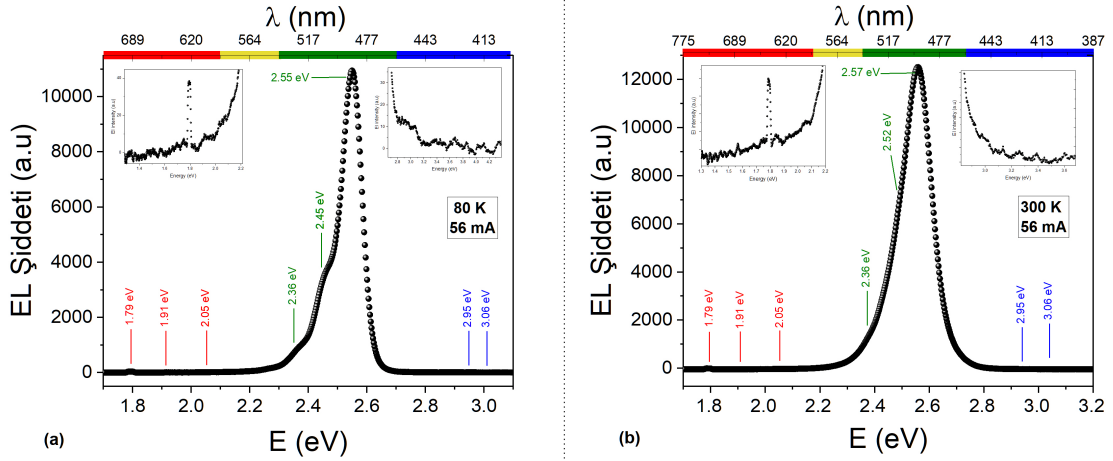
Aygıttan çıkan ışık şiddeti seçilen iki sıcaklık için (80 K ve 300 K) enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak şekil 4.49 (a)-(b)’de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan akım ile ışıma şiddetinin arttığı görülmüştür.

Ayrıca 36 mA sabit enjeksiyon akımı değerinde sıcaklık değişimiyle spektrum değişiminin gösterildiği şekil 4.49 (c) ile de 170 K sıcaklığa kadar artan sıcaklıkla ışıma şiddetinin arttığı, $T > 170\text{ K}$ için artan sıcaklıkla azaldığı gözlenmiştir.

Şekil 4.49 (d) enerjideki kaymayı göstermektedir. 80 K ile başlayan ölçümde spektrumun tepe noktası kırmızı çizgi ile işaretlenmiştir. Sıcaklık artmasıyla tepe noktası yüksek enerjilere doğru kayar ve bu kayma 250 K’ya kadar devam eder. 250

K üzerindeki sıcaklıklarda tepe noktası daha düşük enerjilere doğru kayar.

Spektrumda mevcut olan enerji seviyelerini tespit etmek amacıyla spektrum tüm sıcaklıklar için bilgisayar programı aracılığıyla Gauss tepelerine ayrılmıştır ve 56 mA akım enjeksiyonu durumundaki tüm ışınım merkezlerine karşılık gelen enerji değerleri, 80 K ve 300 K' da EL spektrumunda oklarla gösterilmiştir (şekil 4.50). Taranan geniş sıcaklık aralığında, emisyon merkezlerinin sayısı değişmemiştir. Tepe enerji değerleri kırmızı (1.8-2.0 eV)/yeşil(2.4-2.6 eV)/mavi(2.8-3.1 eV) bantlar ile örtüşmektedir.

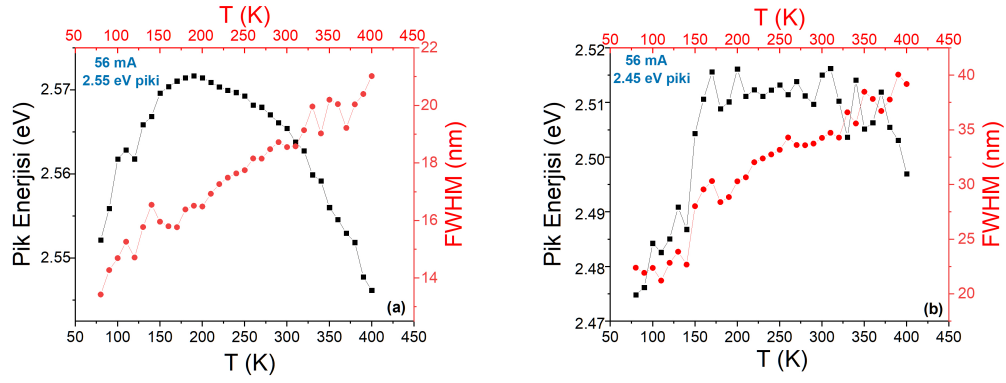


Şekil 4.50 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=80$ K'da (b) $T=300$ K'da EL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)

300 K' da spektrumda 1.79 eV, 1.91 eV, 2.05 eV, 2.36, 2.45 eV, 2.55 eV, 2.95 eV ve 3.06 eV enerji düzeyleri tespit edilmiştir. Beklenmeyen kırmızı ve mavi bantların yanı sıra, 2,55 eV ve 2,45 eV tepe enerjideki yeşil emisyonlar, diğer örneklerdeki duruma benzer şekilde InGaN katmanının katkı oranındaki sapmalarla ilişkilidir ve eşitlik 2.1 ile de destelenir.

%20 katkılı InGaN tabakasına atfettirilen 2.55 eV ve 2.48 eV merkezlerinin tepe enerjisi ve spektrumun çizgi genişliği (FWHM) sabit enjeksiyon akımı değerinde (56 mA) sıcaklığın fonksiyonu olarak şekil 4.51' de gösterildi.

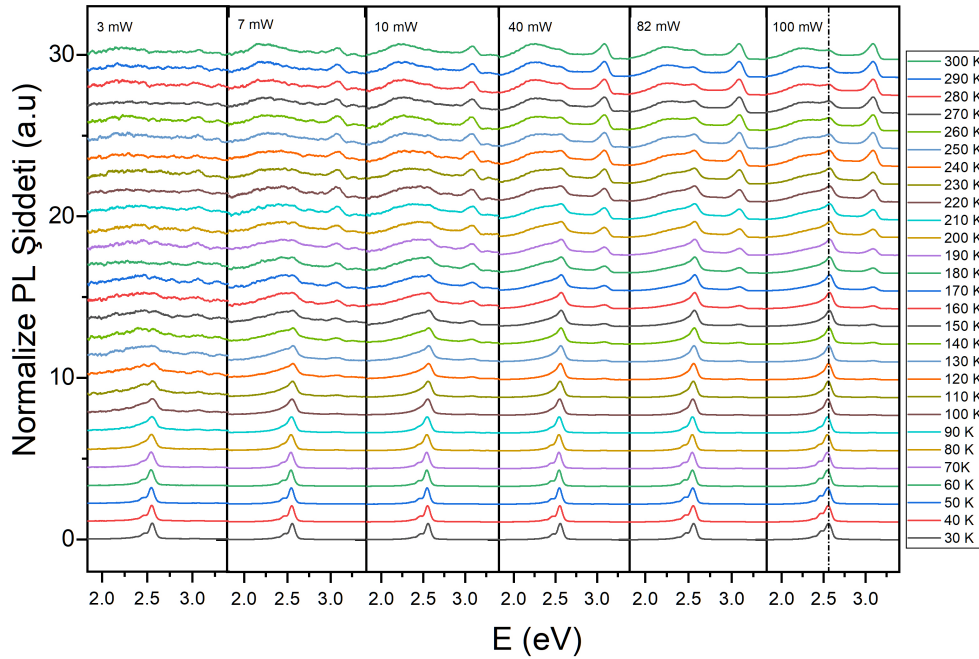
Enerjilerin sıcaklıkla maviye kayması ($T < 200$ K) bant doldurma etkisiyle hoping mekanizmasının etkin olduğunun göstergesidir [31, 108, 110–113, 116]. Diğer yandan spektrumdaki kırmızıya kaymanın ($T > 200$ K) sebebi nokta kusurlardan kaynaklı ışımasız yeniden birleşme merkezlerinin sıcaklıkla aktive olmasıdır.



Şekil 4.51 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED'in seçilen 56 mA enjeksiyon akımındaki EL spektrumundan (a) 2.55 eV (b) 2.45 eV' deki tepe için tepe enerjisinin sıcaklıkla değişimi

4.3.4 %20 InGaN/GaN MQW LED için PL Ölçümleri

Gücün fonksiyonu olan 30-300 K sıcaklık aralığında alınan PL ölçüm sonuçları şekil 4.52' de verilmiştir.

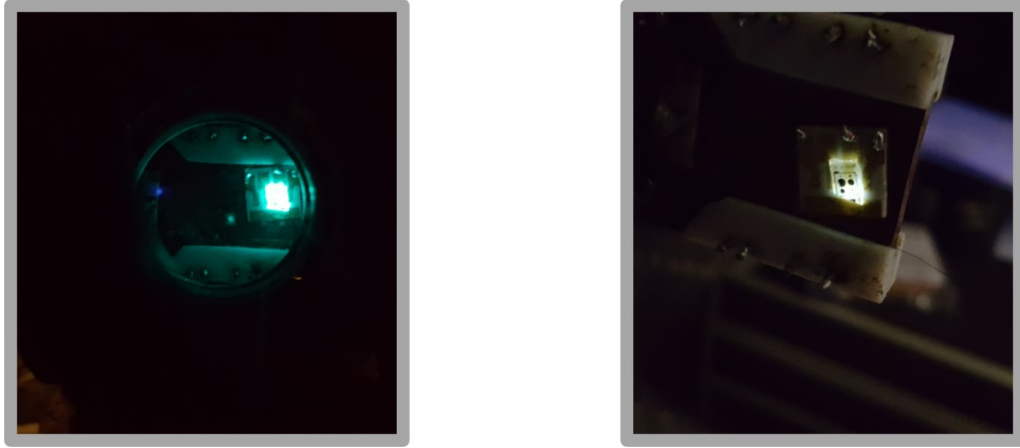


Şekil 4.52 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları

Aygıt üzerine düşen ışığın gücü 3 mW ve 7 mW iken düşük sıcaklıklarda PL sinyali görülür ancak oda sıcaklığına doğru bu sinyal spektrometre sınırlarına doğru zayıflar. Orta ve yüksek güçlü ışık altında (10 mW, 40 mW, 82 mW ve 100 mW) ölçüm skalasındaki düşük sıcaklıklarda ~ 2.5 eV civarında bir luminesans merkezi görülür.

Ölçüm boyunca bu merkez görünürlüğünü korusa da artan sıcaklıkla ışıma gücünün azalmasından dolayı ~ 2.0 eV civarındaki yeni bir merkez baskın hale gelmiştir. Öte yandan ölçüm sınırına doğru (3.1 eV) başka bir merkezin görünürlüğü de orta sıcaklıklardan itibaren artmaya başlamıştır.

30 K ile başlanan ölçümde aygıtın %20 In konsantrasyonlu yapı için beklenene uygun şekilde yeşil renkte ışıma yaptığı ancak aygıt oda sıcaklığına doğru ısıtıldığında rengin sarıya kaydığı görülmüştür (şekil 4.53).



Şekil 4.53 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED aygıtın $T=30$ K' da (solda) ve $T=300$ K' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması

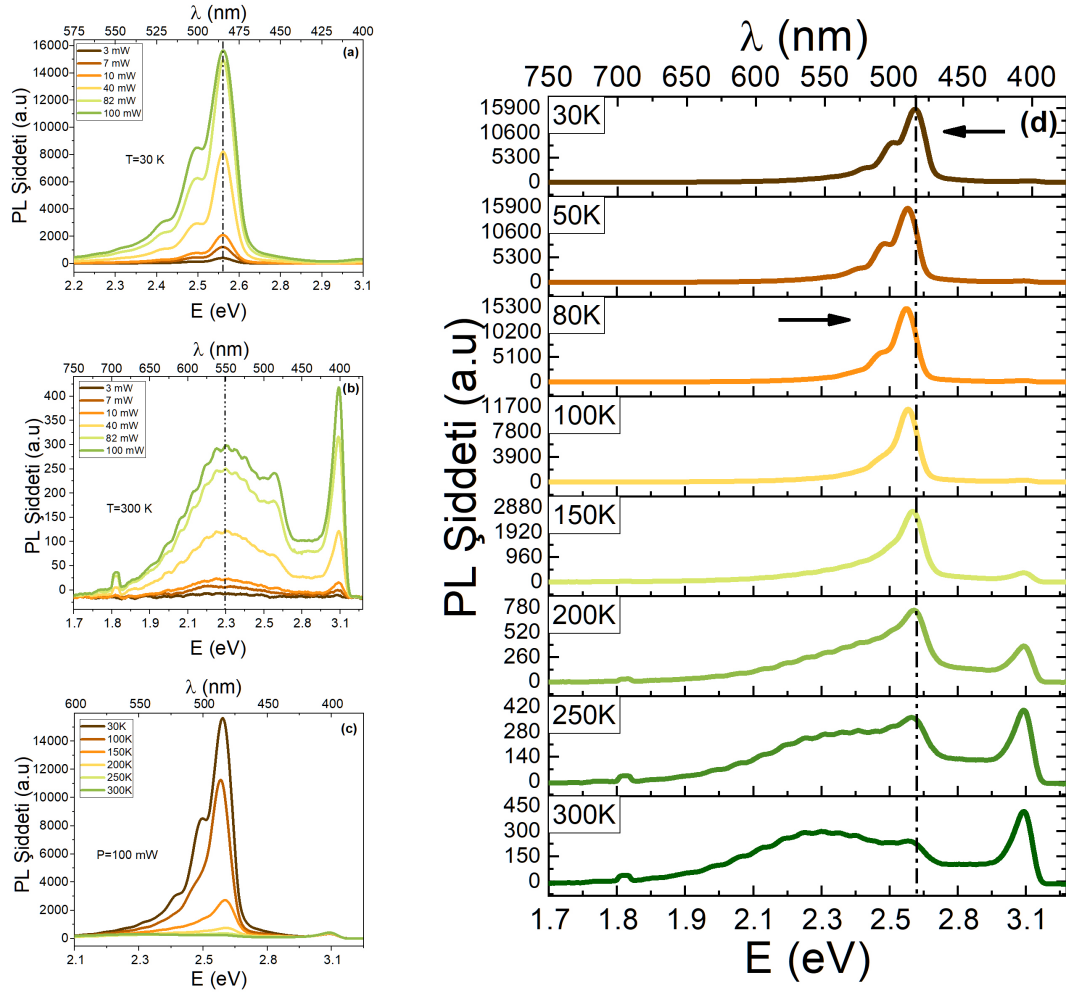
Aygıttan çıkan ışık şiddeti aygıt üzerine düşen ışığın gücünün fonksiyonu olarak şekil 4.54 (a)-(b)' de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan güç ile ışıma şiddetinin arttığı görülmüştür. Ayrıca sabit güç değerinde sıcaklık değişimiyle spektrumun değişiminin gösterildiği şekil 4.54 (c) ile de sıcaklık arttıkça ışıma şiddetinin yüksek oranda azaldığı gösterilmiştir.

Şekil 4.53' de görülen 30 K' da güçlü ve yeşil olan ışımanın 300 K da zayıf ve sarımsı-yeşile dönüşmesi olayı şekil 4.54 (a)-(b)' ile de desteklenir niteliktedir çünkü 300 K sıcaklıktaki spektrumda (şekil 4.54 (b)) 2.5 eV civarındaki tepenin ışıma şiddeti 30 K sıcaklıktakine göre (şekil 4.54 (a)) 10 kattan fazla azalmıştır. Başka bir deyişle 30 K' da baskın olan 2.5 eV' deki tepe (yeşil) iken 300 K' da 2.2 eV civarındaki tepe (sarımsı-yeşil) baskın hale gelmiştir.

Şekil 4.54 (d) enerjideki kaymayı göstermektedir. 30 K ile başlayan ölçümde spektrumun tepe noktası siyah çizgi ile işaretlenmiştir. Sıcaklık artmasıyla tepe noktası düşük enerjilere doğru kayar ve bu kayma 80 K' ya kadar devam eder. 80 K üzerindeki sıcaklıklarda tepe noktası daha yüksek enerjilere doğru kayar.

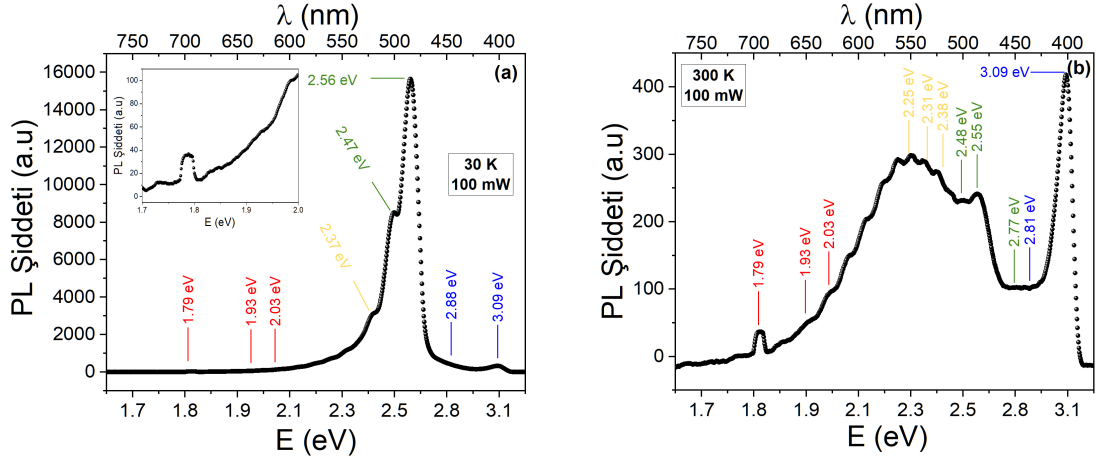
Spektrumda mevcut olan enerji seviyelerini tespit etmek amacıyla spektrum tüm sıcaklıklar için Gauss tepelerine ayrılmıştır ve tüm ışıma merkezlerine karşılık gelen

enerji değerleri, 30 K ve 300 K' da PL spektrumunda oklarla gösterilmiştir (şekil 4.55).



Şekil 4.54 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (a) T=30 K' da (b) T=300 K' da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) 100 mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları (d) 100 mW gücünde sıcaklıkla enerjinin kayması

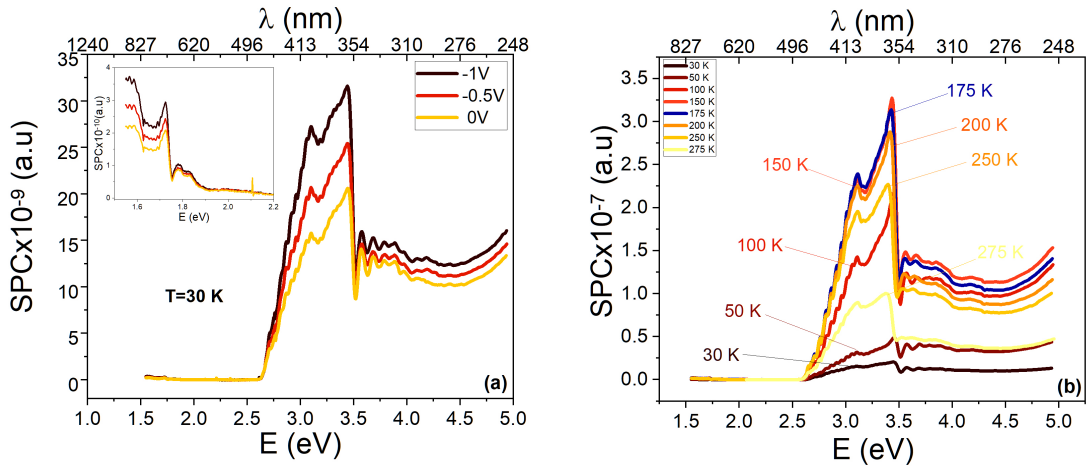
Taranan geniş sıcaklık aralığında, InGaN MQW katmanlarından gelen ışımaların güçleri büyük oranda azalmıştır. Dolayısıyla öne çıkan ışıma merkezleri değişmiştir. Tepe enerji değerleri kırmızı (1.8-2.0 eV)/sarı (2.2-2.4 eV)/yeşil (2.4-2.6 eV)/mavi (2.8-3.1 eV) bantlar ile örtüşmektedir. 30 K' da spektrumda 1.79 eV, 1.93 eV, 2.03 eV, 2.37 eV, 2.47 eV, 2.56 eV, 2.59 eV, 2.88 eV ve 3.09 eV enerji düzeyleri tespit edilmiştir. Beklenmeyen kırmızı ve mavi bantların yanı sıra, 2.59 eV, 2.56 eV ve 2.47 eV tepe enerjideki yeşil emisyonlar, diğer örneklerdeki duruma ve EL ölçümlerindeki duruma benzer şekilde InGaN katmanının katkı oranındaki sapmalarla ilişkilidir ve eşitlik 2.1 ile de destelenir.



Şekil 4.55 $In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30$ K'da (b) $T=300$ K'da PL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)

4.3.5 %20 InGaN/GaN MQW LED için PC/PV Ölçümleri

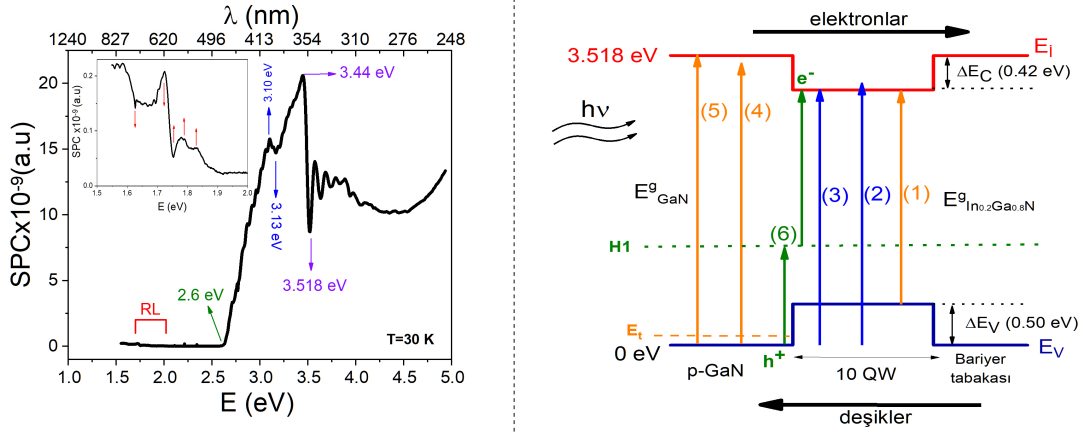
30 K'da uygulanan gerilimin değişmesiyle elde edilen SPC spektrumu şekil 4.56 (a)'da ve 0 V gerilimde sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edilen SPC spektrumu şekil 4.56 (b)'de gösterildi.



Şekil 4.56 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (a) $T=30$ K'da gerilimin fonksiyonu olarak gösterilen (b) 0 V gerilimde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen SPC spektrumları

Artan ters besleme ile spektrumun şiddetinin arttığı görülmüştür. Ayrıca sabit gerilim değerinde sıcaklık değişimiyle gösterilen spektrumda EL spektrumuna benzer şekilde 170 K sıcaklığa kadar artan sıcaklıkla spektrumun şiddetinin arttığı, $T > 170$ K için artan sıcaklıkla azaldığı gözlenmiştir.

Spektrumdaki tepe ve çukur değerleri ile olası geçişler belirlenerek şekil 4.57 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.57 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ MQW LED için (solda) $T=30\text{ K}$ 'da SPC spektrumu ve spektrumda mevcut olan enerji seviyeleri, (sağda) (1) ve (5) banttı banta geçişler, (6) banttı H1 tuzağına geçişler, (4) GaN için fonon replikası, (2) GaN'nin değerklik bandından QW'deki bir bağı enerji seviyesine geçişler

Spektrumda %20 In içerkli InGaN için 2.6 eV ve GaN için 3.518 eV gibi bant aralığı [102, 104, 108, 109] ile ilgili geçişlerin yanı sıra, 30 K'da 3.44 eV, 3.13 eV ve 3.10 eV geçişleri de görölmektedir. 3.44 eV'deki tepe, GaN için bant aralığından 80 meV ile ayrılmıştır ve GaN'nin bir boyuna optik (LO) foton enerjisidir. 3.1 eV'deki diğr tepe ise, GaN'nin valans bandından InGaN'nin iletim bandına bir geçişi temsil eder ve şekil 4.57'te süreç (3) olarak belirtilir. 3,13 eV'lık 30 meV daha fazla değr, InGaN iletim bandının üzerinde bir bağı enerji değrini gösterir [72, 117, 118].

Şekil 4.57' te sağ tarafta verilen şematik enerji bant diyagramları, InGaN ve GaN katmanları arasındaki iletim ve valans bandındaki bant ofsetleri ile birlikte yapıdaki tüm geçiş sürecini listeler. Açıkça göröldüğü gibi, mevcut örnek için ΔE_C 0.42 eV, ΔE_V ise 0.50 eV olarak belirlenir [43, 105, 106].

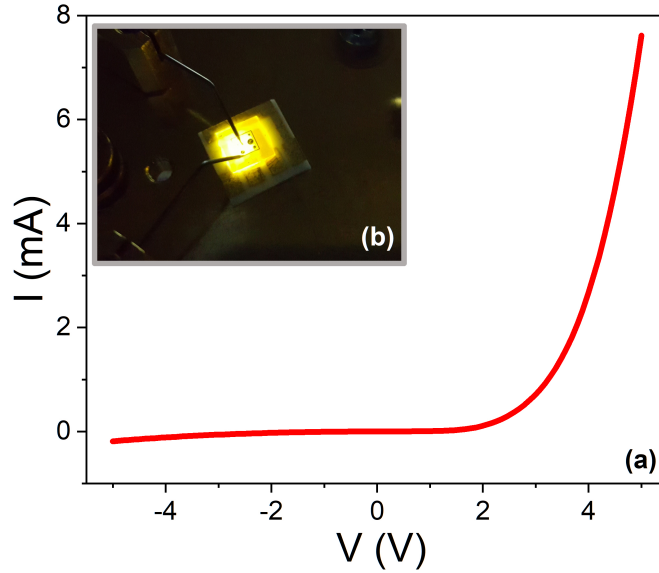
Şekil 4.57 iç grafiğinde göröldüğü üzere mevcut p-i-n LED aygıtta 1.6-1.9 eV civarında SPC sinyalinin başlangıcı ile ilişkili omuz EL ve PL spektrumlarında da olduğı gibi kırmızı lüminesans bandına karşılık gelir [119]. Bu bant InGaN'nin iletim bandından elektronların, pin yapısındaki p ve/veya i GaN katmanı içinde 1 eV civarında bir tuzak seviyesine [102–104, 108] geri yayılması veya deşiklerin önce H1 tuzağı tarafından yakalanması ve ardından InGaN katmanının iletim bandına uyarılmasıdır. SPC absorpsiyon konusuna dayandığından, ikinci senaryo daha uygundur ve şekil 4.57' de süreç (6) olarak belirtilmiştir.

4.4 %30 InGaN/GaN MQW LED

%30 InGaN/GaN MQW LED için sıcaklığa bağlı I-V C-V, EL, PL ve PC/PV ölçümleri alınmıştır.

4.4.1 %30 InGaN/GaN MQW LED için I-V Ölçümleri

Şekil 4.58' de %30 InGaN MQW LED için 300 K' de karanlık ortamdaki I-V davranışı görülmektedir. Davranış ideal diyot davranışına uygundur. Davranışına göre LED'in çalışma gerilimi (threshold gerilimi) ~2.5 V değerindedir. Bu gerilim değerinden yüksek gerilimlerde LED'in ışıması gözle görünür hale gelmiştir (Şekil 4.58 (b)).



Şekil 4.58 (a) 300 K' daki $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ MQW LED için karanlık ortamda ileri ve ters besleme durumlarındaki I-V davranışı **(b)** LED'in I-V ölçümü sırasında ışıması

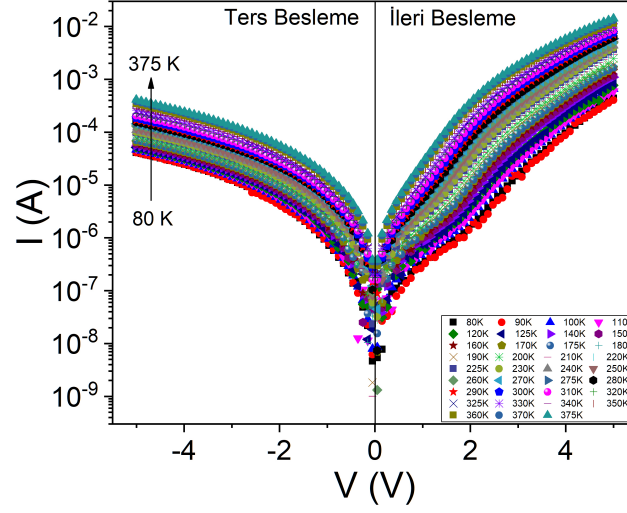
Şekil 4.59' da $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED' in hem düz hem de ters besleme durumlarında, değişen sıcaklık değerlerinde elde edilen akım-gerilim davranışı görülmektedir.

Taşıyıcı iletim mekanizmalarının tespiti için Şekil 4.59, denklem 2.9 ve denklem 2.10' ye göre fit edildi. Fit parametreleriyle E_A , I_0 ve A değerleri belirlendi [11].

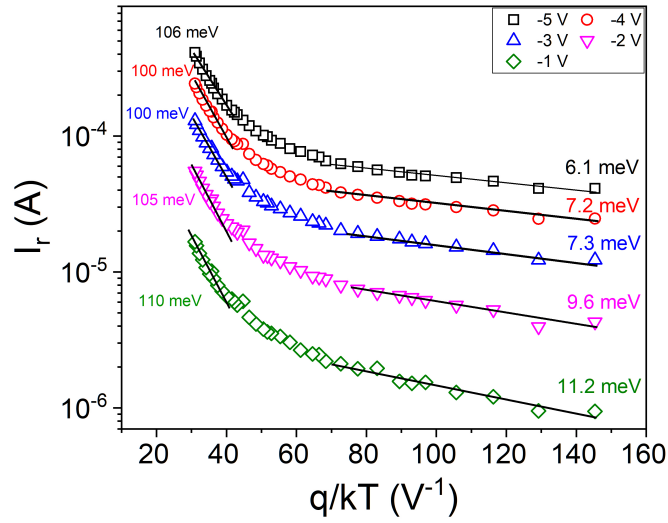
4.4.1.1 Ters Besleme Durumu

Sabit ters besleme durumunda ters akım (I_r), sıcaklığın ters fonksiyonu olarak grafikte gösterilip eşitlik 2.9 ye göre fit edildiğinde aktivasyon enerjisi farklılığından dolayı

iki süreç olduğu anlaşılır (Şekil 4.60). Bu süreçlerde aktivasyon enerjileri yüksek sıcaklıkta ~ 110 meV ve düşük sıcaklıkta ~ 10 meV değerlerindedir.



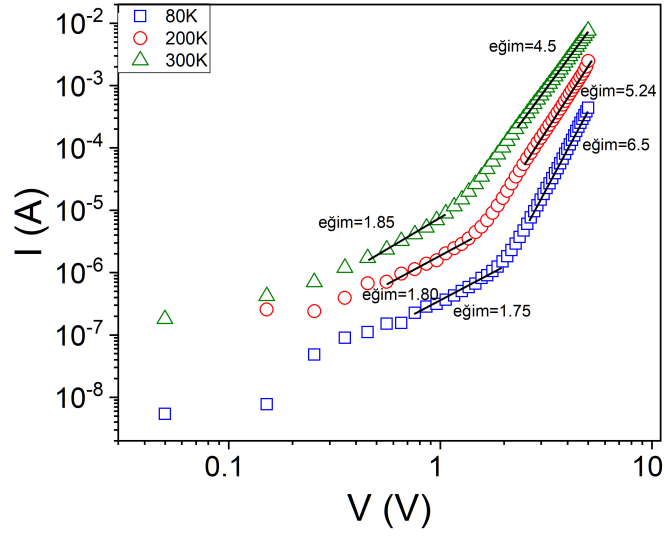
Şekil 4.59 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için karanlık ortamda düz ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışının sıcaklığa bağlılığı



Şekil 4.60 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için sabit gerilim altında ters akımın Arrhenius eğrisi

4.4.1.2 Düz Besleme Durumu

Düz besleme durumunda I-V davranışı Şekil 4.61' de gösterilmiştir. Davranıştan yapıda $1 < V < 2V$ ve $3.5 < V < 5V$ düz besleme gerilim aralıkları için iki ayrı iletim mekanizmasının mevcut olduğu görülür.



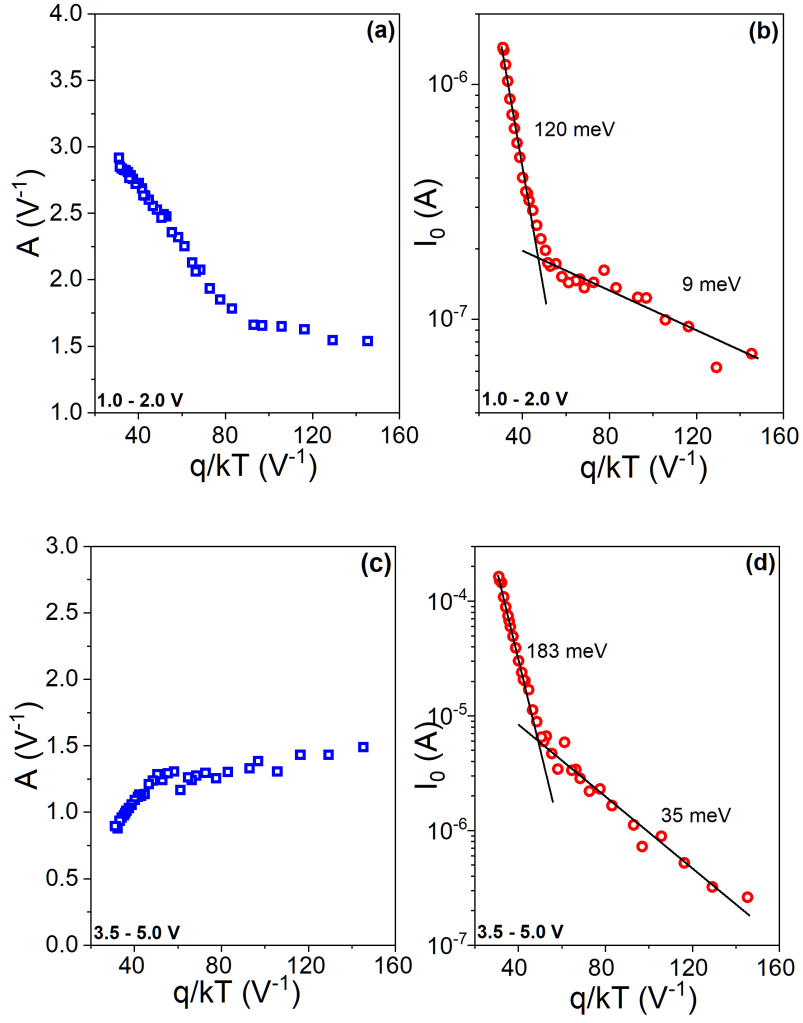
Şekil 4.61 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için düz besleme gerilimi altında akım-gerilim davranışı

1<V<2V düz besleme gerilimi aralığında; I_0 ve A sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterildiğinde sonuçlar beklenenden farklı bir idealite faktörü (η) değerini (şekil 4.62 (a)) ve ters besleme durumu ile aynı aktivasyon enerjilerini (şekil 4.62 (b)) gösterdi. İdealite faktörü η , denklem 2.11' ten yola çıkılarak $A - q/kT$ grafiğinin fit edilmesiyle belirlendi.

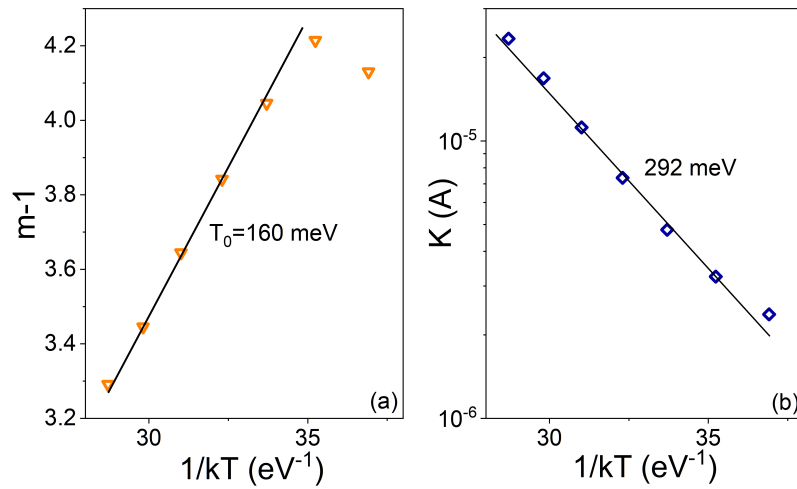
LED yapıda ısımanın da başladığı SCLC bölgesine karşılık gelen **3.5<V<5V besleme aralığında;** aynı süreç daha büyük E_A değerlerinin varlığıyla gerçekleşir (şekil 4.62 (c) ve (d)).

SCLC bölgesinde akım-gerilim davranışı eşitlik 2.18' ye göre dir. SCLC bölgesinin bu eşitliğe göre fit edilmesiyle elde edilen K ve m değerlerinden şekil 4.63 elde edildi. $(m-1) - 1/kT$ grafiği eşitlik 2.17' a göre fit edilirse eğimi doğrudan T_0 değerini verir. Benzer şekilde $K - q/kT$ grafiğinin eğimi de Δ değerini verir.

Literatürdeki GaN tabanlı p-n ve p-i-n eklemlı yapılarıdakine benzer şekilde [42, 120–123] beklenenden farklı bir idealite faktörü için E_A değerleri tünelleme tipi iletkenlik mekanizmasına işaret eder. Tünelleme tipinde elde edilen aktivasyon enerjisi InGaN/GaN tabanlı MQW LED yapıda oksijen kirlilikleri, nitrojen boşlukları, Mg-H kompleksleri ve bariyer-kuyu ara yüzeyindeki örgü uyumsuzluklarından ortaya çıkan yapısal kusurlardan kaynaklanan karakteristik bir kusur merkezine işaret edebilir. Etkin kütle elektronlarını kullanarak, bariyer enerjisi 120-220 meV aralığında bulunmuştur [42, 124, 125]. Bu değer boşluklar için 50-80 meV aralığındadır [42].



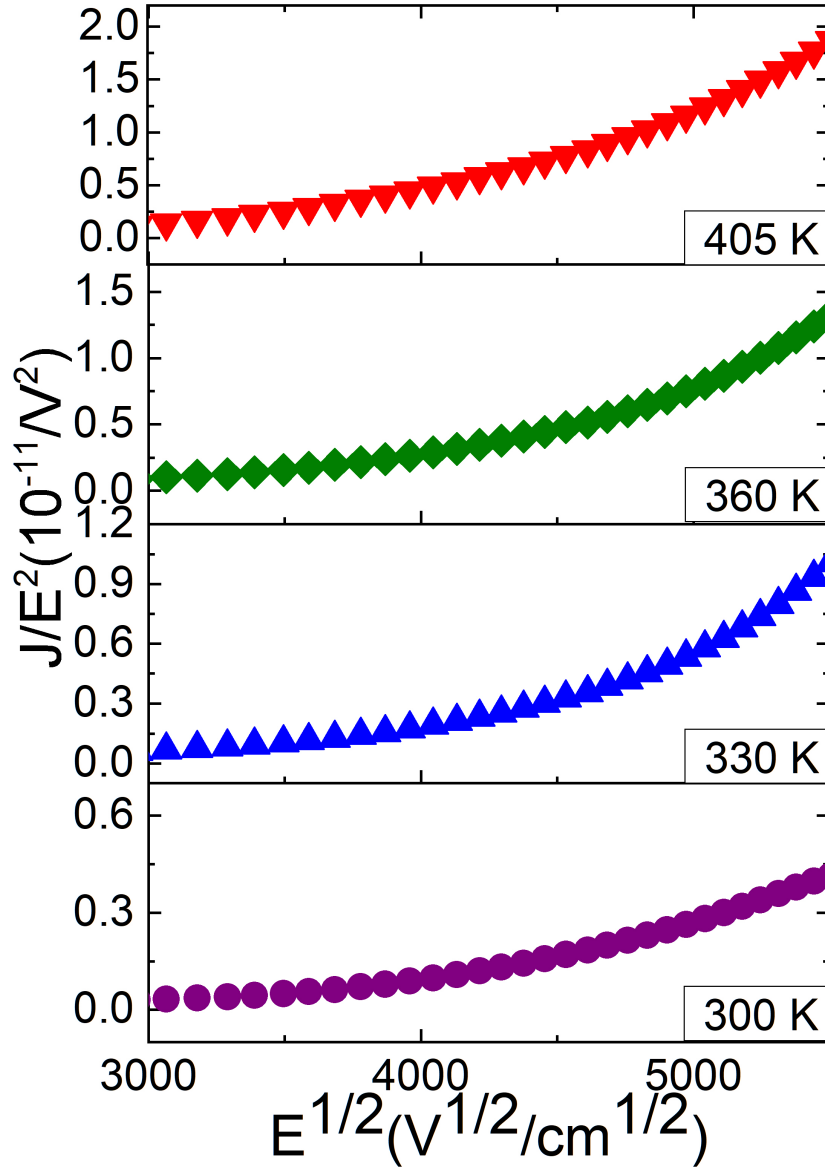
Şekil 4.62 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için 1.0-2.0 V aralığında (a) A - q/kT (b) I_0 - q/kT değişimi, 3.5-5 V aralığında (c) A - q/kT (d) I_0 - q/kT değişimi



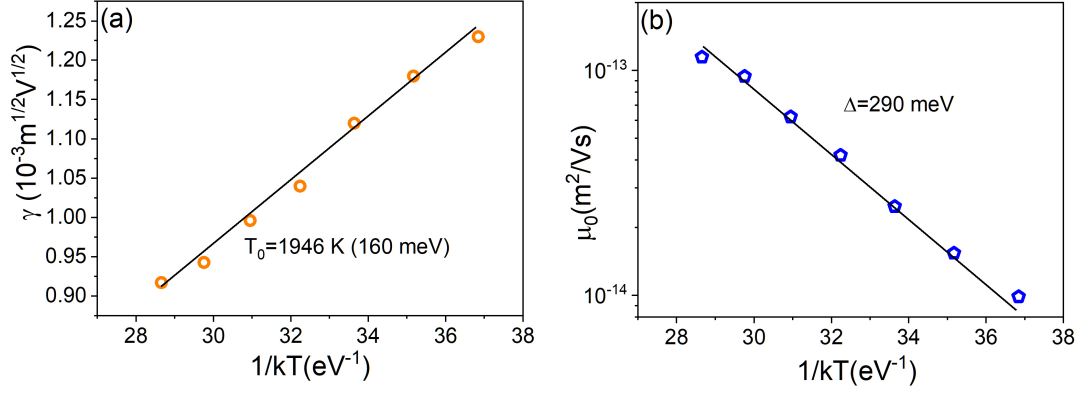
Şekil 4.63 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için $3.5 < V < 5V$ gerilim aralığında (a) m (b) K nin sıcaklıkla davranışı

4.4.1.3 DC Mobilité Hesabı

Akım-Gerilimin SCLC bölgesi için $J/E^2 - \sqrt{E}$ grafiği çizilerek Mott-Gurney eşitliğine göre (eşitlik 2.19) fit edilirse μ_0 ve γ parametrelerinin yanısıra B ve T_0 sabitleri de elde edilir. Şekil 4'te sıcaklığa bağlı $J/E^2 - \sqrt{E}$ grafiği verilerek γ ve eksenini kestiği nokta grafiği çizilmiştir. Bu grafiklerden $T_0=160$ meV ve $\Delta = 290$ meV değerleri belirlenmiştir.



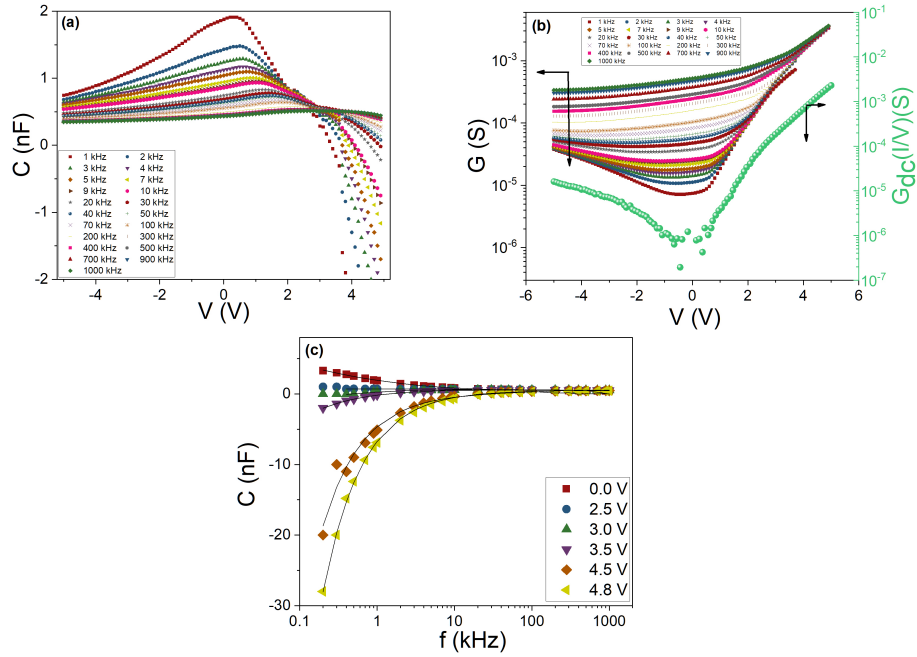
Şekil 4.64 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için sıcaklığın fonksiyonu olan J/E^2 ye $\sqrt{E}$ grafiği



Şekil 4.65 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için J/E^2 ye $\sqrt{E}$ grafiğinin (a) Eğiminden elde edilen elektrik alan katsayısı (γ) (b) Sıfır alan mobilitesini hesaplamak için eksenleri kesen noktalar

4.4.2 %30 InGaN/GaN MQW LED için C-V Ölçümleri

Kapasitans/iletkenlik-gerilim değişimi frekansın fonksiyonu olarak ölçülmüştür ve şekil 4.66’ da gösterilmiştir.

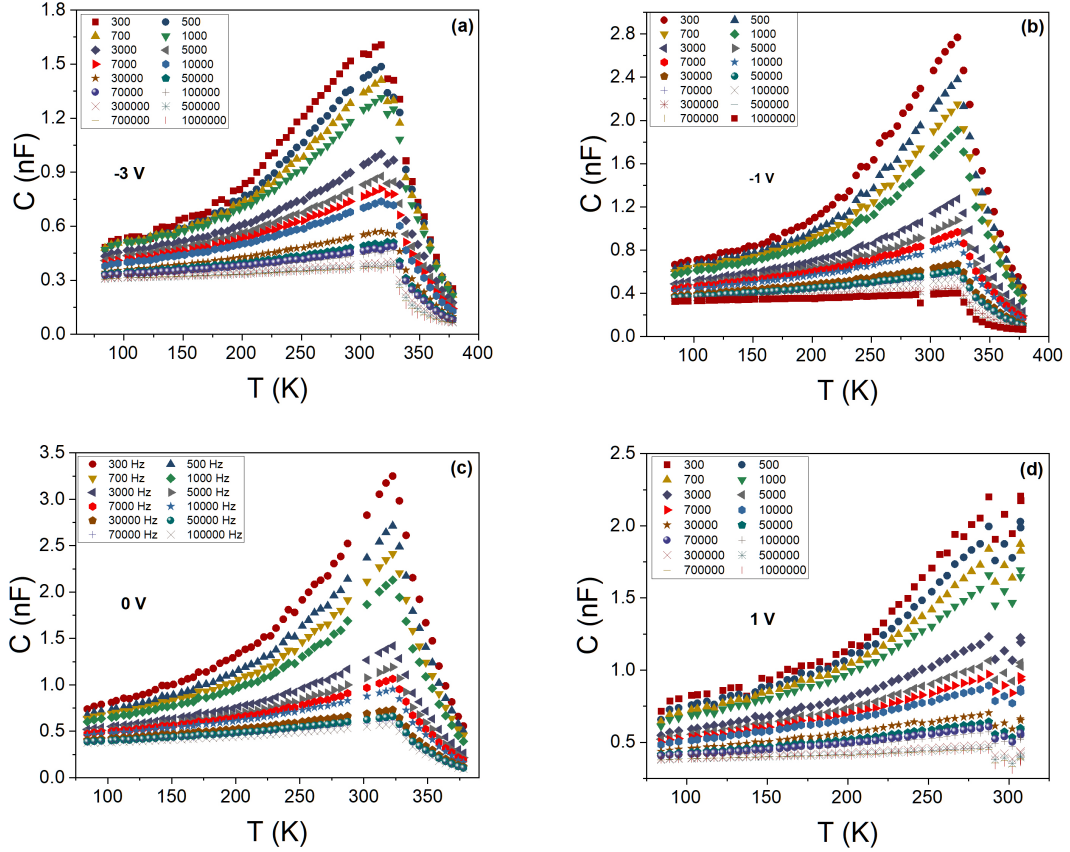


Şekil 4.66 Oda sıcaklığındaki $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) Kapasitans-gerilim davranışı (b) AC/DC iletkenlik-gerilim davranışı (c) Kapasitans-frekans davranışı

Şekil 4.66 (c)’ den de görüleceği gibi yüksek frekans değerlerinde ve sıfır gerilimde kapasitans frekanstan bağımsızdır. Bu sabit değer geometrik kapasitansa (C_0) karşılık gelir. Ayrıca gerilimin 2.5 V üzerindeki değerlerinde negatif kapasitans olarak da bilinen indüktif etki başlar ve gerilim değeri arttıkça bu etkinin başlangıç değeri yüksek

frekanslara doğru kayar.

Değişen gerilimler uygulanmasıyla frekansın fonksiyonu olarak C-T taraması yapılmış ve şekil 4.67 ile gösterilmiştir.

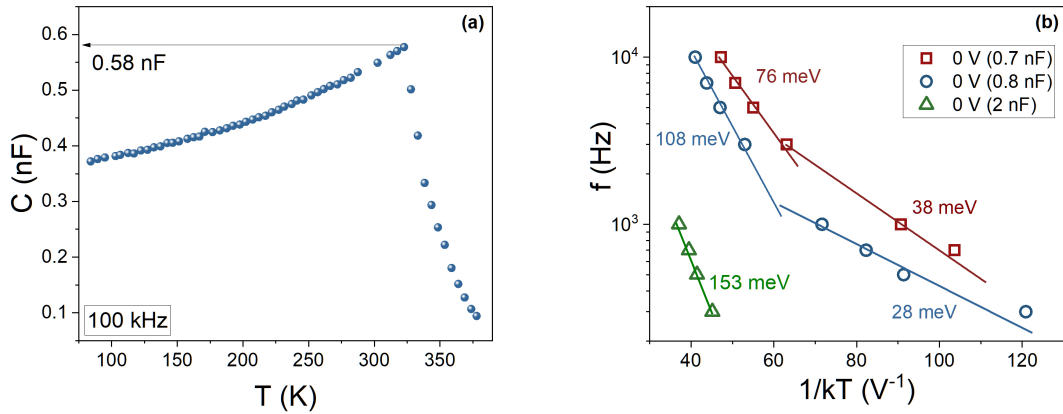


Şekil 4.67 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) -3 V (b) -1 V (c) 0 V (d) 1 V gerilim altında C-T davranışı

Görüldüğü gibi kapasitansda keskin bir değişim gerçekleşmiştir. Bu değişim düşük frekanslarda keskin iken yüksek frekanslarda (100 kHz ve üstü) kademeli olarak gözlenmiştir. Kapasitansın AC yük dağılımı düşük sinyalinde ilk momentin tersi ile doğru orantılıdır, mesela $C = \epsilon S / \langle x \rangle$. Burada ϵ , InGaN filmin permitivitesi (geçirgenlik, dielektrik sabiti) ve S de diyot yüzey alanıdır. Bu yüzden düşük sıcaklıktaki kapasitans (sığa- C_{LT}) i-tabakasının kalınlığı ve p-tabakasındaki tüketim bölgesi genişliğinin kombinasyonu olan $\langle x \rangle = W_{LT}$ ye karşılık gelir. Diğer bir deyişle kapasitans değeri AC etkisinin hem p/i arayüzeyi civarından hem de mevcut MQW LED yapının p-GaN tabakasından, tüketim bölgesinden geldiğini gösterir. Yüksek sıcaklıklardaki kapasitans (C_{HT}) $\langle x \rangle = W_{HT}$ 'yi yani i-katmanının genişliğini ifade eder (şekil 4.68). Bu p/i arayüzeyi civarındaki yükler tarafından karşı dengelenen AC değişimidir. Şekil 4.68 (a)' da görüldüğü gibi ortam sıcaklığı 80 K dan 320 K ya kadar değerler aldığıında yüksek frekanslardaki kapasitans (>100 kHz) 0.35- 0.6 nF

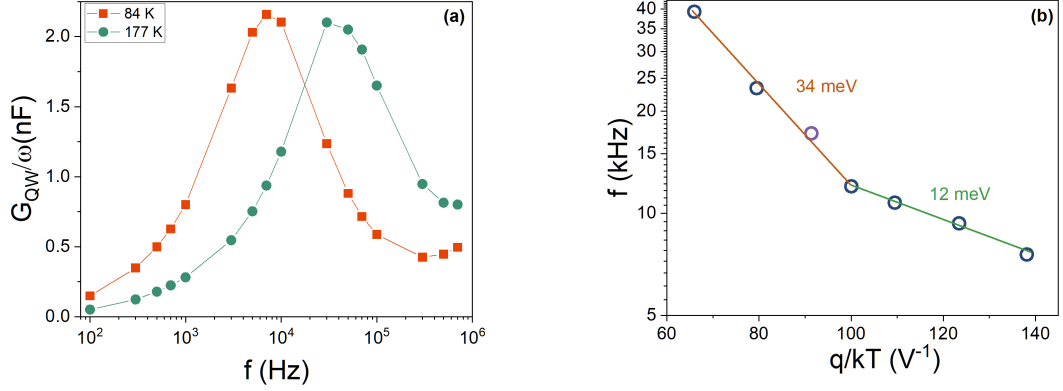
arası değerler alır ve sonra aniden düşer. Grafik ayrıca p-i-n yapıdaki bir i-tabakasının yüksek AC etkisinde yalıtkan gibi davrandığını gösterir. Aynı sıcaklık aralığında AC modülasyon frekansı azaldığında, ölçülen kapasitans, hem düşük hem de yüksek sıcaklık durumları için ara yüzey ve i-tabakasının iç kısımlarındaki yerleşimlerden dolayı $\langle x \rangle$ ile ters orantılıdır.

C-T ölçümünde özel bir kapasitans değerini kullanarak (p/i arayüzeyi için 0.7 nF) Arrhenius analizleri yapıldığında aktivasyon enerjisi, düşük sıcaklıkta ~ 40 meV ve yüksek sıcaklıkta 76 meV olarak belirlendi (şekil 4.68 (b)). Bu analizlerin devamında i-tabakasındaki yerleşimlere uygun olarak 0.8 nF kapasitans değerindeki E_A düşük sıcaklıkta 35 meV ve yüksek sıcaklıkta 108 meV bulundu. 35 meV henüz tanımlanmamış E_A değeri olmasına rağmen 76 meV ve 108 meV literatürle ve bu çalışmanın I-V-T kısmıyla aynı olduğundan tünelleme taşıyıcısı olan elektron ve hollerin enerji bariyerine karşılık gelebilir [42, 124, 125]. Elde edilen bu aktivasyon enerjileri InGaN/GaN LED yapıda Kuantum Kuyularından (QWs) yük salınımı için gerekli olan 0.3 - 0.4 eV değerine çok çok uzaktır. Fakat bu değerler düşük aktivasyon enerjisi geniş kusurlar boyunca taşıyıcı tünellemesi veya komşu kuantum kuyusuyla takası olduğunu gösterir yorumunda bulunan Bouirum ve diğ. [84] ve Soltanovich ve diğ. [106] çalışmalarıyla uyumludur.



Şekil 4.68 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) Seçilen kapasitansın 100 kHz değerinde sıcaklığa bağlı davranışı (b) Sabit kapasitans değerlerinde frekans-sıcaklık ilişkisi

Sadece aktivasyon enerjisi değil (hem I-V-T hem de C-T- ω ölçümlerinden elde edilen) aynı zamanda ağırlıklı ortalama açıklığı da (AC etkisinin p-i-n yapıdaki i-tabakasının kalınlığına işaret ettiği yer) bu iddiayı olası yapar. Açıkça C-T ölçümleri kapasitansın azalan frekansla arttığını gösteriyor. Şekil 4.68 (b)'de görüldüğü gibi iki farklı sıcaklık aralığı aktivasyon enerjileriyle birbirinden ayrılır; yüksek sıcaklık bölgesinde 76 meV-153 meV iken düşük sıcaklık bölgesinde 35 meV. Ek olarak C-T- ω ölçümlerinden açıkça görülüyor ki kondüktans tek bir sıcaklıkta (84 K) bir maksimum yapar ve ortam

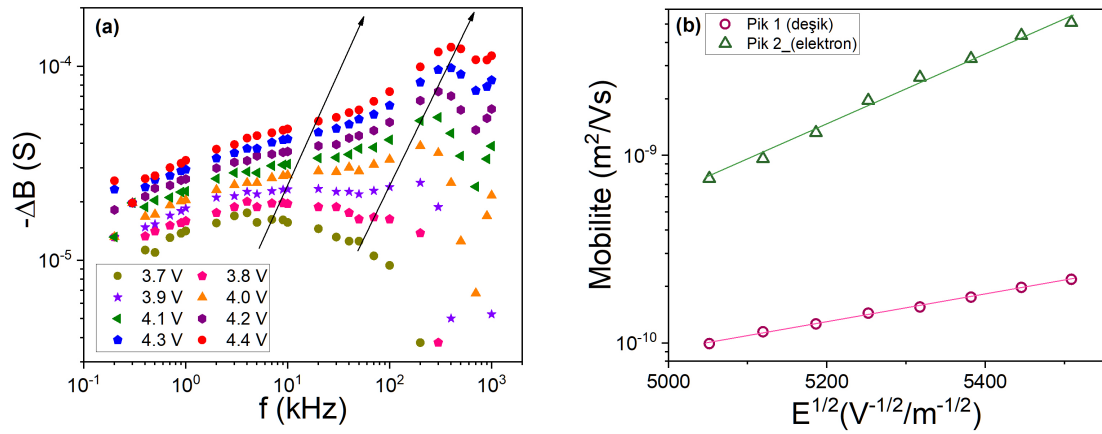


Şekil 4.69 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) Farklı sıcaklıklarda 0 V değerinde G_{QW}/ω değerinin frekansa bağlılığı (b) $G_{QW}/\omega - \omega$ grafiğinin tepe noktalarından elde edilen frekans- sıcaklık grafiği

sıcaklığı arttığında bu yüksek frekanslara doğru kayar. Kondüktansın tepe yaptığı değerleri kullanarak Arrhenius analizleri yapıldı ve şekil 4.69(b) de gösterildi. Elde edilen aktivasyon enerjileri önceki değerlerle uyumludur.

4.4.2.1 AC Mobilité Hesabı

İndüktif etki yani negatif kapasitans etkisi diferansiyel süseptans ($-\Delta B(\omega)$) eğrisi çizilerek rahatlıkla belirlenir (şekil 4.70). Bu eğrilerin tepe noktaları elektron ve deşiklerin zaman sabitlerinin belirlenmesi için kullanılır.



Şekil 4.70 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) çift logaritmik negatif diferansiyel süseptans eğrisi (b) $\sqrt{E}$ 'nin fonksiyonu olarak elektron ve deşik mobilitesi

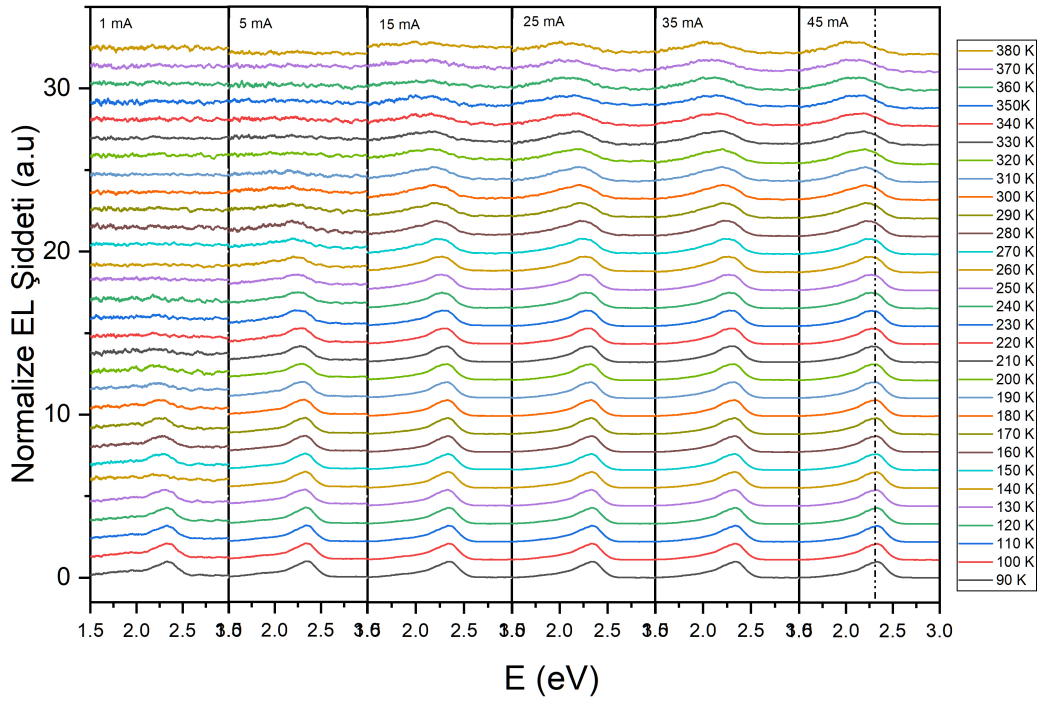
Zaman sabitlerinin yardımıyla elektron ve deşiklerin mobilitesi (μ) eşitlik 2.33 ve eşitlik 2.34' ten yola çıkarak hesaplandı ve $\sqrt{E}$ 'nin fonksiyonu olarak gösterildi (şekil 4.70) ayrıca $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ SL LED için hesaplanan tüm mobilité değerleri tablo 4.3 ile tablollaştırıldı.

Tablo 4.3 $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ SL LED için I-V ve C-V ölçümleri sonucunda elde edilen AC ve DC mobiliteleri

V(V)	AC mobilite (m^2V/s)			DC mobilite (m^2V/s)
	μ_p	μ_n	$\mu_p + \mu_n$	μ_{eff}
3.18	5.36×10^{-11}	4.85×10^{-9}	4.90×10^{-9}	5.13×10^{-9}
3.28	7.66×10^{-11}	6.05×10^{-9}	6.13×10^{-9}	5.58×10^{-9}
3.38	1.05×10^{-10}	7.32×10^{-9}	7.42×10^{-9}	6.06×10^{-9}
3.49	1.33×10^{-10}	8.79×10^{-9}	8.93×10^{-9}	6.59×10^{-9}

4.4.3 %30 InGaN/GaN MQW LED için EL Ölçümleri

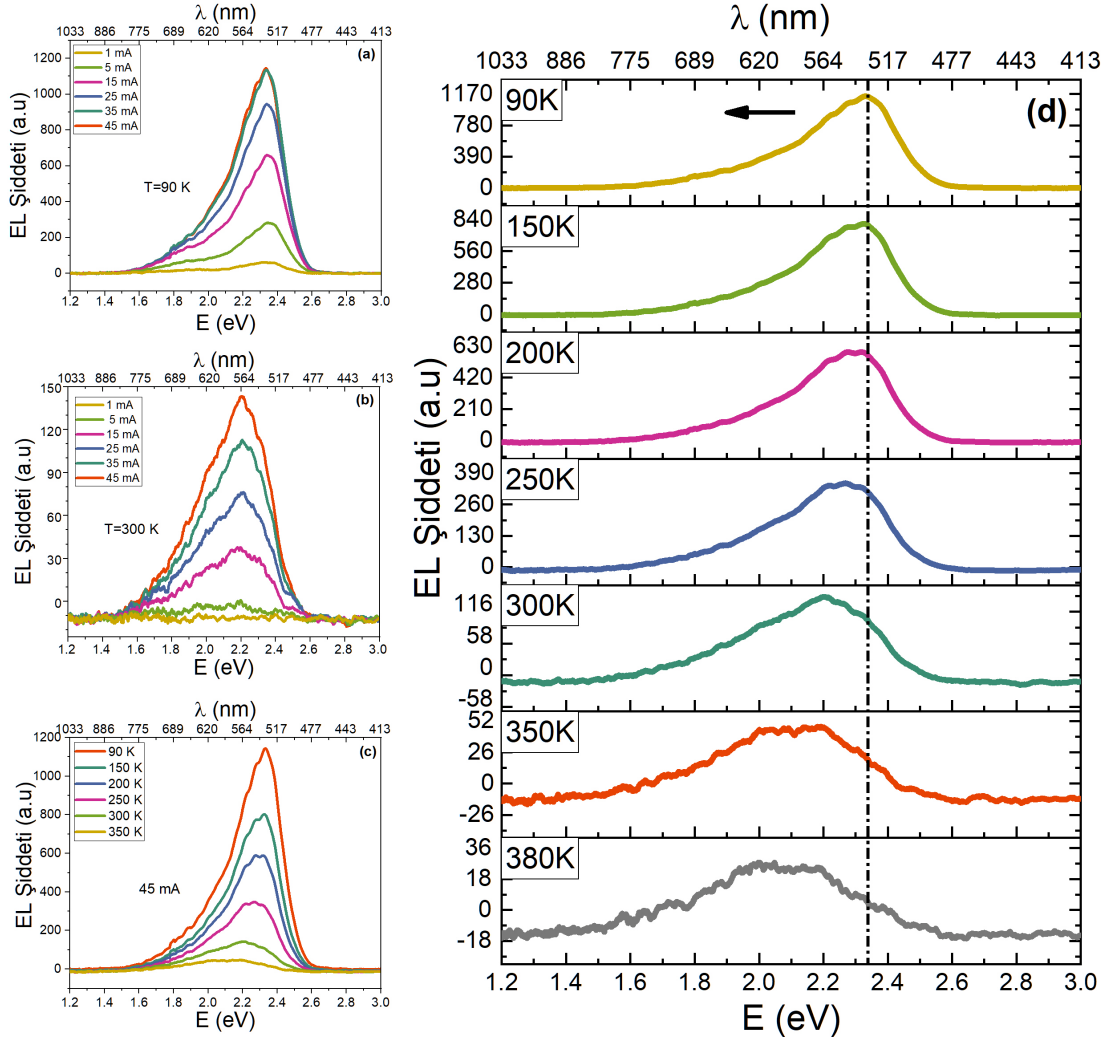
Enjeksiyon akımının fonksiyonu olan 90-380 K sıcaklık aralığında alınan EL ölçüm sonuçları şekil 4.71’ de verilmiştir.



Şekil 4.71 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için akımın fonksiyonu olarak ölçülen 90-380 K sıcaklık aralığındaki EL spektrumları

1 mA, 5 mA ve 15 mA akım enjeksiyon durumlarında 80-270 K sıcaklık aralığında 2.35 eV civarında bir luminesans merkezi görülür. Sıcaklık arttığında bu luminesans merkezi düşük enerjilere (kırmızıya) doğru kayar. 270 K üzerindeki sıcaklıklarda düşük ve orta enjeksiyon akımı durumlarında EL sinyali cihazımızın sınırlarına doğru zayıflar. Diğer enjeksiyon durumlarında (25, 35 ve 45 mA) tüm sıcaklıklarda benzer

kaymalar görülür. Bu enjeksiyon değerlerinde düşük enjeksiyon durumunun aksine 270 K' da EL sinyali halen görülmektedir (şekil 4.71).



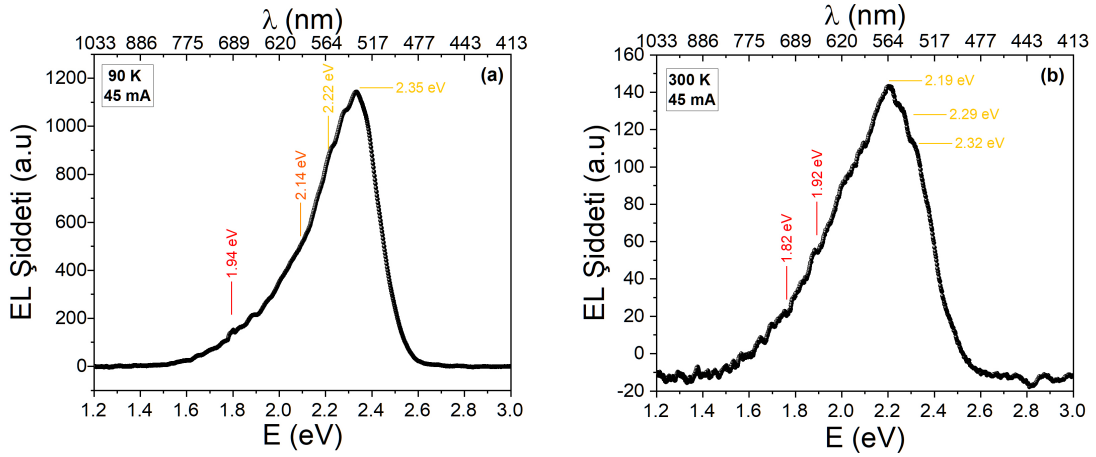
Şekil 4.72 $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ MQW LED için (a) $T=90$ K' da (b) $T=300$ K' da enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak gösterilen (c) 45 mA enjeksiyon akımı uygulanmasıyla sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen EL spektrumları (d) 45 mA enjeksiyon akımında sıcaklıkla enerjinin kayması

Aygıttan çıkan ışık şiddeti seçilen iki sıcaklık için (90 K ve 300 K) enjeksiyon akımının fonksiyonu olarak şekil 4.72 (a)-(b)' de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan akım ile ışıma şiddetinin arttığı görülmüştür.

Ayrıca 45 mA sabit enjeksiyon akımı değerinde sıcaklık değişimiyle spektrum değişiminin gösterildiği şekil 4.72 (c) ile de artan sıcaklıkla ışıma şiddetinin azaldığı gözlenmiştir.

Şekil 4.72 (d) enerjideki kaymayı göstermektedir. 90 K ile başlayan ölçümde spektrumun tepe noktası siyah çizgi ile işaretlenmiştir. Sıcaklık artmasıyla tepe noktası düşük enerjilere doğru kaymaktadır.

Spektrumda mevcut olan enerji seviyelerini tespit etmek amacıyla spektrum tüm sıcaklıklar için bilgisayar programı aracılığıyla Gauss tepelerine ayrılmıştır ve 45 mA akım enjeksiyonu durumundaki tüm ışıma merkezlerine karşılık gelen enerji değerleri, 90 K ve 300 K' da EL spektrumunda oklarla gösterilmiştir (şekil 4.73). Taranan geniş sıcaklık aralığında, emisyon merkezlerinin sayısı değişmemiştir. Tepe enerji değerleri kırmızı (1.8-2.0 eV)/sarı (2.2-2.4) bantlar ile örtüşmektedir.



Şekil 4.73 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=90$ K'da (b) $T=300$ K'da EL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)

90 K' da spektrumda 1.94 eV, 2.14 eV, 2.22 eV ve 2.35 eV enerji düzeyleri tespit edilmiştir. Beklenmeyen birden fazla olan kırmızı ve sarı bantların yanı sıra, 2.35 eV tepe enerjideki sarı emisyon, diğer örneklerdeki duruma benzer şekilde InGaN katmanının katkı oranındaki sapmalarla ilişkilidir ve eşitlik 2.1 ile de destelenir.

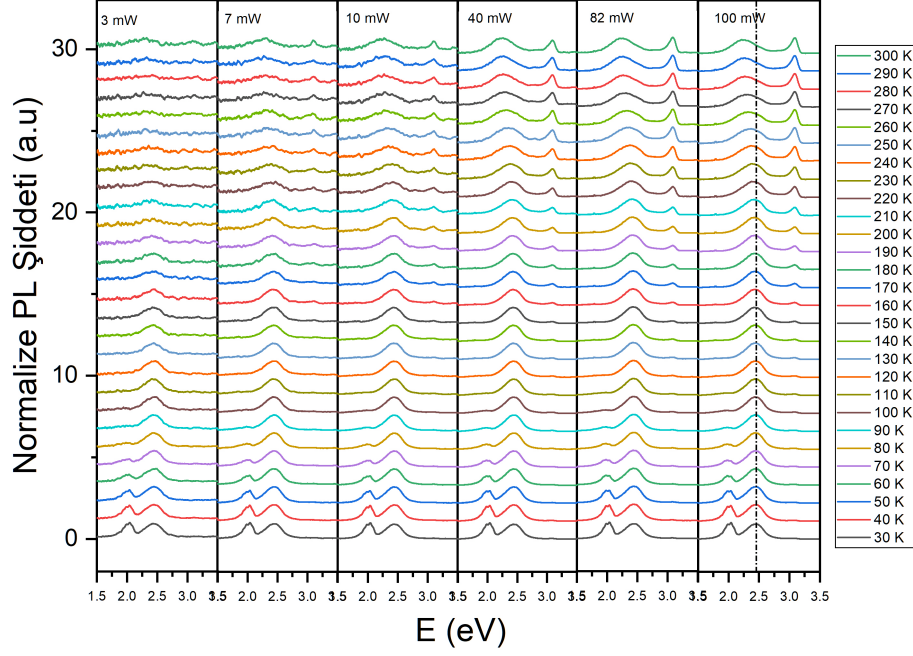
Spektrumdaki kırmızıya kaymanın sebebi nokta kusurlardan kaynaklı ışımasız yeniden birleşme merkezlerinin sıcaklıkla aktive olmasıdır [31, 108, 110–113, 116].

4.4.4 %30 InGaN/GaN MQW LED için PL Ölçümleri

Gücün fonksiyonu olan 30-300 K sıcaklık aralığında alınan PL ölçüm sonuçları şekil 4.74' te verilmiştir.

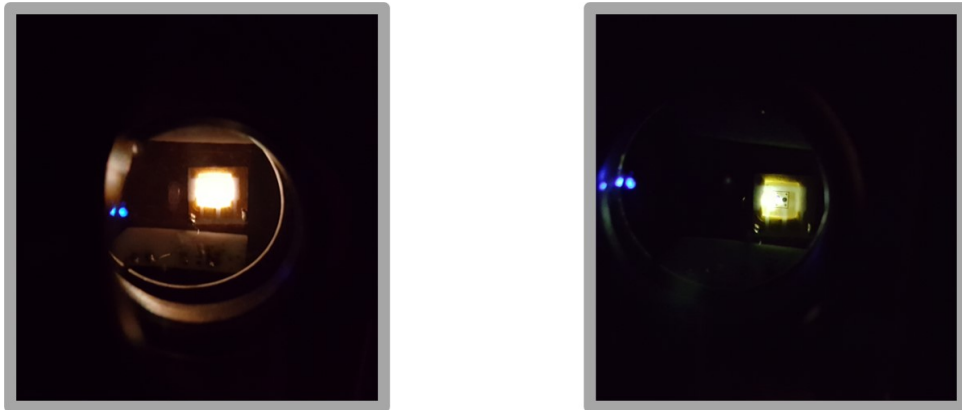
Aygıt üzerine düşen ışığın gücü 3 mW ve 7 mW iken düşük sıcaklıklarda PL sinyali görülür ancak oda sıcaklığına doğru bu sinyal spektrometre sınırlarına doğru zayıflar. Orta ve yüksek güçlü ışık altında (10 mW, 40 mW, 82 mW ve 100 mW) ölçüm skalasındaki düşük sıcaklıklarda ~ 2.0 eV ve ~ 2.5 eV civarında iki lüminesans merkezi görülür. Ölçüm boyunca bu merkezlerden ~ 2.5 eV civarındaki görünürlüğünü korurken artan sıcaklıkla daha düşük enerjilere (kırmızıya) kayar. ~ 2.0 eV civarındaki

merkez etkisini kaybederken $T > 170$ K sıcaklıklarında ~ 3.0 eV civarında yeni bir merkez baskın hale gelir.



Şekil 4.74 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için gücün fonksiyonu olarak ölçülen 30-300 K sıcaklık aralığındaki PL spektrumları

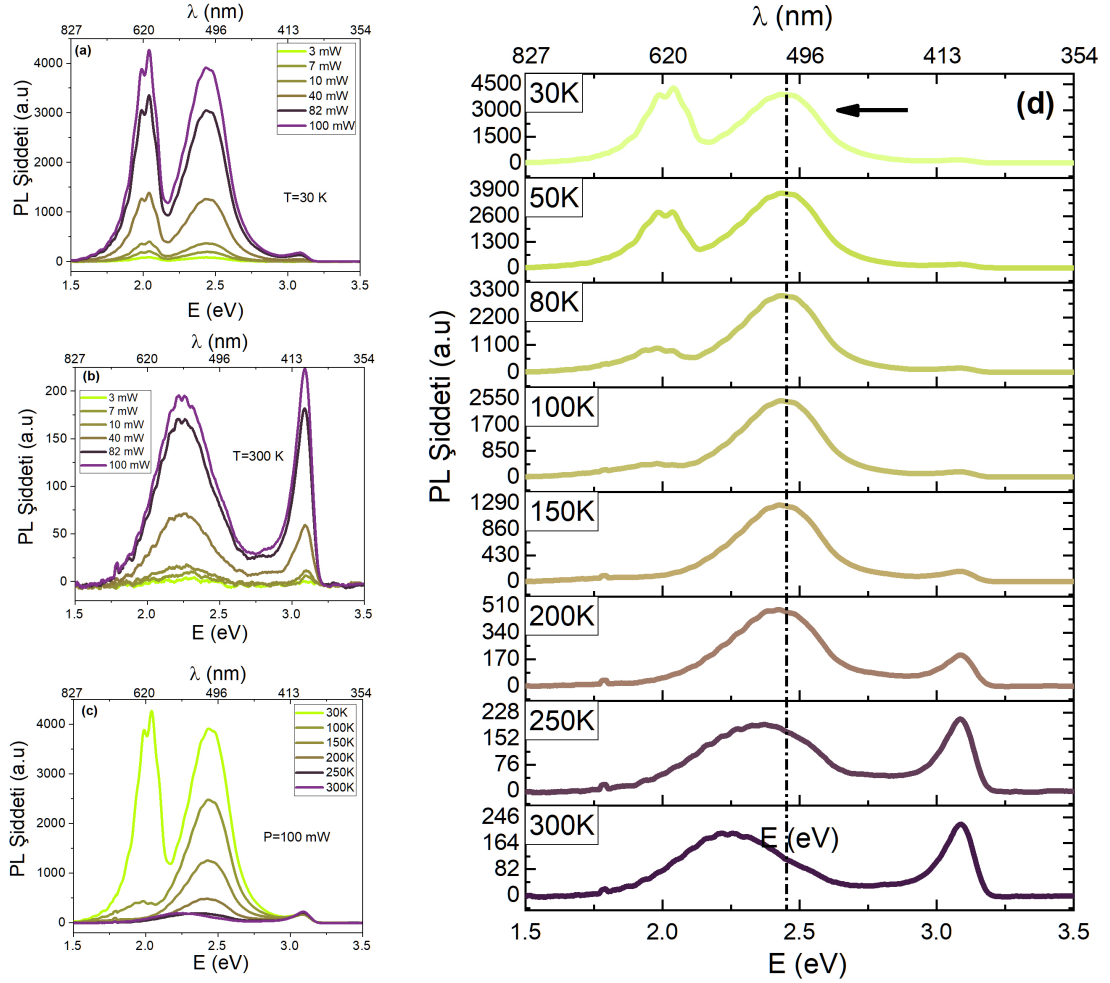
30 K ile başlanan ölçümde aygıtın %30 In konsantrasyonlu yapı için beklenene uygun şekilde kırmızımsı-sarı renkte ışıma yaptığı ancak aygıt oda sıcaklığına doğru ısıtıldığında rengin sarıya kaydığı görülmüştür (şekil 4.75).



Şekil 4.75 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED aygıtın $T=30$ K' da (solda) ve $T=300$ K' da (sağda) PL ölçümleri sırasındaki ışıması

Aygıttan çıkan ışık şiddeti aygıt üzerine düşen ışığın gücünün fonksiyonu olarak şekil 4.76 (a)-(b)' de gösterildi. Tüm sıcaklık değerlerinde artan güç ile ışıma şiddetinin

arttığı görülmüştür. Ayrıca sabit güç değerinde sıcaklık değişimiyle spektrumun değişiminin gösterildiği şekil 4.76 (c) ile de sıcaklık arttıkça ışıma şiddetinin yüksek oranda azaldığı gösterilmiştir.



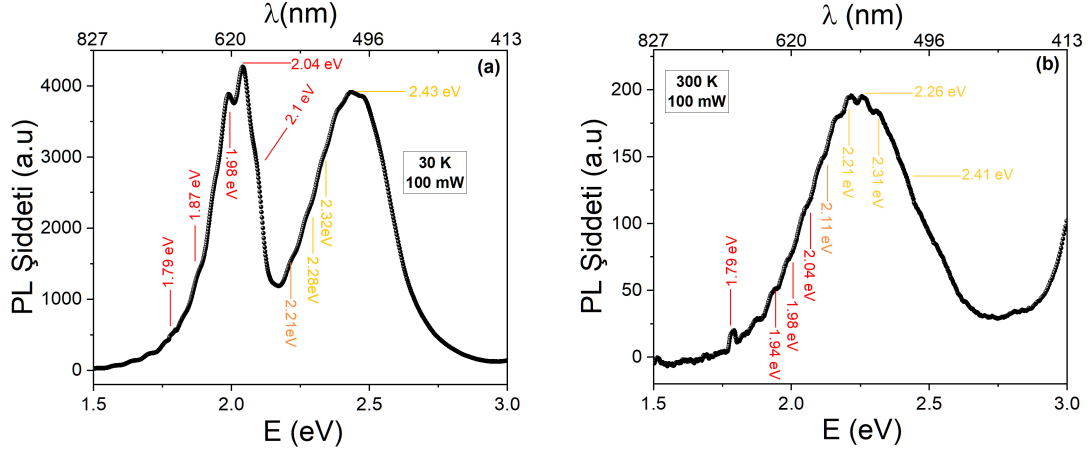
Şekil 4.76 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ MQW LED için (a) T=30 K' da (b) T=300 K' da gücün fonksiyonu olarak gösterilen (c) 100 mW gücünde sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilen PL spektrumları (d) 100 mW gücünde sıcaklıkla enerjinin kayması

Şekil 4.76 (d) enerjideki kaymayı göstermektedir. 30 K ile başlayan ölçümde spektrumun tepe noktası siyah çizgi ile işaretlenmiştir. Sıcaklık artmasıyla tepe noktası düşük enerjilere doğru kaymaktadır.

Spektrumda mevcut olan tüm ışıma merkezlerine karşılık gelen enerji değerleri, 30 K ve 300 K' daki PL spektrumlarında oklarla gösterilmiştir (şekil 4.77).

Tepe enerji değerleri kırmızı (1.8-2.0 eV) ve sarı (2.2-2.4 eV) bantlar ile örtüşmektedir. Taranan geniş sıcaklık aralığında, sıcaklık arttıkça InGaN MQW katmanlarından gelen ışımların güçleri büyük oranda azalmıştır. Dolayısıyla öne çıkan ışıma merkezleri değişmiştir. 30 K' da spektrumda 2.0 eV civarındaki kırmızı lüminesans merkezleri baskın iken 300 K' da 2.5 eV civarındaki sarı lüminesans merkezleri daha düşük

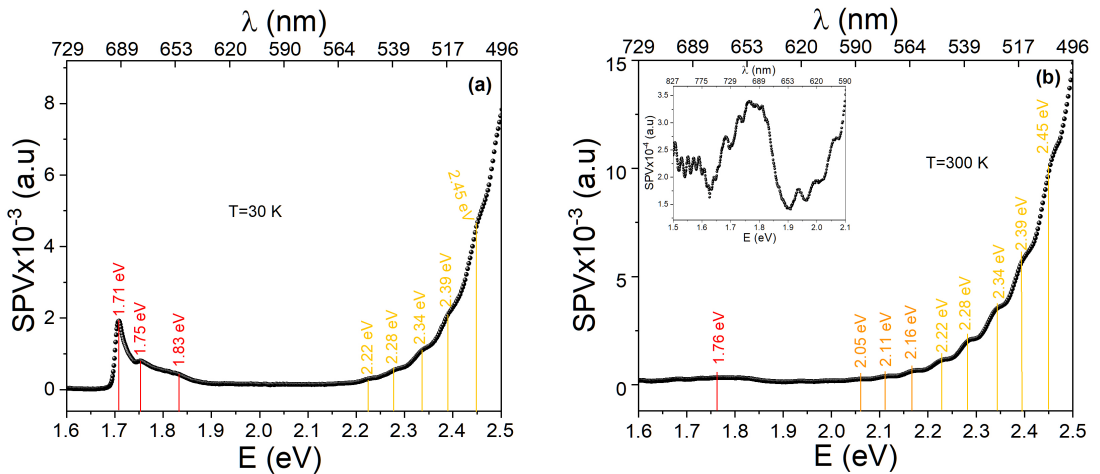
enerjilere kaymasına rağmen baskındır (şekil 4.77). Bu durum şekil 4.75 ile desteklenir niteliktedir.



Şekil 4.77 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için (a) $T=30\text{ K}$ 'da (b) $T=300\text{ K}$ 'da PL spektrumları ve spektrumlarda yer alan Gauss tepelerinin tepe noktaları (mevcut enerji seviyeleri)

4.4.5 %30 InGaN/GaN MQW LED için PC/PV Ölçümleri

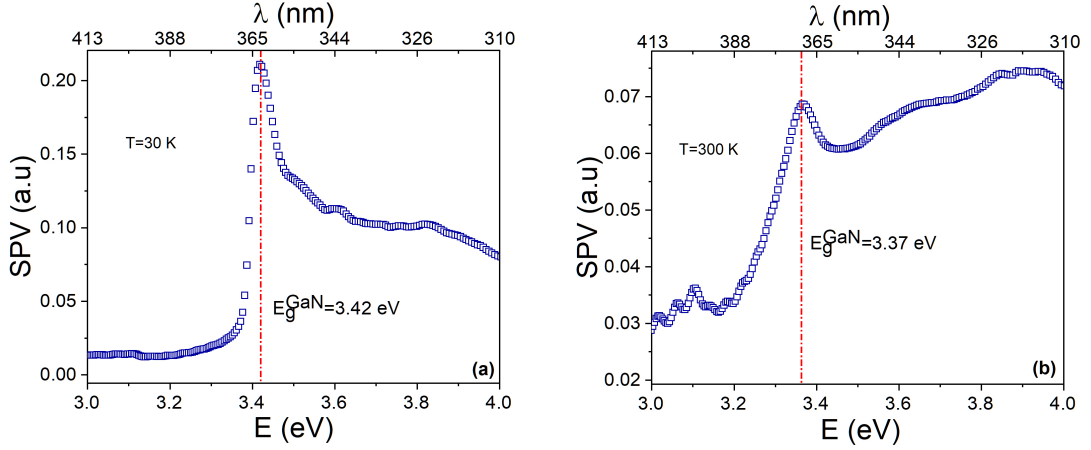
%30 MQW LED aygıt yapısındaki GaN ve InGaN katmanlarının bant aralıklarının belirlenebilmesi, hem PL hem de EL ölçümleri sonucunda görülen alt bantların tanımlanabilmesi ve kusur seviyelerinin tespit edilebilmesi için şekil 3.7' de verilen ölçüm düzeneği 30-300 K sıcaklık aralığında uygulanmış, 30 K ve 300 K sıcaklıklarındaki spektrumlar şekil 4.78 ve 4.79' da verilmiştir.



Şekil 4.78 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için SPV spektrumu (a) 30 K (b) 300 K

Spektrumda mevcut olan ve InGaN tabakasından kaynaklandığı düşünülen tüm ışıma merkezlerine karşılık gelen enerji değerleri, 30 K ve 300 K' daki SPV spektrumlarında

oklarla gösterilmiştir (şekil 4.78). Tepe enerji değerleri kırmızı (1.8-2.0 eV) ve sarı (2.2-2.4 eV) bantlar ile örtüşmektedir. Taranan geniş sıcaklık aralığında, sıcaklık arttıkça InGaN MQW katmanlarından gelen ışımaların güçleri büyük oranda azalmıştır. Dolayısıyla EL ve PL ölçüm sonuçlarında olduğu gibi öne çıkan ışımaya merkezleri değişmiştir.



Şekil 4.79 $In_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ MQW LED için SPV spektrumunda GaN bant aralığı enerjisi (a) 30 K. (b) 300 K

30 K ve 300 K'de kaydedilen SPV spektrumlarına göre bant aralıkları GaN katmanı için 30 K' de (300 K) 3.42 eV (3.37 eV) olarak görülmektedir (şekil 4.79 (a)-(b)).

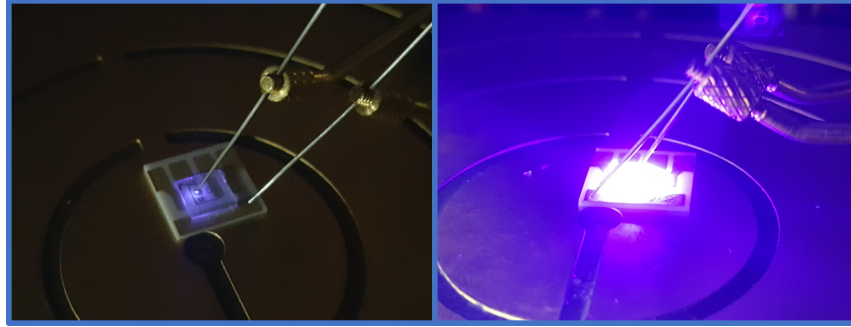
5 SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu bölümde %10 In içerikli InGaN SL LED ve %10 In içerikli InGaN/GaN MQW LED aygıtların analiz sonuçlarının karşılaştırması ve %10, %20 ve %30 In içerikli InGaN/GaN MQW LED aygıtların analiz sonuçları yer almaktadır.

5.1 %10 InGaN SL LED - %10 InGaN/GaN MQW LED Sonuçları

%10 In içerikli InGaN i-katmanlarından oluşan p-i-n yapıdaki SL ve MQW aygıtlar için sabit sıcaklık I-V, EL ve PL ölçümleri karşılaştırılmıştır.

Oda sıcaklığında karanlık ortamda 6 V gerilim uygulanmasıyla aygıtların ışımaları şekil 5.1' de gösterilmiştir.



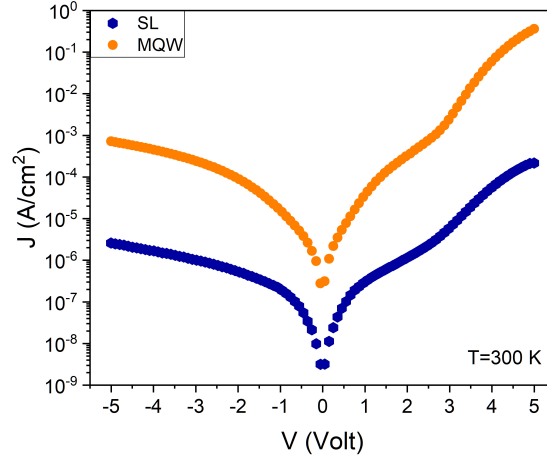
Şekil 5.1 SL ve MQW LEDlerin sabit gerilim altında ışık şiddetlerinin karşılaştırılması

Her bir kuantum kuyusundan gelen ışımlar sayesinde MQW yapı ile SL yapıya göre çok daha güçlü ışık elde edildiği açıkça görülmektedir.

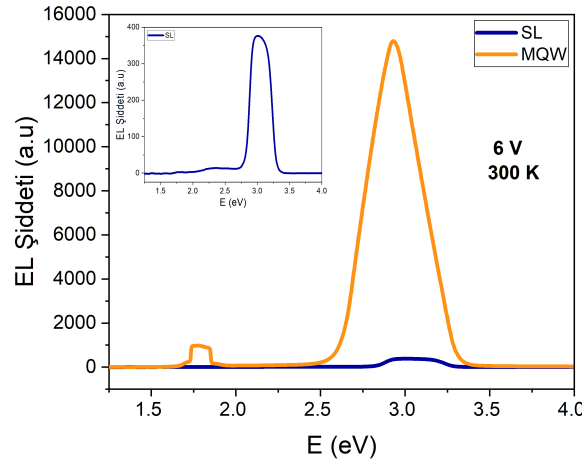
Her iki aygıt için de verilen I-V analizi sonuçları da bu durumu destekler niteliktedir. Şekil 5.2' ye göre 300 K' da -5 V - 5 V aralığında gerilim taraması ile alınan I-V ölçümlerinde SL ve MQW aygıtlardan MQW daha yüksek akım değerlerine ulaşabilmiştir.

6 V gerilimle 300 K sıcaklığında elde edilen EL spektrumlarına göre SL aygıtın

ışması (şekil 5.3-iç grafik) MQW aygıttan hem düşük şiddettedir hem de tepenin genişliğinden ve keskinliğinden anlaşılacağı üzere daha kalitesizdir (şekil 5.3).



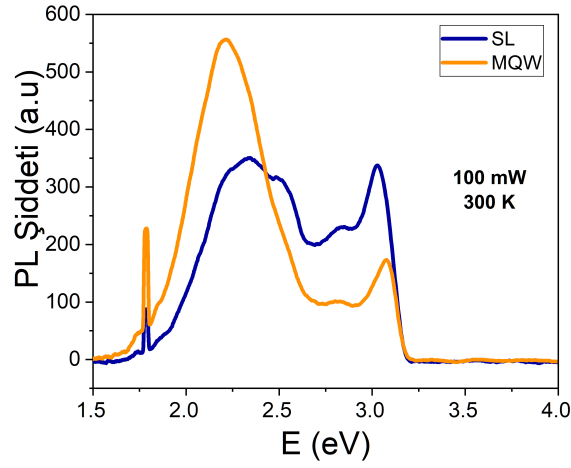
Şekil 5.2 SL LED - MQW LED için karanlık ortamda 300 K’ da ileri ve ters besleme durumlarındaki akım-gerilim davranışı



Şekil 5.3 SL LED - MQW LED için 300 K’ da 6 V gerilim uygulamasıyla elde edilen EL ölçüm spektrumu

100 mW gücünde 365 nm dalga boylu LED aydınlatmasıyla elde edilen 30 K sıcaklıktaki PL spektrumlarına göre de MQW aygıtın ışıması SL aygıtın ışımasından yüksek şiddettedir (şekil 5.4).

Hem EL hem de PL spektrumlarında eşitlik 2.1’ den yola çıkarak görülmesi beklenen bantların tepe pozisyonlarında InGaN tabakasındaki In homojensizliği nedeniyle kaymalar olsa da ışımalar %10 için beklenen enerji aralığındadır. Ayrıca her iki analiz de MQW yapının ışıma şiddetinin SL yapının ışıma şiddetinden kat kat fazla olduğunu gösterir.

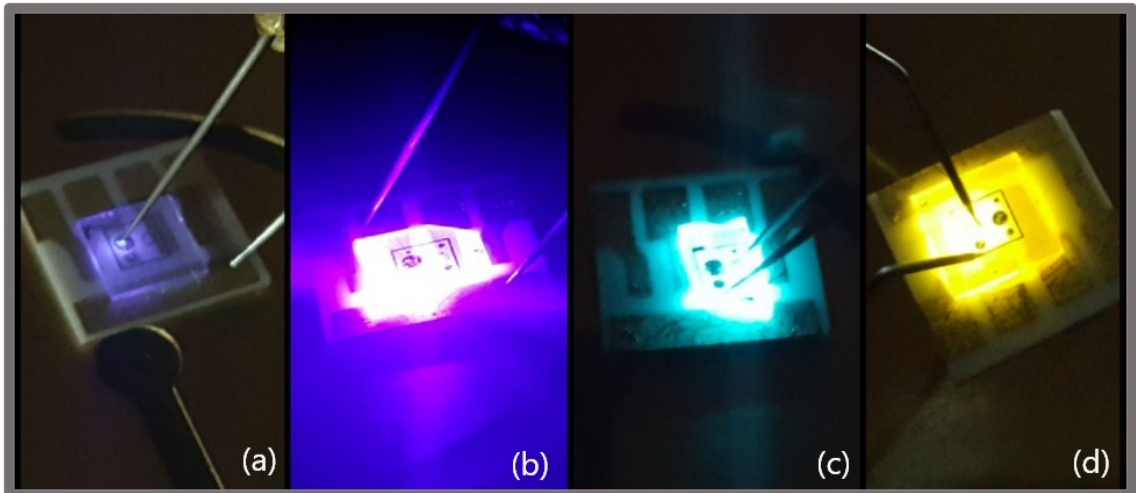


Şekil 5.4 SL LED - MQW LED için 30 K' da 100 mW gücünde ışık altında elde edilen PL ölçüm spektrumu

Kısaca, p-i-n yapıda i-katmanı olarak tek tabaka InGaN kullanmak yerine MQW yapılar oluşturulması LED aydınlatma uygulamaları açısından bakıldığında ışımaya kalitesini ve verimliliğini artırır.

5.2 %10 InGaN SL LED ve %10- %20- %30 InGaN/GaN MQW LED Sonuçları

Çalışmada incelenen tüm aygıtların oda sıcaklığında sabit gerilim (5 V) uygulanmasıyla ışımları şekil 5.5 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.5 (a)%10 InGaN SL LED' in (b) %10 InGaN/GaN MQW LED' in (c) %20 InGaN/GaN MQW LED' in (d) %30 InGaN/GaN MQW LED' in oda sıcaklığında karanlık ortamda 5 V gerilim altında ışımaları

Eşitlik 2.1 ile ön görüldüğü gibi InGaN tabakasındaki In homojensizliği nedeniyle kaymalar olsa da %10 In içerikli aygıtların ışıması mavi, %20 In içerikli aygıtın ışıması yeşil ve %30 In içerikli aygıtın ışıması kırmızımsı-sarı renklindedir.

Sıcaklığın fonksiyonu olarak yapılan akım-gerilim analizleri ile; belirlenen aktivasyon enerjileri, A parametresinin sıcaklıkla davranışı ve diyotlar için idealite faktörlerinin (η) beklenen değerlerden çok fazla olması akım iletim mekanizmasının tünelleme tipi olabileceğine işaretler [31, 79, 116]. Tünelleme tipi iletim mekanizmasında elde edilen aktivasyon enerjileri p-i-n yapı için azot boşlukları, oksijen kirlilikleri, Mg-H karışımları, örgü uyumsuzlukları gibi yapısal kusurlara işaret eder [42, 72].

Yapılardaki tünelleme mekanizmasına işaret eden bariyer enerjileri kapasitans-sıcaklık taraması ile de belirlenmiş ve her iki ölçüm sonuçlarının da uyumlu olduğu görülmüştür. I-V ve C-T taraması ile elde edilen aktivasyon enerjileri LED yapıda kuantum kuyularından yük salınımı için gerekli olan 0.3-0.4 eV değerlerinden çok farklıdır. Ancak bu durum geniş kusurlar boyunca taşıyıcı tünellemesi veya komşu kuantum kuyusuyla takas şeklinde yorumlanır [43, 84, 106].

Kapasitans-sıcaklık ölçüm sonuçlarında threshold voltajı sonrasında indüktif etkinin başladığı kapasitans değerlerinin negatif değerlere doğru değiştiği gözlenmiştir. Bu durum EL, PL ve PC/PV ölçümlerindeki bant enerjilerinin sıcaklıkla kaymasına da açıklık getirir.

Elektro-optik ölçümlerde emisyon bantlarının ortaya çıkışı, elektriksel ölçümlerdeki indüktans ile ilgilidir. İndüktif etki, elektriksel ölçümlerde uygulanan ileri besleme değişimiyle, yapıdan geçen akımdaki değişimin gecikmesinden kaynaklanır. Çalışmada incelenen aygıtlar için bu etki elektron-deşik çifti yeniden birleşmesi sırasında ortaya çıkar. Bunun nedeni, ışık yayımının başlangıcı ile indüktif etkinin ortaya çıkışının (yani negatif kapasitansın başlangıcının) ileri besleme gerilimi ile çakışmasıdır. Ayrıca, frekans azaltıldığında indüksiyon etkisi daha belirgindir. İleri beslemenin artması üzerine, negatif katkı daha yüksek frekansa kayar [81]. Çalışmadaki tüm örnekler için bu durum gözlenmiştir.

EL, PL ve PC/PV ölçümlerinde mevcut olan geçişler, spektrumlarda sarı lüminesans, yeşil lüminesans, mavi lüminesans ve kırmızı lüminesans olarak kendini göstermiştir. Bu geçişler ya MQW ve p-i-n yapısındaki bariyer tabakası içinde ya/ya da kasıtsız olarak/hafif katkılı katmanların yeniden birleşme işleminde ya da p-GaN katmanının kendisinde gerçekleşir.

Tüm aygıtlar için EL, PL ve PC/PV ölçümleriyle elde edilen spektrumlarda InGaN katmanı için eşitlik 2.1 ile ön görülen değerlerde emisyon merkezleri tespit edilmiş

ve sıcaklığın fonksiyonu olarak incelenmiştir. Ayrıca PC/PV spektrumları GaN katmanının emisyon merkezinin tespitine olanak sağlamıştır.

PL ve PC/PV spektrumlarında beklenenden farklı olarak karşımıza çıkan ~ 2.2 eV deki sarı lüminesans merkezleri GaN için DAP geçişlerini ifade eder. ~ 2.4 eV deki sarı lüminesans merkezi ise kasıtsız olarak katkı GaN veya hafif p-tipi katkı GaN'deki Mg ile ilgilidir. Yine beklenmeyen UVL merkezleri GaN'nin iletim bandından sıkı akseptör seviyesine geçişi ifade eder. Son olarak, kırmızı lüminesans merkezleri ise (1.96-2.05 eV), derin donör seviyesinden derin akseptör seviyesine geçişten kaynaklanmaktadır [52, 105, 109, 117–119].

Sıcaklık arttıkça emisyon bantlarında ortaya çıkan enerji kaymalarından maviye kayma süreci indiyum miktarındaki dalgalanmadan kaynaklanan yüksek enerjili lokalize seviyelerin bant doldurma etkisine dayanır [108, 110–115]. Bu FWHM değerinin genişlemesini de açıklar. Bu süreçte emisyon bantları enjekte edilen yükler tarafından hopping mekanizmasıyla dolar. Kırmızıya kayma süreci, ışımasız yeniden birleşme merkezlerinin sıcaklıkla aktive olmasından kaynaklanır ve yeniden birleşme sürecinin ışımasız yeniden birleşme süreciyle ilişkili nokta kusurlardan kaynaklı baskın olmasıyla ortaya çıkar. Bu durum H1 tuzak seviyesinin ışımasız yeniden birleşme tipini tetiklediği SRH yeniden birleşme süreci ile ilişkilendirilir. Ayrıca düşük uyarma güçlerindeki lokalizasyon etkisi daha büyük In içeriği dalgalanmalarından kaynaklanır.

Bu çalışma kapsamında SL yapı ile MQW yapılar karşılaştırılmış olup LED uygulamaları açısından MQW yapının daha uygun olduğu görülmüştür. Diğer yandan farklı konsantrasyonlu MQW LEDlerin analizleriyle iletim mekanizmaları, enerji bantları ve bu bilgilerden yola çıkarak yapıdaki kusur merkezleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada yer alan analiz sonuçlarının tespit edilen büyütmeden kaynaklı yapısal kusur merkezlerinin iyileştirilmesine dolayısıyla LED teknolojisine ışık tutacağı öngörülmektedir.

- [1] D. H. Filsinger, D. B. Bourrie, "Silica to silicon: Key carbothermic reactions and kinetics," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 73, no. 6, pp. 1726–1732, 1990.
- [2] H. J. Round, "Light-emitting diodes hit the centenary milestone," *World*, vol. 19, p. 309, 1907.
- [3] R. M. Potter, J. M. Blank, A. Addamiano, "Silicon carbide light-emitting diodes," *Journal of Applied Physics*, vol. 40, no. 5, pp. 2253–2257, 1969.
- [4] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. Kingsley, T. Soltys, R. Carlson, "Coherent light emission from gaas junctions," *Physical Review Letters*, vol. 9, no. 9, p. 366, 1962.
- [5] M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill Jr, G. Lasher, "Stimulated emission of radiation from gaas p-n junctions," *Applied Physics Letters*, vol. 1, no. 3, pp. 62–64, 1962.
- [6] J. Pankove, M. Massoulie, "Injection luminescence from gaas," *Bull. Am. Phys. Soc*, vol. 7, p. 88, 1962.
- [7] T. M. Quist, R. H. Rediker, R. Keyes, W. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, H. Zeigler, "Semiconductor maser of gaas," *Applied Physics Letters*, vol. 1, no. 4, pp. 91–92, 1962.
- [8] G. Rostky, "Leds cast monsanto in unfamiliar role," *Electronic Engineering Times*, vol. 944, no. March 10, p. 24, 1997.
- [9] M. Craford, R. W. Shaw, A. Herzog, W. Groves, "Radiative recombination mechanisms in gaasp diodes with and without nitrogen doping," *Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 10, pp. 4075–4083, 1972.
- [10] R. Logan, H. White, W. Wiegmann, "Efficient green electroluminescence in nitrogen-doped gap p-n junctions," *Applied Physics Letters*, vol. 13, no. 4, pp. 139–141, 1968.
- [11] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes (2006)*. E. Fred Schubert, 2006.
- [12] H. P. Maruska, J. Tietjen, "The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line gan," *Applied Physics Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 327–329, 1969.
- [13] J. Pankove, E. Miller, J. Berkeyheiser, "Gan blue light-emitting diodes," *Journal of Luminescence*, vol. 5, no. 1, pp. 84–86, 1972.
- [14] H. Maruska, W. Rhines, D. Stevenson, "Preparation of mg-doped gan diodes exhibiting violet electroluminescence," *Materials Research Bulletin*, vol. 7, no. 8, pp. 777–781, 1972.

- [15] J. Pankove, M. Lampert, "Model for electroluminescence in gan," *Physical Review Letters*, vol. 33, no. 6, p. 361, 1974.
- [16] H. Maruska, L. Anderson, D. Stevenson, "Microstructural observations on gallium nitride light-emitting diodes," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 121, no. 9, p. 1202, 1974.
- [17] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki, "P-type conduction in mg-doped gan treated with low-energy electron beam irradiation (leebe)," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 28, no. 12A, p. L2112, 1989.
- [18] I. Akasaki, H. Amano, K. Itoh, N. Koide, K. Manabe, "Gan-based ultraviolet/blue light emitting devices," in *Inst. Phys. Conf. Ser.*, vol. 129, 1992, p. 851.
- [19] S. Nakamura, M. Senoh, S.-i. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, "Room-temperature continuous-wave operation of ingan multi-quantum-well structure laser diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 69, no. 26, pp. 4056–4058, 1996.
- [20] S. Nakamura, S. Pearton, G. Fasol, *The blue laser diode: the complete story*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [21] S. Nakamura, "Ingan/algan blue-light-emitting diodes," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 13, no. 3, pp. 705–710, 1995.
- [22] M. Fikry, "Investigations of processing methods for gan-based laser diodes," *Masterarbeit (Institut für Optoelektronik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik an der Universität Ulm, 2008)*,
- [23] E. Munoz, E. Monroy, J. Pau, F. Calle, F. Omnes, P. Gibart, "In nitrides and uv detection," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 13, no. 32, p. 7115, 2001.
- [24] G. Parish, S. Keller, P. Kozodoy, J. Ibbetson, H. Marchand, P. Fini, S. Fleischer, S. DenBaars, U. Mishra, E. Tarsa, "High-performance (al, ga) n-based solar-blind ultraviolet p-i-n detectors on laterally epitaxially overgrown gan," *Applied Physics Letters*, vol. 75, no. 2, pp. 247–249, 1999.
- [25] S. Pimputkar, J. S. Speck, S. P. DenBaars, S. Nakamura, "Prospects for led lighting," *Nature photonics*, vol. 3, no. 4, pp. 180–182, 2009.
- [26] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S.-i. Nagahama, "High-brightness ingan blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures," *Japanese journal of applied physics*, vol. 34, no. 7A, p. L797, 1995.
- [27] C. Li, Z. Ji, J. Li, M. Xu, H. Xiao, X. Xu, "Electroluminescence properties of ingan/gan multiple quantum well-based leds with different indium contents and different well widths," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [28] S. Krishna, N. Aggarwal, M. Mishra, K. Maurya, M. Kaur, G. Sehgal, S. Singh, N. Dilawar, B. K. Gupta, G. Gupta, "Epitaxial growth of high in-content in0.41ga0.59n/gan heterostructure on (11–20) al2o3 substrate," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 658, pp. 470–475, 2016.

- [29] J. Liu, Z. Jia, S. Ma, H. Dong, G. Zhai, B. Xu, "Enhancement of carrier localization effect and internal quantum efficiency through in-rich ingan quantum dots," *Superlattices and Microstructures*, vol. 113, pp. 497–501, 2018.
- [30] J. Yang, D. Zhao, D. Jiang, S. Liu, P. Chen, J. Zhu, F. Liang, W. Liu, M. Li, "Improvement of thermal stability of ingan/gan multiple-quantum-well by reducing the density of threading dislocations," *Optical Materials*, vol. 85, pp. 14–17, 2018.
- [31] X. Xu, Q. Wang, C. Li, Z. Ji, M. Xu, H. Yang, X. Xu, "Enhanced localisation effect and reduced quantum-confined stark effect of carriers in ingan/gan multiple quantum wells embedded in nanopillars," *Journal of Luminescence*, vol. 203, pp. 216–221, 2018.
- [32] Y.-K. Kuo, J.-Y. Chang, M.-C. Tsai, S.-H. Yen, "Advantages of blue ingan multiple-quantum well light-emitting diodes with ingan barriers," *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 1, p. 011 116, 2009.
- [33] J. Xu, M. F. Schubert, A. N. Noemaun, D. Zhu, J. K. Kim, E. F. Schubert, M. H. Kim, H. J. Chung, S. Yoon, C. Sone, *et al.*, "Reduction in efficiency droop, forward voltage, ideality factor, and wavelength shift in polarization-matched gainn/gainn multi-quantum-well light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 1, p. 011 113, 2009.
- [34] C. Champness, W. Clark, "Anomalous inductive effect in selenium schottky diodes," *Applied physics letters*, vol. 56, no. 12, pp. 1104–1106, 1990.
- [35] T. Noguchi, M. Kitagawa, I. Taniguchi, "Negative capacitance of silicon diode with deep level traps," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 7, p. 1423, 1980.
- [36] H. Gommans, M. Kemerink, R. Janssen, "Negative capacitances in low-mobility solids," *Physical Review B*, vol. 72, no. 23, p. 235 204, 2005.
- [37] F. Lemmi, N. Johnson, "Negative capacitance in forward biased hydrogenated amorphous silicon p+-in+ diodes," *Applied physics letters*, vol. 74, no. 2, pp. 251–253, 1999.
- [38] H. Liu, Z. Wasilewski, M. Buchanan, H. Chu, "Segregation of si doping in gaas-algaas quantum wells and the cause of the asymmetry in the current-voltage characteristics of intersubband infrared detectors," *Applied physics letters*, vol. 63, no. 6, pp. 761–763, 1993.
- [39] A. Perera, W. Shen, M. Ershov, H. Liu, M. Buchanan, W. Schaff, "Negative capacitance of gaas homojunction far-infrared detectors," *Applied Physics Letters*, vol. 74, no. 21, pp. 3167–3169, 1999.
- [40] J. M. Shah, Y.-L. Li, T. Gessmann, E. F. Schubert, "Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2.0$) in algan/gan pn junction diodes," *Journal of applied physics*, vol. 94, no. 4, pp. 2627–2630, 2003.
- [41] J. Fedison, T. Chow, H. Lu, I. Bhat, "Electrical characteristics of magnesium-doped gallium nitride junction diodes," *Applied physics letters*, vol. 72, no. 22, pp. 2841–2843, 1998.

- [42] C. Reynolds Jr, A. Patel, *Tunneling entity in different injection regimes of ingan light emitting diodes*, 2008.
- [43] O. Soltanovich, E. Yakimov, "Capacitance-voltage and admittance investigations of ingan/gan mqw leds: Frequency dependence," *physica status solidi c*, vol. 10, no. 3, pp. 338–341, 2013.
- [44] Y. Zohta, H. Kuroda, R. Nii, S. Nakamura, "Frequency dependence of the reverse-biased capacitance of blue and green light-emitting diodes," *Journal of crystal growth*, vol. 189, pp. 816–819, 1998.
- [45] M. El Besseghi, A. Aissat, B. Alshehri, K. Dogheche, E. Dogheche, D. Decoster, "Frequency response modeling and optimization of a pin photodiode based on gan/ingan adapted to photodetection at a wavelength of 633 nm," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 162, pp. 525–530, 2015.
- [46] C. Trager-Cowan, K. O'Donnell, S. Hooper, C. Foxon, "Morphology of luminescent gan films grown by molecular beam epitaxy," *Applied physics letters*, vol. 68, no. 3, pp. 355–357, 1996.
- [47] C. Trager-Cowan, I. Osborne, M. Barisonzi, S. Manson-Smith, K. O'Donnell, K. Jacobs, I. Moerman, P. Demeester, "Cathodoluminescence from an ingan/gan mqw grown on an epitaxially laterally overgrown gan epilayer," *physica status solidi (b)*, vol. 216, no. 1, pp. 347–350, 1999.
- [48] A. Gokarna, A. Gauthier-Brun, W. Liu, Y. Androussi, E. Dumont, E. Dogheche, J. Teng, S. Chua, D. Decoster, "Optical and microstructural properties versus indium content in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films grown by metal organic chemical vapor deposition," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 19, p. 191 909, 2010.
- [49] E. Calleja, F. Sánchez, D. Basak, M. Sanchez-Garcia, E. Munoz, I. Izpura, F. Calle, J. Tijero, J. Sánchez-Rojas, B. Beaumont, *et al.*, "Yellow luminescence and related deep states in undoped gan," *Physical Review B*, vol. 55, no. 7, p. 4689, 1997.
- [50] S. Belahsene, N. A. Al Saqri, D. Jameel, A. Mesli, A. Martinez, J. De Sanoit, A. Ougazzaden, J. P. Salvestrini, A. Ramdane, M. Henini, "Analysis of deep level defects in gan pin diodes after beta particle irradiation," *Electronics*, vol. 4, no. 4, pp. 1090–1100, 2015.
- [51] G. Pozina, J. Bergman, B. Monemar, T. Takeuchi, H. Amano, I. Akasaki, "Origin of multiple peak photoluminescence in ingan/gan multiple quantum wells," *Journal of Applied Physics*, vol. 88, no. 5, pp. 2677–2681, 2000.
- [52] A. Cavallini, L. Polenta, "Electrical characterization of nanostructures," in *Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures*, Elsevier, 2008, pp. 55–91.
- [53] H. Wang, Z. Ji, S. Qu, G. Wang, Y. Jiang, B. Liu, X. Xu, H. Mino, "Influence of excitation power and temperature on photoluminescence in ingan/gan multiple quantum wells," *Optics express*, vol. 20, no. 4, pp. 3932–3940, 2012.
- [54] W. Liu, D. Zhao, D. Jiang, D. Shi, J. Zhu, Z. Liu, P. Chen, J. Yang, F. Liang, S. Liu, *et al.*, "Effect of carrier transfer process between two kinds of localized potential traps on the spectral properties of ingan/gan multiple quantum wells," *Optics express*, vol. 26, no. 3, pp. 3427–3434, 2018.

- [55] M. Razeghi, A. Rogalski, "Semiconductor ultraviolet detectors," *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 10, pp. 7433–7473, 1996.
- [56] B. Alshehri, *Design, Fabrication and Characterization of III-Nitrides-based Photodiodes: Application to high-speed devices*. Universite de Valenciennes, PhD Thesis, 2016.
- [57] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, Y.-F. Wu, "Gan-based rf power devices and amplifiers," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 287–305, 2008.
- [58] D. Hofstetter, E. Baumann, F. R. Giorgetta, R. Théron, H. Wu, W. J. Schaff, J. Dawlaty, P. A. George, L. F. Eastman, F. Rana, *et al.*, "Intersubband transition-based processes and devices in aln/gan-based heterostructures," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 7, pp. 1234–1248, 2010.
- [59] H. Machhadani, Y. Kotsar, S. Sakr, M. Tchernycheva, R. Colombelli, J. Mangeney, E. Bellet-Amalric, E. Sarigiannidou, E. Monroy, F. Julien, "Terahertz intersubband absorption in gan/algan step quantum wells," *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 19, p. 191101, 2010.
- [60] H. Morkoç, *Handbook of nitride semiconductors and devices, Materials Properties, Physics and Growth*. John Wiley & Sons, 2009, vol. 1.
- [61] *Solid state*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wurtzite_polyhedra.png.
- [62] S. Nakamura, "Gan growth using gan buffer layer," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 30, no. 10A, p. L1705, 1991.
- [63] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda, "Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality gan film using an aln buffer layer," *Applied Physics Letters*, vol. 48, no. 5, pp. 353–355, 1986.
- [64] T. Nagatomo, T. Kuboyama, H. Minamino, O. Omoto, "Properties of gal-xinxn films prepared by movpe," *Japanese journal of applied physics*, vol. 28, no. 8A, p. L1334, 1989.
- [65] J. Wu, W. Walukiewicz, K. Yu, J. Ager III, E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, "Small band gap bowing in in 1- x ga x n alloys," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 25, pp. 4741–4743, 2002.
- [66] J. Wu, W. Walukiewicz, K. Yu, W. Shan, J. Ager III, E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, W. Metzger, S. Kurtz, "Superior radiation resistance of in 1- x ga x n alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, no. 10, pp. 6477–6482, 2003.
- [67] O. Jani, I. Ferguson, C. Honsberg, S. Kurtz, "Design and characterization of ga n/ in ga n solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 13, p. 132117, 2007.
- [68] Y. Nanishi, Y. Saito, T. Yamaguchi, "Rf-molecular beam epitaxy growth and properties of inn and related alloys," *Japanese journal of applied physics*, vol. 42, no. 5R, p. 2549, 2003.
- [69] R. Singh, B. J. Baliga, "Pin diode," in *Cryogenic Operation of Silicon Power Devices*, Springer, 1998, pp. 37–48.
- [70] B. Doherty, *Microsemi watertown. micronotes-pin diode fundamentals*.

- [71] R. Cory, D. Fryklund, S. Solutions, "Solid state rf/microwave switch technology: Part 2," *Microwave Product Digest*, p. 34, 2009.
- [72] O. Özdemir, K. Bozkurt, N. A. Kuruoğlu, H. Baş, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Transport and storage dynamics of 30% in-rich ingan/gan mqw led p-i-n structure," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 52, no. 34, p. 345 302, 2019.
- [73] S. M. Sze, Y. Li, K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons, 2021.
- [74] P. Auger, "Sur les rayons beta secondaires produits dans un gaz par des rayons x.," *CR Acad. Sci.(F)*, vol. 177, p. 169, 1923.
- [75] W. Shockley, W. Read Jr, "Statistics of the recombinations of holes and electrons," *Physical review*, vol. 87, no. 5, p. 835, 1952.
- [76] Q. Mu, M. Xu, X. Wang, Q. Wang, Y. Lv, Z. Feng, X. Xu, Z. Ji, "Influence of the ingan/gan quasi-superlattice underlying layer on photoluminescence in ingan/gan multiple quantum wells," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 76, pp. 1–5, 2016.
- [77] G.-E. Weng, W.-R. Zhao, S.-Q. Chen, H. Akiyama, Z.-C. Li, J.-P. Liu, B.-P. Zhang, "Strong localization effect and carrier relaxation dynamics in self-assembled ingan quantum dots emitting in the green," *Nanoscale research letters*, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [78] H. Sun, Z. Ji, H. Wang, H. Xiao, S. Qu, X. Xu, A. Jin, H. Yang, "Transfer and recombination mechanism of carriers in phase-separated ingan quantum wells," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 9, p. 093 508, 2013.
- [79] Y.-H. Cho, G. Gainer, A. Fischer, J. Song, S. Keller, U. Mishra, S. DenBaars, "S-shaped temperature-dependent emission shift and carrier dynamics in ingan/gan multiple quantum wells," *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 10, pp. 1370–1372, 1998.
- [80] E. Ehrenfreund, C. Lungenschmied, G. Dennler, H. Neugebauer, N. Sariciftci, "Negative capacitance in organic semiconductor devices: Bipolar injection and charge recombination mechanism," *Applied physics letters*, vol. 91, no. 1, p. 012 112, 2007.
- [81] H. Martens, J. Huiberts, P. Blom, "Simultaneous measurement of electron and hole mobilities in polymer light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 12, pp. 1852–1854, 2000.
- [82] L. Marsal, J. Pallares, X. Correig, J. Calderer, R. Alcubilla, "Electrical characterization of n-amorphous/p-crystalline silicon heterojunctions," *Journal of applied physics*, vol. 79, no. 11, pp. 8493–8497, 1996.
- [83] H. Matsuura, T. Okuno, H. Okushi, K. Tanaka, "Electrical properties of n-amorphous/p-crystalline silicon heterojunctions," *Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 4, pp. 1012–1019, 1984.
- [84] E.-M. Bourim, J. I. Han, "Size effect on negative capacitance at forward bias in ingan/gan multiple quantum well-based blue led," *Electronic Materials Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 67–75, 2016.
- [85] M. A. Lampert, P. Mark, "Current injection in solids," 1970.

- [86] G. González, "Quantum theory of space charge limited current in solids," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 8, p. 084306, 2015.
- [87] H. Scher, E. W. Montroll, "Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids," *Physical Review B*, vol. 12, no. 6, p. 2455, 1975.
- [88] P. Blom, M. Vissenberg, "Dispersive hole transport in poly (p-phenylene vinylene)," *Physical Review Letters*, vol. 80, no. 17, p. 3819, 1998.
- [89] S. V. Novikov, D. H. Dunlap, V. M. Kenkre, P. E. Parris, A. V. Vannikov, "Essential role of correlations in governing charge transport in disordered organic materials," *Physical Review Letters*, vol. 81, no. 20, p. 4472, 1998.
- [90] H. Meyer, D. Haarer, H. Naarmann, H. Hörhold, "Trap distribution for charge carriers in poly (paraphenylene vinylene)(ppv) and its substituted derivative dpop-ppv," *Physical Review B*, vol. 52, no. 4, p. 2587, 1995.
- [91] K. Bozkurt, O. Özdemir, N. A. Kuruoğlu, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Impact of trap states on inductive phenomena in 30% ingan/gan mqw led devices," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 52, no. 10, p. 105102, 2019.
- [92] F. Castro, P. Bueno, C. Graeff, F. Nüesch, L. Zuppiroli, L. Santos, R. Faria, "Crossover from capacitive to pseudoinductive charge-relaxation in organic/polymeric light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 87, no. 1, p. 013505, 2005.
- [93] J. H. Burroughes, D. D. Bradley, A. Brown, R. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, A. B. Holmes, "Light-emitting diodes based on conjugated polymers," *nature*, vol. 347, no. 6293, pp. 539–541, 1990.
- [94] L. Rigutti, M. Tchernycheva, *Electrical and electro-optical characterization of semiconductor nanowires*, 2013.
- [95] J. Lefebvre, S. Maruyama, P. Finnie, "Photoluminescence: Science and applications," *Carbon Nanotubes*, pp. 287–319, 2007.
- [96] C. A. Munson, J. L. Gottfried, F. C. De Lucia Jr, K. L. McNesby, A. W. Miziolek, "Laser-based detection methods of explosives," in *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*, Elsevier, 2007, pp. 279–321.
- [97] A. Einstein, "Einstein's proposal of the photon concept: a translation of the annalen der physik paper of 1905," *Ann. Physik*, vol. 17, p. 132, 1905.
- [98] P. Mark, *Surface physics of phosphors and semiconductors*, edited by cg scott and ce reed. reviewer, 1976.
- [99] A. Erol, M. Ç. Arıkan, "Photoconductivity and transient spectroscopy," in *Semiconductor Research*, Springer, 2012, pp. 333–365.
- [100] B. Alshehri, K. Dogheche, S. Belahsene, B. Janjua, A. Ramdane, G. Patriarche, T.-K. Ng, S.-O. Boon, D. Decoster, E. Dogheche, "Synthesis of in 0.1 ga 0.9 n/gan structures grown by mocvd and mbe for high speed optoelectronics," *MRS Advances*, vol. 1, no. 23, pp. 1735–1742, 2016.
- [101] B. Alshehri, K. Dogheche, S. Belahsene, A. Ramdane, G. Patriarche, D. Decoster, E. Dogheche, "Dynamic characterization of iii-nitride-based high-speed photodiodes," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 1–7, 2017.

- [102] A. K. Viswanath, E.-j. Shin, J. I. Lee, S. Yu, D. Kim, B. Kim, Y. Choi, C.-H. Hong, "Magnesium acceptor levels in gan studied by photoluminescence," *Journal of Applied physics*, vol. 83, no. 4, pp. 2272–2275, 1998.
- [103] U. Kaufmann, M. Kunzer, H. Obloh, M. Maier, C. Manz, A. Ramakrishnan, B. Santic, "Origin of defect-related photoluminescence bands in doped and nominally undoped gan," *Physical Review B*, vol. 59, no. 8, p. 5561, 1999.
- [104] P. Arifin, Sugianto, A. Subagio, H. Sutanto, D. Dwiputra, F. F. Florena, A. C. Keintjem, R. Khaeroni, "Room-temperature photoluminescence of mg-doped gan thin films grown by plasma-assisted mocvd," *AIP Advances*, vol. 10, no. 4, p. 045 123, 2020.
- [105] A. Polyakov, A. Govorkov, N. Smirnov, A. Markov, I.-H. Lee, J.-W. Ju, S. Y. Karpov, N. Shmidt, S. Pearton, "Properties of undoped gan/ingan multi-quantum-wells and gan/ingan p-n junctions prepared by epitaxial lateral overgrowth," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 12, p. 123 708, 2009.
- [106] O. Soltanovich, E. Yakimov, "Analysis of the temperature dependence of the capacitance-voltage characteristics of ingan/gan multiple quantum well light-emitting structures," *Semiconductors*, vol. 47, no. 1, pp. 162–168, 2013.
- [107] K. Saron, M. Ibrahim, M. Hashim, T. Taha, N. G. Elfadill, E. Mkawi, N. K. Allam, "Leakage current reduction in n-gan/p-si (100) heterojunction solar cells," *Applied Physics Letters*, vol. 118, no. 2, p. 023 902, 2021.
- [108] M. Reshchikov, A. Usikov, H. Helava, Y. Makarov, V. Prozheeva, I. Makkonen, F. Tuomisto, J. Leach, K. Udary, "Evaluation of the concentration of point defects in gan," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2017.
- [109] U. Kaufmann, M. Kunzer, M. Maier, H. Obloh, A. Ramakrishnan, B. Santic, P. Schlotter, "Nature of the 2.8 ev photoluminescence band in mg doped gan," *Applied physics letters*, vol. 72, no. 11, pp. 1326–1328, 1998.
- [110] J. Piperk, "Efficiency droop in nitride based light emitting diodes," *Phys Stat. Sol. A*, vol. 207, no. 10, p. 2217, 2010.
- [111] D. S. Meyaard, G.-B. Lin, Q. Shan, J. Cho, E. Fred Schubert, H. Shim, M.-H. Kim, C. Sone, "Asymmetry of carrier transport leading to efficiency droop in gann based light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 99, no. 25, p. 251 115, 2011.
- [112] D. Zhu, A. N. Noemaun, M. F. Schubert, J. Cho, E. F. Schubert, M. H. Crawford, D. D. Koleske, "Enhanced electron capture and symmetrized carrier distribution in gann light-emitting diodes having tailored barrier doping," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 12, p. 121 110, 2010.
- [113] Y. Shen, G. Mueller, S. Watanabe, N. Gardner, A. Munkholm, M. Krames, "Auger recombination in ingan measured by photoluminescence," *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 14, p. 141 101, 2007.
- [114] A. Efremov, N. Bochkareva, R. Gorbunov, D. Larinovich, Y. T. Rebane, D. Tarkhin, Y. G. Shreter, "Semiconductors," *S1063782606050162*, vol. 40, p. 605, 2006.

- [115] S. Hammersley, D. Watson-Parris, P. Dawson, M. Godfrey, T. Badcock, M. Kappers, C. McAleese, R. Oliver, C. Humphreys, "The consequences of high injected carrier densities on carrier localization and efficiency droop in ingan/gan quantum well structures," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 8, p. 083 512, 2012.
- [116] W. Xu, T. Ao, X. Zhang, "2009," *Hydrological modeling and integrated water resources management in ungauged mountainous watersheds*, 1935.
- [117] F. Luc, E. Rosencher, B. Vinter, "Determination of electron recombination parameters in gaas/algaas quantum wells by impedance spectroscopy," *Applied physics letters*, vol. 62, no. 10, pp. 1143–1145, 1993.
- [118] E. Rosencher, B. Vinter, F. Luc, L. Thibaudau, P. Bois, J. Nagle, "Emission and capture of electrons in multiquantum-well structures," *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 2875–2888, 1994.
- [119] W. Krystek, F. H. Pollak, Z. Feng, M. Schurman, R. Stall, "Nondestructive, room temperature determination of the nature of the band-bending (carrier type) in group iii nitrides using contactless electroreflectance and surface photovoltage spectroscopy," *MRS Online Proceedings Library Archive*, vol. 482, 1997.
- [120] S. Strite, H. Morkoç, "Gan, aln, and inn: A review," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 10, no. 4, pp. 1237–1266, 1992.
- [121] M. Trivedi, K. Shenai, "Performance evaluation of high-power wide band-gap semiconductor rectifiers," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 9, pp. 6889–6897, 1999.
- [122] N. A. Kuruoğlu, O. Özdemir, K. Bozkurt, S. Sundaram, J.-P. Salvestrini, A. Ougazzaden, Q. Gaimard, S. Belahsene, K. Merghem, A. Ramdane, "Dc and ac electrical response of mocvd grown gan in pin structure, assessed through i–v and admittance measurement," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, no. 50, p. 505 109, 2017.
- [123] W. Yang, D. Li, J. He, C. Wang, X. Hu, "Temperature-dependent ac current-voltage-capacitance characteristics of gan-based light-emitting diodes under high forward bias," *physica status solidi (c)*, vol. 11, no. 3-4, pp. 714–717, 2014.
- [124] X. Cao, E. Stokes, P. Sandvik, S. LeBoeuf, J. Kretchmer, D. Walker, "Diffusion and tunneling currents in gan/ingan multiple quantum well light-emitting diodes," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 23, no. 9, pp. 535–537, 2002.
- [125] D. Yan, H. Lu, D. Chen, R. Zhang, Y. Zheng, "Forward tunneling current in gan-based blue light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 8, p. 083 504, 2010.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. O. Özdemir, N. Ayarçı Kuruoğlu, K. Bozkurt, H. Baş, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Transport and Storage Dynamics of 30 % In-rich InGaN/GaN MQW LED p-i-n structure," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 52, no. 34, p. 345302, 2019.

Konferans Bildirisi

1. H. Baş, O. Özdemir, N. Ayarçı Kuruoğlu, K. Bozkurt, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Electroluminescence (EL) Study of 10% InGaN/GaN MQW LED Devices", *Turkish Physical Society - 35th International Physics Congress*, sözlü bildiri, Muğla/Türkiye, 4-8 Eylül 2019.
2. O. Özdemir, N. Ayarçı Kuruoğlu, K. Bozkurt, H. Baş, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Effect of Bulk Trap in GaN Barrier Layer on the Electroluminescence Spectral Properties of InGaN/GaN Multiple Quantum Well LED Device", *Turkish Physical Society - 35th International Physics Congress*, poster bildirisi, Muğla/Türkiye, 4-8 Eylül 2019.
3. H. Baş, O. Özdemir, N. Ayarçı Kuruoğlu, K. Bozkurt, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Light Emission Bands of InGaN/GaN MQW Based LED in p-i-n Structures", *Turkish Physical Society - 34th International Physics Congress*, sözlü bildiri, Muğla/Türkiye, 5-9 Eylül 2018.
4. O. Özdemir, N. Ayarçı Kuruoğlu, K. Bozkurt, H. Baş, B. Alshehri, K. Dogheche, Q. Gaimard, A. Ramdane, E. Dogheche, "Determination of Conduction Path in InGaN/GaN MQW LED by Current-Voltage and Admittance Measurements", *Turkish Physical Society - 34th International Physics Congress*, poster bildirisi, Muğla/Türkiye, 5-9 Eylül 2018.

Proje

1. Prof. Dr. Orhan Özdemir, Hanife Baş, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB), 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı, 1649B031903336, Doktora Bursiyeri, 01.06.2019-2021.
2. Prof. Dr. Orhan Özdemir, Hanife Baş, Y.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Doktora Araştırma Projesi, Metal Organik Kimyasal Buhar

Biriktirme Tekniğiyle pin Yapısında Büyütölen Galyum Nitrit Esaslı Işığ Yayan Diyotların İncelenmesi, FDK-2019-3525, Araştırmacı, 30.01.2019-2021.

3. Prof. Dr. Orhan Özdemir, Prof. Dr. Kutsal Bozkurt, Araş.Gör. Dr. Neslihan Ayarcı Kuruoğlu, Hanife Baş, Y.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Genel Araştırma Projesi, Tek Tabaka ve Çoklu Kuantum Kuyudan oluşın %10 In katkılı $In_xGa_{1-x}NGaN$ LED Yapıların Elektronik Optoelektronik Özelliklerinin Karşılaştırılması, FBA-2021-4559, Araştırmacı 07.07.2021.