



**GENİŞ YASAK ENERJİ ARALIKLI  
SICAK ELEKTRON LAZER VE  
IŞIN YAYICI YARIİLETKEN  
HETERO-YAPILAR**

**Doktora Tezi  
Selman MUTLU**

**Eskişehir, 2020**

**GENİŞ YASAK ENERJİ ARALIKLI SICAK ELEKTRON LAZER VE IŞIN  
YAYICI YARIİLETKEN HETERO-YAPILAR**

**Selman MUTLU**

**Doktora Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞ**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Ocak 2020**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 1502F069 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Selman MUTLU'nun GENİŞ YASAK ENERJİ ARALIKLI SICAK ELEKTRON LAZER VE IŞIN YAYICI YARIİLETKEN HETERO-YAPILAR başlıklı tezi 23/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Jüri Üyeleri</u>	<u>Unvan Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Engin TIRAŞ	
Üye	: Prof. Dr. Ayşe EROL	
Üye	: Prof. Dr. İbrahim KANI	
Üye	: Doç. Dr. İsmet İnönü KAYA	
Üye	: Prof. Dr. Yüksel ERGÜN	

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### GENİŞ YASAK ENERJİ ARALIKLI SICAK ELEKTRON LAZER VE IŞIN YAYICI YARIİLETKEN HETERO-YAPILAR

Selman MUTLU

Fizik Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2020

Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

Bu çalışmada, InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu yapısının, sıcak elektron etkisi ile ışığa yapan bir aygıt olan sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer heteroeklem (*Hot-Electron Light emission and Lasing In Semiconductor Heterostructures*, HELLISH) aygıtı olarak çalışması incelendi. InGaN/GaN heteroeklem yapısı safir alıtış üzerine n ve p-tipi GaN tabakalarının arasına, n-tipi GaN içerisine aktif InGaN kuantum kuyu sisteminin yerleştirilmesi şeklinde tasarlandı. İndiyum oranı 0,16 olan dört kuantum kuyulu InGaN/GaN heteroeklem yapısı İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi tarafından Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma sistemi kullanılarak büyütülmüştür. Fabrikasyon aşamaları İstanbul Üniversitesi bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı'nın olanakları kullanılarak gerçekleştirildi. p-n eklemine doğrusal olmayan bir potansiyel dağılımı oluşturabilmek için *Top-Hat HELLISH* (THH) geometrisinde, iki farklı boyutta InGaN/GaN THH aygıtı üretimi yapıldı. Aygıtların karakterizasyonları İstanbul Üniversitesi Nano-Optoelektronik Araştırma Laboratuvarı'nda yapıldı. THH aygıtlarının bünyesinde bulunan klasik ışık yayan diyot (LED) yapılarında akım-voltaj, voltaja bağılı ışık şiddeti ve dalgaboyu değişimine göre elektrolüminesans şiddeti ölçümleri gerçekleştirilerek, çalışma voltajı, ışığa gücü ve ışığa dalgaboyları gibi aygıt parametreleri elde edildi. THH aygıtlarında ise akım-elektrik alan, dalgaboyuna bağılı elektrolüminesans şiddeti değişimi ve elektrik alan-ışık şiddeti ölçümleri oda sıcaklığında yapıldı ve çalışma elektrik alanı, ışığa gücü ve ışığa dalgaboyları parametreleri belirlendi. Elde edilen tüm bulgular literatürdeki benzerleriyle karşılaştırılarak değerlendirildi.

**Anahtar Sözcükler:** Top-Hat HELLISH, InGaN/GaN MQW LED, Sıcak elektron, XOR lojik, Mavi ışık.

## ABSTRACT

### WIDE BAND GAP HOT ELECTRON LASING AND LIGHT EMISSION IN SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES

Selman MUTLU

Department of Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2020

Supervisor: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

In this work, multiple quantum well structure of InGaN/GaN is investigated as a device utilizing *Hot-electron* Light emission and Lasing In Semiconductor Heterostructures (HELLISH). A heterojunction structure is designed based on active InGaN quantum well placed in the n-type GaN region sandwiched by the n- and p-type GaN layers. Four quantum well structure of InGaN/GaN heterojunction where the Indium ratio is 0.16, has been fabricated via Metal Organic Chemical Vapor Deposition in University of Ihsan Doğramacı Bilkent, Nanotechnology Research Center (NANOTAM). The other stages of the device fabrication have been realized in the of Advanced Lithography Laboratories/Istanbul University Science Faculty Physics Department. In order to create an anisotropic potential distribution of the heterojunction, it is aimed to fabricate InGaN/GaN THH devices along two different directions in Top-Hat HELLISH (THH) geometry. The characterizations of devices have been performed in Nano-Optoelectronic Research Laboratories/Istanbul University Science Faculty. In this thesis, it is presented the results of I-V, photovoltaic, and electroluminescence characteristics of the Light Emitted Diode structures within the THH devices. The parameters such as working voltage, emission power, and wavelength of emitted radiation has been obtained. Besides, it is determined the parameters, i.e., working electric field, wavelength-dependent electroluminescence based on the acquired current-electric field, electric field-emission power characteristics, and electroluminescence spectrum. Here, it is presented a comprehensive analysis of measurements and device characteristics other similar devices presented in the literature.

**Keywords:** Top-Hat HELLISH, InGaN/GaN MQW LED, Hot electron, XOR logic, Blue light.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli bilgilerini, maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yol gösteren danışman hocam **Prof. Dr. Engin TIRAŞ**'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca kendimi her zaman çok şanslı hissetmeme sebep olan, birikimlerini, maddi-manevi desteğini, yardımlarını ve ilgisini esirgemeyen çalışma azmini hep örnek alacağım **Prof. Dr. Ayşe EROL**'a teşekkürlerimi borç bilirim.

2015 yılında aramızdan ayrılan, yenilikçi ve parlak fikirleriyle bizleri motive eden, yariletken mutfağının en büyük ustası **Prof. Dr. Naci BALKAN**'ı rahmetle anıyorum.

NANOTAM imkanlarını kullanmaya izin verdiği için **Prof.Dr. Ekmel ÖZBAY**'a ve grubundan **Yıldırım DURMUŞ** ve **Gökhan KURT**'a teşekkür ederim. Örneklerin fabrikasyon sürecinde değerli deneyimlerini paylaşan **Erkin ÜLKER**'e teşekkür ederim.

Çalışma hayatımın bana kazandırdığı en değerli iki dostum **Öğr.Gör.Dr. Furkan KURUOĞLU** ve **Araş.Gör.Dr. Fahrettin SARCAN**'a sonsuz teşekkür ederim.

Beraber çalışmaktan gurur duyduğum başta **Doç.Dr. Ömer DÖNMEZ** olmak üzere kıymetli hocalarım **Doç.Dr. Ferhat NUTKU**, **Dr.Öğr.Üyesi Saffettin YILDIRIM**, **Dr.Öğr.Üyesi Kamuran KARA KOÇ**, **Dr. İsmail Can YEŞİLYURT** ve **Mustafa AYDIN**'a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde yardımlarını esirgemeyen güler yüzlü çalışma arkadaşlarım **Ümit DOĞAN**, **Göksenin KÖMÜRCÜ**, **Burak KAY**, **Shemsat KERİMOVA**, **Sabina YUSUFOVİÇ** ve **Osman TOPAL**'a teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında desteklerini esirgemeyen aileme ve artık aileden sayılan dostum **Dr. Şükrü ARDALI**'ya teşekkür ederim.

Ufacık bir gülüşü ile bile hayatıma büyük bir anlam katan, mutluluk kaynağım, en büyük destekçim biricik eşim **İlknur KIRIMÇA MUTLU**'ya gösterdiği bütün fedakarlıklar için tüm sevgimi ve teşekkürlerimi sunuyorum. Canıyla canlandığım, varlığıyla anlamlandığım, özlemiyle eftarlandığım, dünya bir yana kızım bir yana diyebildiğim, iyi ki bir kızım var benim. **Erva Eylül canım kızıma**.

Selman MUTLU

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Selman MUTLU

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
GÖRSELLER DİZİNİ .....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. GALYUM NİTRÜR .....	3
2.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler .....	4
2.2. Kristal Yapısı .....	5
2.3. Bant yapısı .....	6
2.4. Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemiyle Büyütülmesi.....	7
2.5. n ve p-tipi Katkılama .....	8
2.6. Hidrojen Etkisi.....	9
2.7. n ve p-tipi Omik Kontaklar .....	10
2.8. In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N Alaşımı.....	12
3. IŞIK YAYAN DİYOT (LED).....	16
3.1. Optik Süreçler .....	17
3.2. p-n Eklem .....	17



<b>4. SICAK ELEKTRON IŞIN YAYICI VE LAZER YARIİLETKEN HETEROEKLEM (<i>HOT ELECTRON LIGHT EMISSION AND LASING IN SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURE, HELLISH</i>)</b> .....	<b>20</b>
4.1. HELLISH Yapılar.....	20
4.2. <i>Top-Hat HELLISH</i> (THH) Yapısı.....	29
<b>5. ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI VE DENEYSEL YÖNTEMLER</b> .....	<b>33</b>
5.1. Örnek Yapısı .....	33
5.2. Fabrikasyon Aşamaları.....	34
5.2.1. Kristal kesme .....	35
5.2.2. Kristal temizleme.....	36
5.2.3. Fotolitografi .....	37
5.2.3.1. <i>Normal fotolitografi</i> .....	40
5.2.3.2. <i>Desen tersleme fotolitografisi</i> .....	40
5.2.4. Banyolama (Develop).....	41
5.2.5. Aşındırma .....	41
5.2.5.1. <i>Fotoelektrokimyasal aşındırma (Islak aşındırma)</i> .....	41
5.2.5.2. <i>İndüktif eşleşmiş plazma - reaktif iyon aşındırma (ICP-RIE kuru aşındırma)</i> .....	44
5.2.6. Magnezyum aktivasyonu .....	45
5.2.7. Metalizasyon .....	46
5.2.8. <i>Lift-off</i> .....	47
5.2.9. Üretim süreci reçetesi .....	47
5.3. Elektrolüminesans Deney Düzenekleri.....	50
5.3.1. Klasik LED Ölçümleri İçin DC Elektrolüminesans Düzeneği .....	51
5.3.2. THH Ölçümleri İçin Pulsu Elektrolüminesans Düzeneği .....	51
5.3.3. Foto Elektrolüminesans Deney Düzeneği .....	56
<b>6. DENEYSEL BULGULAR</b> .....	<b>58</b>
6.1. THH-GaN-B-10 Aygıt Ölçümleri .....	59
6.1.1. THH-GaN-B-10 Aygıtının dc elektrolüminesans ölçümleri .....	59
6.1.2. THH-GaN-B-10 Aygıtının pulslu elektrolüminesans ölçümleri.....	68
6.1.3. THH-GaN-B-10 Aygıtının foto elektrolüminesans ölçümleri .....	76
6.2. THH-GaN-B-5 Aygıt Ölçümleri .....	79

6.2.1. THH-GaN-B-5 Aygıtının dc elektrolüminesans ölçümleri .....	79
6.2.2. THH-GaN-B-5 Aygıtının pulslu elektrolüminesans ölçümleri.....	87
6.2.3. THH-GaN-B-5 Aygıtının foto elektrolüminesans ölçümleri .....	94
7. GENEL SONUÇLAR.....	97
KAYNAKÇA .....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	HATA! YER İŞARETİ TANIMLANMAMIŞ.
ÖZGEÇMİŞ	



## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> Si, GaAs ve GaN'ün bazı fiziksel özellikleri .	5
<b>Tablo 2.2.</b> p-GaN için omik kontak oluşturmak için kullanılan metaller, kalınlıkları ve ısıt işlemleri.	12
<b>Tablo 2.3.</b> Farklı çalışma grupları tarafından elde edilen eğrilme parametreleri	14
<b>Tablo 3.1.</b> LED malzemeleri ve emisyon dalgaboyları	16
<b>Tablo 5.1.</b> FED-STD-209E standartlarına göre temiz oda sınıfları ve ISO 14644-1 standartlarındaki karşılıkları	34
<b>Tablo 6.1.</b> XOR mantıksal kapısının çalışma düzeni	72
<b>Tablo 7.1.</b> THH-GaN-B-10 ve THH-GaN-B-5 kodlu örneklerde sonuçların karşılaştırılması.	97

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Wurtzite kristal yapısı.....	6
Şekil 2.2. Zinc blende kristal yapısı.....	6
Şekil 2.3. GaN'ün elektronik bant şeması.....	7
Şekil 2.4. $In_xGa_{1-x}N$ alaşımında yasak enerji aralığının indiyum konsantrasyonuna göre değişimi .....	14
Şekil 3.1. Dengedeki bir p-n eklemnin bat şeması. Burada $E_c$ , iletim bandı enerjisi, $E_v$ , valans bandı enerjisi, $W_n$ , n-tipi arınmış bölge genişliği, $W_p$ , p-tipi arınmış bölge genişliği, $I_s$ , sürüklenme akımı, $I_d$ , difüzyon akımı, $E$ , oluşan iç elektrik alan, $V_{bi}$ , kontak potansiyeli, $E_{Fn}$ , n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi, $E_{Fp}$ , p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi, $p_n$ , n-tipi bölgedeki boşluklar (n-tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıları), $n_p$ , p-tipi bölgedeki elektronlar (p-tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıları), $p_p$ , p bölgesindeki boşluklar (p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları) ve $n_n$ , n bölgesindeki elektronlardır (n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları) .....	18
Şekil 3.2. İleri besleme durumunda hetero-eklem LED bant şeması.....	19
Şekil 4.1. HELLISH-1 aygıtının tabaka yapısı.....	21
Şekil 4.2. HELLISH-1 aygıtının enerji bant profilinin şematik gösterimi. $E_{n,p}$ tabakalara paralel uygulanan elektrik alandır. $I_{th}$ (termoionik) ve $I_{tu}$ (tünelleme) akımları yardımlarıyla engel tabakasından üç boyutlu kuantum kuyunun birinci altbant içine dengede olmayan taşıyıcılar hareketlenirler. $I_{de}$ ve $I_{dh}$ ise sırasıyla kuantum kuyu içindeki elektron ve boşluk sürüklenme akımlarıdır. $I_h$ ise kuyu içinde sıcak boşlukların sızma akımıdır.....	22
Şekil 4.3. HELLISH-2 aygıtının band yapısı .....	24
Şekil 4.4. HELLISH-2 aygıtının tabaka yapısı. $L_z$ kuantum kuyu genişliğidir .....	24
Şekil 4.5. UB-HELLISH aygıtının tabaka yapısı .....	26
Şekil 4.6 a) Yüksek derecede karmaşık yapı ve üretim teknikleri ile tasarlanmış ticari VCSEL b) basit bar geometrisinde tasarlanmış ve üretilmiş HELLISH-VCSEA aygıtı .....	27
Şekil 4.7. İletim ve değerlik bantlarında yarı-düz bant bölgesi (noktalı çizgi) şematik gösterimi. Sırasıyla boşlukların (beyaz ok) ve elektronların	

(siyah ok) sürüklenmesi ve difüzyonu. Dolu olmayan ok yeniden birleşme sonrası enerjisi $h\nu$ olan ışımadır .....	28
<b>Şekil 4.8.</b> Yarı-düz bant koşulları altında ışık yayılımı gösterimi. İB ve DB sırasıyla iletim ve değerlik bantlarıdır. İki paralel düzlem ile bant eğilme dereceleri gösterilmiştir. a) $E_a=0V/cm$ b) $E_a<V_{bi}/l$ c) $E_a= V_{bi}/l$ d) $E_a>V_{bi}/l$ .....	29
<b>Şekil 4.9.</b> Uzunluğu $l_0$ olan bir HELLISH aygıtında doğrusal olmayan p-kanal potansiyel dağılımı (Kırmızı çizgi ile çizilen). Burada n-kanal kontakları omik iken p-kanal kontakları omik değildir. Bu yüzden, aygıt ileri beslemede aşamalı olarak katoda doğru artar ve azalır. Bu aygıtın bulit-in potansiyelini azaltır ve kaynak kontak civarında ışımali yeniden birleşme artar.....	30
<b>Şekil 4.10.</b> a) THH aygıtının şematik gösterimi ve kontak konfigürasyonu. b) Aygıtın n (kırmızı çizgi) ve p kanalları (siyah çizgi) boyunca potansiyel dağılımı. $V_n>V_p$ bölgesinde aygıt geri besleme ve $V_p>V_n$ bölgesinde ise ileri besleme durumundadır .....	31
<b>Şekil 4.11.</b> Heteroeklem boyunca potansiyel dağılımı. $V_r$ ve $V_f$ sırası ile eklem içindeki maksimum geri ve ileri besleme voltajları iken $V_a$ yapıya uygulanan voltajdır. $l_1, l_2, l_3$ ve $l_4$ kontakların konumu, $\Delta V$ voltaj farkıdır .....	32
<b>Şekil 5.1.</b> Örneğin tabaka yapısı ve kalınlıkları.....	34
<b>Şekil 5.2.</b> Elmas kesici ile kristal yonganın kesilmesi. ....	36
<b>Şekil 5.3.</b> TSC işlemi yapıldıktan sonra doğal oksit tabakası temizlenmiş olan GaN örneğini yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü.....	37
<b>Şekil 5.4.</b> AZ 5214E kodlu fotodirencin a) dalgaboyuna bağılı absorpsiyon katsayısı ve duyarlı olduğı i ve h çizgileri b) dakikadaki devir sayısına göre kaplanan fotodirenç kalınlığı değışimleri (Kırmızı çizgi ile gösterilen değışim deneysel olarak elde edilen, mavi çizgi ile gösterilen değışim ise fotodirencin teknik özellikleri olarak verilen değışimlerdir.). ....	38
<b>Şekil 5.5.</b> Maske üzerindeki tek bir örneğin desen tasarımı.....	39
<b>Şekil 5.6.</b> Fotoelektrokimyasal aşındırma düzeneğinin şematik gösterimi .....	42
<b>Şekil 5.7.</b> Aşındırma sürecinde fotoakımın zamana göre değışimi. ....	43

<b>Şekil 5.8.</b> Fotoelektrokimyasal aşındırma sonrası a) profilmetre ile alınan yüzey görüntüsü b) kalınlık ölçümü.....	44
<b>Şekil 5.9.</b> Sentech SI500 ICP-RIE ile 360 saniyede elde edilen aşındırma kalınlığının KLA Tenchor P-6 profilmetre ile ölçümü. ....	45
<b>Şekil 5.10.</b> Aygıt fabrikasyon aşamalarının şematik gösterimi. 10 numaralı fabrikasyon aşamasından 18 numaralı aşamaya kadar olan süreçler iki kez daha tekrarlandığından şematik gösterimde tekrar çizilmemiştir. Tekrarlanan aşamalarda sadece kullanılan maskeler ve buharlaştırılan metaller farklılık göstermektedir.....	50
<b>Şekil 5.11.</b> Klasik LED ölçümleri için hazırlanan EL deney düzeneği.....	51
<b>Şekil 5.12.</b> THH EL ölçüm düzeneğinin yüksek hızlı akım-voltaj deney düzeneğini içeren bölümünün ayrıntılı gösterimi. Burada $V_{giriş}$ devreye uygulanan voltaj, $R_{yük}$ yük direnci, $V_R$ yük direnci üzerine düşen voltajdır. $R_{//}$ paralel direnci ise puls üretici, kablolar ve devre arasında empedansı sağlamak ve termal gürültüyü azalmak için eklenmiştir.....	52
<b>Şekil 5.13.</b> Kare dalga için iş döngüsü şeması. Dalganın tepe noktasındaki değeri $V_{cc}$ , çukurdaki değeri ise $V_{ss}$ 'dir. ....	53
<b>Şekil 5.14.</b> THH ölçümleri için hazırlanan EL ölçüm düzeneği.....	54
<b>Şekil 5.15.</b> THH EL düzeneği ile yapılan ölçümdeki osiloskop ekran görüntüsü Sarı renkte olan sinyal osiloskobun birinci kanalından gözlemlenen elektrolüminesans sinyalini, osiloskobun dördüncü kanalında yeşil ile gösterilen kare dalga örneğe uygulanan pulslu voltajı ve osiloskobun ikinci kanalındaki kırmızı kare dalga ise yük direnci üzerine düşen voltajı göstermektedir.....	56
<b>Şekil 5.16.</b> Foto elektrolüminesans ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi. ....	57
<b>Şekil 6.1.</b> THH aygıtının tabaka yapısı ve kontak konfigürasyonunun şematik gösterimi. Kontak numaraları 1 ve 4 nolu kontaklar p-tipi kontaklar iken 2 ve 3 nolu kontaklar n-tipi kontaklardır. ....	58
<b>Şekil 6.2.</b> n-tipi kontakların I-V grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışımaya şiddeti değişimi (iç grafik). 2 nolu kontakta potansiyel uygulanıp 3 nolu kontakın topraklandığı konfigürasyon 2V3T olarak, 2 nolu kontakın topraklanıp 3 nolu kontakta potansiyel uygulandığı konfigürasyon 2T3V olarak gösterildi.....	59

<b>Şekil 6.3.</b> p-tipi kontakların I-V grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışımaya şiddeti değişimi (içeriye yerleştirilmiş şekil). Kontak numarası 1 olan kontakta potansiyel uygulanıp 4 nolu kontakın topraklandığı konfigürasyon 1V4T olarak, 1 nolu kontakın topraklanıp 4 nolu kontakta potansiyel uygulandığı konfigürasyon 1T4V olarak gösterildi. ....	60
<b>Şekil 6.4.</b> THH-GaN-B-10 aygıtının klasik LED ileri besleme gösterimi. a) 1 nolu kontak +V uygulandığında ve 2 nolu kontak toprağa bağlandığında (1V2T) ileri besleme elde edilir. Işıma 1 ve 2 nolu kontakların arasındaki örnek kenarında meydana gelir. b) 3 nolu kontak topraklanıp 4 nolu kontak +V uygulandığında (3T4V) diğer klasik LED yapısı ileri beslenir. Işıma 3 ve 4 nolu kontaklar arasından gerçekleşir. ....	61
<b>Şekil 6.5.</b> 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının I-V grafiği. Her iki yapıda klasik LED davranışını göstermiştir. ....	62
<b>Şekil 6.6.</b> 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının uygulanan voltaj ile bütünleşik EL şiddetinin değişimi. ....	62
<b>Şekil 6.7.</b> THH-GaN-B-10 aygıtında klasik LED'in ileri beslemede bütünleşik EL gücünün uygulanan voltaj ile değişimi. ....	63
<b>Şekil 6.8.</b> 1V2T kontak konfigürasyonunda alınan EL spektrumu. ....	64
<b>Şekil 6.9.</b> 3T4V kontak konfigürasyonunda alınan EL spektrumu. ....	64
<b>Şekil 6.10.</b> Her iki konfigürasyonda 20 V ileri besleme voltajında alınan EL spektrumlarının normalize edilerek karşılaştırılması. ....	65
<b>Şekil 6.11.</b> 3T4V konfigürasyonunda 14 V ileri besleme voltajında elde edilen EL spektrumu. Siyah sürekli çizgi ile gösterilen deneysel elde edilen spektrumdur. Kesikli kırmızı çizgi ile gösterilen spektrum ise ayrılan piklerin toplamı olan fit spektrumdur. Deneysel spektrum 5 farklı emisyon dalgaboyuna sahiptir. ....	66
<b>Şekil 6.12.</b> Top Hat Hellish kontak yapısında a) 12 nolu kontaklara pulslu voltaj uygulanıp 34 nolu kontakların topraklandığı kontak konfigürasyonu (12V34T) b) 12 toprak 34 pulslu voltaj uygulandığındaki kontak konfigürasyonu (12T34V).....	68

- Şekil 6.13.** 12V34T kontak diziliminde 0.75 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 60 ve 500 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi. ....69
- Şekil 6.14.** 12T34V kontak diziliminde 0.75 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 60 ve 500 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi. ....69
- Şekil 6.15.** 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında uygulanan elektrik alana bağlı akımın değişimi. İki polaritede de aynı doğrusal artış elde edildi. ....70
- Şekil 6.16.** 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 0,53 kV/cm'lik elektrik alanda EL emisyonunun başladığı görüldü. İki polaritede de aynı davranış elde edildi. ....71
- Şekil 6.17.** 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı elde edilen bütünleşik EL gücü değişimi. İki polaritede de aynı elektrik alan değerlerinde aynı güçte ışımlar elde edildi. 1,95 kV/cm'lik maksimum elektrik alan değerindeki maksimum emisyon gücü 1,94  $\mu$ W'tır. ....72
- Şekil 6.18.** 12V34T kontak diziliminde EL spektrumu. ....73
- Şekil 6.19.** 12T34V kontak diziliminde EL spektrumu. ....73
- Şekil 6.20.** İki polarite için 1,25 kV/cm'lik elektrik alan değerinde alınan EL spektrumunun normalize edilerek karşılaştırılması. İki polaritede elde edilen EL spektrumları aynıdır. ....74



- Şekil 6.21.** 12T34V kontak konfigürasyonunda, 1,25 kV/cm'lik elektrik alan uygulandığı durumda EL spektrumunun piklerine ayrılması. 4 farklı pik elde edildi. Emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü. ....75
- Şekil 6.22.** İki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- akım değişimi. Elektrik alan arttıkça ışıkla uyarılan ölçümde daha fazla akım geçtiği görüldü.....77
- Şekil 6.23.** İki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- EL değişimi. Mavi ve yeşil noktalarla gösterilen ölçüm F-EL şiddeti iken siyah ve kırmızı noktalarla gösterilen ölçüm EL şiddetidir. aygıtın emisyonuna başlama elektrik alanı 0,53 kV/cm'den 0,32 kV/cm'e düşmüştür.....77
- Şekil 6.24.** F-EL spektrumu (siyah spektrum) ve EL spektrumunun (kırmızı spektrum) karşılaştırılması. EL spektrumu üzerine ışık ile uyarım yapıldığında EL spektrumunun 2 kat daha şiddetlendiği görüldü. ....78
- Şekil 6.25.** n-tipi kontakların I-V grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışımaya şiddeti değişimi (iç grafik). 2 nolu kontakta potansiyel uygulanıp 3 nolu kontakın topraklandığı konfigürasyon 2V3T olarak ifade edildi. 3 nolu kontakta potansiyel uygulanıp 2 nolu kontakın topraklandığı konfigürasyon 2T3V'dur. ....80
- Şekil 6.26.** p-tipi kontakların 1V4T ve 1T4V kontak konfigürasyonlarında I-V grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışımaya şiddeti değişimi (iç grafik). 1 nolu kontakta potansiyel uygulanıp 4 nolu kontakın topraklandığı konfigürasyon 1V4T olarak, 1 nolu kontakın topraklanıp 4 nolu kontakta potansiyel uygulandığı konfigürasyon 1T4V olarak gösterildi. ....80
- Şekil 6.27.** 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının I-V grafiği. Her iki yapıda klasik LED davranışı göstermiştir. ....81
- Şekil 6.28.** 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının uygulanan voltaj ile bütünleşik EL şiddetinin değişimi. THH-GaN-B-5 aygıtı 6,1 V ileri besleme voltajında ışımaya yapmaya başladı.....82

<b>Şekil 6.29.</b> THH-GaN-B-5 aygıtında klasik LED'in ileri beslemede bütünleşik EL gücünün uygulanan voltaj ile değişimi. 40 V ileri besleme voltajında 343,2 $\mu$ W ışığa gücü elde edildi. ....	82
<b>Şekil 6.30.</b> 1V2T kontak konfigürasyonunda alınan EL spectrumu. ....	83
<b>Şekil 6.31.</b> 3T4V kontak konfigürasyonunda alınan EL spectrumu. ....	83
<b>Şekil 6.32.</b> Her iki konfigürasyonda 15 V ileri besleme voltajında alınan EL spektrumlarının normalize edilerek karşılaştırılması. ....	84
<b>Şekil 6.33.</b> 1V2T konfigürasyonunda 19 V ileri besleme voltajında elde edilen EL spektrumu. Siyah sürekli çizgi ile gösterilen deneysel elde edilen spektrumdur. Kesikli kırmızı çizgi ile gösterilen spektrum ise ayrılan piklerin toplamı olan fit spektrumudur. Deneysel spektrum 6 farklı emisyon dalgaboyuna sahiptir. ....	85
<b>Şekil 6.34.</b> 12V34T kontak diziliminde 0,34 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 25 ve 400 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi. ....	87
<b>Şekil 6.35.</b> 12T34V kontak diziliminde 0,34 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 25 ve 400 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi. ....	88
<b>Şekil 6.36.</b> THH-GaN-B-5 aygıtının 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında uygulanan elektrik alanına bağlı akımın değişimi. İki polaritede de aynı doğrusal artış elde edildi.....	89
<b>Şekil 6.37.</b> THH-GaN-B-5 aygıtının 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alanına bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 0,25	

	kV/cm'lik elektrik alanda EL emisyonunun başladığı görüldü. İki polaritede de aynı davranış elde edildi. ....	89
<b>Şekil 6.38.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtına 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı elde edilen bütünleşik EL gücü değişimi. İki polaritede de aynı elektrik alan değerlerinde aynı güçte ışımalar elde edildi. 2,5 kV/cm'lik maksimum elektrik alan değerindeki maksimum emisyon gücü 3,5 $\mu$ W'tır.....	90
<b>Şekil 6.39.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtında 12V34T kontak diziliminde EL spektrumu.....	91
<b>Şekil 6.40.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtında 12T34V kontak diziliminde EL spektrumu.....	91
<b>Şekil 6.41.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtında iki polaritedeki,0,64 kV/cm'lik elektrik alan değerinde alınan EL spektrumunun normalize edilerek karşılaştırılması. İki polaritede elde edilen EL spektrumları aynıdır. ....	92
<b>Şekil 6.42.</b>	12V34T kontak konfigürasyonunda, THH-GaN-B-5 aygıtına 0,64 kV/cm'lik elektrik alan uygulandığı durumda EL spektrumunun piklerine ayrılması. 4 farklı pik elde edildi. Emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü. ....	93
<b>Şekil 6.43.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtında iki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- akım değişimi. ....	94
<b>Şekil 6.44.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtında iki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- EL değişimi. Mavi ve yeşil noktalarla gösterilen ölçüm F-EL şiddeti iken siyah ve kırmızı noktalarla gösterilen ölçüm EL şiddetidir. aygıtın emisyona başlama elektrik alanı 0,25 kV/cm'den 0,18 kV/cm'e düşmüştür .....	95
<b>Şekil 6.45.</b>	THH-GaN-B-5 aygıtının F-EL spektrumu (siyah spektrum) ve EL spektrumunun (kırmızı spektrum) karşılaştırılması. EL spektrumu üzerine ışık ile uyarım yapıldığında EL spektrumunun 1,6 kat daha şiddetlendiği görüldü. ....	96

## GÖRSELLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Görsel 2.1.</b> H. Amano ve ark. tarafından elde edilen ilk ışımaya fotoğrafı. Sadece M şekli elektron bombardımanı ile uyarılmıştır.....	4
<b>Görsel 6.1.</b> 1V2T kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları).....	67
<b>Görsel 6.2.</b> 3T4V kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları. ....	67
<b>Görsel 6.3.</b> 12V34T kontak diziliminde THH-GaN-B-10 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.....	75
<b>Görsel 6.4.</b> 12T34V kontak diziliminde THH-GaN-B-10 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.....	76
<b>Görsel 6.5.</b> 1V2T kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları. ....	86
<b>Görsel 6.6.</b> 3T4V kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları. ....	86
<b>Görsel 6.7.</b> 12V34T kontak diziliminde THH-GaN-B-5 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.....	93
<b>Görsel 6.8.</b> 12T34V kontak diziliminde THH-GaN-B-5 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.....	94

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### KISALTMALAR

%DC	: Yüzde İş Döngüsü
AC	: Alternatif Akım
AlGaAs	: Alüminyum Galyum Arsenik
AlN	: Alüminyum Nitrür
DBR	: Dağıtıcı Bragg Yansıtıcıları
DC	: Doğru Akım
DI	: De İyonize
DMSO	: Dimetil Sülfoksit
DT	: Gecikme Süresi
F-EL	: Foto-Elektrolüminesans
FWHM	: Tam Yüksekliğin Yarı Genişliği
GaAs	: Galyum Arsenik
GaN	: Galyum Nitrür
HELLISH	: Sıcak Elektron Işın Yayıcı ve Lazer Yarıiletken Heteroeklem
HVPE	: Hidrid Buhar Fazlı Epitaksi
ICP-RIE	: İndüktif Eşleşmiş Plazma-Reaktif İyon Aşındırma
I-E	: Akım-Elektrik Alan
InGaN	: İndiyum Galyum Nitrür
InN	: İndiyum Nitrür
I-V	: Akım-Voltaj
KOH	: Potasyum Hidroksit
LED	: Işık yayan diyot
LEEBI	: Düşük Enerjili elektron bombardımanı ışınlama
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
NAND	: Ve Değil Mantık Kapısı
NANOTAM	: Nanoteknoloji Araştırma Merkezi
NiO	: Nikel Oksit
PL	: Fotolüminesans
PMT	: Foto Çoğaltıcı Tüp
PW	: Puls Genişliği

RF	: Radyo Frekans
RTA	: Hızlı Isıl İşlem
THH	: Top Hat HELLISH
TiN	: Titanyum Nitrür
TSC	: Üç Solvent Temizleme
UB	: Ultra Parlak
UV	: Ultra Viyole
VCSEL	: Dikey Kaviteli Yüzey Işımalı Lazer
VCSOA	: Dikey Kaviteli Yarıiletken Optik Yükseltec
WKB	: Wentzel Kromers Brillouin
XOR	: Özel veya Mantık Kapısı

## SİMGELER

$\mu_b$	: Boşluk Mobilitesi
$\mu_e$	: Elektron Mobilitesi
$Al(CH_3)_2(TMAI)$	: Trimetilalüminyum
Au	: Altın
B	: Eğrilme Parametresi
$Cp_2Mg$	: Bis (siklopentadienil) Magnezyum
DETe	: Dietiltellurium
DEZn	: Dietilink
DMZn	: Dimetilzinc
E:	: Elektrik Alan
e:	: Elektron Yüğü
$E_a$	: Dış Elektrik Alan
$E_c$	: İletim Bandı Enerji Seviyesi
$E_{e1}$	: Birinci Elektron Enerji Seviyesi
$E_{Fn}$	: n Tipi Yarıiletkenin Fermi Enerji Seviyesi
$E_{Fp}$	: p Tipi Yarıiletkenin Fermi Enerji Seviyesi
$E_g$	: Bant Aralığı
$E_{hh1}$	: Birinci Ağır Boşluk Enerji Seviyesi
Ek	: Kırılma Alanı

$E_{lh1}$	: Birinci Hafif Boşluk Enerji Seviyesi
$E_{lh2}$	: İkinci Hafif Boşluk Enerji Seviyesi
$E_v$	: Valans Bandı Enerji Seviyesi
$Ga(CH_3)_2(TMGa)$	: Trimetilgalyum
$H^+$ ve $H^-$	: İyonik Hidrojenler
$Hh$	: Ağır Boşluk
$I_d$	: Difüzyon Akımı
$In$	: İndiyum
$In(CH_3)_2(TMIn)$	: Trimetilindiyum
$I_{örnek}$	: Örnek Akımı
$I_s$	: Sürüklenme Akımı
$I_{th}$	: Termoyonik Akım
$I_{tu}$	: Tünelleme Akım
$J_{therm}$	: Termoyonik Akım Yoğunluğu
$J_{tun}$	: Tünelleme Akım Yoğunluğu
$k_B$	: Boltzman Sabiti
$Lh$	: Hafif Boşluk
$L_z$	: Kuantum Kuyu Genişliği
$Mg$	: Magnezyum
$Mg-H$	: Magnezyum Hidrojen Bağı
$N_2$	: Azot Gazı
$N_A$	: Akseptör Katkı Yoğunluğu
$N_D$	: Donor Katkı Yoğunluğu
$NH_3$	: Amonyak
$Ni$	: Nikel
$n_i$	: Katkısız Katkı Yoğunluğu
$n_n$	: n Tipi Bölgedeki elektronlar
$n_p$	: p Tipi Bölgedeki elektronlar
$O_2$	: Oksijen Gazı
$\emptyset_m$	: Metal İş Fonksiyonu
$\emptyset_s$	: Yarıiletken İş Fonksiyonu
$\emptyset_{Ti}$	: Titanyumun İş Fonksiyonu
$Pd$	: Paladyum

$\text{PH}_3$	:	Fosfin
$p_n$	:	n Tipi Bölgedeki boşluklar
$p_p$	:	p Tipi Bölgedeki boşluklar
Pt	:	Platin
$R_{eş}$	:	Eşdeğer Direnç
$R_{yük}$	:	Yük Direnci
Si	:	Silisyum
$\text{SiH}_4$	:	Silan
T	:	Sıcaklık
$T(E_z)$	:	Bariyer Geçiş Sabiti
$T_e$	:	Elektron Sıcaklığı
$T_L$	:	Örgü Sıcaklığı
$V_a$	:	Dış Voltaj
$V_b$	:	Bariyer Yüksekliği
$V_{bi}$	:	Kontakt Potansiyeli
$V_{cc}$	:	Dalganın Tepe Noktası Değeri
$V_f$	:	İleri Besleme Voltajı
$V_{giriş}$	:	Puls Giriş Voltajı
$V_r$	:	Geri Besleme Voltajı
$V_R$	:	Yük Voltajı
$V_s$	:	Sürüklenme Hızı
$V_{ss}$	:	Dalganın Çukur Noktası Değeri
$W_n$	:	n Tipi Arınmış Bölge Genişliği
$W_p$	:	p Tipi Arınmış Bölge Genişliği
X	:	Alaşım Konsantrasyonu
X	:	Boyutsuz THH Parametresi
Zn	:	Çinko
$\Lambda$	:	Dalgaboyu
X	:	Isıl İletkenlik



## 1. GİRİŞ

Günümüzün elektronik sanayisi, ileri teknolojinin kullanıldığı ve üretildiği birimlerin başında gelmektedir. Bu sanayinin en temel köşe taşlarından biri ise yarıiletken malzemelerdir. Bu sebeple yarıiletken malzemeler sürekli araştırılmakta ve buna paralel olarak yüksek kalitede elektronik cihazlar geliştirilmektedir. Bu tip elektronik cihazlar günlük hayatımızda kullanıldığı gibi askeri ve uzay teknolojisinde de vazgeçilmezler arasındadır.

Yarıiletkenlerin optoelektronik özelliklerinin karakterize edilmesinin aygıt teknolojisi bakımından önemi büyüktür. III-Nitrür grubu, optik ve elektronik aygıtlardaki uygulamalarından dolayı oldukça ilgi çekmektedir. GaN tabanlı ve özellikle InGaN yapılar ortaya koyduğu optoelektronik özellikleriyle teknolojide geniş kullanım alanına yol açar. Bu yapıların teknolojik olarak görüntüleme, veri depolama, iletim, fotodinamik terapi, cerrahi, terahertz aygıt ve gaz algılayıcı aygıt olarak kullanılması muhtemeldir. Galyum zengini ( $x > 0,5$ )  $In_{1-x}Ga_xN$  alaşımları, dalgaboyu enerjisi 2,1–3,4 eV ( $\lambda \sim 0.60-0.36 \mu m$ ) aralığında değişen mükemmel ışın yayıcılar olarak bulunmuştur. Özellikle InGaN/GaN mavi ışık yayan diyodun (Light Emitting Diode, LED) geliştirilmesiyle aydınlanma ve görüntüleme teknolojilerinde büyük bir değişim yaşanmıştır. Bu nedenle 2014 Nobel Fizik Ödülü “enerji verimli beyaz ışık kaynaklarının geliştirmesine olanak veren mavi LED” i geliştirdikleri için Isamu AKASAKI, Hiroshi AMANO ve Shuji NAKAMURA’ya verilmiştir.

Tasarlanan yarıiletken aygıtların yüksek sıcaklıklarda ve yüksek alanlarda etkin çalışabilmesi önemlidir. Bu yüzden aygıtların yüksek elektrik alanlardaki davranışlarının ve sıcak elektron iletiminin incelenmesinin teknolojik önemi vardır. Kristal büyütme teknikleri ve ileri fabrikasyon tekniklerinin geliştirilmesi sonucunda düşük boyutlu yarıiletken aygıtlar üretilebilmektedir. Böylece birkaç potansiyel fark altında yüksek elektrik alanların elde edilebilir hale gelmesiyle kristal içinde örgü sıcaklığı ile dengede olmayan serbest elektronların (sıcak elektronların) oluşturulmasına olanak tanınmıştır.

Sıcak elektron etkisinden yararlanarak ışına yapan bir aygıt olan sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer yarıiletken hetero-eklem (*Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure*, HELLISH) yapılar sıcak elektron yüzey yayıcılarıdır. Yapı boyunca tüm tabakalara difüze olmuş iki elektriksel kontak yardımıyla, tabakalara paralel uygulanan elektrik alan ile taşıyıcılar kendi kanallarında ısınırlar ve daha yüksek

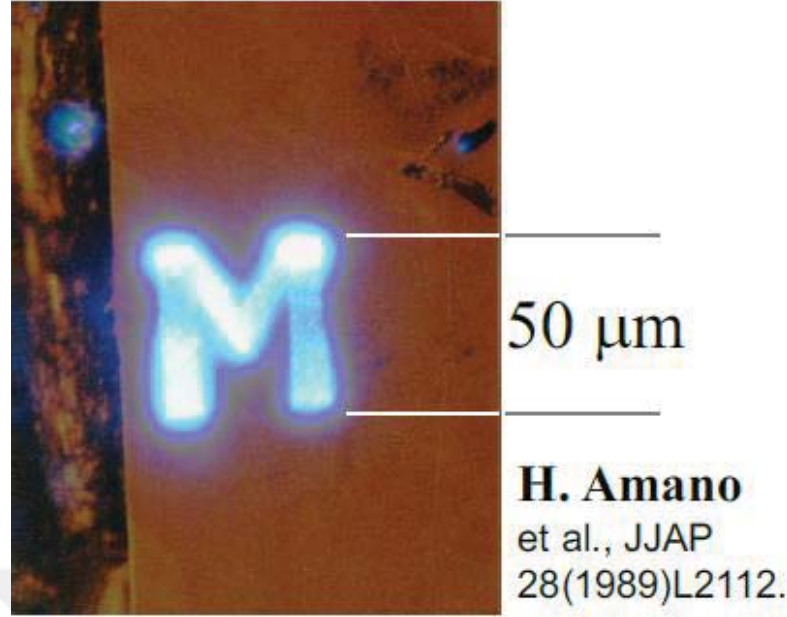
enerji seviyelerine ulaşırlar. Eklem n- tarafındaki elektronlar ve p- tarafındaki boşlukların kuantum kuyu içerisinde elektron-hole çifti oluşturmasıyla yüzey ışımı gerçekleşir. Aygıtın yüzey ışımı yapması özelliğinden dolayı iki boyutlu bir matris yapısında sıralanabilirler. Uygun satıra potansiyel fark uygulandığında ve uygun sütun toprağa bağlandığında kesişim bölgesindeki aygıt ışık vermektedir. Boyutlarının oldukça küçük olmasından dolayı da daha küçük alanlara daha fazla aygıt dizilebilir. Işık yayılımı, elektrik alan tarafından taşıyıcıların ısıtılmasıyla gerçekleştirildiğinden yayılan ışığın şiddeti uygulanan gerilimin polaritesine bağlı değildir.

Bu tez çalışmasında sıcak elektron etkisinden yararlanarak ışıma yapan bir aygıt olan sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer yarıiletken heteroeklem yapıların tasarımları ve üretimleri yapılarak, elektriksel ve optik özellikleri belirlendi. Elde edilen sonuçlardan muhtemel optoelektronik aygıt olarak kullanılabilme yöntemlerinin araştırılması da tez kapsamında amaçlanmıştır.

## 2. GALYUM NİTRÜR

Galyum nitür (GaN), III/V grubu direkt ve geniş bir bant aralığına sahip bir yarıiletkenidir. Optoelektronik cihazlarda, mavi-yeşil ışık yayan diyotları ve ultraviyole LED'leri geliştirmek için GaN'ın kullanımı gerekli ve önemlidir. Galyum nitür çok sert ve mekanik olarak dengeli bir malzemedir ve büyük bir ısı kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri ile elektronik ve optoelektronik aygıt üretimi için yaygın kullanılan bir yarıiletken malzeme haline gelmiştir.

GaN'ün ilk başarılı sentezi 1930'lu yıllarda sıvı galyum ve amonyak (NH<sub>3</sub>)'ın doğrudan reaksiyonu ile *Jonhson ve ark.* tarafından gerçekleştirildi [1]. Reaksiyon sonrası açığa, koyu gri renkli toz şeklinde bir malzeme çıkmıştır. Elde edilen malzemenin oda sıcaklığında hava, asit ve bazlar ile kimyasal dengede olduğu görülmüştür. *Maruska ve Tietjen* 1969 yılında hidrid buhar fazlı epitaksi (*Hydride Vapor Phase Epitaxy; HVPE*) ile safir alttaş üzerine ilk tek kristal GaN filmi büyütmüşlerdir. GaN filmde kendiliğinden oluşan yüksek elektron yoğunluğunun azot boşluklarından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir [2]. *Pankove ve ark.* 1970'li yılların başlarında, ilk GaN aygıt uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [3]. Çinko (Zn) katkılı bir yalıtkan üzerine n-tipi GaN tabakası büyüterek, yeşil ışık yayan bir LED oluşturmuşlardır. Fakat daha sonra p-tipi katkılama zorluklarından dolayı GaN araştırmaları neredeyse durmuştur. Büyük bir atılım olan magnezyum (Mg) katkılı GaN ile p-tipi iletim *Amano ve ark.* tarafından 1989 yılında sağlanmıştır [4]. Düşük enerjili elektron bombardımanı ışınlama (*Low Energy Electron Beam Irradiation; LEEBI*) ile direncin ciddi bir şekilde düşürüldüğü ve fotoluminesans (*PL*) verimliliğinin de dikkat çekici bir şekilde arttığı görülmüştür. p-tipi katkılamaadaki başarılı sonuçlar aygıt performanslarında büyük gelişmeler sağlamıştır. *Amano ve ark.* tarafından elde edilen ilk ışımaya Görsel 2.1'de verilmiştir [5]. Ardından *Nakamura ve ark.* 1993 yılında ilk GaN mavi LED'i üretmişlerdir [6, 7]. *Nichia Corporation* 1993 yılında dünyadaki ilk InGaN (İndiyum Galyum Nitür) mavi LED'i ticari olarak pazarlamaya başlamıştır. Ayrıca 1995 yılında galyum nitür LED'lerin verimini arttırmak için çok önemli bir teknoloji olan tek kuantum kuyulu LED'ler üretilmiştir [8]. Bu teknolojiye kuantum kuyusunun aşırı dar tasarlanması sayesinde kuantum sınırlı Stark etkisi baskılanır [9, 10] ve böylece geçiş olasılıkları artar [10].



**Görsel 2.1.** H. Amano ve ark. tarafından elde edilen ilk ışımaya fotoğrafı. Sadece M şekli elektron bombardımanı ile uyarılmıştır [5].

Bu gelişmeler sonucunda 2014 yılında Fizik Nobel Ödülü, “enerji verimli beyaz ışık kaynaklarının geliştirilmesine olarak veren mavi LED” geliştirdikleri için *Isamu AKASAKI, Hiroshi AMANO ve Shuji NAKAMURA*’ya verilmiştir.

## 2.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Galyum nitür, kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde, elektronik ve optoelektronik aygıtların üretimi için kullanılması çok cazip olan bir yarıiletkendir. Bir aygıtın hangi sıcaklık aralığında daha verimli çalıştığı, ısı iletkenlik ile belirlenir [11, 12]. GaN’ün ısı iletkenliği GaAs ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Aygıtların çalışma performanslarını etkileyen bir diğer parametre ise kırılma alanıdır. Kırılma alanı aygıtın en yüksek çalışabileceği potansiyel fark değeridir [13, 14]. Kırılma alanı, yüksek güç aygıtlarının tasarımı için önemli bir parametredir. Kırılma voltajı değeri GaAs ile karşılaştırıldığında GaN’ün oldukça büyük bir kırılma alanı değerine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek elektron sürüklenme hızı ile de GaN yüksek frekans uygulamaları için uygun bir malzeme olarak ilgi çeker [15]. Tablo 2.1’de Si, GaAs ve GaN yarıiletken malzemelerin bazı fiziksel özellikleri verildi. GaN’ün bu özellikleri sayesinde yüksek frekans, yüksek sıcaklık ve yüksek güç aygıtları için uygun bir yarıiletken olduğu görülmektedir.

**Tablo 2.1.** *Si, GaAs ve GaN*'ün bazı fiziksel özellikleri [11–14, 16].

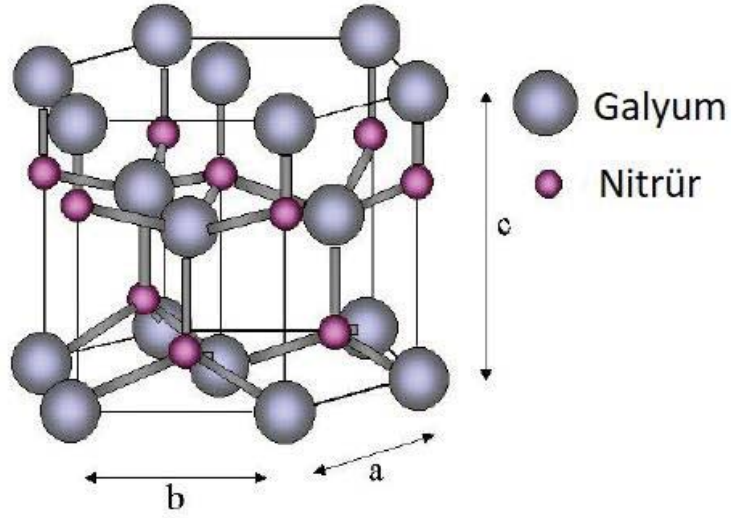
Özellik	Si	GaAs	GaN
Bant Aralığı, $E_g$ (eV)	1,12	1,42	3,40
Kırılma Alanı, $E_k$ (MV/cm)	0,3	0,4	3,3
Elektron mobilitesi, $\mu_c$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	1400	8500	1000
Boşluk mobilitesi, $\mu_b$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	450	400	200
Elektron Sürüklenme hızı, $v_s$ ( $10^7 \text{cm/s}$ )	1,0	1,0	2,5
Isıl iletkenlik, $\chi$ (W/cmK)	1,3	0,55	1,3

## 2.2. Kristal Yapısı

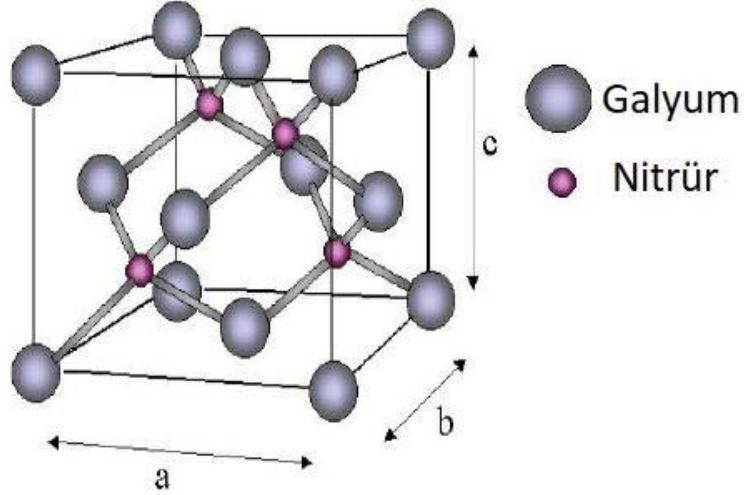
Galyum nitrür hem *wurtzite* hem de *zinc blende* yapısında kristallenebilir. Kristalografik olarak iki farklı yapı birçok benzerlik göstermesine rağmen katkılama ve elektriksel özellikleri oldukça farklıdır. Düşük basınç altında termal olarak çok dengeli olduğundan daha yaygın kullanılan kristal yapısı *wurtzite*'dir. *Zinc blende*, *wurtzite* kristal yapısıyla karşılaştırıldığında, teorik olarak hesaplanan daha yüksek mobilite, kübik simetri sayesinde daha iyi izotropik özellikler ve yüksek optik kazanç gibi daha iyi elektriksel özelliklere sahiptir. Fakat bu üstün teorik özellikler, yapıda oluşan yüksek kusurlar nedeniyle deneysel olarak elde edilememiştir [17, 18].

*Wurtzite* kristal yapısı,  $a$  ve  $b$  eşit sabitlerine sahip hegzagonal bir örgü ile karakterize edilir.  $c$ -ekseni hegzagonal düzleme diktir. Örgü aslında  $c$ -ekseni boyunca yerleştirilmiş bir galyum ve nitrür atom yüzeyleri dizisidir. Böylece, *wurtzite* kristal yapısı, iç içe geçmiş iki hegzagonal örgü ile karakterize edilir. *Zinc blend* örgüsü ise, iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik örgü tarafından oluşturulur.

GaN kristal yapısının tanımı, üç örgü sabiti ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) ve üç açı  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  ile verilmektedir. *Wurtzite*  $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 120^\circ$  sabitlerine sahiptir. *Zinc blende* ise bir kübik yapının tipik olarak  $a = b = c$  ve  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  sabitlerine sahiptir. *Wurtzite* kristal yapısı Şekil 2.1'de gösterilirken *Zinc blende* kristal yapısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Wurtzite kristal yapısı [19].



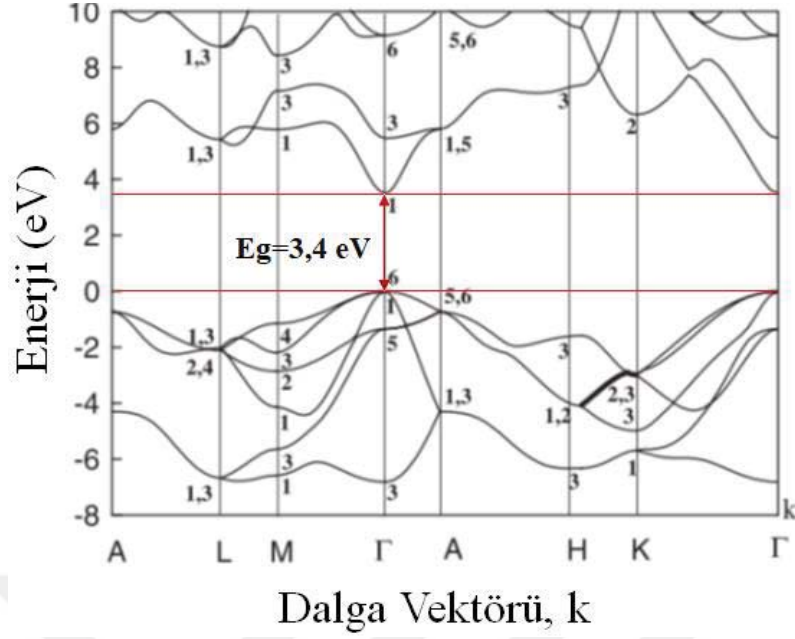
Şekil 2.2. Zinc blende kristal yapısı [19].

Kristalin örgü sabitleri, yarıiletkenin elektriksel özellikleri ile güçlü bir ilişkiye sahiptir. Örneğin, örgü yapısı ne kadar küçükse, enerji aralığı o kadar büyük olur. Bu durum aynı zamanda sıcaklık ve enerji aralığı arasındaki ilişkiyle de örtüşür. Aslında daha yüksek bir sıcaklık, kristal yapının genişlemesini ve dolayısıyla düşük bir enerji aralığının oluşmasını sağlar [19].

### 2.3. Bant yapısı

III-Nitrür bileşik yarıiletkenlerin elektronik bant yapısı deneysel psödopotansiyel yaklaşımı (*empirical pseudopotential approach*) kullanılarak ile hesaplandığında [20], Şekil 2.2'deki GaN'ün bant yapısı elde edilir.





Şekil 2.3. GaN'ün elektronik bant şeması [20].

GaN için oda sıcaklığında enerji bant aralığı 3,4 eV (366 nm)'tur. GaN'ün bant yapısı bir iletim bandı ile üç valans bandı içerir. Wurtzite kristal yapısındaki malzemelerde, spin-orbital (*spin-orbit*) ve kristal-alan (*crystal-field*) etkilerinden dolayı valans bandı üç alt banda ayrılır. Alt bantlar, ağır boşluk (*heavy hole*, hh), hafif boşluk (*light hole*, lh) ve spin-orbital olarak adlandırılırlar [21, 22].

#### 2.4. Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemiyle Büyütülmesi

Tüm III-V bileşikleri gibi, galyum nitür de doğal formda mevcut değildir. Diğer tüm bileşik yarıiletkenler gibi, yapay sentez ile hazırlanmaktadır. Johnson ve arkadaşları, 1932'de metal galyumu amonyak gazı ile reaksiyona sokarak GaN üreten ilk kişiler olmuşlardır [1]. Daha sonraları çok çeşitli büyütme teknikleri geliştirilerek çok tabakalı yarıiletken filmlerin uygun yüzeyler üzerinde büyümesi mümkün hale gelmiştir. Farklı büyütme teknikleri ile büyütülen tabakaların kalınlığının kesin ve tekrar üretilebilirliği sağlanmaya çalışılmıştır.

Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (*Metalorganic Chemical Vapour Deposition*, MOCVD) tekniği, elektronik ve optoelektronik cihazlar için epitaksiyel yarıiletken filmler üretmek için en çok kullanılan tekniklerden biridir [23–28]. Buhar fazındaki III ve V. grup elementleri, bir MOCVD odasında, ısıtılmış bir alttaş üzerinde, atmosferik basınç altında reaksiyona girerler. MOCVD tekniği, buhar fazında kaynak malzemelerinin taşınması, bu kaynak malzemelerin ısıtılmış bölgede reaksiyonu ve

reaksiyon sonunda oluşan ürünün bir alttaş üzerinde biriktirilmesi aşamalarından oluşur. III. grup elementlerin buhar fazındaki kaynak malzemeleri trimetil veya trietil bazlı metal-organik bileşiklerdir. III. grup elementlerinin en yaygın kullanılan buhar fazındaki kaynak malzemeleri, alüminyum büyütülmesi için trimetilalüminyum  $\text{Al}(\text{CH}_3)_2$ (TMAl), galyum büyütülmesi için trimetilgalyum  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_2$ (TMGa) ve indiyum büyümesi için trimetilindiyum  $\text{In}(\text{CH}_3)_2$ (TMIn)'dur. V. grup elementlerinin buhar fazındaki kaynak malzemeleri ise fosfit ve nitrit büyütülmesi için sırasıyla hidritler fosfin ( $\text{PH}_3$ ) ve amonyaktır ( $\text{NH}_3$ ). Katkılama için kullanılan buhar fazındaki kaynak malzemeleri ise dietilzinc (DEZn), dimetilzinc (DMZn), bis (siklopentadienil) magnezyum ( $\text{Cp}_2\text{Mg}$ ) ve dietiltellurium (DETe) metal organik bileşikleridir. Si katkılamak için de silan ( $\text{SiH}_4$ ) kullanılır. MOCVD tekniğinde yer alan reaksiyonlar, çok karmaşık ara aşamalar içermesine rağmen, MOCVD ile yüksek kalitede epitaksiyel tabakalar elde edilir.

### **2.5. n ve p-tipi Katkılama**

Üretilen aygıtların performanslarının geliştirilmesinde, farklı konsantrasyonlarda katkılamamanın büyük bir önemi vardır. 1990'lı yılların başlarına kadar, geniş bant aralığına sahip yarıiletkenleri katkılamak oldukça zor olmuştur. Katkılama bir yarıiletkendeki, çok az sayıdaki atomu farklı tip atomlarla yer değiştirerek elektronların ya da boşlukların sayısını arttırmak için kullanılan bir tekniktir. Yarıiletken malzemeye, daha fazla elektrona sahip atomlar eklendiğinde, katkı türü n tipi katkı olarak adlandırılır. Bu katkılamada iletim öncelikle elektronlar tarafından gerçekleştirilir. Bu katkılama çeşidinin tam tersi ise, yarıiletkene daha az elektron içeren atomlar eklendiğinde p-tipi katkılama meydana gelir. p-tipi katkılamada boşluk sayısı arttırılır ve iletim öncelikle boşluklar ile gerçekleştirilir.

Transistörler ve LED'ler gibi temel elektronik aygıtlar, malzemenin p ve n-tipi katkılanmış türevlerinin bir araya getirilmesiyle (p-n eklem) oluşturulurlar. Bu nedenle verimli aygıtlar elde edebilmek için yeterince katkılanmış n ve p-tipi katkılamaya ihtiyaç vardır. En yaygın olarak kullanılan katkılama tekniği, malzemenin büyütüldüğü sırada katkı atomlarını gaz fazında büyütme odasına eklenmesidir. Ayrıca iyon implantasyonu (ekmek) ile de doğru ve kontrollü bir katkılama yapmak mümkündür. Katkılamadan sonra, katkıların aktif hale getirilmesi için ve katkılamamanın neden olduğu bozuklukları en aza indirmek için hızlı ısı işlem uygulanabilir.



Katkısız GaN, kendiliğinden n-tipi katkı olarak büyümektedir. Büyütülme sırasında azot eksikliğinden kaynaklanan kusurlar nedeni ile GaN'ün n-tipi davranış gösterdiği düşünülmektedir [29].

GaN kolayca n-tipi katkılanabilir. En fazla kullanılan katkı atomu, Ga atomları yerine geçen silisyum (Si)'dur. Katkılama ile  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> civarında konsantrasyon oluşturulabilir. n-tipi katkılama, MOCVD ile GaN tabakası büyütülürken büyütme odasına silan (SiH<sub>4</sub>) eklenmesiyle gerçekleştirilir [30]. n-tipi katkılama için oksijen, hidrojen ve germanyum atomları da kullanılabilir. Fakat yapı içerisinde oluşturdukları kusurlardan dolayı Si'dan daha az etkilidirler [31]. Bundan dolayı çok fazla tercih edilmezler.

GaN'ün n-tipi büyüme doğası gereği p-tipi GaN elde etmek oldukça zordur. Malzemenin boşluk sayısını arttırmak için önce fazla elektronların kompanse edilmesi gerekir. Sadece Mg atomları ile başarılı bir katkılama yapılmıştır. Fakat Mg atomları hidrojen ile bağ yaptığından katkı pasif durumdadır. p-tipi GaN tabakasının yüksek direnç değerini azaltmak için Mg atomlarının aktif hale getirilmesi gerekir. Bunun için büyütme sonrasında malzeme ısıtılma tabii tutulur ve aktivasyonu gerçekleştirilir. *Amano ve ark.* düşük enerjili elektron bombardımanı ışınlatma (*Low Energy Electron Beam Irradiation*; LEEBI) kullanarak Mg katkılı p-tipi GaN elde eden ilk araştırmacılar [4]. Daha sonrasında *Nakamura ve ark.* farklı ortamlarda ısıtılma uygulamalarıyla daha düşük dirençli p-tipi GaN filmler elde etmişlerdir [32].

## 2.6. Hidrojen Etkisi

MOCVD reaksiyonunda hidrojenin (H<sub>2</sub>) bir akış gazı olarak kullanılması nedeniyle, GaN katmanlarında en çok bulunan safsızlık hidrojendir [29]. H<sub>2</sub>'nin kendisi kimyasal olarak aktif değildir, ancak elementin iyonik formları olan H<sup>+</sup> ve H<sup>-</sup> magnezyum atomları ile çok duyarlıdır. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda (25-250 °C) bile nötr Mg-H bağlarının oluşumu ile p-tipi GaN'de Mg akseptörlerinin pasifleştirilmesi (elektriksel olarak devre dışı bırakılması), hidrojenin p-tipi GaN içindeki olumsuz bir etkisidir [33, 34]. Bu durum GaN'deki akseptör yüzdesini azaltır ve öz direnci artırır. N<sub>2</sub> ya da O<sub>2</sub> ortamlarında 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ısıtılma, hidrojen atomlarını Mg-H komplekslerinden çıkarabilir, böylece p-tipi GaN filmlerinin direnci düşürülebilir [35-40].

## 2.7. n ve p-tipi Omik Kontaklar

Üretilen yarıiletken aygıtların bir devreye entegre edilebilmesi için metal kontaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Kontak, metal ve aygıtın yarıiletken yüzeyinin çok düşük bir dirençle temas ettirilmesi olarak tanımlanabilir. Düşük dirençli ve dayanıklı kontaklar oluşturabilmek için aygıt yüzeyi çok temiz ve pürüzsüz olmalıdır. Yarıiletken yüzey ve metal temas ettiklerinde aralarında Fermi enerjileri eşitleninceye kadar bir yük akışı olur. Sistem dengeye geldiğinde, yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarının aralarındaki ilişkiye göre oluşan kontak omik ya da doğrultucu kontak olur. İş fonksiyonu, bir elektronun Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır. n-tipi yarıiletken malzeme üzerine kontak oluşturulmak istendiğinde, metalin iş fonksiyonu ( $\phi_m$ ) yarıiletkenin iş fonksiyonundan ( $\phi_s$ ) büyük ise oluşan kontak doğrultucu iken,  $\phi_m < \phi_s$  durumunda oluşan kontak omiktir. Aynı şekilde p-tipi yarıiletken üzerine kontak oluşturulmak istenirse,  $\phi_m < \phi_s$  durumunda doğrultucu kontak oluşurken,  $\phi_m > \phi_s$  durumunda ise omik kontak oluşur. Omik kontaklarda elektronlar ve boşluklar herhangi bir engel ile karşılaşmadan metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale kolayca geçebilirler. Doğrultucu kontaklarda ise taşıyıcı taşıyıcılar bir yönde hareket edebilirken diğer yöndeki hareketleri bir potansiyel engel tarafından zorlaştırılır, hatta hareket edemezler. Bu tez çalışmasında omik kontaklar kullanıldığından, n-tipi GaN ve p-tipi GaN tabakaları ile omik kontak oluşumu açıklandı.

n-tipi GaN için, Ti/Al/Ni/Au kontak konfigürasyonu, buharlaştırılma kolaylığı ve yüksek elektriksel özelliklerinden dolayı en çok kullanılan omik kontak formudur [41–45]. Metallerin sırasıyla buharlaştırılması ardından yüksek tavlama sıcaklıkları (800 °C üzeri) ile kontak alışı omik hale gelir. Tavlama sırasında, Ti ve Al gibi azot bağlayıcı metaller, yarıiletken-metal arayüzeyinde azot ile TiN, AlN veya AlTi<sub>2</sub>N gibi yapılar oluştururlar. Tavlama ayrıca metaller arasında birbirleri içine geçmeye (*interdiffusion*) yol açar. Metallerin birbiri içine geçmesiyle düşük dirençli Ti-Al ve Au<sub>2</sub>Al bileşikleri oluşur [46–49]. Böylece oluşan kantağın direnci düşer. Ti metali n-tipi GaN yüzeyi ile temas halindedir. Aslında, Ti iş fonksiyonunun ( $\phi_{Ti}$ , 4,3 eV) GaN'ün elektron ilgisinden daha büyük olmasından dolayı omik kontak için uygun değildir. Fakat tavlama ile oluşan TiN (3,7 eV) iş fonksiyonu, GaN'ün iş fonksiyonundan daha küçüktür. TiN oluşumu ile etkili potansiyel engel yüksekliği azalır. Aynı zamanda GaN tabakası içinde azot eksikliği

ile yüksek katkılı alanlar oluşturur [49–51]. Böylece düşük dirençli omik kontaklar elde edilir.

GaN tabanlı aygıtların üretimi ve geliştirilmesi için yüksek kalitede omik kontakların oluşturulması, aygıt performansı için çok önemli bir parametredir. Çünkü aygıtların performansı yüksek p-tipi kontak dirençlerinden ciddi bir şekilde etkilenir. p-tipi GaN yüzeyinde iyi kalitede omik kontak oluşturulması çok fazla araştırılmasına rağmen hala büyük ölçüde sorun olmaya devam etmektedir. Bunun nedeni p-GaN katkı seviyesinin arttırılamaması ve p-GaN iş fonksiyonu ile karşılaştırılabilecek metal iş fonksiyonu elde edilememesinden kaynaklanmaktadır [52, 53]. p-tipi GaN'ün iş fonksiyonu yaklaşık 6,6 eV olduğu düşünülmektedir [54]. p-tipi GaN'de omik kontak oluşturmak için yapılan ilk çalışmalarda Pt, Au, Ni ve Pd gibi metaller kullanılmasına rağmen tek katmandan oluşturulan kontaklar doğrultucu davranış göstermişlerdir [54–56]. Bununla birlikte yarıiletken-kontak arayüzeyinde metallerin birbirleriyle kimyasal reaksiyonları sonucunda farklı metallerin oluşma olasılığı da vardır. Bundan dolayı, daha sonraki çalışmalarda farklı şekillerde ve üretim teknikleri kullanılarak p-GaN omik kontak elde edilmeye çalışılmıştır. En çok kullanılan p-GaN kontak Ni/Au formudur [57–61]. Genellikle oksijen ortamında ısıl işlem ile uygun iletkenlik sağlanır. Termal işlem sırasında oluşan NiO sayesinde Mg atomları serbest kalır. Böylece p-GaN tabakasında serbest boşluk konsantrasyonu artar ve elektriksel olarak daha fazla boşluk iletme katkıda bulunur [57, 62–69]. Tablo 2.2'de p-GaN kontak için kullanılan metaller, kalınlıkları ve ısıl işlem sıcaklıkları verilmiştir.

**Tablo 2.2.** *p-GaN için omik kontak oluşturmak için kullanılan metaller, kalınlıkları ve ısıl işlemleri [53].*

Kontak Malzemeleri ve kalınlıkları [nm]	Öz Direnç ( $\Omega\text{cm}^2$ )	RTA ( Hızlı termal tavlama)	Ref.
Ni/Au (10/5)	$<1 \times 10^{-4}$	500 °C 10 dak. hava	[57]
Ni/Au (55)	$4 \times 10^{-6}$	500 °C 10 dak. hava	[70]
Ni/Au (5/20)	$1 \times 10^{-4}$	400-600 °C	[71]
Ni/Au (20/100)	$< 4,8 \times 10^{-6}$	500 °C 1 dak. hava	[72]
Ni/Au (20/100)	$4,5 \times 10^{-6}$	500 °C 10 dak. hava	[73]
Ni/Au (5/5)	$8,9 \times 10^{-5}$	Yok	[74]
Cr/Au	$2,6 \times 10^{-3}$	Yok	[75]
Pd/Ag/Au/Ti/Au (1/50/10/30/20)	$1 \times 10^{-6}$	800 °C 1 dak. N <sub>2</sub>	[76]
Ni/Au/Ir/Au (50/80/50/80)	$2,3 \times 10^{-4}$	800 °C N <sub>2</sub>	[77]
Ni/Au/CrB <sub>2</sub> /Ti/Au (50/80/50/20/80)	$2 \times 10^{-4}$	700 °C 1 dak. N <sub>2</sub>	[78]
Ni/Au/ZrN/Ti/Au (50/80/50/20/80)	$2 \times 10^{-4}$	700 °C 1 dak. N <sub>2</sub>	[79]
In <sub>0.19</sub> Ga <sub>0.81</sub> N/Pt/Au	$1,1 \times 10^{-6}$	Yok	[80]

## 2.8. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Alaşımı

III-Nitrür yarıiletkenlerin alaşım konsantrasyonlarının değiştirilmesi ile yasak enerji bant aralığı da değiştirilebilir [8, 81–83]. Bu özelliklerinden dolayı kızılötesi bölgeden ultraviyole bölgeye kadar ışık yayan aygıt olarak kullanılabilirler. *Wurtzite* kristal yapısındaki GaN ve InN'ün beraber kullanılmasıyla elde edilen In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N,  $x$  alaşım konsantrasyonuna bağlı olarak 0,7-3,4 eV enerji aralığında ışın yayıcı aygıt olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. *Wurtzite* GaN ve InN bileşikleriyle oluşan In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N alaşımı da *wurtzite* kristal yapısındadır [16, 84].

InGaN malzemesini büyütme oldukça zordur. Yüksek kaliteli InGaN malzemeleri büyütme zorluklarının başında InN ve GaN arasındaki atomlar arası mesafedeki büyük farklılıklar gelir. Bu fark nedeniyle katı fazda birbirleri arasına karışabilirlikleri sınırlanır [85]. Ayrıca iki bileşik yarıiletken arasındaki buhar basıncı farkından dolayı (GaN'ün buhar basıncına kıyasla InN'ün yüksek buhar basıncı) InGaN alaşımında indiyumun düşük oranda yer almasına neden olur [23]. Bu problemler, düşük büyütme sıcaklıkları, yüksek akış oranı, düşük basınç ve düşük büyütme oranı gibi büyütme parametrelerinin optimize edilmesiyle en aza düşürülebilir.

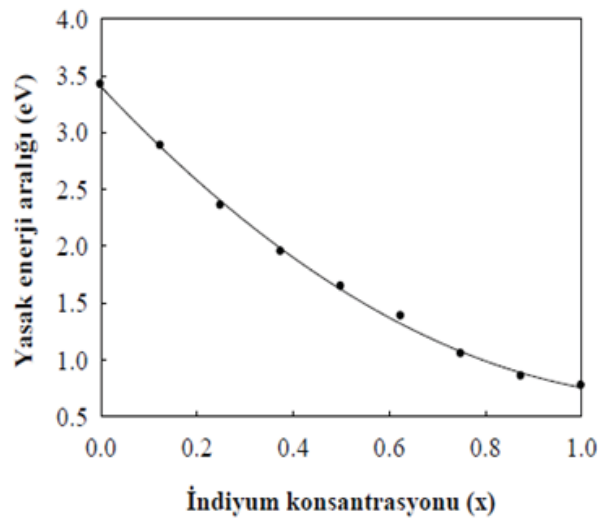
Büyütülen InGaN malzemenin bant aralığı *Vegard* yasası ile hesaplanır [21, 22, 86, 87]. *Vegard* yasası

$$Eg(In_xGa_{1-x}N) = x Eg(InN) + (1-x)Eg(GaN) - bx(1-x) \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $x$  alaşımdaki In miktarının mol kesri ve  $b$  eğrilme parametresidir (*bowing parameter*). Eğrilme parametresi, GaN ve InN ikili alaşımının bant aralığı enerjisinin doğrusallıktan sapma miktarı ile ilgilidir [21, 22, 81, 88–90]. Eğrilme parametresinin değerini belirlemek için hem deneysel hemde teorik birçok çalışma yapılmasına rağmen hala kesin bir sonuç elde edilememiştir. Oluşan yeni yapının homojen olmaması, faz ayrımı ve gerilmeler nedenlerinin yanı sıra InGaN'ün indiyum oranını ve bant aralığı enerjisini ölçmek için kullanılan tekniklerin de eğrilme parametresinin hesaplanmasında yanlışlıklara yol açabileceği düşünülmektedir [83]. Eğrilme parametresi 1-6 eV arasındaki değerleri alabilir. Tablo 2.3'de literatürde bulunan farklı büyütme koşullarında, farklı büyütme teknikleriyle farklı konsantrasyonlardaki InGaN yapılardan elde edilen eğrilme parametreleri verildi.  $In_xGa_{1-x}N$  alaşımının yasak enerji aralığının In konsantrasyonuna bağlı olarak değişimi Şekil 2.4'te verildi. In oranı arttıkça yasak enerji aralığının azaldığı görülmektedir.

**Tablo 2.3.** Farklı çalışma grupları tarafından elde edilen eğrilme parametreleri [83].

Alaşım miktarı ölçümü	Kalınlık (nm)	İn Oranı (x)	Eg Ölçümü	Eğrilik Parametresi b	Gerilme Durumu	Büyütme Tekniği
XRD	300	0,2-0,27	PL	3,6	GERGİN	MBE
SIMS	15-60	0,02-0,15	PR	3,2	GERGİN	MOCVD
XRD	400	X<0,10 X>0,13	PL	6,0	SAKİN	MBE
			PL	4,0		
XRD	N.A.	0,07-0,33	PL	1,0	N.A.	MOCVD
N.A.	N.A.	X=0,0625	F.P.C.	4,8	GERGİN	N.A.
		X=0,225	F.P.C.	3,5	SAKİN	N.A.
		X=0,25	F.P.C.	3,0	GERGİN	N.A.
XRD	40	0<X<0,2	PR	2,6	GERGİN	MOCVD
			PR	3,8	SAKİN	MOCVD
			PL	3,2	GERGİN	MOCVD
R.B.S.	250	X<0,12	OT	3,5	GERGİN	MOCVD
F.P.C.	F.P.C.	F.P.C.	F.P.C.	1,7	N.A.	N.A.
Smsyn	N.A.	0-0,375	Smsyn	1,21±0,03	SAKİN	N.A.
XRD	250	0,61<X<1	PL	1,8	SAKİN	MBE
XRD	40	0,2	PL	3,2	GERGİN	MOCVD
XRD	30-100	0-0,25	PL	4,11	SAKİN	MOCVD
				3,42	GERGİN	MOCVD
N.A.	200-7500	0-0,5	OA	1,4	N.A.	MBE



**Şekil 2.4.**  $In_xGa_{1-x}N$  alaşımında yasak enerji aralığının indiyum konsantrasyonuna göre değişimi [16, 91].

InGaN yarıiletkeninin, büyütme hızı, büyütme sıcaklıkları, indiyum oranındaki değişimler ve InGaN kalınlığı gibi parametreleri optik özellikleri etkileyen faktörlerden başlıcalarıdır. MOCVD ile büyütülen InGaN alaşımlarında, düşük büyütme sıcaklıklarında daha fazla indiyum oranı elde edildiği görülmüştür [92, 93]. Yüksek sıcaklıklarda ( $T_g > 750$  °C) büyütülen bazı örneklerde belirgin bir şekilde bant kenarı emisyonu gözlenirken [94] düşük sıcaklıklarda ( $T_g < 700$  °C) büyütülen bazı örneklerde ise derin bir seviye veya safsızlık geçişlerinin baskın olduğu tespit edilmiştir [95]. Yüksek büyütme sıcaklıklarında, bant kenarından emisyonun derin seviye emisyonuna oranı artmıştır. Ayrıca bant kenarı emisyon şiddeti artan indiyum konsantrasyonu ile azalır [95]. Bant kenarı ışımaya tam yüksekliğin yarı genişliği (*Full Width Half Maximum*, FWHM)'nin indiyum konsantrasyonu ile genişlediği elde edilmiştir [92, 93, 95].

InGaN tabakanın kalitesinin ve optik özelliklerinin belirlenmesindeki önemli etkilerden birisi de kristalin büyütme hızıdır. Yüksek büyütme hızında, indiyum birleşimleri daha da yükselir. İndiyum zengini InGaN'ın düşük sıcaklık fotolumineans sonuçlarından derin ve geniş emisyonların baskın olduğu elde edilmiştir [96].

### 3. IŞIK YAYAN DİYOT (LED)

Işık yayan diyot (*Light Emitting Diode*, LED), uygun ileri besleme koşulları altında elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde doğal ışığa yapan bir p-n eklemdir. Günümüzde LED teknolojisi, aydınlanma, optik haberleşme ve görüntü sistemleri alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. LED'ler, yapılarında kullanılan yarıiletken malzemeye göre, elektrik enerjisini görünür bölgeden kırmızı altı bölgeye kadar optik spektruma dönüştüren aygıtlardır. Tablo 3.1'de kullanılan yarıiletken malzemelerin emisyon yaptıkları dalga boyları verilmiştir.

**Tablo 3.1.** LED malzemeleri ve emisyon dalga boyları [97].

Renk	Dalgaboyu (nm)	Yarıiletken Malzeme
IR	>760	GaAs AlGaAs
Kırmızı	$610 < \lambda < 760$	AlGaAs GaAsP AlGaInP GaP
Turuncu	$590 < \lambda < 610$	GaAsP AlGaInP GaP
Sarı	$570 < \lambda < 590$	GaAsP AlGaInP GaP
Yeşil	$500 < \lambda < 570$	InGaN/GaN GaP AlGaInP AlGaP
Mavi	$450 < \lambda < 500$	InGaN
UV	<400	AlN AlGaN
Beyaz	Geniş Spektrum	Sarı Fosfor İçeren Mavi/UV diyot



### 3.1. Optik Süreçler

Bir yarıiletkende foton ve taşıyıcılar (elektronlar ve boşluklar) arasında soğurma, doğal ışığa ve uyarılmış ışığa adı verilen üç temel optik süreç gerçekleşir. Soğurma valans banttaki bir elektronun, yasak enerji aralığından daha büyük enerjili bir fotonun enerjisiyle iletkenlik bandına geçmesi olarak tanımlanabilir. İletkenlik bandına çıkan elektronun bir süre bu bantta kaldıktan sonra, iletim bandında boşluklarla rekombine olurlar. Aldığı enerjiyi yasak bant aralığı enerjisi değerinde foton olarak salar. Buna doğal ışığa denir. Uyarılmış ışığa ise gelen fotonun iletkenlik bandında bulunan elektronu valans bandına inmesi için zorlar ve foton yaymasına denir. LED'ler soğurma ve doğal ışığa optik süreçlerine dayalı olarak çalışırlar.

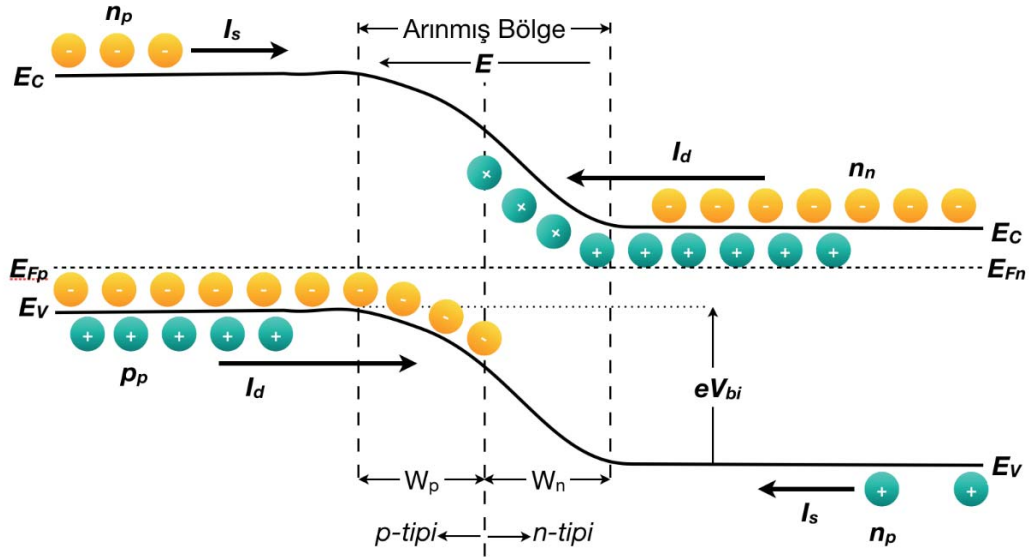
Yarıiletken ışık kaynaklarından elektrolüminesans (*EL*) ışığı elde edilmesinde, seçilen yarıiletkenin bant geçişleri (direk bant/ indirek bant) çok önemli rol oynar. Direk bant aralığına sahip yarıiletkenlerde iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı  $k$  değerinde olduğundan valans banttaki elektronlar foton soğurarak iletim bandına geçebilirler. İletkenlik bandında  $10^{-8}$  s kaldıktan sonra valans banttaki boşluklarla rekombine olurlar. İndirek bant aralığında ise elektronların iletkenlik bandına geçebilmeleri için hem foton hem de fonon soğurması gerekir. İndirek bant aralığında rekombinasyon da çok yavaştır. Elektronlar  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  s kadar sonra rekombine olurlar. Bundan dolayı ışımsız rekombinasyon oluşması olasılığı çok yüksektir. Bu sebeplerden ötürü direk bant aralığına sahip yarıiletkenler ışık kaynağı olarak seçilmesi çok daha uygundur.

### 3.2. p-n Eklem

Diyotların bir yöndeki dirençleri diğer yöndeki dirençlerinden oldukça düşüktür. İleri besleme ( $V_f$ ) durumunda akım eksponansiyel bir şekilde artarken, geri beslemede ( $V_r$ ) ise besleme voltajından bağımsız olarak çok küçük bir akım geçer. Geri besleme durumunda geçen çok küçük akımlar sızıntı akımı olarak adlandırılır. Diyot geri beslemede eşik değerine ulaştığında, diyot karakteristiği bozulmaya başlar. Diyot özelliklerinin bozulmaya başladığı eşik değerine kırılma voltajı denir.

Günümüz teknolojisinde elektronik ve optoelektronik aygıtların temelini oluşturan p-n eklemeleri, iki farklı tipte katkılanmış yarıiletken malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Eklem p-tipi yarıiletkeninde boşluklar, n-tipi yarıiletkeninde ise elektronlar çoğunluk taşıyıcılarıdır. İki farklı taşıyıcı yoğunluğuna sahip n ve p-tipi yarıiletken bir araya getirildiklerinde aralarında Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar yük alış

verişi meydana gelir. Eklem n tarafından p tarafına doğru elektronlar, p tarafından n tarafına doğru boşluklar difüzyon yoluyla geçerler. p tarafına geçen elektronlar boşluklarla n tarafına geçen boşluklar ise elektronlarla yeniden birleşme (*recombination*) yaparlar. Böylece eklem bölgesi hareketli yüklerden arındırılır. Geride sadece iyonize olmuş akseptör ve donör atomları kalır. Bu iyonize yüklerden kaynaklanan, eklem içerisinde bir elektrik alan oluşur. İç elektrik alan, hareketli yüklerden arındırılmış eklem bölgesinde, eklem n tarafından p tarafına doğrudur. Arınmış bölgedeki iç elektrik alan sayesinde bu bölgeye giren taşıyıcılar süpürülürler. Bu durumda denge durumunda difüzyon akımını dengeleyen bir sürüklenme akımı oluşur. Şekil 3.1’de denge durumunda bir p-n eklemine yük dağılımı ve bant profili verilmiştir. Burada  $E_c$  iletim bandı enerjisi,  $E_v$  valans bandı enerjisi,  $W_n$  n-tipi arınmış bölge genişliği,  $W_p$  p-tipi arınmış bölge genişliği,  $I_s$  sürüklenme akımı,  $I_d$  difüzyon akımı,  $E$  oluşan iç elektrik alan,  $V_{bi}$  kontak potansiyeli,  $E_{Fn}$  n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi,  $E_{Fp}$  p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi,  $p_n$  n-tipi bölgedeki boşluklar (n-tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıları),  $n_p$  p-tipi bölgedeki elektronlar (p-tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıları),  $p_p$  p bölgesindeki boşluklar (p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları) ve  $n_n$  ise n bölgesindeki elektronlardır (n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları).



**Şekil 3.1.** Dengedeki bir p-n eklem bant şeması. Burada  $E_c$  iletim bandı enerjisi,  $E_v$  valans bandı enerjisi,  $W_n$  n-tipi arınmış bölge genişliği,  $W_p$  p-tipi arınmış bölge genişliği,  $I_s$  sürüklenme akımı,  $I_d$  difüzyon akımı,  $E$  oluşan iç elektrik alan,  $V_{bi}$  kontak potansiyeli,  $E_{Fn}$  n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi,  $E_{Fp}$  p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi,  $p_n$  n-tipi bölgedeki boşluklar (n-tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıları),  $n_p$  p-tipi bölgedeki elektronlar (p-tipi bölgedeki azınlık taşıyıcıları),  $p_p$  p bölgesindeki boşluklar (p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları) ve  $n_n$  n bölgesindeki elektronlardır (n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları) [98].

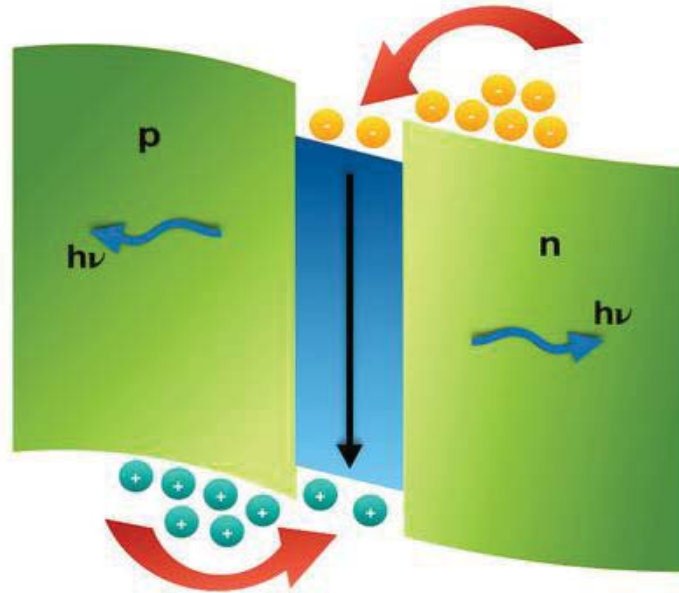
Kontak potansiyeli,

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (3.1)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada  $k_B$ , Boltzman sabiti,  $e$  elektron yükü,  $T$  sıcaklık,  $N_A$  akseptör katkı yoğunluğu,  $N_D$  donör katkı yoğunluğu ve  $n_i$  ise katkısız (*intristic*) taşıyıcı yoğunluğudur.

İleri besleme durumunda eklem içindeki elektrik alan azalır ve arındırılmış bölge daralır. Bundan dolayı kontak potansiyeli uygulanan potansiyel kadar azalır. Böylece elektronlar eklem p tarafına, boşluklar ise n tarafına geçebilirler. Geri beslemeye ise kontak potansiyelinin, uygulanan potansiyel kadar artmasıyla iç elektrik alan ve arınmış bölge genişlikleri artar. Taşıyıcıların geçişleri engellenmiş olur.

Bir p-n eklem arınmış bölgesine, asal ve eklem bant aralığından daha küçük bant aralığına sahip bir yarıiletken yerleştirilmesi ile oluşturulan hetero-eklem LED'in, ileri besleme durumundaki enerji bantları Şekil 3.2'de verildi. Enjekte edilen elektronlar dar enerji bant aralığına sahip yarıiletkende yeniden birleşirler. Böylece emisyon enerjisi p ve n tipi yarıiletkenin bant aralığından daha küçük olur ve yapı tarafından tekrar soğurulmaz [97, 98].



Şekil 3.2. İleri besleme durumunda hetero-eklem LED bant şeması.

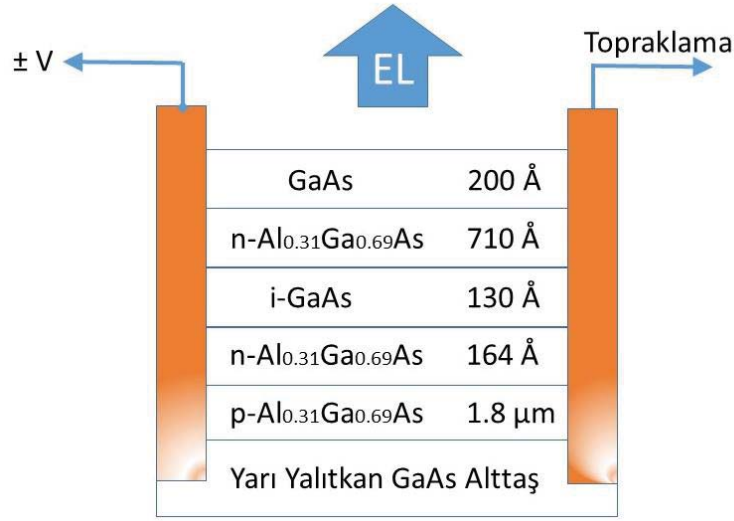
#### 4. SICAK ELEKTRON IŞIN YAYICI VE LAZER YARIİLETKEN HETEROEKLEM (*HOT ELECTRON LIGHT EMISSION AND LASING IN SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURE, HELLISH*)

Kristal büyütme ve ileri fabrikasyon tekniklerinin geliştirilmesi sonucunda, çok küçük boyutlarda yarıiletken aygıtların üretilebilmesi ile birkaç potansiyel fark altında yüksek elektrik alanlar ( $E$ ) kolayca elde edilebilir. Yüksek elektrik alan etkisi ile oluşan, kristal içinde örgü sıcaklığı ( $T_L$ ) ile dengede olmayan serbest elektronlara sıcak elektron denir. Günümüzde sıcak elektron rejimi yarıiletken teknolojisi için çok önemlidir. Birçok yüksek frekans aygıtı sıcak elektron bölgesinde çalışabilmesi için tasarlanmışlardır.

Sıcak elektron etkisinden yararlanarak ışına yapan bir aygıt olan sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer yarıiletken hetero-eklem (*Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure, HELLISH*) yapılar sıcak elektron yüzey yayıcılarıdır. İlk HELLISH aygıtları 1995 yılında Prof. Balkan ve grubu tarafından tasarlanmış ve çalışılmaya başlanmıştır [99–102]. İlk tasarlanan HELLISH yapısı bir p-n eklemının yüklerden arındırılmış bölge (*depletion region*) tabakasının n tarafına tek bir kuantum kuyusunun yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu yapı HELLISH-1 olarak adlandırılmıştır. Ardından tek kuantum kuyu yapısı değiştirilerek çoklu kuantum kuyu yapısı kullanılmış ve HELLISH-2 yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra bu yapıları, ultra parlak UB-HELLISH, HELLISH VCSEL- VCSOA ve son olarak *Top-Hat HELLISH* (THH) yapılarının geliştirilmesi takip etmiştir. Bu tez çalışmasında THH geometrisinde aygıtlar üretildi ve ölçümleri gerçekleştirildi.

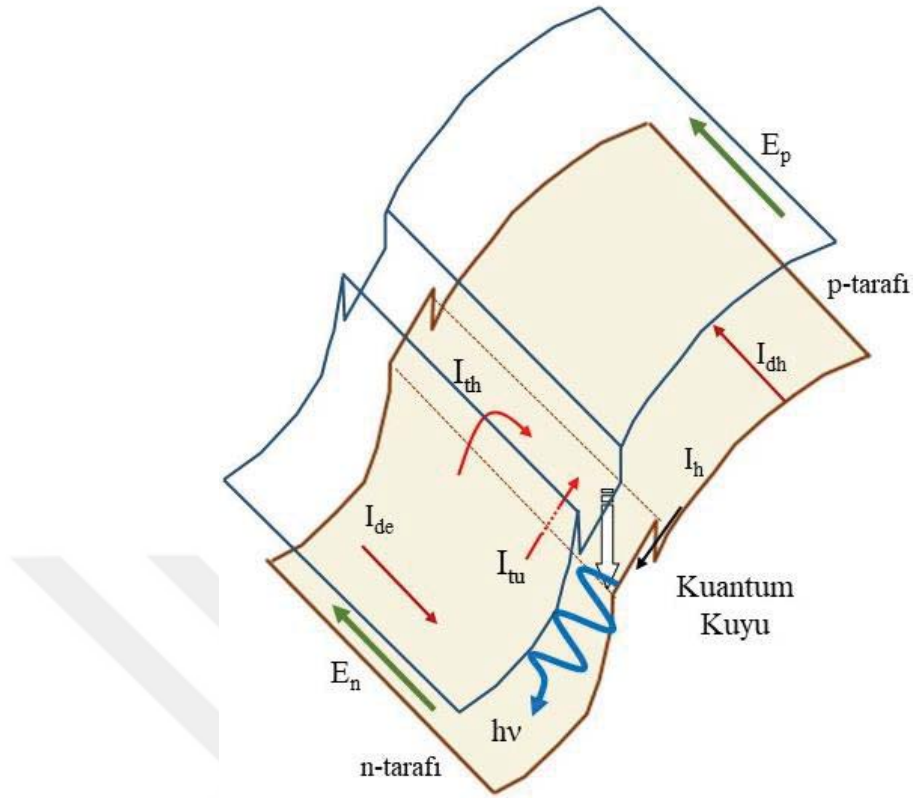
##### 4.1. HELLISH Yapılar

HELLISH-1 yapısı, geniş bant aralığından oluşan bir p-n eklemının n tarafında, daha dar bant aralığına sahip malzemeden yapılmış bir kuantum kuyusu içermektedir [101–104]. Elektriksel kontaklar Au/Ge/Ni alaşımının yapının yüzeyinden içeriye doğru tüm katmanlara difüzyonu ile oluşturulmuştur. Böylece elektrik alan boyuna, aygıt tabakalarına paralel olarak uygulanmıştır. HELLISH-1 aygıtının tabaka yapısı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. HELLISH-1 aygıtının tabaka yapısı [101–103].

HELLISH-1 aygıtında taşıyıcıların davranışları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Boyuna elektrik alan aygıt tabakalarına paralel olarak uygulandığında n tarafındaki elektronlar ve p tarafındaki boşluklar (hole) ısınırlar yani kendi bantlarında daha yüksek enerji seviyelerine ulaşırlar. Ancak boşlukların etkin kütlesi elektronların etkin kütlesinden daha yüksek olduğu için elektron sıcaklığı boşluk sıcaklığına göre daha yüksektir. Oluşan sıcak elektronlar düşük elektrik alanlarda tünelleme, yüksek elektrik alanlarda ise termo-iyonik emisyonların baskın olduğu süreçler ile kuantum kuyusuna geçerler. Kuantum kuyu, sıcak elektronlar için büyük bir tuzak gibi davranır. Kuantum kuyu içindeki elektronlar ısıl olarak örgü ile termal dengede değildirler ve fazla olan enerjilerini, potansiyel engel boyunca fononlar ile etkileşerek ısı aktarımı yaparlar ve/veya kuyu içerisine tünelleyerek fazla enerjilerini kaybeder. Yükten arındırılmış bölgedeki fazla yükler ise eklem enerji-bant profilinin değişmesine neden olur. Bu durumda eklem, eklem p tarafı sanki ileri yönde besleniyormuş gibi, buna karşın n tarafındaki arınmış bölge geri besleniyormuş gibi davranır. Böylece yük dengesini korumak için kuantum kuyu içine sürüklenen boşluklar hareketlenir ve p tarafındaki yükten arındırılmış bölge ve potansiyel engeli azalır. Yeniden birleşme (*recombination*) ile ışımaya, sıcaklığı artırılan taşıyıcılar ile olur [101, 103, 105]. Bu tür aygıtların kullanılmasındaki avantaj üretim süreçleri boyunca gereken sadece iki elektriksel kontaklıdır.



**Şekil 4.2.** HELLISH-1 aygıtının enerji bant profilinin şematik gösterimi.  $E_{n,p}$  tabakalara paralel uygulanan elektrik alanıdır.  $I_{th}$  (termo-iyonik) ve  $I_{tu}$  (tünelleme) akımları yardımıyla engel tabakasından üç boyutlu kuantum kuyunun birinci altbantı içine dengede olmayan taşıyıcılar hareketlenirler.  $I_{de}$  ve  $I_{dh}$  ise sırasıyla kuantum kuyu içindeki elektron ve boşluk sürüklenme akımlarıdır.  $I_h$  ise kuyu içinde sıcak boşlukların sızma akımıdır [103, 106].

Bu yapıda kuantum kuyu içine enjekte edilen akım yoğunluğu iki farklı akım yoğunluğunun katkısı ile oluşmaktadır. Bu akım yoğunluğu katkıları, üç boyutlu (3D) Al<sub>0.21</sub>Ga<sub>0.79</sub>As durumlarından GaAs kuantum kuyu içine elektronların tünellemesi ve termo-iyonik emisyonu ile meydana gelir [101]. Her iki katkı bariyer üzerindeki elektron sayısı ile belirlenir. Bu elektronların dik hızları ve bariyer geçiş sabiti  $T(E_z)$  bu katkıları belirleme kullanılan parametredir. Termo-iyonik emisyon durumunda elektronların balistik olarak bariyer üzerinden geçtikleri varsayımı yapılır. Yani  $T(E_z)=1$  olarak alınır. Bu durumda akım yoğunluğu;

$$J = \frac{em^*}{4\pi^3\hbar^3} \int f(E)T(E_z) dE_x dE_y d\vartheta \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada  $E$  toplam elektron enerjisidir ve  $E_x + E_y = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2)$  ile ifade edilir.  $m^*$ , elektron etkin kütlesi,  $f(E)$  sıcaklığa bağlı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur.



Böylece,

$$J_{tun} = \frac{em^*k_B T_e}{4\pi^3 \hbar^3} \int_0^{V_b} T(E_z) \ln(1 + \exp(\frac{E_F - E_z}{k_B T_e})) dE_z \quad (4.2)$$

$$J_{therm} = \frac{em^*(k_B T_e)^2}{2\pi^2 \hbar^3} \exp(\frac{E_F - V_b}{k_B T_e}) \quad (4.3)$$

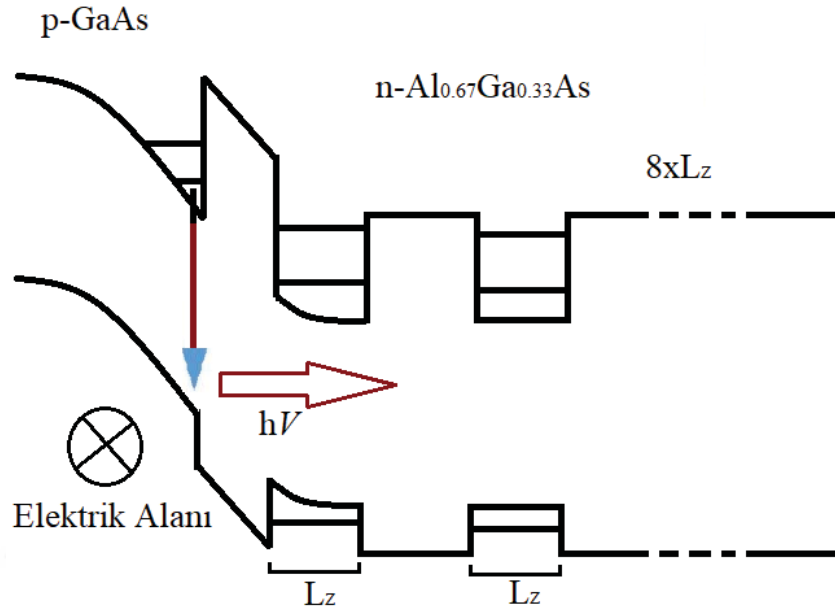
ifadeleri yazılabilir. Burada  $J_{tun}$  tünelleme akım yoğunluğu,  $J_{therm}$  termoiyonik akım yoğunluğu,  $T_e$  elektron sıcaklığı,  $E_f$  Fermi enerjisi ve  $V_b$  bariyer yüksekliğidir. Eşitlik 4.2'deki logaritmik terim, tüm yatay koordinatlar üzerinden integral alınarak hesaplanır. Eşitlik 4.3 ise *Richardson-Dushman* eşitliği olarak bilinir. Eşitlik 4.2'deki geçiş sabiti  $T(E_z)$ , *Wentzel-Kromers-Brilliouin* (WKB) yaklaşımı yapılarak hesaplanır. HELLISH-1 yapısında termo-iyonik emisyon akım yoğunluğunun elektron sıcaklığına bağlı değişimi *Eşitlik 4.3* ile elde edilebilir. Fermi enerjisi;

$$E_F = \frac{\hbar^2 (3\pi^2 n)^{2/3}}{2m^*} \quad (4.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada  $n$  taşıyıcı konsantrasyonudur.

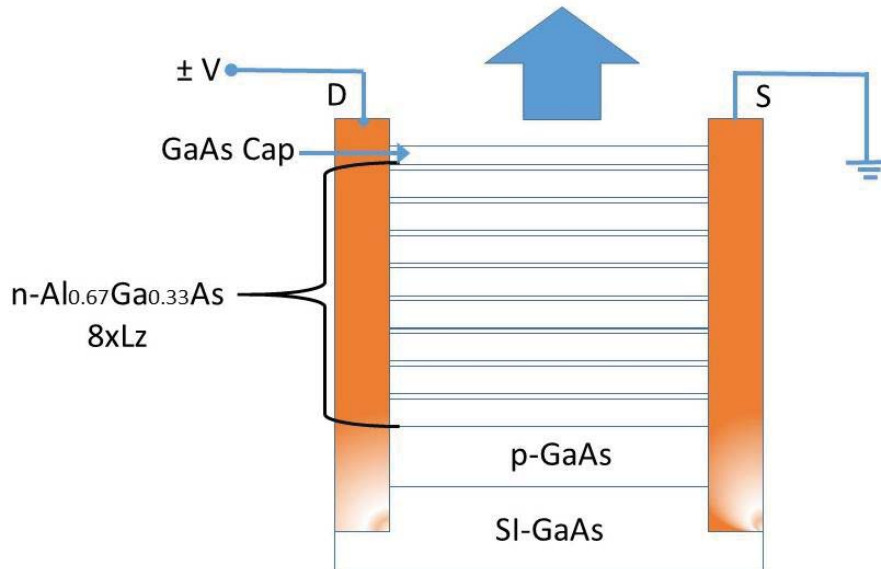
HELLISH-1 aygıtının potansiyel uygulama alanları, adreslenebilen ekran elemanı olarak kullanımı ve optoelektronik lojik kapı uygulamalarıdır. HELLISH yapılar yüzey ışıması yapan aygıtlardır. Bu nedenle kolaylıkla iki boyutlu bir matris yapısında sıralanabilirler. Uygun satıra potansiyel fark uygulandığında ve uygun sütun toprağa bağlandığında kesişim bölgesindeki aygıt ışık vermektedir. Boyutlarının oldukça küçük olmasından dolayı da daha küçük alanlara daha fazla aygıt dizilebilir. HELLISH yapılarda ışık emisyonu bağlantı uçlarından birisi yüksek diğeri düşük potansiyele bağlandığında meydana gelir. Işık emisyonu uygulanan potansiyel farkın polaritesine (kutupsallığına) bağlı değildir. Bu aygıtlar ile sayısal devrelerde kullanılan özel veya (XOR) ile ve-değil (NAND) mantık devrelerinin ışık ile çalışması (*light logic*) yapılabilir [107–110].

HELLISH-1 yapıları geniş ve zayıf ışın yayılımı veren aygıtlardır. Daha güçlü ışın yayılımı elde etmek için tekli kuantum kuyu yerine çoklu kuantum kuyu yerleştirilerek HELLISH-2 aygıtlar tasarlanmıştır [99, 100]. Dalgaboyu farklı, birden fazla kuvvetli ışın yayılımcısı olan aygıtlar elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. HELLISH-2 aygıtının band yapısı [99,100].

HELLISH-2 yapısında gerek n-tipi  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  gerekse p-tipi GaAs yapısında kuantum kuyular bulunmaktadır. GaAs-  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  arayüzeyinde terslenim (*inversiyon*) tabakası da oluşmaktadır. HELLISH-2 aygıtı uygulanan elektrik alan şiddetine bağlı olarak aynı anda birden fazla dalga boyunda emisyon yapabilmektedir. HELLISH-2 aygıtının tabaka yapısı Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

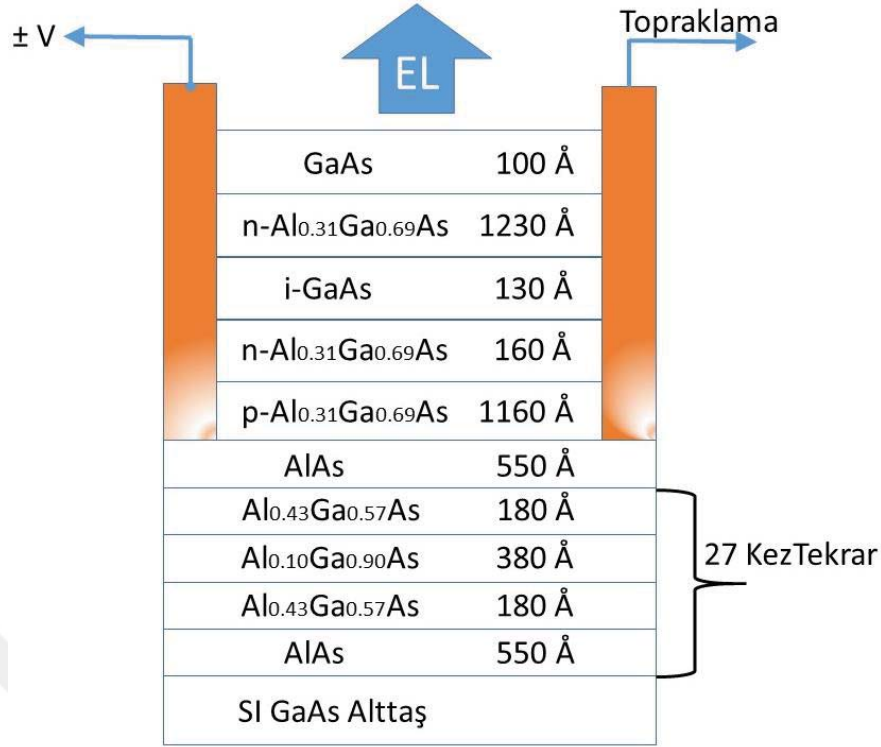


Şekil 4.4. HELLISH-2 aygıtının tabaka yapısı.  $L_z$  kuantum kuyu genişliğidir [99, 100, 102].



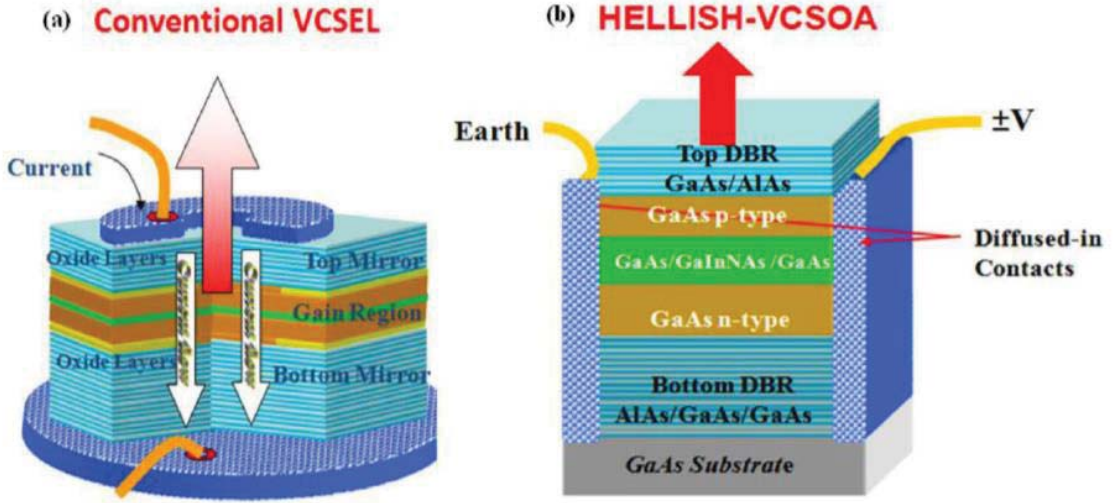
Sıcak elektronlar p-n eklemine en yakın kuantum kuyusundan GaAs terslenim tabakasına tünelleme veya termo-iyonik emisyon ile geçerler. Çok sayıda elektronun terslenim tabakasına geçmesi eklemi etkiler. Eklem p tarafı, yük dengesini korumak için daralır. Daha da önemlisi elektronlarla, boşluklara ait dalga fonksiyonları terslenim tabakasında örtüşmeye başlarlar. Bunun sonucunda GaAs band genişliğine uygun dalga boyunda emisyon gözlenir. Elektrik alan şiddeti arttırılırsa, terslenim tabakasında olan elektron enjeksiyonunun artmasının yanında, terslenim tabakasındaki elektronlar da ısınmaya başlarlar. Bunun sonucunda elektronlar daha yüksek enerjideki durumlara geçebilirler. Bu durum spektrumda kısa dalgaboyundaki emisyonun genliğinin artması ile kendini gösterir. Yeterince yüksek enerjiye sahip fotonlar ( $hV_2 > hV_1$ ) kuantum kuyusunda absorblanır ve birinci elektron enerji seviyesinden ( $E_{e1}$ ) birinci ağır boşluk enerji seviyesine ( $E_{hh1}$ ) geçişine denk düşen dalgaboyunda bir emisyonla neden olurlar [99, 100, 102]. HELLISH-2 aygıtının elektrik alan şiddetine bağlı olarak aynı anda farklı dalgaboylarında ışımaya yapabileceği optik lojik uygulamaları açısından potansiyel önem taşımaktadır.

HELLISH-1 ve 2 yapıların ardından ultra parlak (*Ultra Bright*, UB) UB-HELLISH yapılar tasarlanmıştır [111]. UB-HELLISH yapısı aktif tabakaların altında büyütülen dağıtıcı *Bragg* yansıtıcıları (*Distributed Bragg Reflector*, DBR) eklenmesi haricinde HELLISH-1 yapısıyla aynıdır (Şekil 4.5). Daha önce tasarlanan HELLISH-1 ve 2 yapılarında, alt-taştan kaybolan yayılım aygıtı boyunca geriye yansıtılır. Periyodik yapıya sahip DBR tabakaları kullanılarak oldukça yüksek bir yansımaya (%99 civarında) elde edilebilir [111, 112]. Bu yüzden UB-HELLISH süper parlak ışın yayıcı olarak çalışır.



Şekil 4.5. UB-HELLISH aygıtının tabaka yapısı [111].

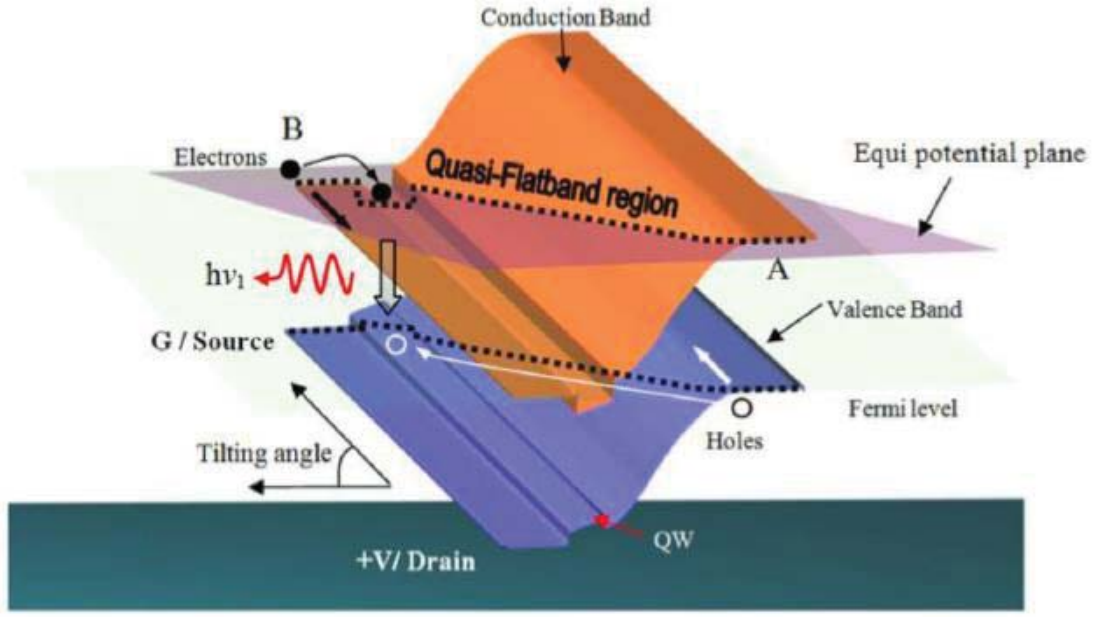
Dikey kaviteli yüzey ışmalı lazer (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*; HELLISH-VCSEL) ve dikey kaviteli yarıiletken optik yükselteçler (*Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers*; HELLISH-VCSEA) klasik HELLISH-1 aygıtının alt ve üst katmanlarına yüksek yansımaya DBR tabakalarının periyodik tekrarlanarak büyütülmesiyle tasarlanmıştır [113–117]. Bu aygıtların elektriksel kontakları, diğer HELLISH aygıtlardakilere benzer şekilde tüm tabakalar boyunca difüze olmuştur. Şekil 4.6’da HELLISH-VCSEA aygıt yapısı ile ticari VCSEL’ler ile karşılaştırılmıştır. Bu iki aygıt, taşıyıcı iletim mekanizmaları ve elektriksel kontak konfigürasyonları bakımından birbirlerinden farklılık gösterirler. HELLISH- VCSEA’da, tüm tabakalar boyunca difüze olmuş iki kontak vardır. Bu yapıdaki p-n eklem tabakaları üst ve alt DBR tabakaları arasındadır. Bu aygıtta akım DBR aynalardan geçmeden kazanç bölgesi içine enjekte edilir [106, 112, 118–124]. Geleneksel VCSEL’lerde ise, akım DBR aynalar boyunca enjekte edilir ve yayılma mesa yüzeyi üzerinden gerçekleşir [109, 112, 115, 116, 125].



Şekil 4.6 a) Yüksek derecede karmaşık yapı ve üretim teknikleri ile tasarlanmış ticari VCSEL b) basit bar geometrisinde tasarlanmış ve üretilmiş HELLISH-VCSOA aygıtı [103, 121].

HELLISH aygıtları boyuna sıcak elektron iletimine dayanmaktadırlar. HELLISH-1, HELLISH-2, UB-HELLISH, HELLISH-VCSEL ve HELLISH-VCSOA yapıların tümü HELLISH modelini temel almışlardır. Aygıt performansı bir aygıttan diğerine farklılık göstermektedir. Aynı sıcaklıkta eşik elektrik alanları (aygıtların ışığa yapmaya başladıkları elektrik alan değerleri) HELLISH-1 aygıtlarında 50 ve 100 V/cm arasında, UB-HELLISH için 200 ve 600 V/cm arasında, HELLISH VCSEL için 50 ve 100 V/cm arasında, HELLISH VCSOA için 110 ve 290 V/cm arasında değişmektedir [103].

Düşük elektrik alan altında her taşıyıcı kendi kanallarındadır ve termal enerjileri örgü termal enerjisi ile dengededir. HELLISH aygıtın çalışması elektron-boşluk çiftlerinin aygıtların kendi kanalları boyunca enjeksiyonuna dayanmaktadır. HELLISH-1 aygıtı için üç boyutlu (3D) model Şekil 4.7’de gösterildi. Aygıtta düşük voltaj uygulandığında, enerji bantlarının eğilmesiyle yarı-düz bant oluşur. Aynı durum ileri beslenme altındaki p-n eklemine de gözlenir. Bu durum, az sayıda taşıyıcının eklem içine sızmasına ve bunun sonucunda boyuna iletiminin artmasına neden olur. Işık yayılımı beklenildiği gibi zayıftır ve kuantum kuyu içine ulaşan boşlukların sayısına bağlıdır [103].



Şekil 4.7. İletim ve değerlik bantlarında yarı-düz bant bölgesi (noktalı çizgi) şematik gösterimi. Sırasıyla boşlukların (beyaz ok) ve elektronların (siyah ok) sürüklenmesi ve difüzyonu. Dolu olmayan ok yeniden birleşme sonrası enerjisi  $h\nu_1$  olan ışımadır [103, 106, 119, 121].

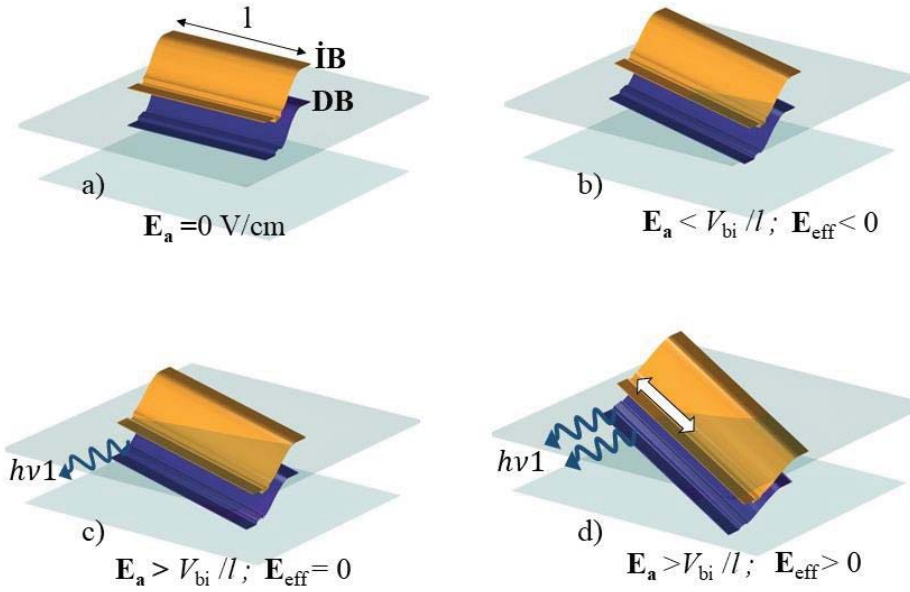
Sıcak elektron etkileri ile ışık yayan aygıtlar, büyütme doğrultusu boyunca elektrik alan uygulanmasıyla çalışırlar. Elektrik alan uygulandığında, uygulanan voltajın polaritesine ve şiddetine göre enerji bantları eğilir. Ancak büyütme doğrultusundaki örnek büyütülür büyütülmez oluşan alanı bu elektrik alan etkileyemez. Yüksek elektrik alan rejiminde, iletim ve değerlik bantları sıcak elektronlar ve boşluklar tarafından doldurulur, yarı-düz bant şartları tüm hetero-eklem yapı boyunca geçerlidir. HELLISH aygıtından yayılan ışık sıcak elektron etkileri tarafından belirlenir. HELLISH aygıtlarının çalışması tanımlayan enerji bantlarının elektrik alana göre değişimi ve ışık yayılımı Şekil 4.8’de verilmiştir. Yarı-düz bant koşulları, aktif bölgede tanımlanan  $E_{eff}$  ile anlaşılabilir. Burada  $E_{eff}$ ,

$$E_{eff} = \frac{V_a - V_{bi}}{\sqrt{l^2 + W^2}} \approx \frac{V_a - V_{bi}}{l} = E_a - \frac{V_{bi}}{l} \quad (4.6)$$

eşitliği ile verilir [126]. Burada  $E_a$ ,  $V_a$ ,  $V_{bi}$ ,  $l$  ve  $W$  sırasıyla uygulanan elektrik alan, dış voltaj, kontak (*built-in*) potansiyeli, ticari p-n diyot ileri besleme uzunluğu ve yükten arındırılmış bölgenin genişliğidir. Bu eşitlik, ticari p-n diyot ile HELLISH aygıtları arasında bir bağlantı olarak nitelendirilebilir.

Uzunluğu  $l$  olan bir HELLISH aygıtına hiçbir dış elektrik alan uygulanmadığında enerji bant diyagramı Şekil 4.8a’da görüldüğü gibi dengededir. Yarı düz bant koşulu

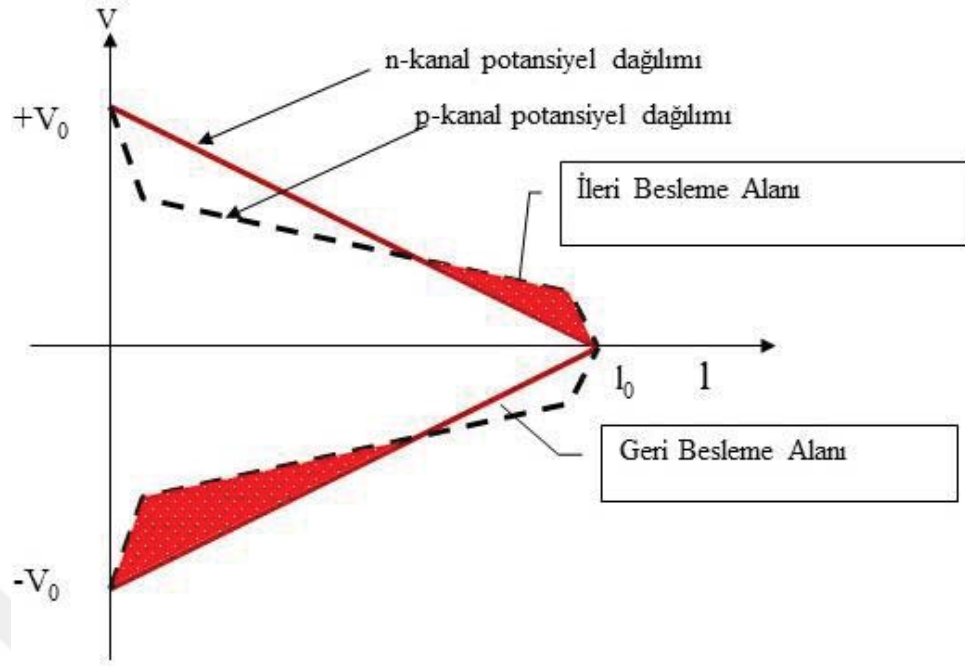
altında bir elektrik alan uygulandığında ( $E_a < V_{bi}/l$ ), yeterince boşluk olmadığından HELLISH aygıtında emisyon meydana gelmez (Şekil 4.8b). Yarı düz bant koşulu sağlandığında ( $E_a = V_{bi}/l$ ) aygıt ışımaya yapmaya başlayabilir (Şekil 4.8c). Besleme artırıldığında ( $E_a > V_{bi}/l$ ) emisyon alanı da boşaltma bölgesine (*drain region*) doğru genişler.



**Şekil 4.8.** Yarı-düz bant koşulları altında ışık yayılımı gösterimi. İB ve DB sırasıyla iletim ve değerlik bantlarıdır. İki paralel düzlem ile bant eğilme dereceleri gösterilmiştir. a)  $E_a = 0 \text{ V/cm}$  b)  $E_a < V_{bi}/l$  c)  $E_a = V_{bi}/l$  d)  $E_a > V_{bi}/l$  [103, 126].

#### 4.2. Top-Hat HELLISH (THH) Yapısı

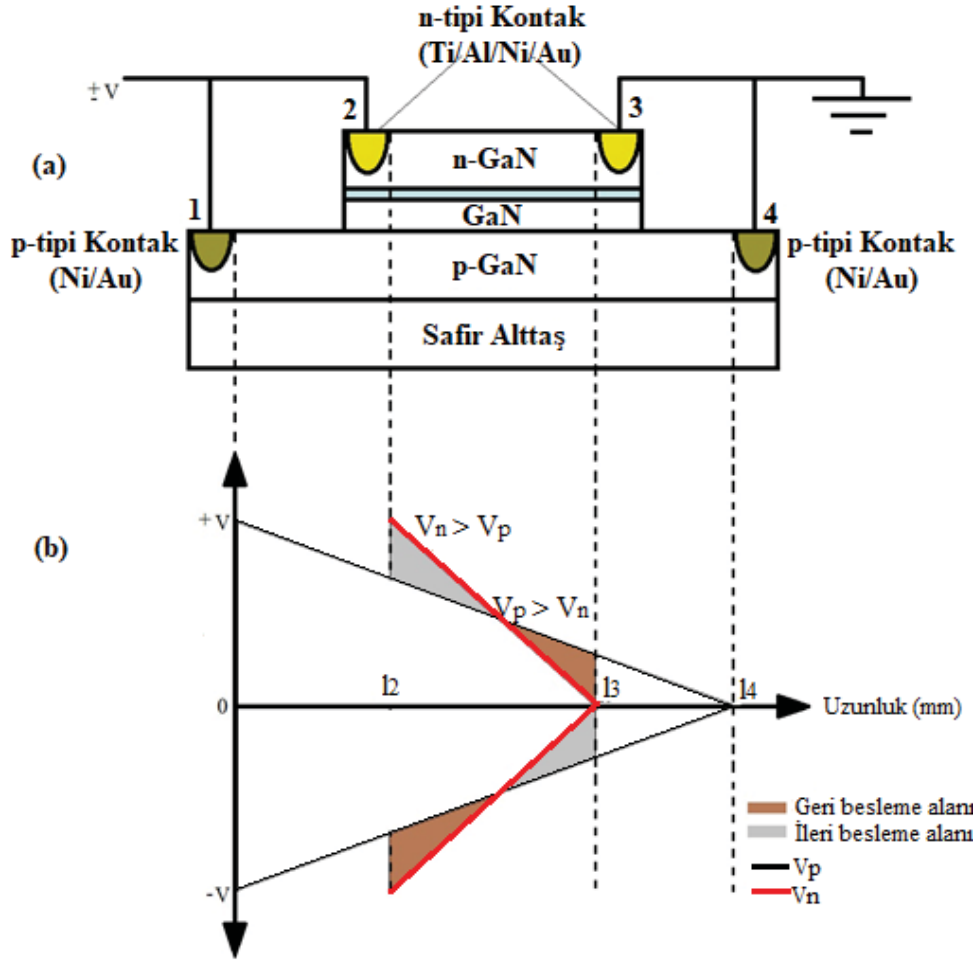
HELLISH aygıtlarda en az bir kontak omik değilse doğrusal olmayan bir elektrik alan dağılımı meydana gelebilir. Tüm n-tipi kontakların omik olduğu bir HELLISH aygıtta n-tipi kanal boyunca potansiyel dağılımı doğrusaldır [103, 106, 116, 118, 121]. Ancak yapı boyunca difüze olmuş kontaklar p-kanalında omik değilse, yüksek dirençli p-tipi kontak alanları oluşur ve p-kanal boyunca doğrusal olmayan potansiyel dağılımı meydana gelir. n-tipi kanal boyunca doğrusal olan ve p-kanal boyunca doğrusal olmayan potansiyel dağılımları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. p-kanalı boyunca doğrusal olmayan potansiyel dağılımı, birleşme noktasının *built-in* potansiyelini etkili bir şekilde azaltmıştır [103, 106, 121, 126]. Hatta kaynak alanı yakınındaki ışımali yeniden birleşmeyi arttırmaktadır [103, 106, 121, 126].



**Şekil 4.9.** Uzunluğu  $l_0$  olan bir HELLISH aygıtında doğrusal olmayan p-kanal potansiyel dağılımı (Kırmızı çizgi ile çizilen). Burada n-kanal kontaktları omik iken p-kanal kontaktları omik değildir. Bu yüzden, aygıt ileri beslemede aşamalı olarak katota doğru artar ve azalır. Bu aygıtın bulit-in potansiyelini azaltır ve kaynak kontak civarında ışmalı yeniden birleşme artar [103, 106].

p-tabakasındaki bu durumu taklit ederek geliştirmek için, *Top Hat* HELLISH (THH) geometrisi, n-kanal boyundan daha uzun bir p-kanal uzunluğuna sahip olacak şekilde tasarlanmış ve n-kanal, p-kanal üzerine simetrik olarak büyütülmüştür. Diğer HELLISH yapılarındaki gibi tabakalar içine difüze olmuş iki adet kontak yerine, n ve p kanallarının kendilerine ait dört adet kontak vardır. Şekil 4.10'da görülen n ve p-kanallarına ait kontaklar sıralanmış olup 1 ve 4 numaralı kontaklar p-kanalına ait p-tipi kontaklar, 2 ve 3 numaralı kontaklar ise n-kanalına ait n-tipi kontaklardır. Her kanalın kendine ait kontakları olmasıyla n ve p-kanalları üzerine farklı metaller kullanılarak omik kontaklar oluşturulabilir. Potansiyel dağılımındaki doğrusal olmayan durum kontakların konumları ile sağlanır. Normal çalışma sırasında, 1 ve 2 numaralı kontaklar birleştirilerek pulslu potansiyel farkları uygulanırken ( $\pm V$ ), 3 ve 4 numaralı kontaklar birleştirilip topraklanır ve 12V34G şeklinde kontak gösterilir. Aygıt pozitif polaritede beslendiğinde 1 ve 2 nolu kontaklar akış (*drain*) kontağı olarak tanımlanırken, 3 ve 4 nolu kontaklar kaynak (*source*) kontakları olarak tanımlanır.





**Şekil 4.10.** a) THH aygıtının şematik gösterimi ve kontak konfigürasyonu. b) Aygıtın n (kırmızı çizgi) ve p kanalları (siyah çizgi) boyunca potansiyel dağılımı.  $V_n > V_p$  bölgesinde aygıt geri besleme ve  $V_p > V_n$  bölgesinde ise ileri besleme durumundadır [103, 121].

Taşıyıcı hareketlerini anlamak için aygıtın band profilinin incelenmesi gerekir. n ve p-kanalları boyunca farklı büyüklükteki elektrik alan dağılımları nedeniyle heteroeklem yapının band profili aşamalı olarak ileri besleme bölgesinden geri besleme bölgesine doğru bükülür. Şekil 4.11’de  $l_2$  konumunda bulunan 2 nolu kontakdan  $l_3$  konumundaki 3 nolu kontaklar arasındaki voltaj dağılımı verilmiştir. Burada sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 numaralı kokontaktların pozisyonları  $l_1=0$  olmak üzere  $l_2$ ,  $l_3$  ve  $l_4$  olarak tanımlanmıştır. n-kanal uzunluğu  $l_3 - l_2$  iken p-kanal uzunluğu  $l_4$ ’tür ve n-kanal simetrik olarak p-kanal üzerine yerleştirilmiştir. Heteroeklem boyunca n ve p-kanalları arasındaki voltaj farkı ( $\Delta V$ ), uygulanan voltajın ve l uzunluğunun bir fonksiyonudur. 2 ve 3 nolu kontaktların arasındaki tam orta noktada  $\Delta V$  sıfıra eşittir. Yani bu noktada bandlar uygulanan elektrik alandan etkilenmezler. Geri besleme durumunda ( $V_r$ )  $l_2$  uzunluğunda

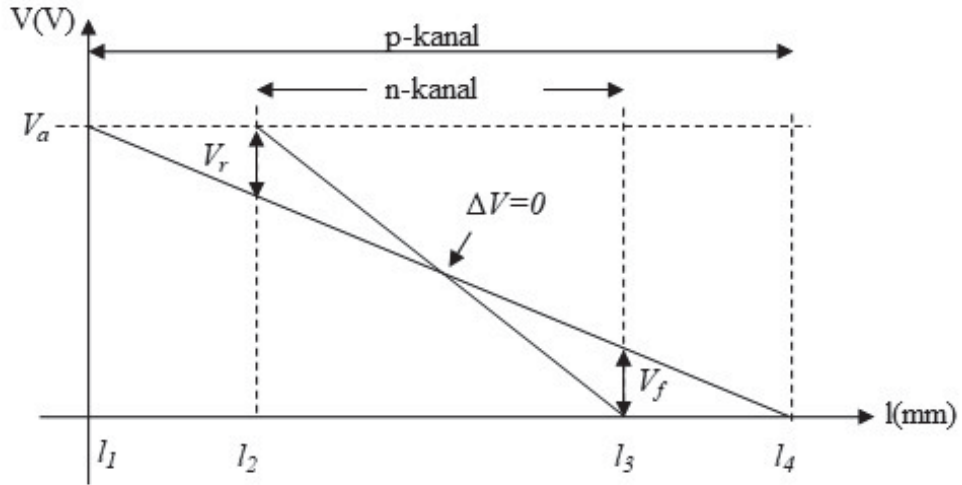
en büyük  $\Delta V$  meydana gelirken, ileri besleme durumunda ( $V_f$ )  $l_3$  uzunluğunda en büyük  $\Delta V$  meydana gelir. Potansiyel fark ve beslemeler,

$$\Delta V(V_a, l) = -\frac{XV_a}{l_2 - l_3} [2l - (l_2 + l_3)] \quad , l_2 < l < l_3 \quad (4.4)$$

$$V_{r,l_2} = -\frac{l_4 - (l_3 - l_2)}{2l_4} V_a = -XV_a \quad , l = l_2 \quad (4.5)$$

$$V_{f,l_3} = XV_a \quad , l = l_3 \quad (4.6)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada  $X = [l_4 - (l_3 - l_2)]/2l_4$  olup, boyutsuz THH parametresi olarak adlandırılır.



**Şekil 4.11.** Heteroeklem boyunca potansiyel dağılımı.  $V_r$  ve  $V_f$  sırası ile eklem içindeki maksimum geri ve ileri besleme voltajları iken  $V_a$  yapıya uygulanan voltajdır.  $l_1, l_2, l_3$  ve  $l_4$  kontaktların konumu,  $\Delta V$  voltaj farkıdır [103].



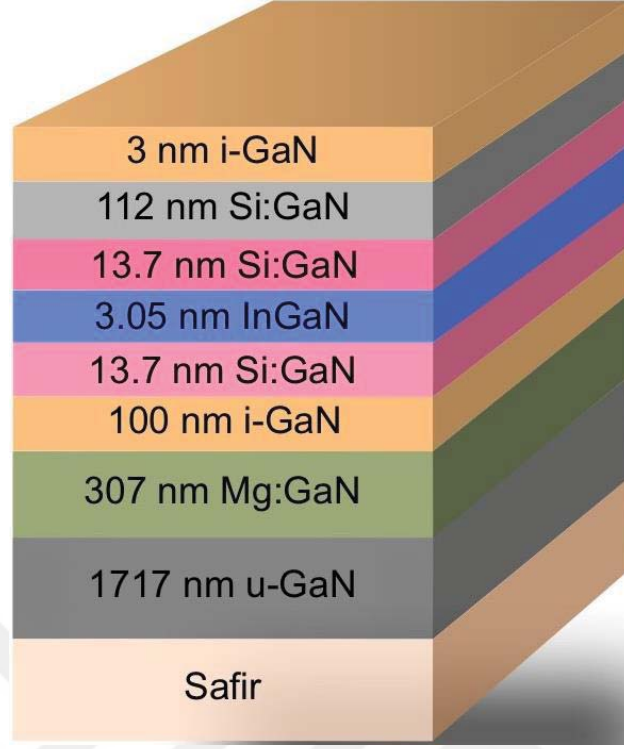
## 5. ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI VE DENEYSEL YÖNTEMLER

Tezin bu bölümünde, incelenen örneklerin yapısı, fabrikasyon aşamaları ve kullanılan deneysel düzenekler hakkında bilgi verildi.

### 5.1. Örnek Yapısı

*Top-Hat HELLSH* (THH) geometrisi, bir ya da daha fazla kuantum kuyusu içeren n-tipi bir tabakanın, daha uzun olan bir p-tipi tabaka üzerine simetrik olarak yerleştirilmesi şeklinde tasarlanmıştır [103, 106, 116, 121]. Böyle bir tasarım ile planlanan p tabaka üzerinde doğrusal olmayan bir potansiyel dağılımı oluşmasını sağlamaktır. Oluşan doğrusal olmayan potansiyel dağılımı ile *built-in* potansiyelinin azaltılması ve ışımalı yeniden birleşme oranının artırılması amaçlanmaktadır.

Tez kapsamında incelenen THH-GaN-B-10 kodlu InGaN/GaN dört kuantum kuyulu örnek metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) büyütme tekniğiyle safir ( $Al_2O_3$ ) alttaş üzerine Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (Nanotam) tarafından büyütülmüştür. Örneğin tabaka yapısı ve kalınlıkları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Safir alttaş üzerine GaN tabakaları büyütülmeye başlamadan önce 1131,5 °C sıcaklıkta safir alttaşın yüzey temizliği yapılarak yüzey kirlilikleri giderilmiştir. Daha sonra, temizlenen safir alttaş yüzeyi üzerine 1130,3 °C sıcaklıkta 0,45 nm/s büyüme hızı ile 859 nm kalınlığında ve ardından 0,61 nm/s büyüme hızıyla 858 nm kalınlığında olmak üzere toplamda 1717 nm düzleştirici GaN tabakası büyütülmüştür. Bu tabakalar üzerine 1034,4 °C sıcaklıkta 0,25 nm/s büyüme hızı ile 307 nm kalınlığında magnezyum katkılı p-tipi GaN büyütülmüştür. Bu tabaka  $1,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  magnezyum ile katkılanarak taşıyıcı olarak kullanılan boşlukların sayısı artırılmıştır. n-tipi GaN tabakası 1033,5 °C sıcaklıkta 0,22 nm/s büyüme hızıyla 100 nm kalınlığında katkısız GaN tabaka olarak büyütülmüştür. Daha sonra kuantum kuyuları oluşturmak için 13,7 nm kalınlığında silisyum katkılı GaN bariyer tabakası büyütülmüştür. Elektron sayısının artırılması için bariyer tabakaları  $1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  silisyum ile katkılanmıştır. Aktif bölge 3,05 nm kalınlığında büyütülmüştür. GaN bariyer tabakası ile beraber InGaN tabakası 4 kez tekrarlanmıştır. Böylece 4 kuantum kuyusu oluşturulmuştur. Diğer büyütülen tabaka 1000,2 °C sıcaklıkta 0,63 nm/s büyüme hızıyla 112 nm kalınlığında silisyum katkılı GaN tabaka olarak büyütülmüştür. n-tipi GaN tabakası  $1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  silisyum ile katkılanmıştır. Son olarak 3 nm katkısız GaN tabakası kapak olarak büyütülmüştür.



Şekil 5.1. Örneğin tabaka yapısı ve kalınlıkları.

## 5.2. Fabrikasyon Aşamaları

Tek kristal büyütme ve fabrikasyon tekniklerinin geliştirilmesi yarıiletken malzemelerin aygıt olarak kullanılmasına yol açmıştır. Büyütülen bir yarıiletken malzemenin aygıt haline getirilebilmesi sürecine fabrikasyon denir. Fabrikasyon süreci temiz oda adı verilen özel ortamlarda gerçekleştirilir. Temiz odalar, hacimdeki parçacık oranına göre sınıflandırılan, bünyesinde belli miktarda parçacık barındıran ortamlardır. Tablo 5.1’de FED-STD-209E standartlarına göre temiz oda sınıfları ve ISO 14644-1 standartlarındaki karşılıkları yer almaktadır.

Tablo 5.1. FED-STD-209E standartlarına göre temiz oda sınıfları ve ISO 14644-1 standartlarındaki karşılıkları

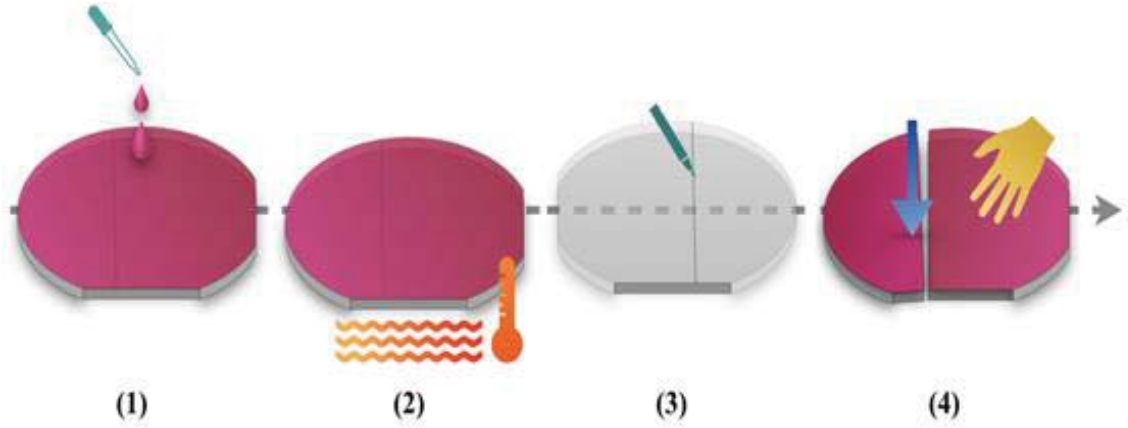
FED STD 209E	Maksimum parçacık sayısı/ft <sup>3</sup>					ISO Karşılığı
	0.1 µm	0.2 µm	0.3 µm	0.5 µm	5 µm	
<b>1</b>	35	7.5	3	1	0.007	<b>ISO 3</b>
<b>10</b>	350	75	30	10	0.07	<b>ISO 4</b>
<b>100</b>	3500	750	300	100	0.7	<b>ISO 5</b>
<b>1000</b>	35000	7500	3000	1000	7	<b>ISO 6</b>
<b>10000</b>	350000	75000	30000	10000	70	<b>ISO 7</b>
<b>100000</b>	3500000	750000	300000	100000	700	<b>ISO 8</b>

Bu tez çalışmasında kullanılan sıcak elektron tabanlı InGaN/GaN dört kuantum kuyulu THH aygıtları İstanbul Üniversitesi İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı bünyesindeki temiz oda ve Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesindeki temiz oda kullanılarak üretildi. THH aygıtların üretim aşamalarının çoğunun gerçekleştirildiği İstanbul Üniversitesi İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı 10, 100 ve 1000 temiz oda sınıflarından oluşmaktadır. İstanbul Üniversitesi İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarında, fabrikasyon aşamalarından kristal temizlenmesi, fotodirenç kaplama işlemi 10 sınıfı temiz oda kısmında, maske hizalama ve UV uygulama işlemleri 100 sınıfı temiz oda kısmında gerçekleştirilirken metalizasyon ve hızlı ısıl işlem uygulanması aşamaları ise 1000 sınıfı temiz oda kısmında gerçekleştirildi. THH aygıtlarının aşındırılması aşaması ise Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesindeki 1000 sınıfı temiz oda kısmında yapıldı. Aygıt fabrikasyon aşamaları; kesme, temizleme, fotolitografi, aşındırma, magnezyum aktivasyonu, metalizasyon ve lift-off aşamalarından oluşmaktadır. Aşağıda bu işlemler hakkında bilgi verilecektir.

### **5.2.1. Kristal kesme**

Farklı boyutlarda aygıt üretebilmek ve üretilen kristal yongayı daha verimli kullanabilmek için uygun geometrik boyutlarda kristal yonganın kesilmesi gereklidir. Kristal kesme, epitaksiyel olarak büyütülen yonganın belirli kristalografik doğrultular boyunca kırılma yeteneğidir. Çoğu yarıiletken kristal yongayı kesmek için elmas kesici kullanılır. Elmas kesici ile yonganın arka yüzeyine büyütme doğrultusunda bir çizik atılır ve yonga ters çevrilerek ön yüzeyinden bir kuvvet uygulanarak çizilen çizikten kırılması sağlanır. Bu teknik GaN gibi safir alttaş üzerine büyütülen yongaların kesilmesinde çok başarılı değildir. Çünkü safir çok sert bir malzemedir ve her yönde kırılabilme özelliği vardır. Bu yüzden yonganın kesilme sürecinde çok dikkatli davranılmalıdır. Aksi halde yonga istemediğiniz şekillerde ve büyüklerde parçalara ayrılabilir. Bu tez çalışmasında incelenen sıcak elektron tabanlı InGaN/GaN dört kuantum kuyulu THH aygıtlarının üretimi için kristal yongadan yaklaşık 6 mm x 8 mm boyutunda parçalar kesildi. Kesilme işleminden önce GaN yonga yüzeyinin kirlenmesini ve çizilmesini önlemek amacıyla yüzey 4000 rpm de 1 dakika fotodirenç ile kaplandı. Daha sonra yonga 110 °C'de sıcak tabla üzerinde 1 dakika tutuldu. Yonga ters çevrildi, alttaş kısmından temiz düzgün bir cetvel yardımıyla boyutları belirlendi ve elmas kesici uç ile güçlü bir şekilde kesilecek boyutta çizildi (çizmek için uygulanan güç, örneği kontrolsüz bir şekilde istenmeyen

şekillerde kırmayacak kadar uygulandı). Daha sonra örneğin ön yüzüne çevrildi ve iki adet lam arasına yerleştirilerek hafifçe bastırıldı ve çizilen yerlerden kırılması sağlandı. Kesilen parçaların simetrik ve küçük olması hem bir yongadan birden çok örnek elde edilmesini hem de sonraki aşamalarda fotodirenç kaplamada kolaylık sağlar. Kristal yonganın elmas kesici ile kesilmesi işlemi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

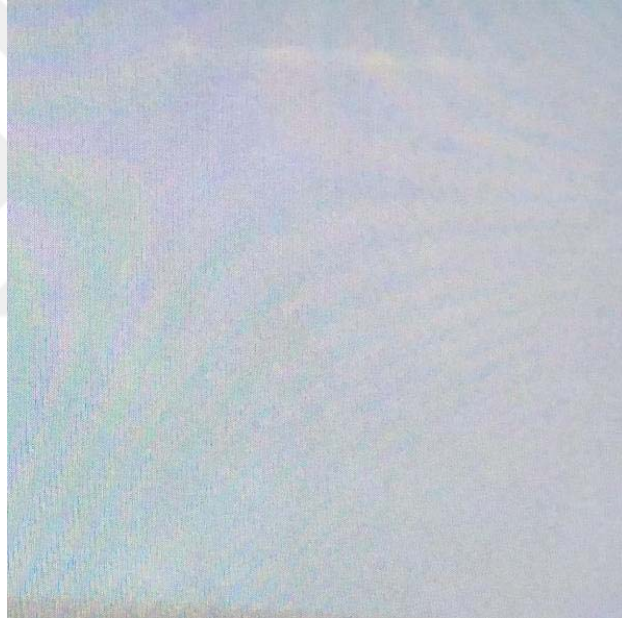


Şekil 5.2. Elmas kesici ile kristal yonganın kesilmesi.

### 5.2.2. Kristal temizleme

İstenilen boyutlarda kesilen yonga parçalarının yüzeyindeki oksit ve kirlilikleri kaldırılarak temizlenmesi, kaliteli kontaklar elde edebilmek için çok önemli bir aşamadır. Basit ve etkili temizleme, temizleme çözeltisi olarak aseton, alkol ve de-iyonize su kullanılarak elde edilir. Yüzeyin kirlilik durumuna göre temizleme işleminde çözeltiler ısıtılarak ultrasonik banyoda da bekletilir. Bu tez çalışmasında tüm fabrikasyon aşamalarının başında, üç solvent temizleme (*Three Solvent Cleaning*, TSC) işlemi yapıldı [127–130]. Trikloroetan, yağı, aseton, fotorezist, organik molekülleri ve trikloroetani, izopropanol, asetonu ve su, alkolü çözer. Kesilmiş kristal parçaları 40 °C sıcaklıkta ultrasonik banyo içerisinde 4'er dakika boyunca trikloroetana, daha sonra asetona ve izopropanol alkol içine batırıldı. Örnek parçaları bol akan de-iyonize (DI) su akışına maruz bırakıldı ve daha sonra kuru azot gazı ile kurutuldu. Ardından numuneler 120 °C 'de bir sıcak plaka üzerinde 2 dakika süreyle ısıtılarak dehidrasyon ısıtma yapıldı. Bu işlem sonunda örnek yüzeyindeki tüm de-iyonize su kalıntılarından arındırıldı. Son olarak, örneklerin yüzeyleri optik bir mikroskop altında incelendi. Örneklerin yüzeylerinde herhangi bir kirlilik ile karşılaşırsa temizleme işlemleri tekrarlanabilir.

Atomik olarak çok daha temiz yüzeyler elde etmek için HCl, HF, NH<sub>4</sub>F, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>OH, NaOH, KOH gibi farklı kimyasallar, farklı temizleme metotları ile kullanılabildiği literatürde çok sayıda yayın yer almaktadır [131]. İlgili yayınların incelenmesi sonucunda bu tez çalışmasında örnek yüzeyinde oluşan doğal oksit tabakasını temizlemek için HCl:De-iyonize su (1:1) karışımında 10 dakika bekletildi [127–129]. Ardından örnekler bol de-iyonize su ile yıkanıp, kuru azot gazı ile kurutuldu. Örnek, yüzeyindeki metalik kirliliklerin giderilmesi için ise 3:1 oranında HCl:HNO<sub>3</sub> karışımında 10 dakika boyunca bekletildi. Yüzeyinde metalik bir kirlilik olmayan örnekler için bu temizleme aşaması kullanılmadı. TSC temizleme işlemi yapılan ve ardından doğal oksit tabakası kaldırılmış olan bir örnek yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.3’de verilmiştir.

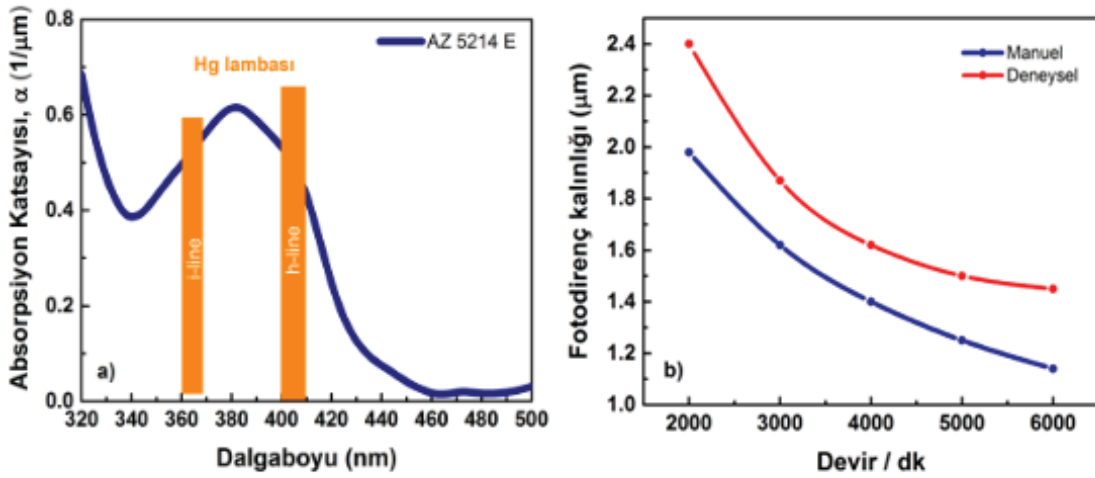


*Şekil 5.3. TSC işlemi yapıldıktan sonra doğal oksit tabakası temizlenmiş olan GaN örneğini yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü.*

### **5.2.3. Fotolitografi**

Mikro fabrikasyon tekniklerinin en önemli ve en çok tekrarlanan aşamalarından biri fotolitografi aşamasıdır. Fotolitografi kısaca optik duyarlılığa sahip malzemelerin, örnek üzerine uygun bir şekilde serilip optik ve kimyasal yollarla şekillendirilmesi olarak tarif edilebilir. Optik duyarlılığa sahip bu malzemeye fotodirenç adı verilmektedir. Fotodirenç pozitif ve negatif olmak üzere iki çeşittir. Pozitif fotodirençte UV ışık düşen yerlerdeki bağlar zayıflar ve uygun developer çözeltisi içerisinde yüzeyden kalkar. Negatif fotodirençte ise UV ışık gören yerlerdeki bağlar daha da kuvvetlenir ve developer

çözeltisi içerisinde UV ışık görmeyen yani krom maske altında kalan alanlar yüzeyden kalkar. Bu tez çalışmasında AZ 5214E kodlu fotodirenç kullanılmıştır. Bu fotodirenç bazı şartlar altında negatif fotodirenç özelliğine de sahiptir. Fotodirenç örnek yüzeyine döndürme ile kaplandı. Döndürme ile kaplamada örnek yüzeyine bir miktar fotodirenç damlatılır, yüzeye yayılması için bir süre beklenir ve ardından uygun kalınlığı elde etmek için döndürülür. Fotodirencin cinsine ve dönme hızına göre kalınlık, fotodirencin cinsine ve dönme süresine göre ise yüzey homojenliği sağlanır. Fotodirenç kaplama işleminden sonra yüzey kenarlarındaki birikmeler kontrol edilmelidir. Bu birikmeler maske ile örnek arasındaki teması olumsuz yönde etkiler ve maske ve örnek arasında boşluklar oluşmasına neden olur. Böylece istenilen şekil tam anlamıyla örnek üzerinde oluşturulamaz. Şekil 5.4.a'da AZ 5214E fotodirencin duyarlı olduğu dalgaboyuna karşı absorpsiyon spektrumu verilirken Şekil 5.4.b'de ise dönme hızına bağlı kaplanan fotodirenç kalınlığı değişimi verildi. Fotodirenç, maske hizalayıcısı bünyesindeki i-çizgisi (370 nm dalgaboylu ışık) ve h-çizgisi (405 nm dalgaboylu ışık) güçlü bir civa lambası kullanılarak uyarıldı.

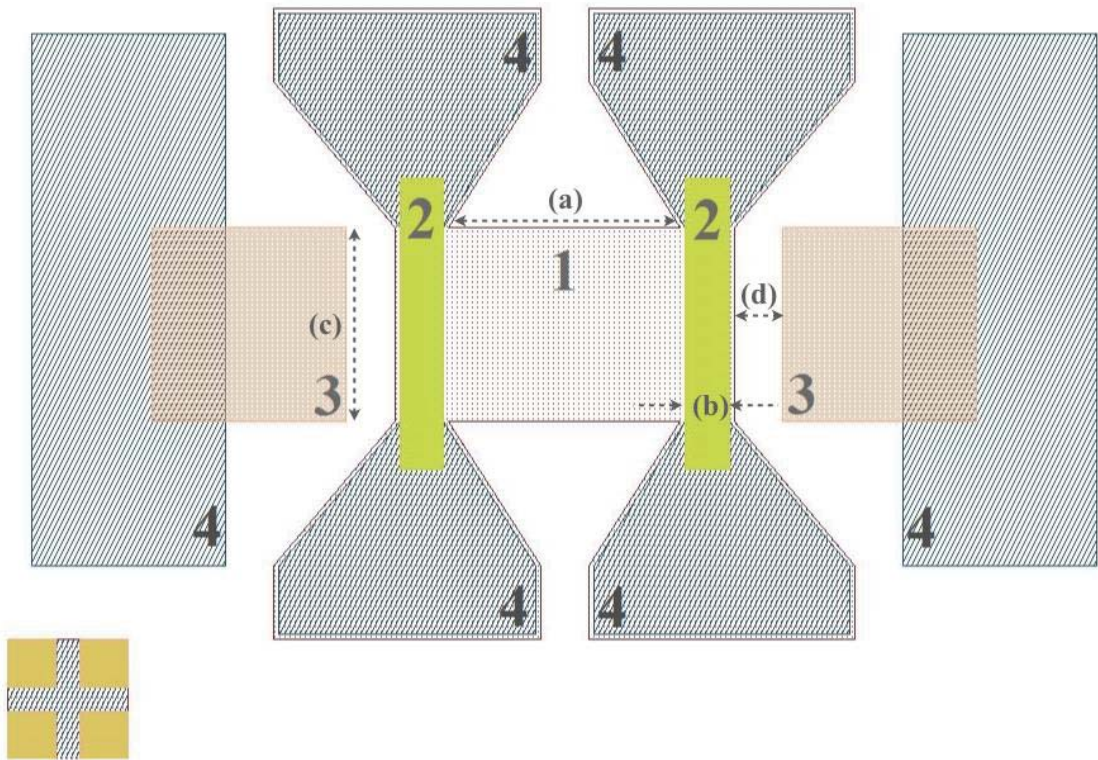


**Şekil 5.4.** AZ 5214E kodlu fotodirencin a) dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı ve duyarlı olduğu i ve h çizgileri b) dakikadaki devir sayısına göre kaplanan fotodirenç kalınlığı değişimleri (Kırmızı çizgi ile gösterilen değişim deneysel olarak elde edilen, mavi çizgi ile gösterilen değişim ise fotodirencin teknik özellikleri olarak verilen değerlerdir.) [132].

Bu tez çalışmasında fotodirenç kaplama işlemleri önce 500 rpm döndürme hızında 5 saniye döndürüldü ve örnek üzerindeki fazla fotodirencin dışarıya atılması sağlandı. Ardından 6000 rpm dönme hızında 60 saniye döndürülerek 1,4  $\mu\text{m}$  kalınlığında homojen bir fotodirenç kalınlığı elde edildi.



Fotolitografi aşamasında, istenilen geometrideki desenlerin örnek üzerine aktarılması için kuantz üzerine krom kaplı maske kullanıldı. Maske üzerindeki krom kaplı desenler UV ışığı geçirmez, kaplı olmayan kuantz ise ışığı geçirerek fotorezistin yapısını değiştirir. Bu sayede maske üzerindeki desenler rahatlıkla örnek üzerine geçirilir. Maske üzerindeki desen Elphy Quantum adlı çizim programı yardımı ile çizildi. Desendeki tek bir örnek için olan çizim Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Şekil 5.5’deki desen, 1 numaralı alan aşındırma maskesi, 2 numaralı alanlar n-tipi kontak maskesi, 3 numaralı alanlar p-tipi kontak maskesi ve 4 numaralı alanlar ise altın tel bağlama için kullanılan maskesinden oluşmaktadır. Kuantz üzerinde bu maskeler ayrı ayrı yer almaktadır. Tüm maskelerin üst üste çizdirilmesi ile Şekil 5.5’de gösterilen örneğin litografisi sonrasındaki şekli oluşmaktadır. Desen üzerindeki (a) uzunluğu n-tipi GaN kanal uzunluğunu, (b) uzunluğu n-tipi kontaktların genişliğini, (c) uzunluğu örnek genişliğini ve (d) uzunluğu ise n-tipi ve p-tipi kontaktlar arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bu tez çalışmasında örnek n-tipi GaN kanal uzunluğu değiştirilerek, 1000  $\mu\text{m}$  ve 500  $\mu\text{m}$  olmak üzere iki farklı boyutta örnek fabrikasyonu yapıldı. 1000  $\mu\text{m}$  uzunluğunda n-tipi GaN tabakası olan örneğe B-3050-10 kodu, 500  $\mu\text{m}$  n-tipi GaN kanal uzunluğuna sahip olan örneğe ise B-3050-5 kodu verildi



Şekil 5.5. Maske üzerindeki tek bir örneğin desen tasarımı.

### **5.2.3.1. Normal fotolitografi**

Bu teknik pozitif fotodirenç kullanıldığında maske üzerindeki krom kaplı desenlerin maske hizalayıcı (mask aligner) yardımıyla örnek üzerine aktarılması için yapılan UV ışığa maruz bırakılması işlemidir. Bu aşamada maskenin örnek üzerine hizalaması Karl-Suss MJB4 maske hizalayıcısı ile yapıldı. Maske hizalanması için maske üzerinde bulunan hizalama işaretçileri kullanıldı. UV ışık kaynağı olarak Karl-Suss MJB4 maske hizalayıcısı bünyesine bulunan civa lambasından yararlanıldı. Örnekler AZ5214E kodlu fotodirenç kaplaması yapıldıktan ve ardından ön pişirme işleminden sonra, ilgili desenin maskesi ile hizalama işlemi yapıldı. Daha sonra örnek, toplam  $160 \text{ mJ/cm}^2$  lik bir doz için  $1,3 \text{ mW/cm}^2$  lik bir optik güçle 120 saniye boyunca UV radyasyonuna maruz bırakıldı. Bu teknik sadece aşındırma maskesi üzerindeki desenin örnek üzerine aktarılması sürecinde kullanıldı.

### **5.2.3.2. Desen tersleme fotolitografisi**

Desen tersleme, pozitif bir fotodirenç kullanılmasına rağmen maskenin şeffaf olan yani UV ışığa maruz bırakılan kısımlarının, örnek üzerine aktarılması tekniğidir. Bu teknik üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama normal litografi aşamasının aynısıdır yani örnek maske ile hizalandıktan sonra UV ışığa maruz bırakılır. İkinci aşama olarak örnek ısıtılır. Bu tekniğin üçüncü aşamasında ise örnek maskesiz olarak tekrar UV ışığa maruz bırakılır. Bu iki ek aşama ile fotodirecin yapısı değiştirir, böylece ilk maruz kalan bölgeler açık olmayan bölgeler gibi davranır ve bunun tersi de geçerlidir [28, 132, 133]. Bu nedenle ek ısıtma aşaması desen tersleme litografisinde çok önemlidir. Bu aşamanın optimizasyonu, ısıtma süresi ve ısıtma sıcaklığı değiştirilerek yapılır. Desen tersleme fotolitografisi ile kalın kaplanan metallerin *lift-off* aşamasını da kolaylaştırır.

Bu tez çalışmasında AZ5214E kodlu fotodirenç ile kaplanan örnekler Karl-Suss MJB4 maske hizalayıcısı ile hizalandı ve ardından örnekler  $1,3 \text{ mW/cm}^2$  optik güçle 49 saniye boyunca UV ışık uygulandı. Örnekler UV ışığa maruz bırakıldıktan sonra 2 dakika boyunca  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir sıcak plaka üzerinde bekletildi. Ardından maskesiz olarak 116 saniye boyunca tekrar UV ışığa maruz bırakıldı. Bu teknik sırasıyla, n-tipi metal kaplama alanlarının, p-tipi metal kaplama alanlarının ve altın tel bağlamak için oluşturulan alanların açılması için kullanıldı.



#### 5.2.4. Banyolama (Develop)

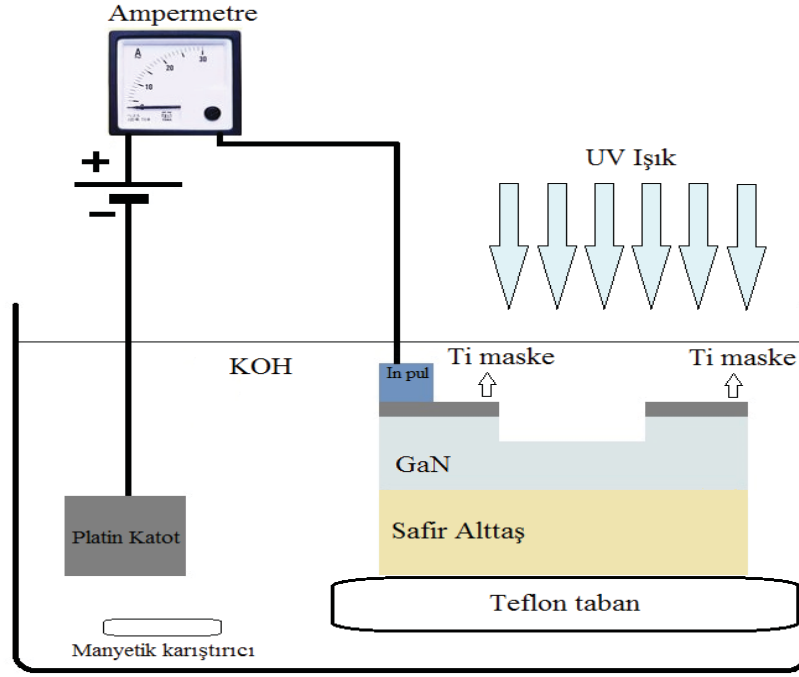
UV ışığa maruz bırakılan pozitif fotodirencin ışık gören bölgeleri, negatif fotodirençlerde ise ışık görmeyen krom desenlerin altında kalan kısımlarında fotodirençlerin kimyasal özellikleri değişir ve developer adı verilen sıvı karışımlarında çözünebilir hale gelir. Kimyasal özellikleri UV ışık ile değiştirilen fotodirencin uygun *developer* kullanılarak örnek yüzeyinden kaldırılması işlemine banyolama (develop) adı verilir. Bu tez çalışmasında kullanılan AZ5214E kodlu pozitif fotodirençle uyumlu AZ400K kodlu *developer* kullanılmıştır. Örnekler AZ 400K:de-iyonize su (1:3) karışımında 43-50 saniye arasında daldırılarak *develop* edilmişlerdir.

#### 5.2.5. Aşındırma

Aşındırma işlemi alt tabakalara ulaşmak için yarıiletkenin bazı alanlardan kaldırılarak örnek üzerindeki desenin çıkması anlamına gelir. İki farklı aşındırma tekniği vardır: Islak aşındırma, yarıiletkenine özel bir çözücü içinde kimyasal tepkime ile gerçekleşir. Kuru aşındırmada ise aşındırma reaktif iyon bombardımanı ile yapılır. Kuru aşındırma teknikleri genellikle çok agresiftir ve yarıiletkenine ciddi anlamda hasar verebilir. Islak aşındırma genellikle daha az yıkıcı, daha ucuz ve daha az karışık ekipmanlar gerektirdiğinden daha fazla tercih edilen tekniktir.

##### 5.2.5.1. Fotoelektrokimyasal aşındırma (Islak aşındırma)

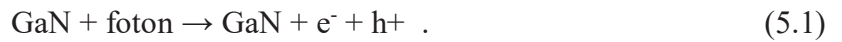
Fotoelektrokimyasal aşındırma yönteminde örnek KOH çözeltisi içinde bekletilirken aynı zamanda UV ışığa maruz bırakılır [134–138]. Şekil 5.6'da fotoelektrokimyasal aşındırma düzeneği verilmiştir. Aşındırma işlemine başlamadan önce örnekler yaklaşık 100 nm Ti ile kaplandı ve klasik lift-off teknikleri ile şekillendirildi. Burada Ti hem aşındırma maskesi hem de elektriksel kontak olarak kullanıldı. Fotodirenç yerine Ti maske seçilmesinin nedeni bu aşındırma yönteminde UV ışık kullanılmasıdır. Çünkü UV ışıkta fotodirencin yapısı çok kısa bir zaman aralığında bozulduğundan maske olarak kullanılmaya uygun değildir. Ayrıca bu yöntemde elektriksel bir kontakta ihtiyaç duyulur bunun için Ti hem elektriksel kontak hem de aşındırma maskesi olarak kullanılabilir. Örnek teflon tabana nikel bir pul ile tutturuldu ve elektriksel kontak Ti kaplı kısım ve nikel pul ile sağlandı.



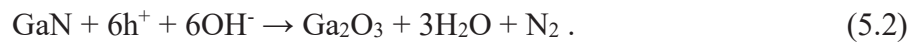
Şekil 5.6. Fotoelektrokimyasal aşındırma düzeneğinin şematik gösterimi [135].

Sistemin katodu için Pt kullanıldı ve örnek ile Pt arasında bir ampermetre bağlanarak elektrokimyasal hücre boyunca akan fotoakım gözlemlendi. Aşındırma süreci boyunca örneğe Keithley 2400 ile +2V potansiyel fark uygulandı. UV ışık kaynağı olarak Hg lambası kullanıldı. Örneğin tüm yüzeyini uyaran UV ışık 365 nm dalgaboyuna ve 14 mW/cm<sup>2</sup> güce sahiptir. Fotoelektrokimyasal aşındırmada fotonla üretilen elektron-boşluk çiftleri oksidasyonu artırır ve elektrokimyasal hücre içindeki etkileşimleri azaltır. Aşındırma oda sıcaklığında 0,04 M KOH çözeltisi içerisinde yapıldı. Aşındırma işleminde aşındırılan örnek yüzeyin pürüzlüğünü azaltmak için manyetik karıştırıcı kullanıldı. Bu deney düzeneğinde aşındırma hücresi ve örnek tutucu asit çözeltisinden etkilenmemesi için teflon seçildi.

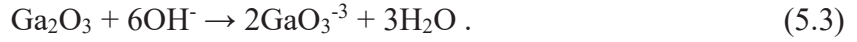
Fotoelektrokimyasal aşındırma yönteminde n-tipi GaN tabakasının aşındırılması için 365 nm dalgaboyundaki UV ışık ile elektron-boşluk çiftleri oluşturulur,



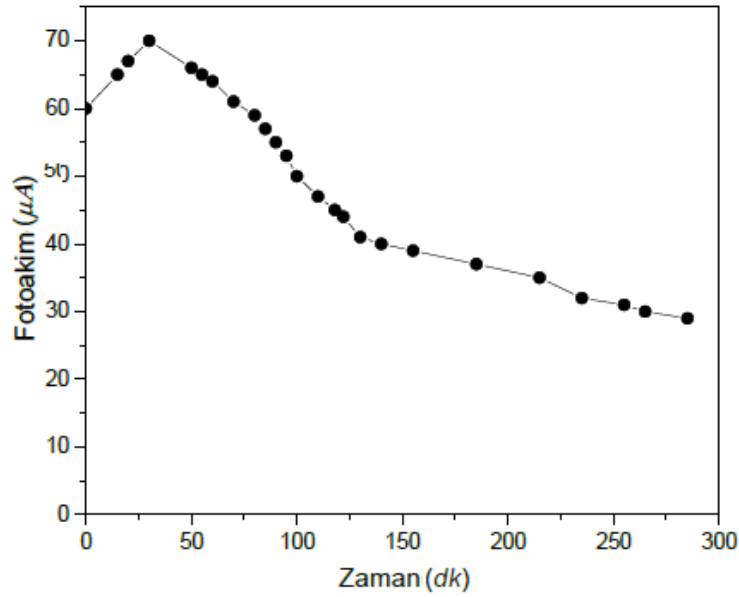
Daha sonra oluşturulan boşluklar hidroksit iyonları ile yarıiletken-elektrolit arayüzeyinde etkileşirler ve sonucunda galyum oksit meydana getirirler,



n-tipi GaN için boşluklar bant bükülmesi nedeniyle yüzeye taşınırlar. Böylece yüzey oksitlenir ve bazik çözelti ile kaldırılır

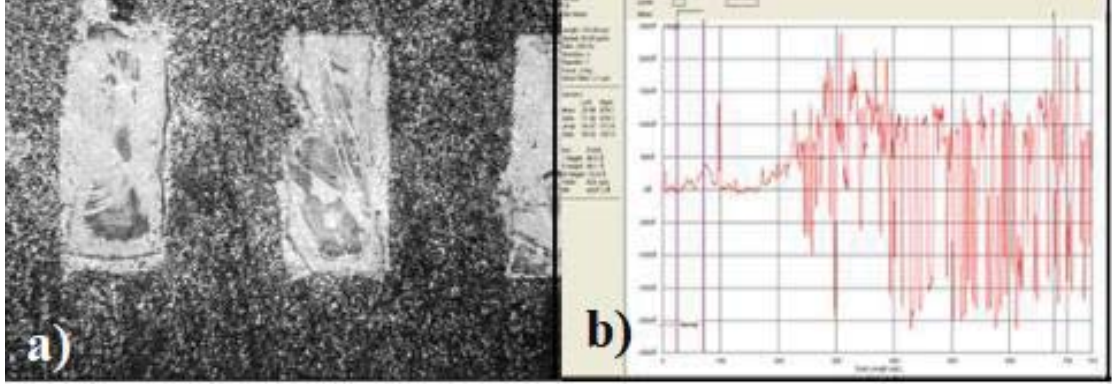


Aşındırılma bu süreçle meydana gelir [135, 139–142]. Üretilen elektronlar ise sistemin katotuna taşınırlar ve fotoakım gözlenir. Şekil 5.7’de aşındırma sırasında akan fotoakımın zamanla değişimi gösterilmiştir. UV ışık açılmadan önce sistemden hiçbir fotoakım geçmemektedir. UV ışık açıldığı anda fotoakım 60  $\mu\text{A}$ ’dır. Yaklaşık 50 dakika sonra fotoakım 70  $\mu\text{A}$  civarına kadar çıkmış daha sonra düşmeye başlamıştır. 5 saat sonra Ti maskeler kalkmaya başladığından UV ışık kapatılmış ve örnek asit çözeltisinden çıkarılmıştır. 0,04 M’lık asit çözeltisi için fotoakımın zamanla değişimine bakıldığında literatürdeki değerlerin çok üzerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.7. Aşındırma sürecinde fotoakımın zamana göre değişimi.

Örneğin yaklaşık 300 dakika KOH çözeltisi içinde UV ışığa maruz bırakılmasına ve fotoakımının çok yüksek değerlerde gözlenmesine rağmen kayda değer bir aşındırma oranı elde edilemedi. Örnek yüzeyinin de çok fazla bozulduğu tespit edildi. Aşındırma sonrası örneğin profilmetre ile alınan yüzey görüntüsü ve aşındırma kalınlığı ölçümü Şekil 5.8’de verilmiştir.



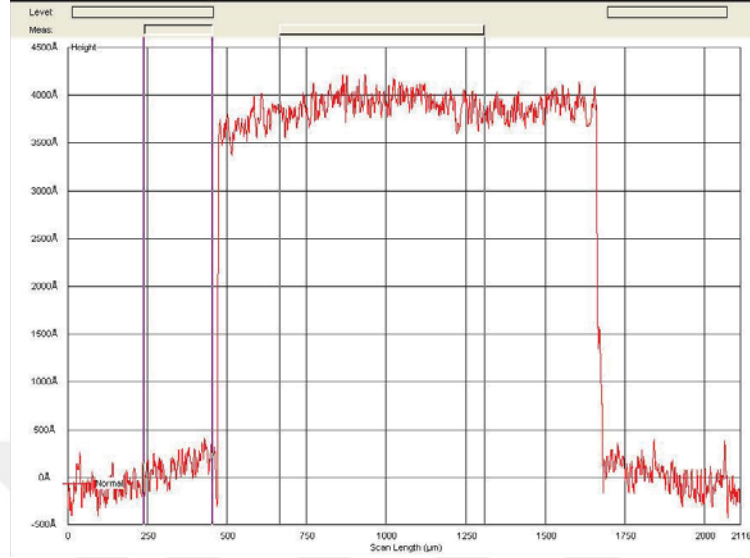
Şekil 5.8. Fotoelektrokimyasal aşındırma sonrası a) profilmetre ile alınan yüzey görüntüsü b) kalınlık ölçümü.

#### 5.2.5.2. İndüktif eşleşmiş plazma - reaktif iyon aşındırma (ICP-RIE kuru aşındırma)

İndüktif eşleşmiş plazma-reaktif iyon aşındırma (*Inductively Coupled Plasma-Reactive ion etching*, ICP-RIE), yarıiletken cihaz üretimi için sıklıkla kullanılan bir aşındırma teknolojisidir. Yüksek aşındırma oranları, işlem esnekliği ve azaltılmış iyon bombardımanı ICP-RIE aşındırma teknolojisinin sağladığı önemli özelliklerdir. ICP kaynağı, yüksek yoğunluklu bir plazma üretir. Plazma üretme bölgesinde bulunan RF anteni değişken bir RF manyetik alan meydana getirir ve düşük basınçta gaz moleküllerinin ve atomların iyonlaşmasına katılan elektronlara enerji veren RF elektrik alanlarını indükler. ICP-RIE, yarıiletkenler, dielektrikler, metaller ve polimerler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerin hızlı aşınması için kullanılabilir. Proses adımları aşındırılacak malzemeye bağlı olarak değişir. Metal asitli uygulamalarda kullanılan ICP-RIE klor bazlı iken dielektrik asitli uygulamalarda kullanılanlar tipik olarak flor bazlıdır. RF gücü, basınç ve gaz akışı gibi birçok işlem parametresi değiştirilerek aşındırma koşulları ayarlanabilir ve optimize edilebilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan örneklerin aşındırılması aşaması Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesindeki 1000 sınıfı temiz oda kısmında CCL<sub>2</sub> F<sub>2</sub> bazlı Sentech SI500 ICP-RIE kullanılarak yapıldı. Plazmanın akış hızı 20 sccm, akış basıncı 8 µbar ve RF güç seviyesi 200 W olarak ayarlandığında aşındırma hızı 1 nm/s olarak elde edildi. Örnekler 360 saniye ICP-RIE ile aşındırıldı ve yaklaşık 360 nm kalınlığında örnek aşındırılmış oldu. Bu aşındırma kalınlığı ile fotolitografi yapılarak belirlenen aşındırma alanlarında tüm n-tipi GaN tabakaları (300 nm) yanında yaklaşık 60 nm p-tipi GaN tabakası da aşındırıldı. Böylece örnek yüzeyinde yukarıda kalan dikdörtgen kısımlar n-tipi GaN tabakasından, aşağıda kalan tüm yüzeyler ise p-tipi

GaN tabakasından oluşmaktadır. Örneğin aşındırma sonrası KLA Tenchor P-6 profilmetre ile ölçülen aşındırma kalınlığı Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. Sentech SI500 ICP-RIE ile 360 saniyede elde edilen aşındırma kalınlığının KLA Tenchor P-6 profilmetre ile ölçümü.

### 5.2.6. Magnezyum aktivasyonu

Magnezyum (Mg), diğer akseptörler ile karşılaştırıldığında çok düşük aktivasyon enerjisine sahip olan, yaklaşık 170 meV, p-tipi bir katkı maddesi olarak kullanılır. Bununla birlikte, bu aktivasyon enerjisi hala çok yüksektir ve bundan dolayı yüksek boşluk konsantrasyonları elde etmek oldukça zordur. Yani  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  Mg katkı konsantrasyonu olduğunda sadece % 1 Mg katkısının oda sıcaklığında iyonize olabilir. Mg-H bağlarının oluşumu da taşıyıcı konsantrasyonunu daha da azaltır [32, 143]. Bu nedenle, p-GaN katmanının taşıyıcı konsantrasyonu,  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ten daha düşük bir değerle sınırlıdır. Bununla birlikte p-tipi GaN tabakalar büyütülme sırasında Mg-H bağları nedeniyle yüksek dirence sahiptirler. Mg-H bağlarını koparmak için genellikle 700 °C sıcaklıkta  $\text{N}_2$  ortamında hızlı ısıtma işlemi uygulanır. Fakat bu tür yüksek sıcaklıklar InGaN aktif katmanının kristal kalitesini bozar. p-tipi GaN tabakasının aktivasyonunu  $\text{O}_2$  ortamında hızlı ısıtma işlemiyle yapmak alternatif bir yoldur. Aktivasyon ortamına oksijenin dahil edilmesi, H'nin p-tipi GaN tabakasından ayrılmasını artırır [35–37, 80]. Bu, temel olarak oksijenin hidrojenle reaksiyonu sırasında hidrojen konsantrasyonunun azalmasına bağlıdır.

Bu tez çalışmasında p-tipi GaN tabakasında Mg katkılarının aktivasyonu 20 dakika  $\text{O}_2$  ortamında 500 °C sıcaklıkta hızlı ısıtma işlemi uygulanarak gerçekleştirildi.

### 5.2.7. Metalizasyon

Üretilen aygıtların elektriksel karakterizasyonunun yapılabilmesi için yarıiletken yüzeyinde metal kontaklara gereksinim vardır. Metal/yarıiletken arayüzeyinde oluşturulan kontakların direnci aygıt performansı açısından çok önemlidir. Yüksek dirençli bir metal/GaN kontağı aygıt performansını büyük ölçüde azaltabilir. Bu durumu önlemek için sağlam ve düşük dirençli omik kontaklar oluşturulmalıdır.

Bu tez çalışmasında n-tipi GaN tabakası üzerinde omik kontak elde etmek için sırası ile Ti (15 nm)/Al (150 nm)/Ni (40 nm)/Au (100 nm) metalleri, termal buharlaştırma sistemi kullanılarak kaplandı. Bu kaplamada Ti/Al kalınlıkları ve oranı n-tipi omik kontak oluşturmak için çok önemli rol oynamaktadır [41, 144]. Titantum, n-tipi GaN tabakasında azot boşlukları oluşturur. GaN içindeki azot boşlukları donör dibi davranırlar [44, 45]. Fakat Ti kolayca oksitlenebilir, bunu önlemek için Al tabakası kaplanır. Al<sub>3</sub>Ti alaşımı oksitlenmeyi önemli ölçüde engeller. Kontak kalitesini arttırmak için Ti ve Al katmanları ardından Ni ve Au katmanları sırasıyla buharlaştırılır [49, 51, 145]. Nikel sayesinde Au ve Al bir birleri içerisine difüze olmazlar. Altın tabakası ise yüksek iletkenliğe ve koruyucu özelliğe sahip olmasından dolayı kaplanır. Termal buharlaştırma ile metallerin kaplanması işleminden sonra örnekler *lift-off* yapıldı. Ardından kontak direncini düşürmek için örneklere 850 °C' de 30 saniye azot ortamında hızlı ısı işlem uygulandı. Böylece n-tipi GaN tabakası için omik kontaklar elde edildi.

p-tipi GaN tabakası üzerine omik kontakları oluşturmak için termal buharlaştırma sistemi ile Ni (10 nm)/Au (10 nm) metalleri sırasıyla buharlaştırıldı. *Lift-off* işleminden sonra bu örneklere 450 °C' de 60 saniye oksijen ortamında hızlı ısı işlem uygulandı ve p-tipi omik kontaklar oluşturuldu. Ni/Au kontağının oksijen ortamında tavlınması, düşük kontak direnci elde etmek için oldukça önemlidir. Çünkü kontak ile p-tipi GaN tabakası arayüzeyinde ısı işlem sırasında p-tipi bir yarıiletken olan NiO oluşur [53, 57, 61, 66, 69, 146]. Ayrıca p-tipi GaN tabakasındaki H atomlarının ortam oksijeni ile reaksiyona girmesi sonucu Mg-H bağları kırılır ve Mg katkı atomları serbest kalır [32, 33, 35, 37, 80].

Son termal buharlaştırma işleminde ise altın telleri bağlamak için oluşturulan bağlantı alanlarına sırasıyla Ti (15nm)/Au (200 nm) metalleri buharlaştırıldı ve *lift-off* işlemi yapıldı. Ardından örneklere azot ortamında 400 °C' de 30 saniye hızlı ısı işlem uygulandı. Böylece altın telleri bağlamak için gerekli olan alanlarda oluşturuldu.

Kaplamalar sırasında termal buharlaştırma sistemi maksimum 80°C hazne sıcaklığına kadar çıkmıştır. Kaplama yapılmaya başlamadan önce kaplama haznesi, ortamdaki kirliliklerden arındırmak ve düşük buharlaşma sıcaklığı elde etmek için  $2 \times 10^{-6}$  mbar değerine ulaşıncaya kadar vakumlanmıştır.

#### 5.2.8. Lift-off

Örneklerin uygun metaller ile kaplanmasından sonra, metal tabakalarının altında kalan fotodirenç tabakasının kaldırılması işlemine *lift-off* denir. Fotodirencin yüzeyden uzaklaştırılması, örneklerin aseton içinde bekletilmesi ile gerçekleşir. Fotodirencin yüzeyden temizlenememesi durumunda aseton ısıtılarak ve ultrasonik titreştirici kullanarak da *lift-off* işlemi yapılabilir. *Lift-off* aşaması sonrasında örnek yüzeyinde halen fotodirenç kalıntısı varsa, örnek 50-70 °C sıcaklık aralığında dimethyl sulfoksit (DMSO) içinde bekletilerek tüm fotodirenç kalıntıları kaldırılabilir.

#### 5.2.9. Üretim süreci reçetesi

Üretim sürecinin tüm basamakları maddeler halinde aşağıda listelenmiştir. Bu basamakları gösteren akış şeması da Şekil 5.10'da gösterilmiştir.

- Yonganın ön yüzü 4000 rpm dönüş hızında 1 dakika spin ile kaplama yöntemiyle AZ 5214E kodlu pozitif fotodirenç ile kaplandı ve 110 °C' de 1 dakika ısıtıldı. Örnek ters çevrildi, elmas uç ile kesilecek boyutta işaretlendi ve iki adet lam arasında alınarak işaretlenen bölgeye güç uygulandı. Yonga 6 mm x 8 mm boyutunda kesildi.
  1. Üç solvent temizliği yapıldı.
    - a. 40 °C'de 4 dakika ultasonik titreştiricide trikloroetan içinde tutuldu.
    - b. De-iyonize su ile yıkandı.
    - c. 40 °C'de 4 dakika ultasonik titreştiricide aseton içinde tutuldu.
    - d. De-iyonize su ile yıkandı.
    - e. 40 °C'de 4 dakika ultasonik titreştiricide izopropanol alkol içinde tutuldu.
    - f. Bol de-iyonize su ile yıkandı ve N<sub>2</sub> gazı ile kurutuldu.
    - g. 120 °C'de 2 dakika ısıtıldı.
    - h. Örnek yüzeyinde metalik kirlilikler varsa HCl: HNO<sub>3</sub> (3:1) karışımında 10 dakika bekletilir. Bol de-iyonize su ile yıkanır ve N<sub>2</sub> gazı ile kurutulur.
  2. Temizlenen örnek 6000 rpm dönme hızında 1 dakika AZ 5214 E fotodirenç ile kaplandı.

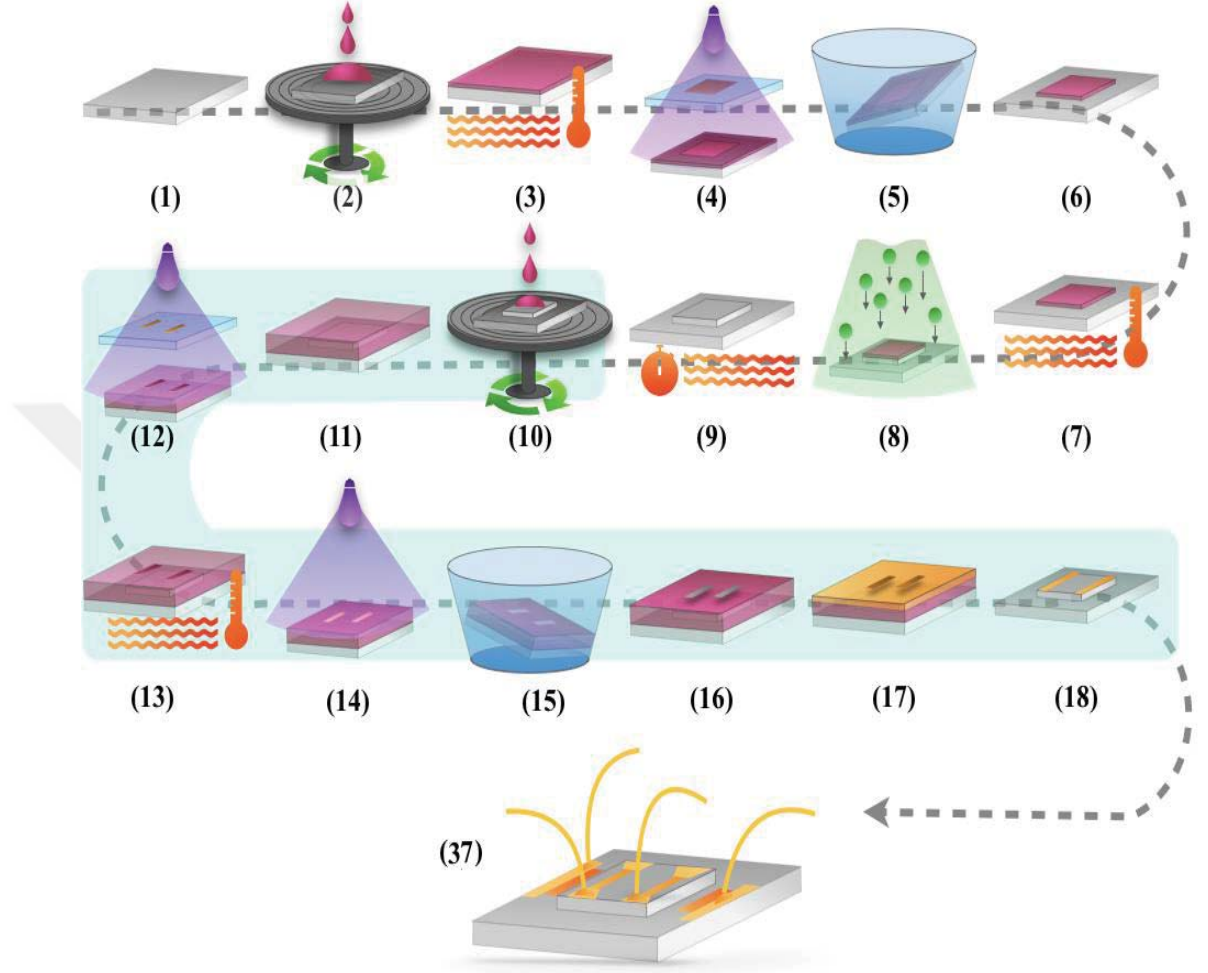


3. 110 °C’de 30 saniye ısıtıldı.
4. Karl Suss MJB4 maske hizalayıcı ile aşındırma maskesi hizalandı. 120 saniye UV ışık uygulandı.
5. AZ 400 K developer: de-iyonize su (1:3) karışımında banyolama işlemi yapıldı.
6. 43-48 saniye arasında UV ışığa maruz kalan alanlardaki fotodirenç tabakaları örnek yüzeyinden kaldırıldı.
7. 110 °C’de 60 saniye ısıtıldı.
8. SI500 ICP-RIE ile 20 sccm akış hızında, 8 µbar akış basıncında ve 200 W RF gücünde, 1 nm/s aşındırma hızı ile 6 dakika aşındırma yapıldı.  
Örnek yüzeyindeki fotodirenç aseton ile temizlendi ve aşındırma kalınlığı KLA Tenchor P-6 profilmetre ile 360 nm olarak ölçüldü.  
Ardından üç solvent temizliği tekrarlandı.
9. O<sub>2</sub> ortamında 20 dakika 500 °C’ de hızlı ısıl işlem ile Mg atomlarının aktivasyonu yapıldı.
10. 6000 rpm dönme hızında 1 dakika AZ 5214 E fotodirenç ile kaplandı.
11. 110 °C’ de 30 saniye ısıtıldı.
12. Karl Suss MJB4 maske hizalayıcı ile n-tipi metal maskesi hizalandı. 49 saniye UV ışık uygulandı.
13. 110 °C’ de 120 saniye ısıtıldı.
14. Maske kullanılmadan tüm örnek yüzeyi 116 saniye UV ışığa maruz bırakıldı.
15. AZ 400 K developer: de-iyonize su (1:3) karışımında banyolama işlemi yapıldı.
16. 43-48 saniye arasında UV ışığa maruz kalan alanlardaki fotodirenç tabakaları örnek yüzeyinden kaldırıldı. Ardından örnek, kontak alanlarına metal buharlaştırmadan önce, bu alanlarda oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için HCl: de-iyonize su (1:1) karışımında 10 dakika bekletildi.
17. Termal buharlaştırma sistemi ile sırasıyla Ti (15 nm)/ Al (150 nm)/ Ni (40 nm)/ Au (100 nm) metalleri belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Ardından tüm fotodirenç yüzeyden kaldırılincaya kadar lift-off da bırakıldı.
18. 850 °C’ de 30 saniye azot ortamında hızlı ısıl işlem uygulandı. Böylece n-tipi omik kontaklar elde edildi.
19. 6000 rpm dönme hızında 1 dakika AZ 5214 E fotodirenç ile kaplandı.



20. 110 °C' de 30 saniye ısıtıldı.
21. Karl Suss MJB4 maske hizalayıcı ile p-tipi metal maskesi hizalandı. 49 saniye UV ışık uygulandı.
22. 110 °C' de 120 saniye ısıtıldı.
23. Maske kullanılmadan tüm örnek yüzeyi 116 saniye UV ışığa maruz bırakıldı.
24. AZ 400 K developer: de-iyonize su (1:3) karışımında banyolama işlemi yapıldı.
25. 43-48 saniye arasında UV ışığa maruz kalan alanlardaki fotodirenç tabakaları örnek yüzeyinden kaldırıldı. Ardından örnek, kontak alanlarına metal buharlaştırmadan önce, bu alanlarda oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için HCl : de-iyonize su (1:1) karışımında 10 dakika bekletildi.
26. Termal buharlaştırma sistemi ile sırasıyla Ni (10 nm)/ Au (10 nm) metalleri belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Ardından tüm fotodirenç yüzeyden kaldırılncaya kadar lift-off' da bırakıldı.
27. 450 °C' de 60 saniye azot ortamında hızlı ışıl işlem uygulandı. Böylece p-tipi omik kontaklar elde edildi.
28. 6000 rpm dönme hızında 1 dakika AZ 5214 E fotodirenç ile kaplandı.
29. 110 °C' de 30 saniye ısıtıldı.
30. Karl Suss MJB4 maske hizalayıcı ile altın tel bağlantı alanları maskesi hizalandı. 49 saniye UV ışık uygulandı.
31. 110 °C' de 120 saniye ısıtıldı.
32. Maske kullanılmadan tüm örnek yüzeyi 116 saniye UV ışığa maruz bırakıldı.
33. AZ 400 K developer: de-iyonize su (1:3) karışımında banyolama işlemi yapıldı.
34. 43-48 saniye arasında UV ışığa maruz kalan alanlardaki fotodirenç tabakaları örnek yüzeyinden kaldırıldı. Ardından örnek, kontak alanlarına metal buharlaştırmadan önce, bu alanlarda oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için HCl: de-iyonize su (1:1) karışımında 10 dakika bekletildi.
35. Termal buharlaştırma sistemi ile sırasıyla Ti (15nm)/ Au (200 nm) metalleri belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Ardından tüm fotodirenç yüzeyden kaldırılncaya kadar lift-off' işlemi yapıldı.
36. 400 °C' de 30 saniye azot ortamında hızlı ışıl işlem uygulandı. Böylece altın telleri bağlamak için oluşturulan bağlantı alanları elde edildi.

37. Örnek üzerindeki metal bağlantı alanları üzerinden altın tel bağlayıcı sistem ile seramik ped üzerindeki Au alanlarına Au tel bağlantıları yapılarak aygıt fabrikasyonu tamamlandı.



**Şekil 5.10.** Aygıt fabrikasyon aşamalarının şematik gösterimi. 10 numaralı fabrikasyon aşamasından 18 numaralı aşamaya kadar olan süreçler iki kez daha tekrarlandığından şematik gösterimde tekrar çizilmemiştir. Tekrarlanan aşamalarda sadece kullanılan maskeler ve buharlaştırılan metaller farklılık göstermektedir.

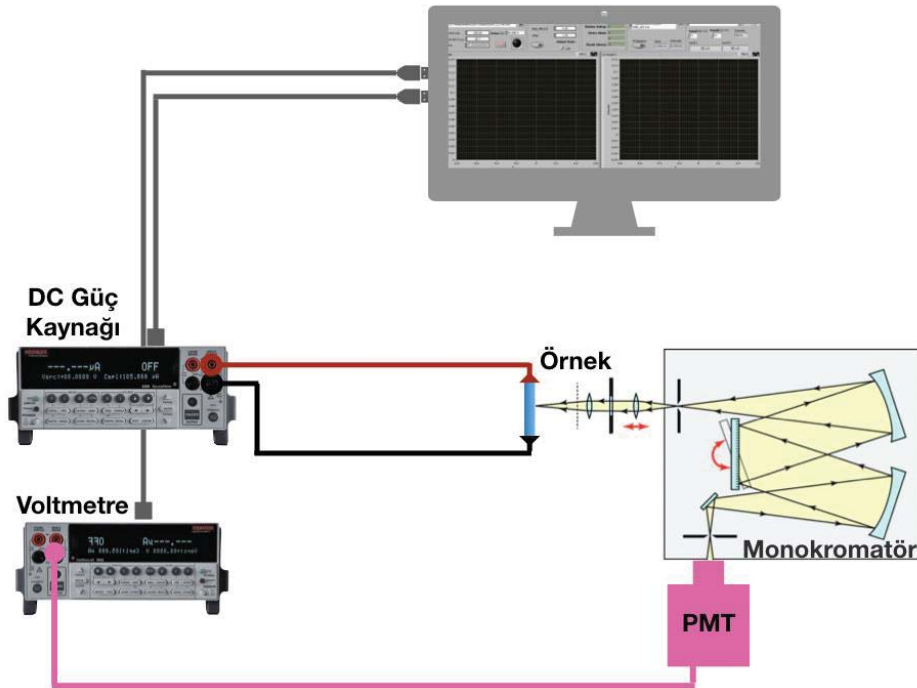
### 5.3. Elektrolüminesans Deney Düzenekleri

Elektrolüminesans (*EL*), üretimi yapılan cihazların elektriksel ve malzeme özelliklerinin belirlenmesini sağlayan deneysel bir ölçüm tekniğidir. Uygulanan bir dış elektrik alan ile bir p-n eklemının, kuantum kuyusunun ya da benzer bir sistemin aktif bölgesine enjekte edilen elektron ve boşluk çiftlerinin doğal ışınması elektrolüminesans olarak tanımlanır. Elektrolüminesans ölçümü ile malzemenin kalitesi, elektron sıcaklığı, ışıklı yeniden birleşme mekanizmaları ve kazanç gibi malzeme özellikleri elde edilir. Bu tez çalışmasında klasik LED ölçümleri ve THH ölçümleri yapabilmek için iki farklı *EL*

düzenegi kurulmuştur. Ayrıca THH aygıtların hem optik yolla hem de aynı zamanda elektrik alan ile uyarılmasını sağlamak için foto-elektrolüminesans deney düzenegi kuruldu. Bu üç deney düzenegi ve *labview* yazılımı yardımı ile her bir deney düzenegi için aynı anda akım-voltaj (I-V), ışık şiddeti-elektrik alan (ya da uygulanan voltaj) ve elektrolüminesans spektroskopisi ölçümleri gerçekleştirildi.

### 5.3.1. Klasik LED Ölçümleri İçin DC Elektrolüminesans Düzenegi

Üretilen THH aygıtın bünyesinde bulunan iki adet klasik LED ölçümü için oluşturulan *EL* düzenegi Şekil 5.11’de gösterilmiştir. *Klasik LED EL* deney düzeneginde örnek uçlarına DC güç kaynağı (Keithley 2400) ile potansiyel fark uygulandı ve buna karşılık olarak aynı cihazla örnek akımı ölçüldü. Eş zamanlı olarak da örneğin ışınması monokromatör ile araştırıldı. PMT’ den gelen ışık şiddeti voltmetre (Keithley 2000) yardımıyla elde edildi ve yazılan *labview* arabirim programı ile işlendi. Bu deney düzenegi ile örneklerin dc besleme altındaki *I-V*, elektrolüminesans spektrumu ve uygulanan potansiyel fark değişimine göre ışık şiddeti ölçümleri gerçekleştirildi.

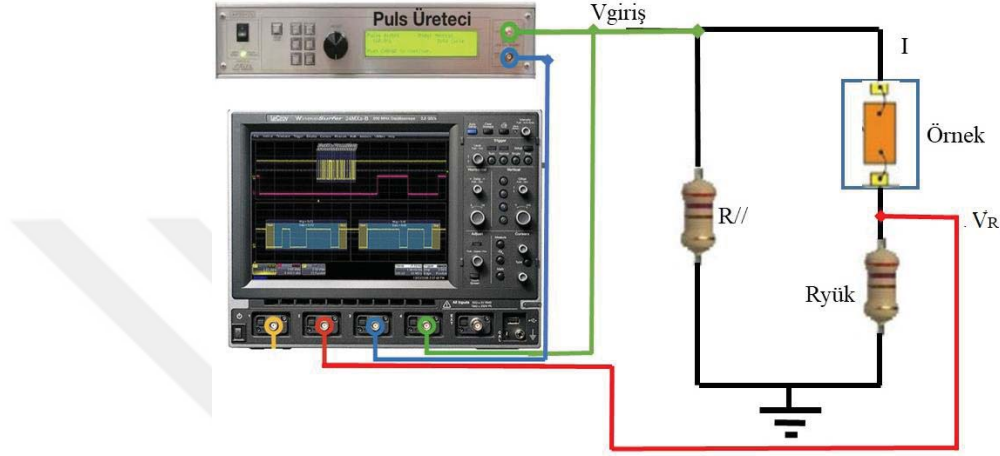


Şekil 5.11. *Klasik LED ölçümleri için hazırlanan EL deney düzenegi.*

### 5.3.2. THH Ölçümleri İçin Pulsu Elektrolüminesans Düzenegi

THH ölçümleri için hazırlanan *EL* ölçüm düzenegi aynı zamanda yüksek hızlı akım-voltaj deney düzenegini de içermektedir (Şekil 5.12). AvTech AVRZ-5 puls üreticisiyle belirlenmiş yüksek gerilim ile yüksek elektrik alanlar elde edildi. Dört kanallı 1,5 GHz

Lecroy 715Zi osiloskop girişlerinin, üretilen yüksek voltajlardan zarar görmemesi için sinyal sönümleme elemanları (*attenuator*) kullanıldı. Puls üretici ile örnek arasında uzun kablolar kullanıldığında, malzemelerin dirençlerinden kaynaklanan termal gürültü (*Johnson noise*) adı verilen sinyal parazitlenmesini önlemek için [147, 148] devreye bir paralel direnç ( $R_{//}=50$  ohm ) bağlandı. Aynı zamanda bu direnç sayesinde puls üretici, iletim kabloları ve devre girişi arasında empedans eşleşmesini de sağlandı.



**Şekil 5.12.** THH EL ölçüm düzeneğinin yüksek hızlı akım-voltaj deney düzeneğini içeren bölümünün ayrıntılı gösterimi. Burada  $V_{giriş}$  devreye uygulanan voltaj,  $R_{yük}$  yük direnci,  $V_R$  yük direnci üzerine düşen voltajdır.  $R_{//}$  paralel direnci ise puls üretici, kablolar ve devre arasında empedansı sağlamak ve termal gürültüyü azalmak için eklenmiştir.

Puls giriş voltajı ( $V_{giriş}$ ) ile yük direnci ( $R_{yük}=50$  ohm) üzerine düşen voltajın ( $V_R$ ) farkından örnek üzerine düşen voltaj ( $V_{örnek}$ ),

$$V_{örnek} = V_{giriş} - V_R \quad (5.4)$$

elde edildi. Yük direnci üzerine düşen  $V_R$  voltajının osiloskop giriş direnci ( $R_{os}$ ) ve yük direncinin eşdeğer direncine ( $R_{eş}$ ),

$$\frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_{yük}} + \frac{1}{R_{os}} \quad (5.5)$$

bölünmesiyle örnek üzerinden geçen akım ( $I_{örnek}$ ),

$$I_{örnek} = \frac{V_R}{R_{eş}} \quad (5.6)$$

elde edildi. Osiloskop yük direncine paralel olarak bağlandı. Örnek üzerine düşen elektrik alan ( $E$ ),

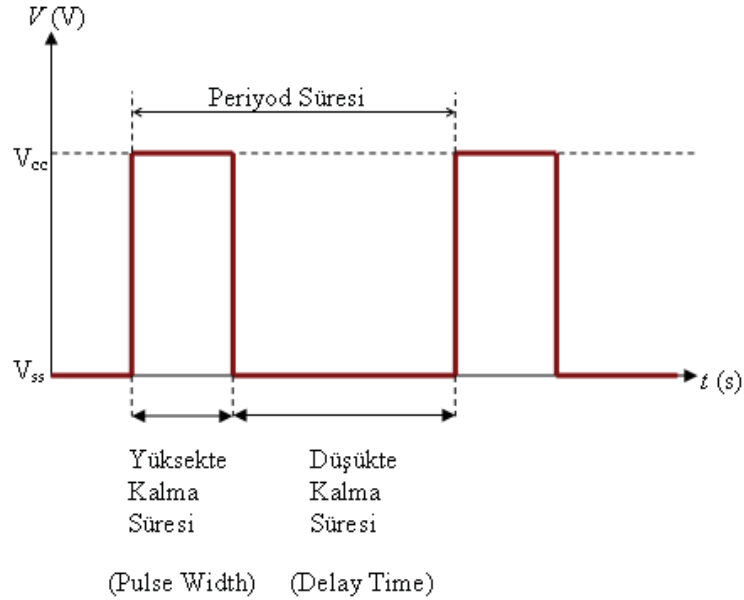
$$E = V_{\text{örnek}}/l \quad (5.7)$$

eşitliği kullanılarak hesaplandı.

Termal dengedeki bir yarıiletkeneye yüksek elektrik alan uygulandığında *Joule* ısınması etkisi ile örgü sıcaklığının arttığı görülür. *Joule* ısınmasını en aza indirmek için çok düşük iş döngüsü (*duty cycle*, DC) ile kısa elektrik sinyalleri uygulanmalıdır. İş döngüsü kare dalganın yüksekte kalma süresinin periyoda bölümüyle elde edilir

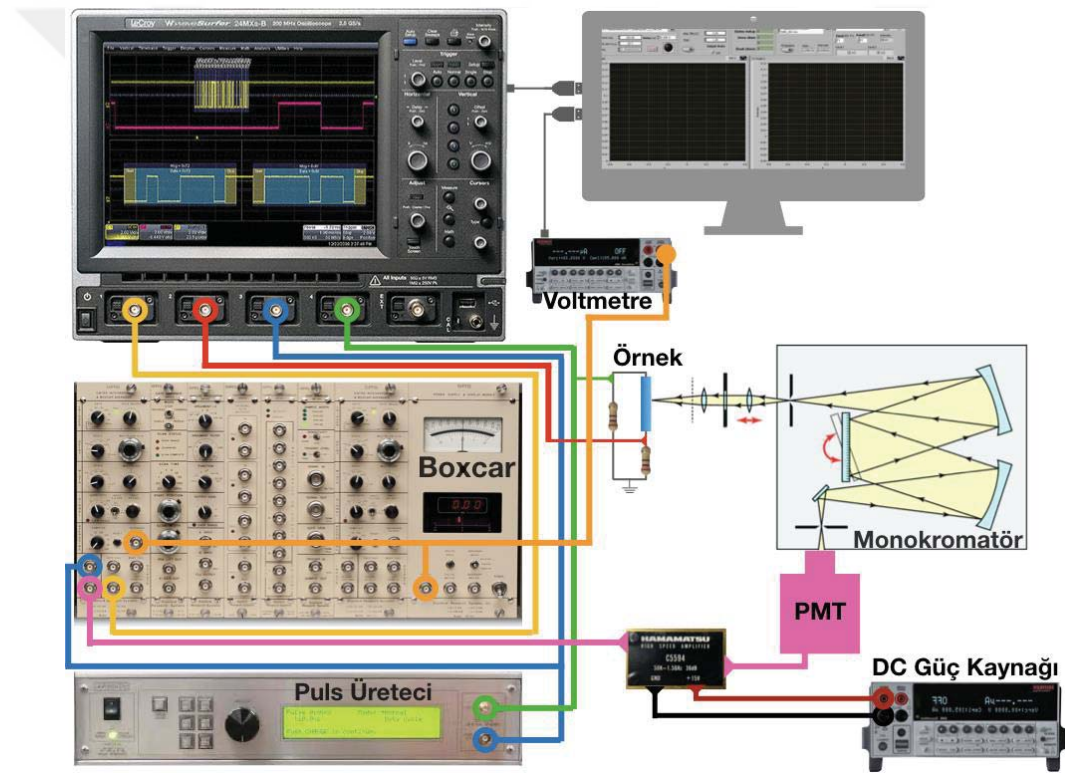
$$\%DC = (PW / DT) \times 100. \quad (5.8)$$

Burada DC yüzde olarak iş döngüsü olmak üzere  $PW$  (*puls width*) puls genişliği ve  $DT$  (*delay time*) gecikme zamanıdır. Kare dalga iş döngüsü şeması Şekil 5.13’de gösterilmektedir. Uygulanan pulsların iş döngüsü değeri ne kadar küçük olursa voltajın yüksekte kalma süresi o kadar az olur. Böylece örneğe soğuması için verilen süre arttırılmış olur ve örneğin ısınması önlenmiş olur ya da bu ısınma en aza indirilmiş olur. İş döngüsü değeri keyfi birimdedir.



Şekil 5.13. Kare dalga için iş döngüsü şeması. Dalganın tepe noktasındaki değeri  $V_{cc}$ , çukurdaki değeri ise  $V_{ss}$ 'dir.

THH ölçümleri için hazırlanan *EL* ölçüm düzeneği Şekil 5.14'te verildi. *THH EL* deney düzeneği, *Klasik LED EL* düzeneğinden oldukça farklıdır. Bu düzende uyarım kaynağı olarak AvTech AVRZ-5 puls üretici kullanıldı. Örneğe uygulanan elektrik alan sonucunda oluşan ışımaya, mercekler yardımıyla Acton SR-2300i monokromatöre odaklandı ve Hamamatsu R3896 fotoçoğaltıcı (PMT) ile kaydedildi. Fotoçoğaltıcının çıkışı, *box-car averager*'a bağlandı ve *box-car*'da 100 kez örneklendikten sonra ortalaması alınan sinyalin dalgaboyuna bağlı olarak değişimi bilgisayar ile kaydedildi. *EL* düzeneğinde Keithley 2000 voltmetre, *box-car* üzerinden ışık şiddetini ölçmek için, Keithley 2400 güç kaynağı ise Hamamatsu C5594-44 dönüştürücü ve yükseltici beslemek için kullanıldı.



Şekil 5.14. THH ölçümleri için hazırlanan *EL* ölçüm düzeneği.

Puls üretici genlik değeri 3 V olan bir tetikleme sinyali üretir. Puls üreticinin *Sync Out* çıkışı osiloskobun tetikleme kanalı olarak seçilen üçüncü kanalına ve *Box-car Averager*'ın tetikleme (*Input Trigger*) girişine bağlandı (deney düzeneğinde mavi çizgi kullanılarak oluşturulan bağlantı şeması) ve böylece bu cihazın eş zamanlı olarak ölçüm alması sağlandı (Şekil 5.14). Deney düzeneğinde yer alan tüm girişler ve kullanılan tüm kablolar 50  $\Omega$  dirence sahiptir. Puls üreticinin *Out* çıkışı ile örneğin bulunduğu yüksek hızlı akım voltaj ölçümleri devresine pulslu elektrik sinyalleri uygulandı. Uygulanan



pulslu sinyallerin genlik değerleri belirlemek için *Out* çıkışı osiloskobun dördüncü kanalına 30 dB değerindeki sinyal sönümleyici (*attenuator*) ile bağlandı (deney düzeneğinde yeşil çizgi kullanılarak oluşturulan bağlantılar). Böylece devreye uygulanan  $V_{giriş}$  voltajı osiloskobun dördüncü kanalından ölçüldü. Örnek üzerine düşen potansiyel farkın hesaplanması için ise, 50  $\Omega$ 'luk yük direnci ( $R_{yük}$ ) üzerine deşen voltaj ( $V_R$ ) osiloskobun ikinci kanalından ölçüldü (deney düzeneğindeki kırmızı renkli hat ).  $V_{giriş}$  voltajından yük direnci üzerine düşen  $V_R$  voltajının farkı ile örnek voltajı ( $V_{örnek}$ ) hesaplandı. Fotoçoğaltıcı çıkışı elektrik sinyalini akım olarak ölçülebilir bir niceliğe dönüştürür. Fakat *box-car* elektrik sinyalini voltaj olarak algılayabildiğinden, fotoçoğaltıcı çıkışına dönüştürücü (Hamamatsu C5594-44) bağlandı ve çıkış voltaj moduna dönüştürüldü. Hamamatsu C5594-44 dönüştürücü aynı zamanda yüksek hızlı bir yükselteçtir. *THH EL* ölçüm düzeneğinde Keithley 2400 DC güç kaynağı ile 15 V (95 mA) uygulanarak beslendi. Dönüştürücü çıkışından (deney düzeneğindeki kırmızı renkli hat) *box-car*'ın sinyal girişine (*Input Signal*) bağlandı. *THH EL* deney düzeneğinde sarı çizgi ile gösterilen hat ile örnekten çıkan ışığın elektrik sinyali şeklinde elde edilebilmesi için *Box-car*'ın sinyal çıkışı (*Signal Output*) osiloskobun birinci kanalına 20 dB'lik sinyal sönümleyici kullanılarak bağlandı. *Box-car* ortalama çıkışından (*Averaging-Average output*), 100 kez örneklendirilen sinyal Keithley 2000 voltmetre ile okundu. Osiloskop ve voltmetre ile ölçülen tüm veriler *labview* ile yazılan arabirim programları kullanılarak bilgisayarda işlendi. Ayrıca *box-car*'ın kapı (*gate*) kanalı kullanılarak, osiloskobun birinci kanalında AC modda gözlenen sinyalin uygun kapı aralığı açılarak yakalanması çok önemlidir. Kapı kanalı çıkışı 50  $\Omega$ 'luk terminator kullanılarak osiloskobun ikinci veya dördüncü kanallarına bağlanarak uygun kapı açılarak sinyal yakalanır ve ardından bu bağlantı sökülerek ilgili kanallara kendi bağlantıları tekrar yapılır. Bu bağlantı aşaması, uygun kapı açıldıktan sonra söküldüğü için Şekil 5.14'de gösterilen *THH EL* deney düzeneğinde yer almamıştır. *THH EL* deney düzeneğinde eksiksiz ve doğru bir şekilde ölçümler gerçekleştirebilmek için *box-car*'ın bağlantılarının doğru yapılabilmesi büyük önem taşımaktadır.

Şekil 5.15'de *THH EL* düzeneği ile yapılan ölçümdeki osiloskop ekran görüntüsü yer almaktadır. Sarı renkte olan sinyal osiloskobun birinci kanalından gözlemlenen elektrolüminesans sinyalidir. Örneğe uygulanan pulslu voltaj, osiloskobun dördüncü kanalında yeşil ile gösterilen kare dalga iken yük direnci üzerine düşen voltaj ise osiloskobun ikinci kanalından gösterilen kırmızı renkli kare dalgadır. Bütün sinyallerin



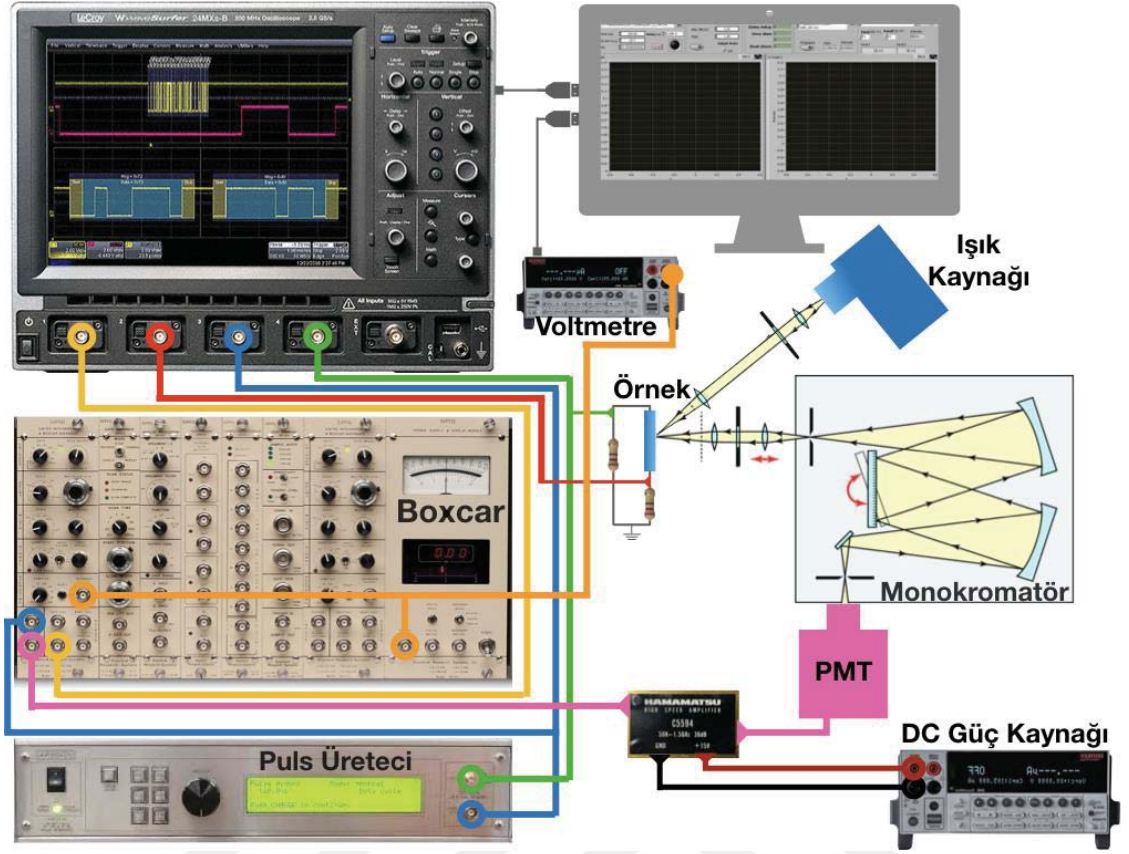
düzgün kare dalgalar şeklinde olması, kare dalgalarda herhangi bir şekil bozukluğu olmaması deney düzeneğinde kullanılan tüm cihazlar arasında empedans uyumu olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.15. THH EL düzeneği ile yapılan ölçümdeki osiloskop ekran görüntüsü Sarı renkte olan sinyal osiloskobun birinci kanalından gözlemlenen elektrolüminesans sinyalini, osiloskobun dördüncü kanalında yeşil ile gösterilen kare dalga örneğe uygulanan pulslu voltajı ve osiloskobun ikinci kanalındaki kırmızı kare dalga ise yük direnci üzerine düşen voltajı göstermektedir.

### 5.3.3. Foto Elektrolüminesans Deney Düzeneği

THH geometrisinde üretilen örneklerin eş zamanlı olarak hem pulslu elektrik alan ile hem de yasak enerji aralığından daha büyük enerjili bir ışık ile uyarılması foto elektrolüminesans deney düzeneği ile gerçekleştirildi. Bu deney düzeneğinde örnek elektrolüminesans yaparken üzerine yüksek enerjili ışık düşürüldü. Foto elektrolüminesans ölçüm düzeneği Şekil 5.16'da verilmiştir. Bu deney düzeneğinin, THH EL ölçüm düzeneğine çok benzer olduğu açıkça görülmektedir. THH EL deney düzeneğinden farklı olarak, örnek üzerine yüksek enerjili ışık gönderebilmek için 500 W gücündeki civa lambası ışık kaynağı olarak kullanıldı. Işık kaynağı çıkışında 370 nm dalgaboyunu geçiren filtre kullanılarak örnek üzerine 3,35 eV enerjili ışık düşürülmesi sağlandı.



Şekil 5.16. Foto elektrolüminesans ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.

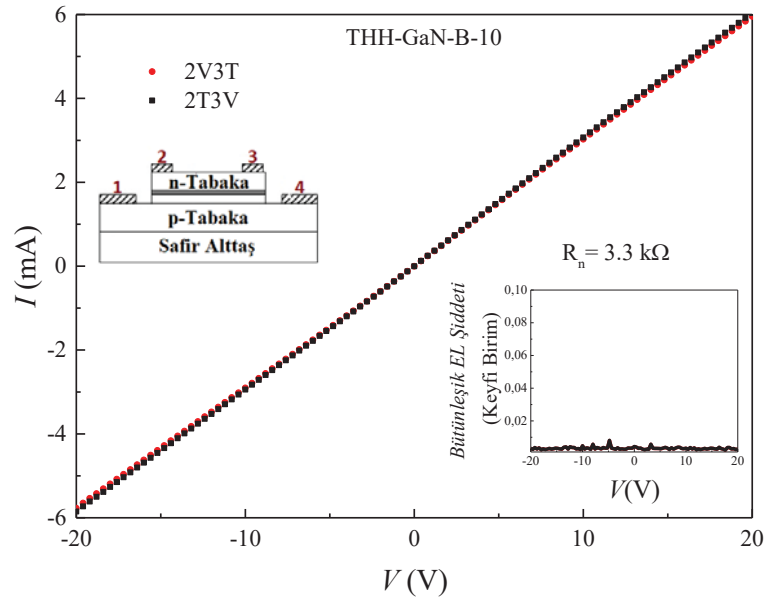


## 6.1. THH-GaN-B-10 Aygıt Ölçümleri

Dört kuantum kuyulu, 1000  $\mu\text{m}$  n-kanal uzunluğuna sahip olan ve simetrik bir şekilde p-kanal (1400  $\mu\text{m}$ ) üzerine yerleştirilen ve her kanal üzerinde kendisine ait dört adet omik kontaklı bulunan THH-GaN-B-10 kodlu aygıtta *DC* elektrolüminesans, pulslu elektrolüminesans ve foto-elektrolüminesans ölçümleri gerçekleştirildi. *DC* elektrolüminesans ölçümlerinde aygıt bünyesindeki iki adet klasik LED'in çalışması incelenirken pulslu elektrolüminesans ölçümlerinde aygıtın THH olarak çalışması incelendi. Tüm ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

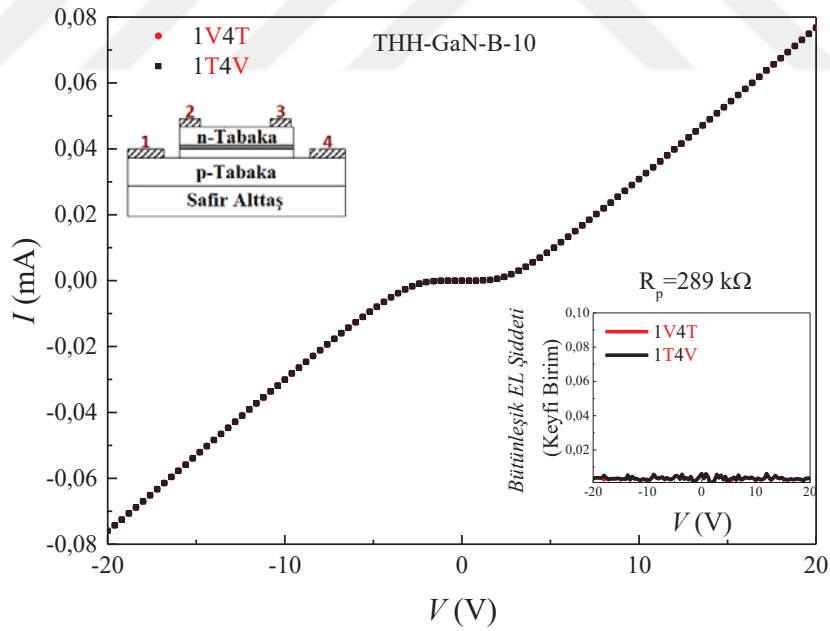
### 6.1.1. THH-GaN-B-10 Aygıtın *dc* elektrolüminesans ölçümleri

*DC* elektrolüminesans ölçümleri öncelikle THH-GaN-B-10 aygıtının n-tipi kontakları (2 ve 3 nolu kontaklar) arasında yapıldı. Böylece n-tipi kontakların akım-voltaj (*I-V*) ve eş zamanlı olarak voltaj-ışık şiddeti grafikleri elde edildi. n-tipi kontaklar arasında yapılan *I-V* ölçümleri -20 V ve +20 V aralığında 0,4 V aralıklarda, 2V3T ve 2T3V bağlantıları ile yapıldı. Her iki kontak konfigürasyonunda da uygulanan potansiyel fark aralığında herhangi bir ışımaya şiddeti görülmedi. n-tipi kontakların *I-V* grafiği doğrusaldır. Böylece n-tipi kontakların omik davranış sergilediği görüldü. *I-V* grafiği eğimi kullanılarak n-tipi kontak direnci 3,39  $\text{k}\Omega$  olarak elde edildi. n-tipi kontakların *I-V* ölçümleri sonuçları Şekil 6.2'de verildi.



Şekil 6.2. n-tipi kontakların *I-V* grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışımaya şiddeti değişimi (iç grafik). 2 nolu kontakta potansiyel uygulanıp 3 nolu kontakta topraklandığı konfigürasyon 2V3T olarak, 2 nolu kontakta topraklanıp 3 nolu kontakta potansiyel uygulandığı konfigürasyon 2T3V olarak gösterildi.

Aygıtın p-tipi kontakları (1 ve 4 nolu kontaklar) arasında elde edilen  $I$ - $V$  grafiği ve uygulanan voltaja göre bütünleşik (*integrated*) elektrolüminesans şiddetinin değişimi grafiği Şekil 6.3’de verildi. Ölçümlerde aygıt kontaklarına -20 V ve +20 V aralığında 0,4 V adımlarda potansiyel fark uygulandı. 1V4T ve 1T4V kontak konfigürasyonlarında uygulanan potansiyel fark aralığında herhangi bir ışımaya şiddeti görülmedi. p-tipi kontakların  $I$ - $V$  grafiği doğrusal bir davranış göstermemekte, -2 ve +2 V aralığında akımın geçmesine engel olan bir sapma göstermektedir. Bu kontak davranışı çok iyi olmayan bir omik kontak davranışı olarak tanımlanabilir. Bu da p-tipi omik kontakların düşük kalitede kontaklar olduğunun bir göstergesidir.  $I$ - $V$  grafiği eğimi kullanılarak p-tipi kontak direnci 289 k $\Omega$  olarak elde edildi. Direncin bu kadar büyük olması aygıtın p kontaklarından birinin altın tel bağlama aşamasında büyük hasar görmesinden ve bu kontakta altın teli bağlamak için gümüş pasta kullanılmasından kaynaklanabilir. Aygıtın p-tipi kontaklarının öz direnci  $1,73 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$  olarak hesaplandı. Bu değer aynı kontak kalınlığı ve ısıtılma işlemi tabii tutulmuş literatür değerleri ( $1 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ , [53, 149]) ile karşılaştırıldığında çok büyüktür.



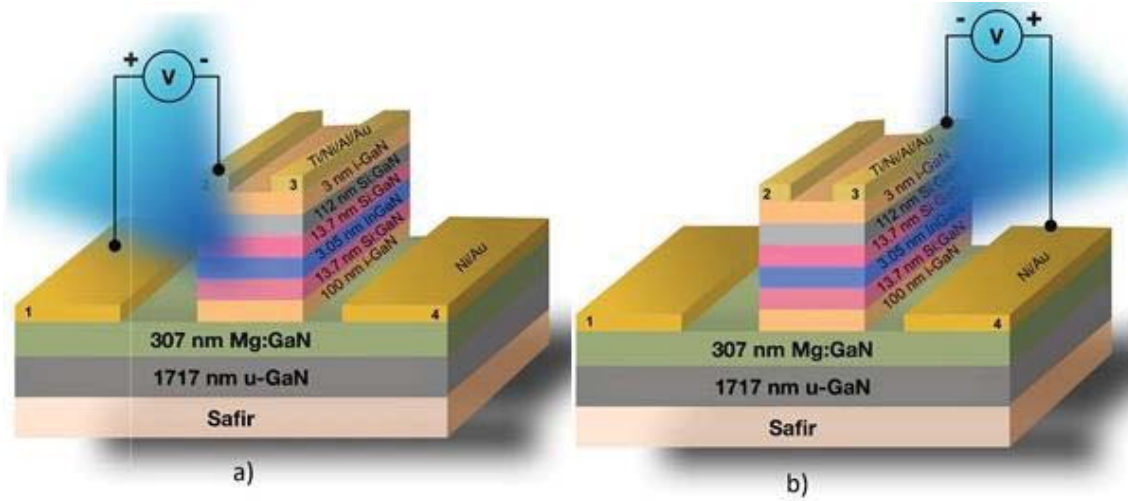
**Şekil 6.3.** p-tipi kontakların  $I$ - $V$  grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışımaya şiddeti değişimi (içeriye yerleştirilmiş şekil). Kontak numarası 1 olan kontakta potansiyel uygulanıp 4 nolu kontakın topraklandığı konfigürasyon 1V4T olarak, 1 nolu kontakın topraklanıp 4 nolu kontakta potansiyel uygulandığı konfigürasyon 1T4V olarak gösterildi.

Aygıtın her iki kanalı için uygulanan voltaja göre bütünleşik elektrolüminesans şiddeti ölçümlerinde herhangi bir emisyon şiddetine rastlanmaması taşıyıcıların kendi



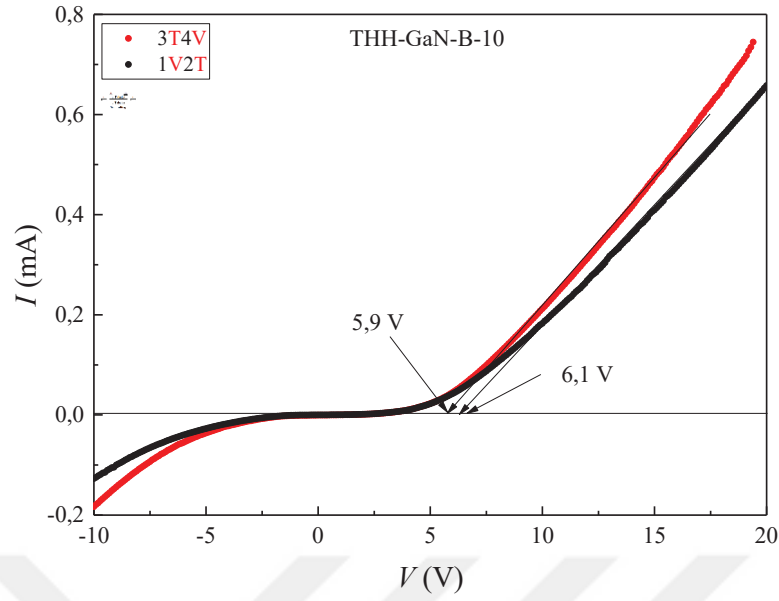
kanallarında taşınım yaptıklarının, herhangi bir şekilde yeniden birleşme yapmadıklarının bir göstergesidir.

Şekil 6.4 a ve b’de THH-GaN-B-10 aygıtı bünyesinde bulunan iki klasik LED’ın ileri besleme durumları ve yaptıkları ışımaya gösterildi. 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonunda bulunan her iki klasik LED yapısı ileri beslendi.

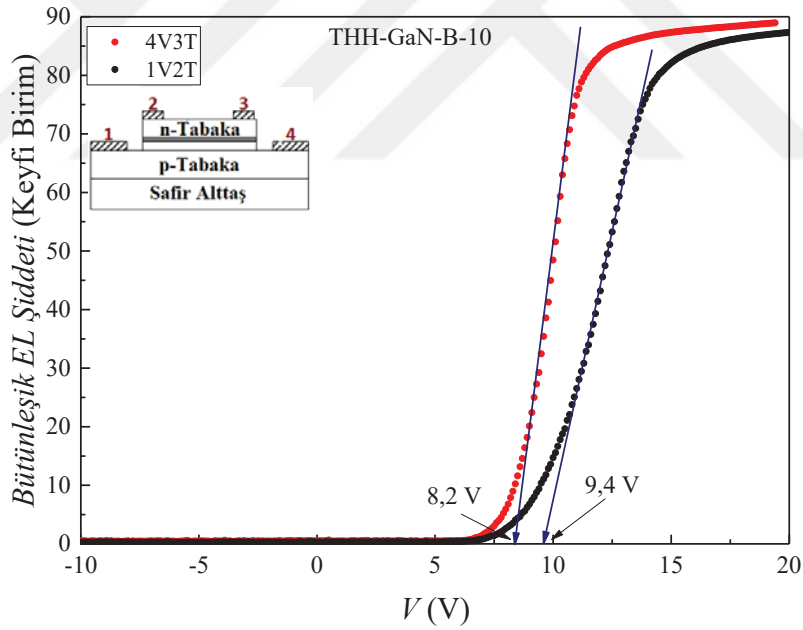


**Şekil 6.4.** THH-GaN-B-10 aygıtının klasik LED ileri besleme gösterimi. a) 1 nolu kontak +V uygulandığında ve 2 nolu kontak toprağa bağlandığında (1V2T) ileri besleme elde edilir. Işıma 1 ve 2 nolu kontaktların arasındaki örnek kenarında meydana gelir. b) 3 nolu kontak topraklanıp 4 nolu kontak +V uygulandığında (3T4V) diğer klasik LED yapısı ileri beslenir. Işıma 3 ve 4 nolu kontaktlar arasından gerçekleşir.

Aygıtın 1V2T ve 3T4V konfigürasyonlarındaki kontaktlarına -10 V’dan +20 V’a kadar 0,5 V aralıklarla potansiyel uygulandı ve elde edilen *I-V* grafiği Şekil 6.5’dedir. Geri besleme voltajlarında çok küçük sızıntı akımları görülürken ileri beslemede klasik LED davranışı gözlemlendi. 3T4V şeklinde voltaj uygulanan klasik LED yapısı 5,9 V ileri besleme voltajında ışımaya yapmaya başlamasına rağmen 1V2T şeklinde voltaj uygulanan klasik LED 6,1 V ileri besleme voltajında ışımaya yapmaya başlamıştır. Her iki grafik arasında küçük farklılıklar görülmesinin nedeni 1 nolu p-kontaklarının fabrikasyon aşamaları sırasında gördüğü hasarlar ve altın tel bağlamak için gümüş pasta kullanılması olabilir. p-kontaktlar arasında oluşan direnç farklılığının, bütünleşik *EL* şiddetinin değişimine etkisi Şekil 6.6’dadır. İleri besleme voltajı arttıkça bütünleşik *EL* şiddeti hızlı bir şekilde artmıştır. Geri beslemede ise herhangi bir ışımaya şiddeti gözlemlenmedi. Bu ölçümler, monokromatörün giriş ve çıkış açıklıkları (*slit*) tamamen açılarak (3000  $\mu\text{m}$ ) ve monokromatör 0 nm konumuna getirilerek gerçekleştirildi.



Şekil 6.5. 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının I-V grafiği. Her iki yapıda klasik LED davranışını göstermiştir.

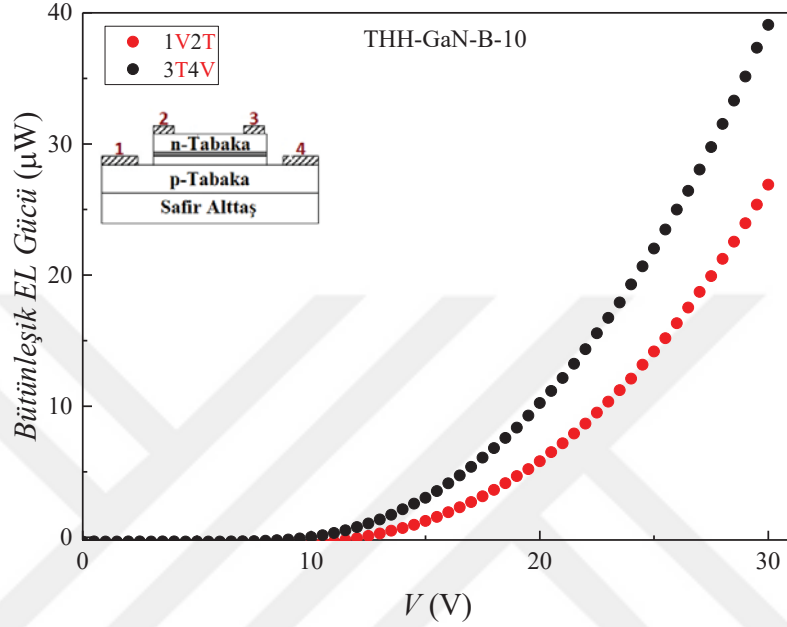


Şekil 6.6. 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının uygulanan voltaj ile bütünleşik EL şiddetinin değişimi.

Klasik LED yapılarının bütünleşik güç ölçümü gerçekleştirilmeden önce RS marka ticari bir LED'in güç ölçümleri yapıldı. Ticari LED'in veri dosyasından, uygulanan akım değerine karşı elde edilen güç bilgilerine göre, kullanılan güç metrenin kalibrasyonu yapıldı. Uygulanan voltaja bağlı olarak değişen bütünleşik *EL* gücü grafiği Şekil 6.7'dedir. Her iki klasik LED'in bütünleşik *EL* gücünün uygulanan voltaja göre

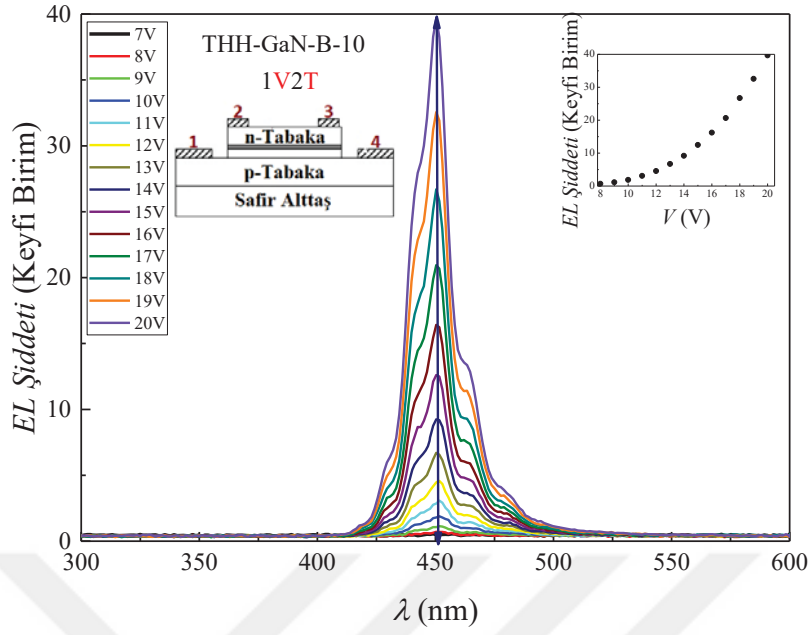


değişimlerinin aynı olması beklenirken 3T4V konfigürasyonundaki LED'in daha yüksek güçte emisyon yaptığı görüldü. 3T4V kontak diziliminde 30 V uygulandığında ışıma gücü 38,9  $\mu\text{W}$  elde edilirken 1V2T kontak diziliminde 30 V uygulandığında 26,9  $\mu\text{W}$  ışıma gücü elde edildi.

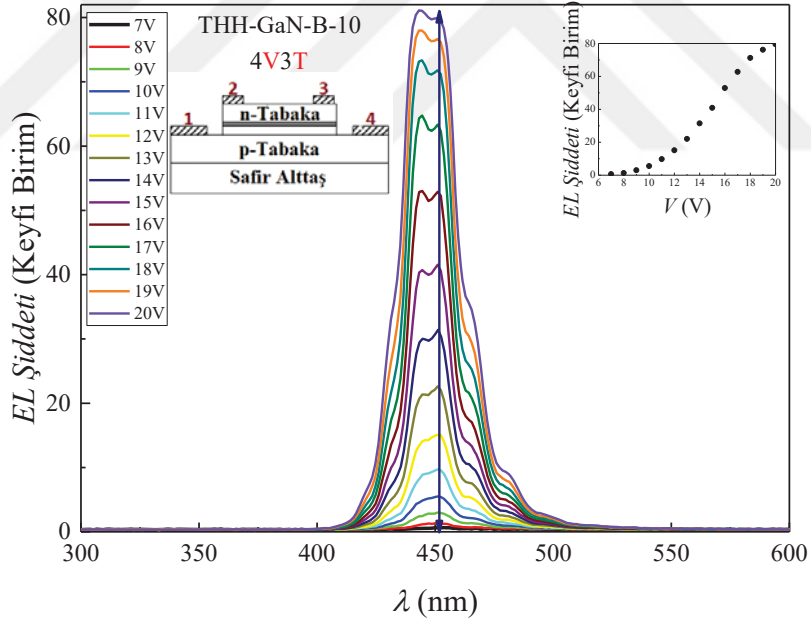


Şekil 6.7. THH-GaN-B-10 aygıtında klasik LED'in ileri beslemede bütünlük EL gücünün uygulanan voltaj ile değişimi.

Farklı ileri besleme voltajlarında dalga boyuna bağlı *EL* şiddetinin değişimi ölçümlerinde monokromatörün giriş ve çıkış açıklıkları 50  $\mu\text{m}$ 'ye ayarlandı ve 300-600 nm arasında spektrum alındı. Hamamatsu PMT'ye -1000 V uygulandı. 1V2T kontak konfigürasyonunda alınan *EL* spektrumu Şekil 6.8'de, 3T4V kontak konfigürasyonunda alınan *EL* spektrumu Şekil 6.9'da gösterildi. Her iki klasik LED için de 7V ile 20V aralığında voltajlar 1V adımlarla uygulanarak gerçekleştirilen ölçümlerde *EL* şiddetinin artan voltaj ile doğrusala yakın arttığı görüldü. Uygulanan voltaj arttırıldığında emisyon piklerinin dalga boylarında bir kayma görülmedi. İki klasik LED'de  $450 \pm 1$  nm dalga boyunda kuvvetli emisyon pikine sahiptir.



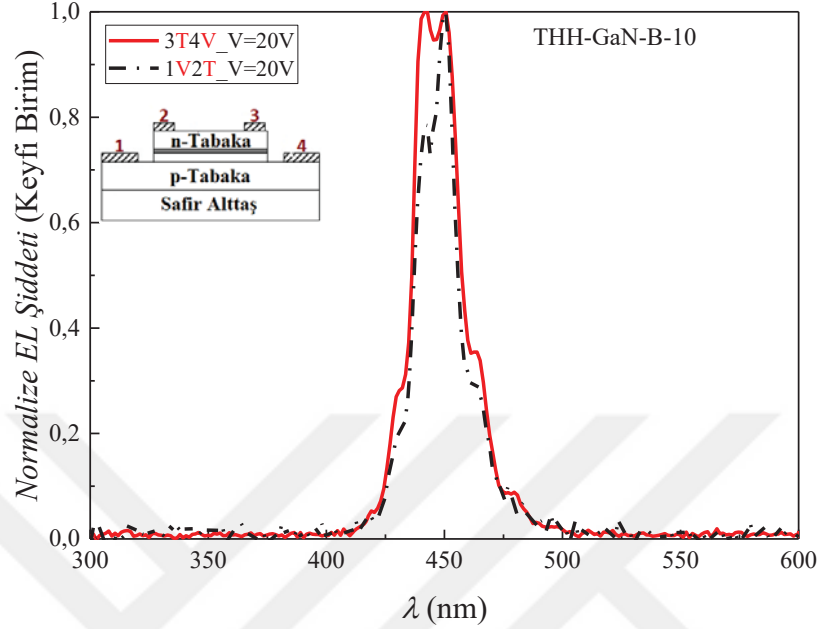
Şekil 6.8. 1V2T kontak konfigürasyonunda alınan EL spektrumu.



Şekil 6.9. 3T4V kontak konfigürasyonunda alınan EL spektrumu.

İki klasik LED yapısının da aynı emisyonları yaptığını görebilmek için, her iki LED'e 20V ileri besleme uygulandığında alınan *EL* spektrumları normalize edildi ve üst üste çizdirildiğinde emisyon piklerinin birbirleri ile örtüştüğü görüldü (Şekil 6.10). Şekilde kesik çizgiler ile gösterilen spektrum 1V2T konfigürasyonundaki LED'e ait iken kırmızı çizgi ile çizilen spektrum 3T4V konfigürasyonu ile beslenen LED'e aittir. Bu tez

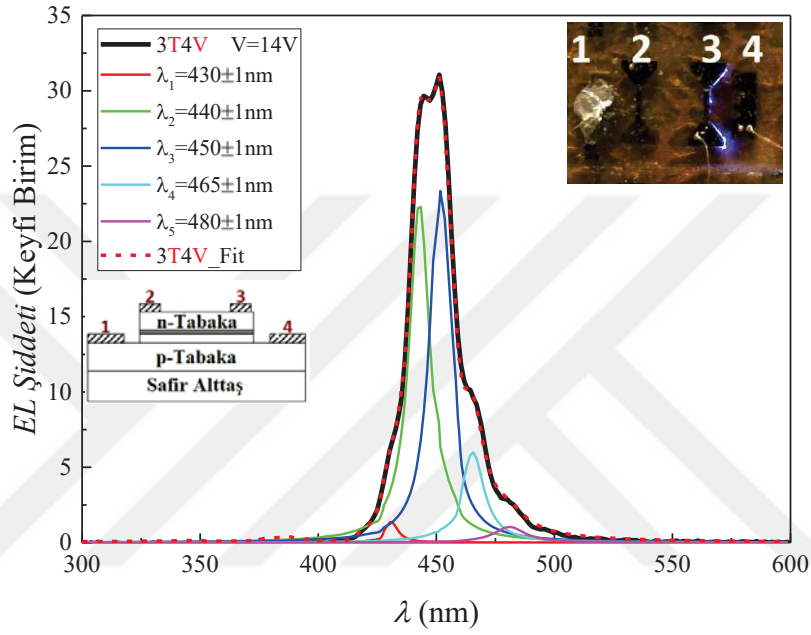
kapsamında incelenen iki LED de aynı spektruma sahip olduğu için THH-GaN-B-10 nolu aygıtının sadece 3T4V konfigürasyonuna ait olan LED sonuçları verilecektir.



Şekil 6.10. Her iki konfigürasyonda 20 V ileri besleme voltajında alınan EL spektrumlarının normalize edilerek karşılaştırılması.

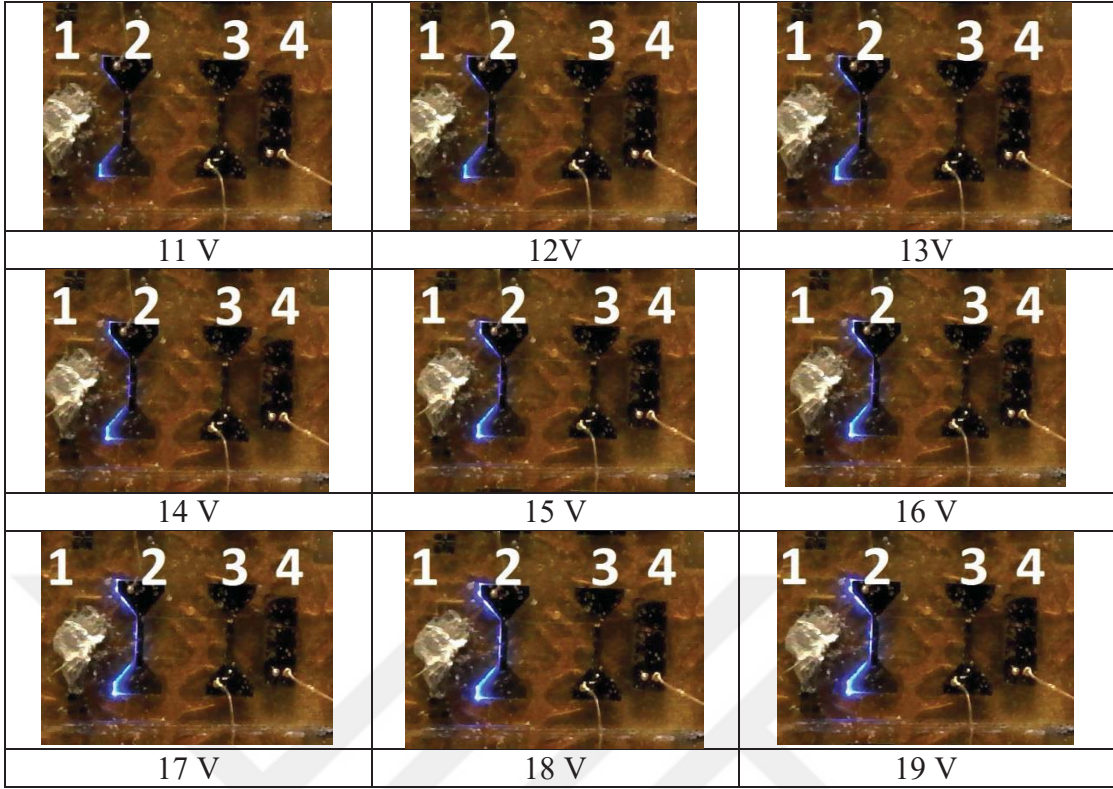
Şekil 6.11’de 3T4V konfigürasyonunda 14 V ileri besleme voltajında elde edilen EL spektrumu verildi. Bu spektrum *magic plot* programı ile piklerine ayrıldı ve 5 farklı dalgaboyunda emisyon piki elde edildi. Ayrılan piklerin  $\lambda_1=430\pm 1$  nm,  $\lambda_2=440\pm 1$  nm,  $\lambda_3=450\pm 1$  nm,  $\lambda_4=465\pm 1$  nm ve  $\lambda_5=480\pm 1$  nm dalgaboylarında oldukları görüldü. Ayrıca 3T4V kontak konfigürasyonundaki klasik LED’in ışımaya yaptığı fotoğraf da Şekil 6.11’de verildi. Emisyonun 3 ve 4 nolu kontaklar arasındaki aygıt kenarından çıktığı görüldü. Işıma dalgaboyları teker teker incelendiğinde, en şiddetli pik  $\lambda_3=450\pm 1$  nm dalgaboylu emisyon piki olduğu görüldü.  $\lambda_3$  kuantum kuyusu içerisindeki Ee1-Ehh1 optik geçişinden meydana gelmektedir (Ee1, kuantum kuyudaki elektronların birinci enerji seviyesi iken Ehh1, birinci ağır boşluk enerji seviyesidir) [150, 151]. Tam yüksekliğin yarı genişliği (*full width half maximum*; FWHM) ise  $10,4\pm 0,2$  nm’dir. Diğer optik geçiş enerjilerine bakıldığında Ee1-Elh1 (Elh1, birinci hafif boşluk enerji seviyesi) geçişi de ikinci en şiddetli pik olan  $\lambda_2=440\pm 1$  nm’ye karşılık gelmektedir [152].  $\lambda_2$   $9,9\pm 0,2$  nm FWHM değerine sahiptir.  $\lambda_4=465\pm 1$  nm dalgaboyundaki ışımaya ise Ee1 seviyesinden yapı içerisindeki indiyumların kümelenmesi sonucu oluşturdukları tuzak seviyesine olan ışımaya geçişlerden oluşmaktadır [153–156]. FWHM değeri ise  $11,3\pm 0,2$  nm olarak elde

edildi. GaN tabakaları içerisinde Ga eksikliklerinden (Galyum atomlarının olması gereken yerde boşluk olması) kaynaklanan değerlik bandının yaklaşık 1 eV üzerindeki tuzak seviyesi ve iletkenlik bandı geçişleri ise  $\lambda_5=480\pm 1$  nm dalgaboyundadır [150, 153, 155]. FWHM değeri ise  $16,2\pm 0,2$  nm olan en geniş pik  $\lambda_5$ 'dir.  $\lambda_3=430\pm 1$  nm dalgaboylu pik ise MOCVD veya HVPE ile büyütülen Si-katkılı n-tipi GaN spektrumlarında sıklıkla gözlenebilen zayıf bir piktir [153].

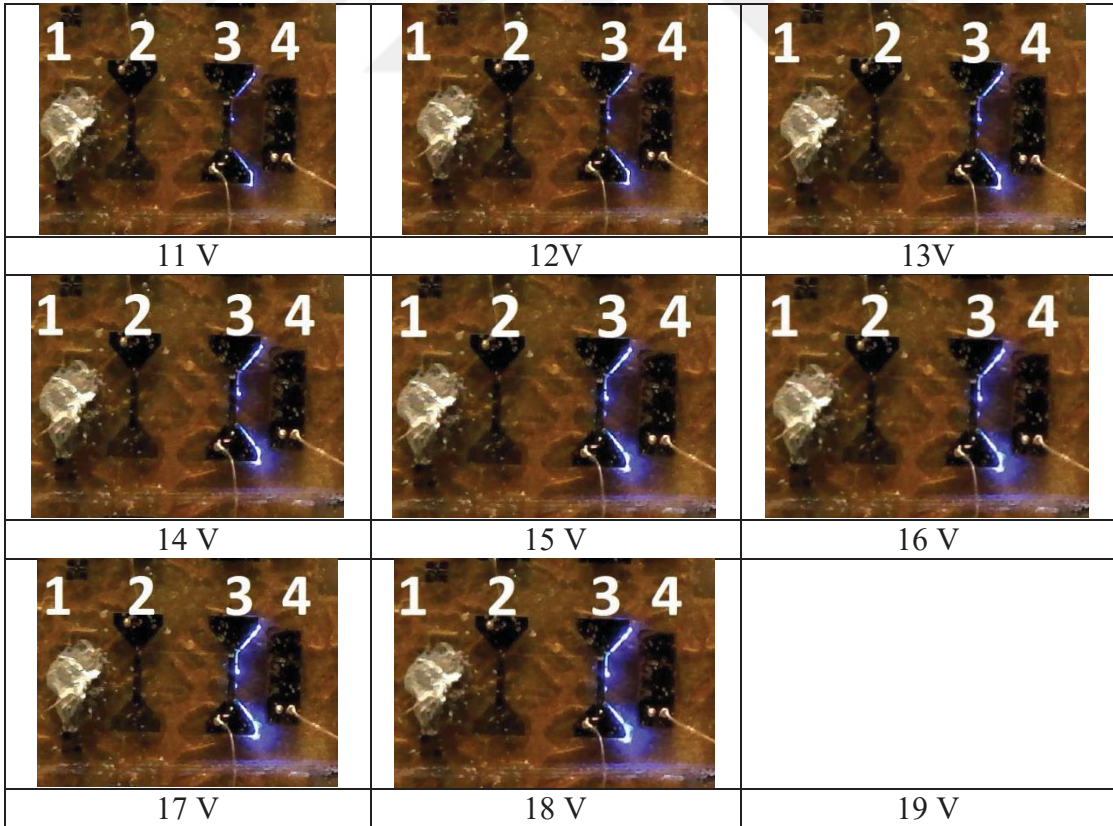


**Şekil 6.11.** 3T4V konfigürasyonunda 14 V ileri besleme voltajında elde edilen EL spektrumu. Siyah sürekli çizgi ile gösterilen deneysel elde edilen spektrumdur. Kesikli kırmızı çizgi ile gösterilen spektrum ise ayrılan piklerin toplamı olan fit spektrumudur. Deneysel spektrum 5 farklı emisyon dalgaboyuna sahiptir.

Görsel 6.1'de 1V2T ve Görsel 6.2'de 3T4V kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'lerin 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğraflarıdır.



**Görsel 6.1.** 1V2T kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları)

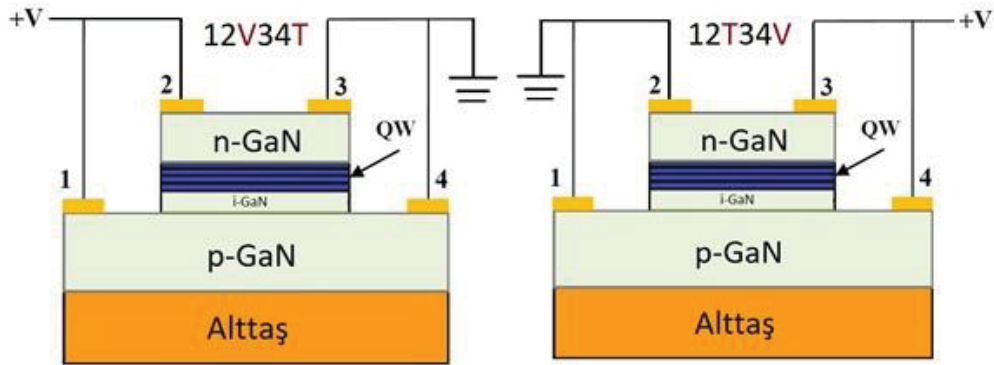


**Görsel 6.2.** 3T4V kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları.

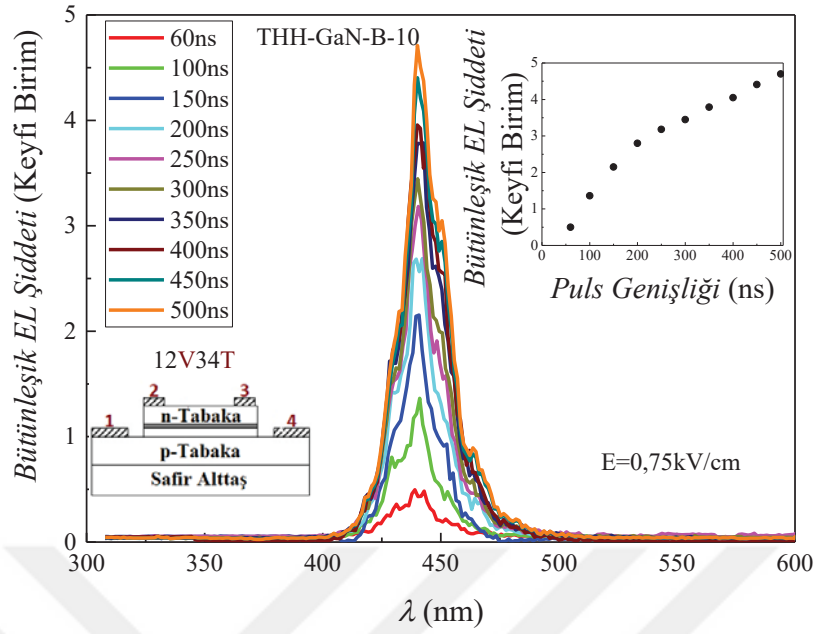


### 6.1.2. THH-GaN-B-10 Aygıtının pulslu elektrolüminesans ölçümleri

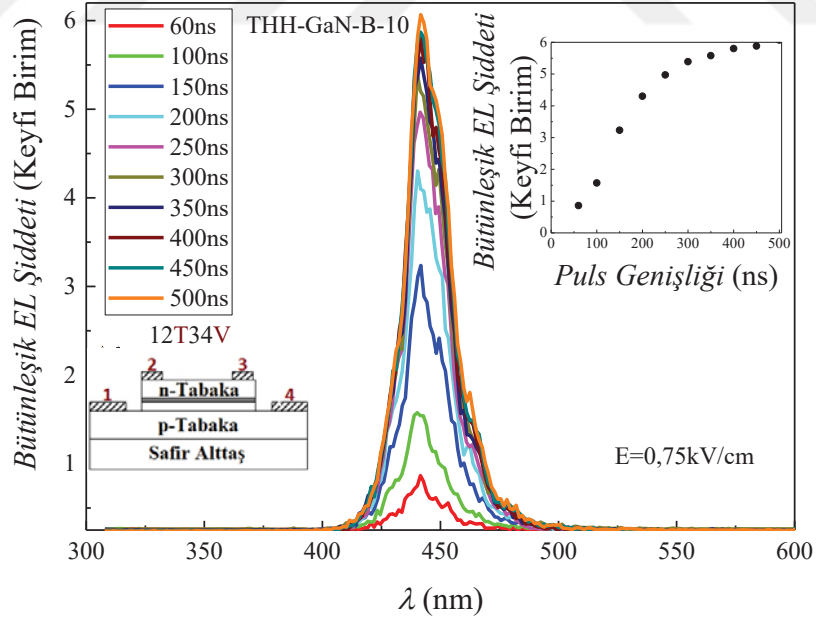
THH-GaN-B-10 aygıtının elektrik alana bağlı ölçümleri pulslu elektrolüminesans deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirildi. Deney düzeneğinde Hamamatsu R3896 PMT' ye -1000 V uygulandı. Hamamatsu C5594-44 dönüştürücü ve yükselteç ise Keithley 2400 ile 15 V, maksimum 95 mA akım değeriyle beslendi. Ölçümlerde kullanılacak pulslu voltajların puls genişliğini belirlemek için sabit bir elektrik alanda puls genişliğine bağlı bütünleşik *EL* şiddeti ölçümleri yapıldı. THH-GaN-B-10 aygıtı Şekil 6.12.a ve b'de yer alan kontak konfigürasyonlarında elektriksel bağlantıları yapıldı. *Top Hat HELLISH* geometrisinde yer alan dört kontak için 1 ve 2 nolu kontaklar birleştirilip pulslu voltajlar uygulandığında, ardından 3 ve 4 nolu kontakların birleştirilip topraklandığı kontak konfigürasyonu 12V34T şeklinde gösterilir. Benzer olarak 3 ve 4 nolu kontakların birleştirip pulslu voltaj uygulandığı, 1 ve 2 nolu kontakların birleştirilip topraklandığı kontak konfigürasyonu da 12T34V şeklinde ifade edilir. Sırasıyla 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde gerçekleştirilen sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine göre bütünleşik *EL* şiddetinin grafikleri Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de verildi. Ölçümlerde aygıtın iki kontak diziliminde de rahatlıkla gözle görünebilen bir ışımaya yaptığı 0,75 kV/cm'lik elektrik alan uygulandı. 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde 60 ve 500 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik *EL* şiddetleri gözlemlendi. Ölçümlerde 300 ns puls genişliğine kadar *EL* şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış azalarak sabit *EL* şiddeti değerlerinde gözlemlendi. *EL* şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi. Bütünleşik *EL* şiddeti ölçümlerinde monokromatör 0 nm konumuna alınıp giriş ve çıkış açıklıkları tamamen (3000  $\mu\text{m}$ ) açıldı.



Şekil 6.12. *Top Hat HELLISH* kontak yapısında a) 12 nolu kontaklara pulslu voltaj uygulanıp 34 nolu kontakların topraklandığı kontak konfigürasyonu (12V34T) b) 12 toprak 34 pulslu voltaj uygulandığındaki kontak konfigürasyonu (12T34V) [106,126].



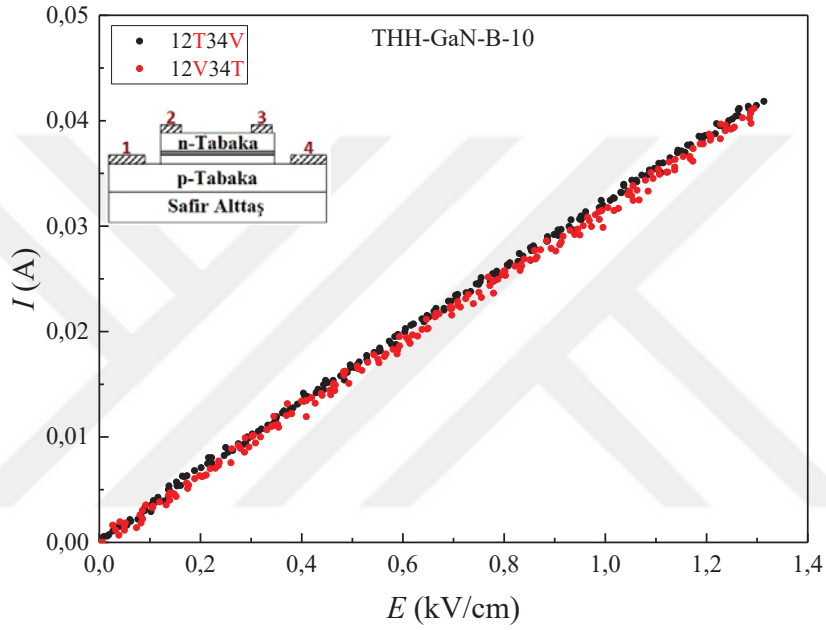
**Şekil 6.13.** 12V34T kontak diziliminde 0.75 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 60 ve 500 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi.



**Şekil 6.14.** 12T34V kontak diziliminde 0.75 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 60 ve 500 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi.

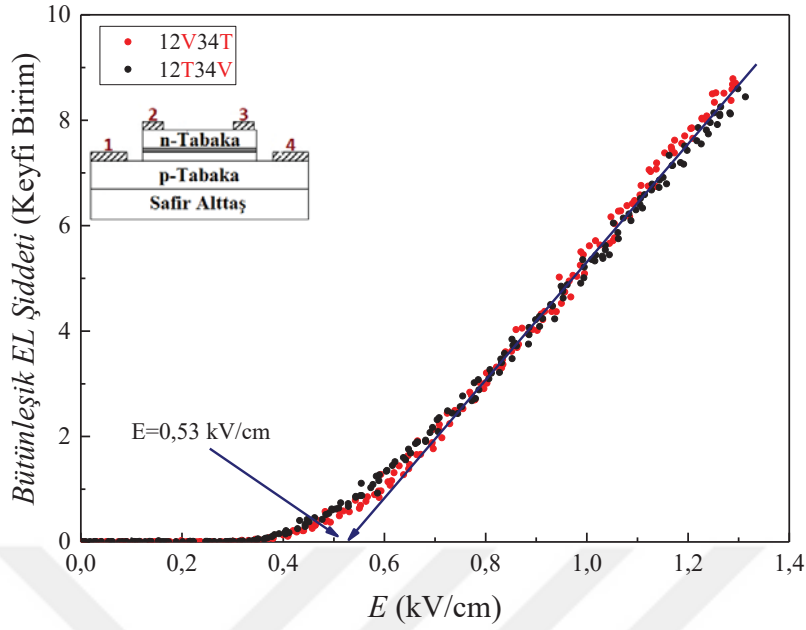


THH-GaN-B-10 aygıtının akım-elektrik alan ( $I-E$ ) ölçümleri 490 Hz frekansında 300 ns puls genişliğine sahip voltaj pulsları ile 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonları için gerçekleştirildi (Şekil 6.15). Ölçümlerde kullanılan frekans ve puls genişliği değerlerine göre iş döngüsü %0,0147 altında tutuldu ve Joule ısınması etkileri en aza indirildi.  $I-E$  alan ölçümlerinde her iki kontak dizilimi de aynı doğrusal artış davranışını gösterdi. Bu ölçümlerde aygıt üzerine maksimum 1,3 kV/cm'lik elektrik alan uygulandı.



Şekil 6.15. 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında uygulanan elektrik alana bağlı akımın değişimi. İki polaritede de aynı doğrusal artış elde edildi.

Şekil 6.16'da 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında uygulanan elektrik alana bağlı bütünleşik  $EL$  şiddeti değişimi verildi. İki besleme diziliminde de aynı davranış elde edildi. 0,53 kV/cm'lik elektrik alan değerinde  $EL$  emisyonunun başladığı görüldü. 0,53 kV/cm'lik elektrik alan aygıtta  $53 \pm 1$  V uygulanarak elde edildi.  $l_1=0$ ,  $l_2=0,2$  mm,  $l_3=1,2$  mm ve  $l_4=1,4$  mm sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 nolu kontakların aygıt üzerindeki konumları olmak üzere,  $X = [l_4 - (l_3 - l_2)]/2l_4$  eşitliği ile verilen boyutsuz THH parametresi  $X = 0,143$  olarak bulundu. Klasik LED yapısının 6,1 V'da ışımaya başladığı göz önüne alındığında, Eşitlik 4.6 ile THH çalışma voltajı  $42,5 \pm 1$  V olarak hesaplandı. THH-GaN-B-10 aygıtının hesaplanan çalışma voltajına yakın bir voltaj değerinde emisyon yapmaya başladığı görüldü.



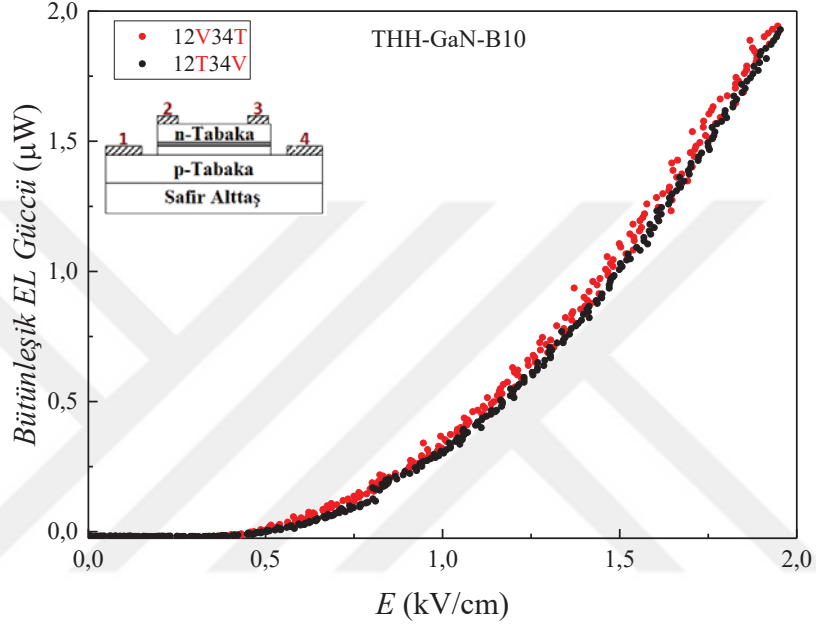
**Şekil 6.16.** 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 0,53 kV/cm'lik elektrik alanda EL emisyonunun başladığı görüldü. İki polaritede de aynı davranış elde edildi.

12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı elde edilen bütünleşik EL gücü değişimi incelendi (Şekil 6.17). İki polaritede de aynı elektrik alan değerlerinde aynı güçte ışımlar elde edildi. 1,95 kV/cm'lik maksimum elektrik alan değerindeki maksimum emisyon gücü 1,94  $\mu$ W'tır.

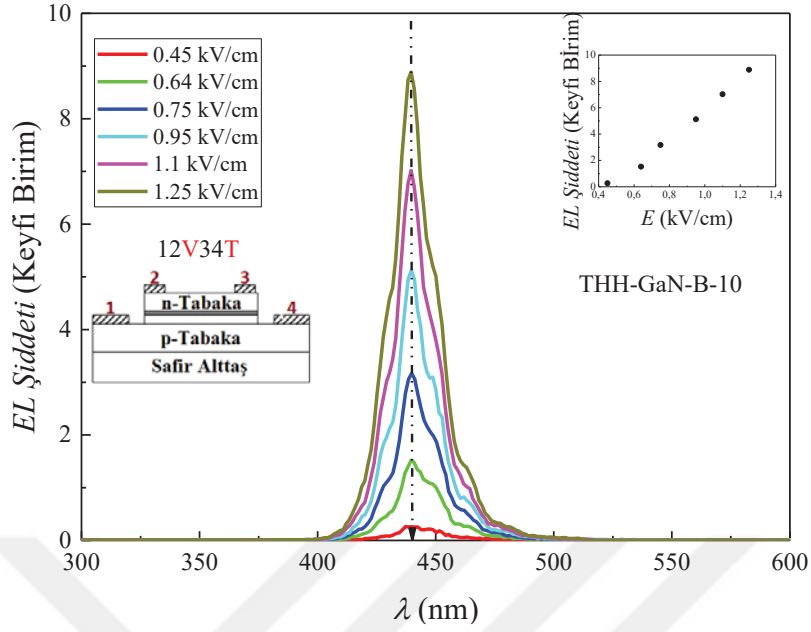
Şekil 6.18'de 12V34 kontak konfigürasyonundaki 300-600 nm aralığındaki EL spektrumu verildi. Spektrumun merkez piki  $440 \pm 1$  nm dalgaboyundadır. Uygulanan elektrik alan arttıkça EL şiddeti lineer bir şekilde artmıştır. Elektrik alanın artışı EL spektrumunun dalgaboyunda bir değişim görülmedi. Benzer davranış 12V34T konfigürasyonu ile elde edilen EL spektrumunda da görüldü (Şekil 6.19). Aygıtın her iki kontak diziliminde de aynı  $I-E$ , aynı  $E$ -ışık şiddeti, aynı  $E$ -güç, aynı elektrik alan değerinde emisyon başlama ve aynı dalgaboyunda spektrum vermesi polariteden bağımsız çalıştığına göstergesidir. Bu durumda THH-GaN-B-10 aygıtı özel veya (XOR) mantıksal kapıların ışık ile çalışması olarak kullanılabilir. XOR mantıksal kapısı, girişlerinin herhangi birine potansiyel uygulandığında çıkış veren, girişlerinin her ikisine birden potansiyel uygulandığında çıkış vermeyen çalışma prensibine sahiptir. XOR mantıksal kapısının çalışma düzeni Tablo 6.1'dedir..

**Tablo 6.1.** XOR mantıksal kapısının çalışma düzeni

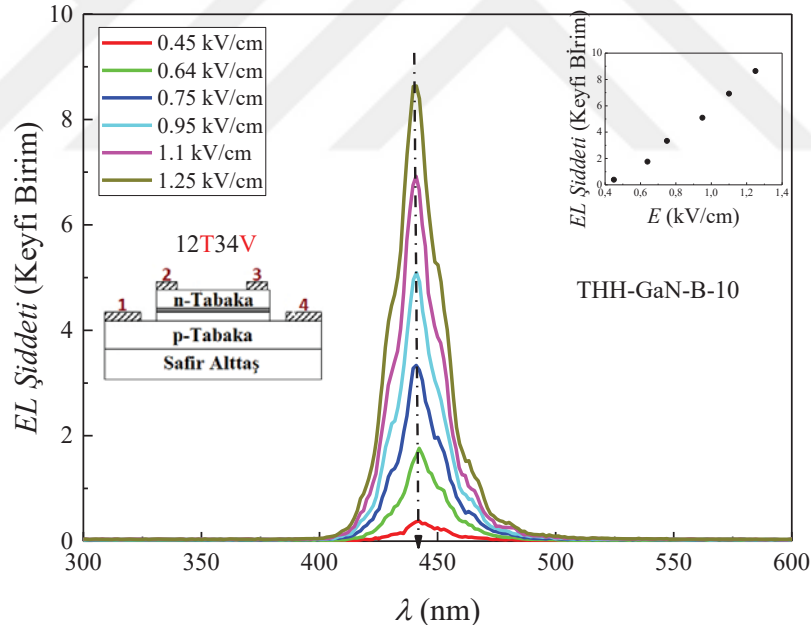
Giriş 1	Giriş 2	Çıkış
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0



**Şekil 6.17.** 12V34T ve 12T34V kontak dizimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı elde edilen bütünleşik EL gücü değişimi. İki polaritede de aynı elektrik alan değerlerinde aynı güçte ışımalar elde edildi. 1,95 kV/cm'lik maksimum elektrik alan değerindeki maksimum emisyon gücü 1,94  $\mu W$ 'tır.



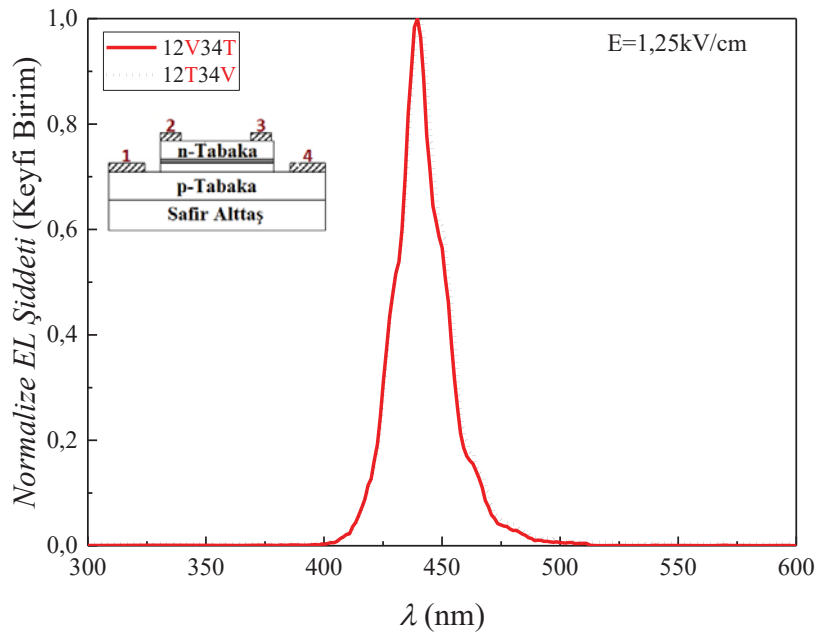
Şekil 6.18. 12V34T kontak diziliminde EL spektrumu.



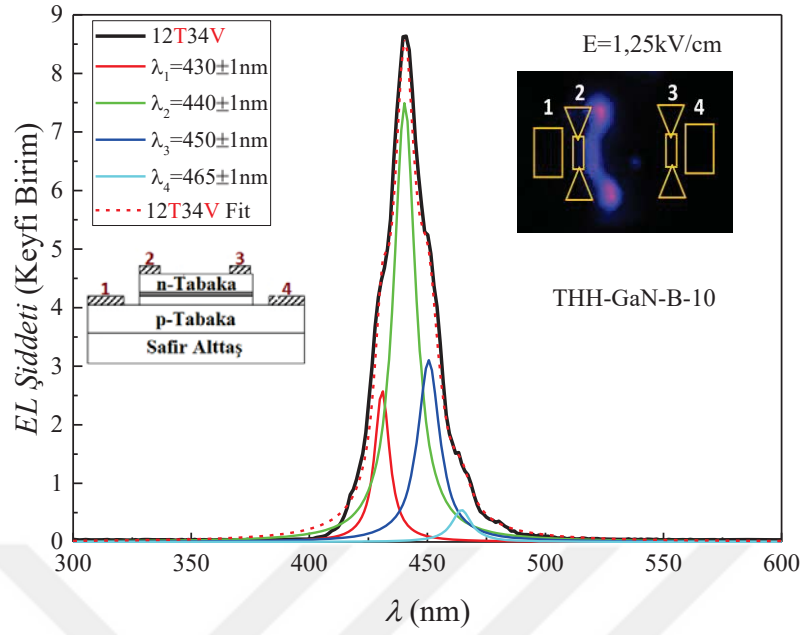
Şekil 6.19. 12T34V kontak diziliminde EL spektrumu.

Kontak konfigürasyonları 12V34T ve 12T34V ile elde edilen *EL* spektrumlarını karşılaştırmak için, 1,25 kV/cm'lik elektrik alandaki iki *EL* spektrumları normalize edildi ve üst üste çizdirildiğinde *EL* emisyon piklerinin birebir örtüştüğü görüldü (Şekil 6.20). İki *EL* spektrumu aynı olduğu için THH-GaN-B-10 nolu aygıtının sadece bir konfigürasyonuna ait olan sonuçları verilmesi yeterlidir.

Şekil 6.21 12T34V konfigürasyonunda 1,25 kV/cm elektrik alan değerinde elde edilen EL spektrumudur. Bu spektrum *magic plot* programı ile piklerine ayrıldığında 4 farklı dalgaboyunda emisyon piki elde edildi. Ayrılan pikler  $\lambda_1=430\pm 1$  nm,  $\lambda_2=440\pm 1$  nm,  $\lambda_3=450\pm 1$  nm,  $\lambda_4=465\pm 1$  nm dalgaboylarındadır. Ayrıca THH-GaN-B-10 aygıtının uygulanan elektrik alanda yaptığı ışımının fotoğrafı da Şekil 6.21’de verildi. Emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü. Işıma dalgaboyları teker teker incelendiğinde,  $\lambda_3=450\pm 1$  nm dalgaboylu emisyon piki Ee1-Ehh1 optik geçişine karşılık geldiği görüldü [150, 151, 157]. Tam yüksekliğin yarı genişliği ise  $11,2\pm 0,2$  nm’dir. Diğer optik geçiş enerjilerine bakıldığında Ee1-Elh geçişi de  $\lambda_2=440\pm 1$  nm’ye karşılık gelmektedir [152].  $\lambda_2$   $11,1\pm 0,2$  nm FWHM değerine sahiptir.  $\lambda_1=430\pm 1$  nm dalgaboylu pik ise MOCVD veya HVPE ile büyütülen Si-katkılı n-tipi GaN spektrumlarında sıklıkla gözlenebilen zayıf bir piktir [153].  $\lambda_4=465\pm 1$  nm dalgaboyundaki ışıma ise Ee1 seviyesinden yapı içerisindeki indiyumların kümelenmesi sonucu oluşturdukları tuzak seviyesine olan ışımali geçişler olduğu düşünüldü [153–156, 158]. FWHM değeri ise  $10,1\pm 0,2$  nm olarak elde edildi. Elde edilen bu değerler klasik LED ışıma sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen piklerin aynı olduğu görüldü. Sadece klasik LED ışımındaki 480 nm dalgaboylu ışımaya yüksek elektrik alan ölçümlerinde rastlanmadı. Elde edilen piklerin FWHM değerleri de birbirlerine çok yakındır.

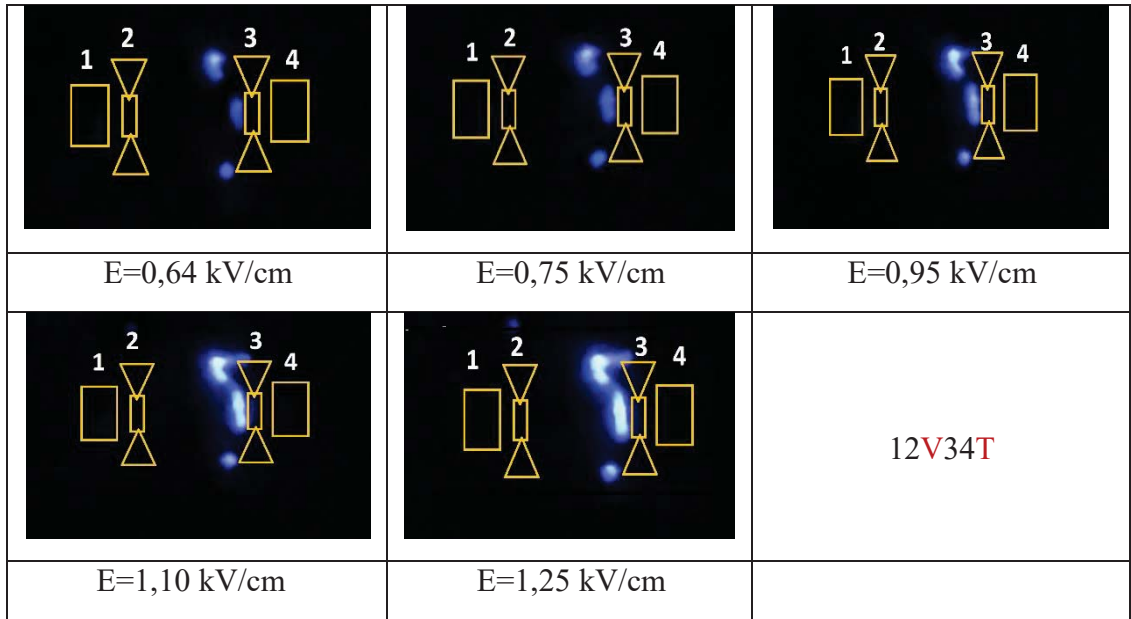


Şekil 6.20. İki polarite için 1,25 kV/cm’lik elektrik alan değerinde alınan EL spektrumunun normalize edilerek karşılaştırılması. İki polaritede elde edilen EL spektrumları aynıdır.

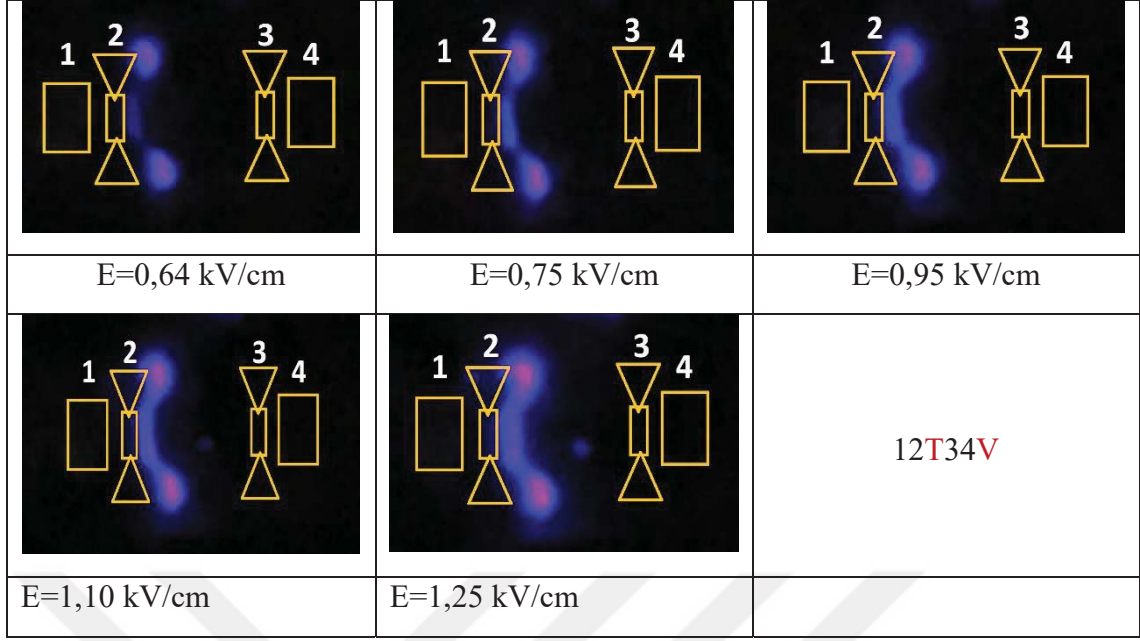


**Şekil 6.21.** 12T34V kontak konfigürasyonunda, 1,25 kV/cm'lik elektrik alan uygulandığı durumda EL spektrumunun piklerine ayrılması. 4 farklı pik elde edildi. Emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü.

Görsel 6.3 ve Görsel 6.4'de sırasıyla 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde THH-GaN-B-10 aygıtının belli elektrik alan değerlerinde yaptıkları EL emisyonlarının fotoğrafları verildi. Her iki polarizede de emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü.



**Görsel 6.3.** 12V34T kontak diziliminde THH-GaN-B-10 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.



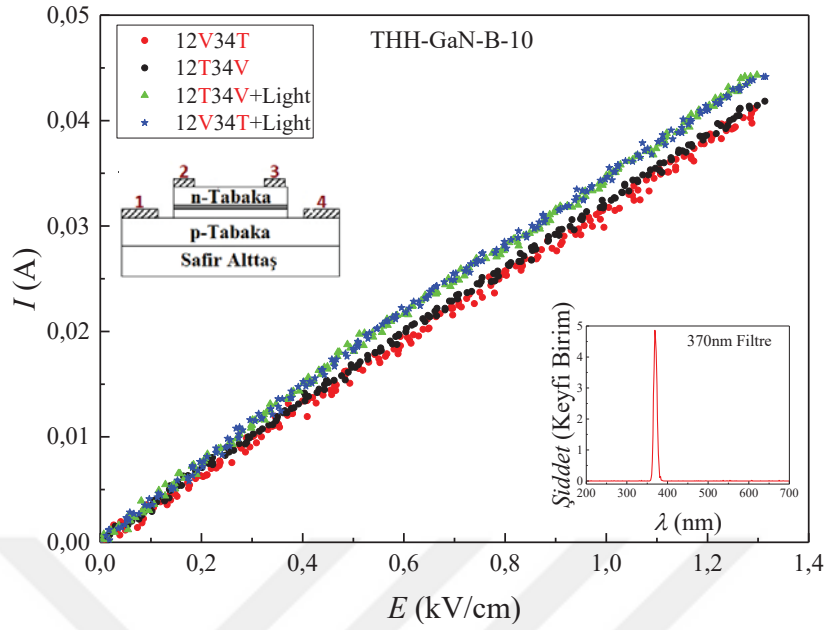
**Görsel 6.4.** 12T34V kontak diziliminde THH-GaN-B-10 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.

### 6.1.3. THH-GaN-B-10 Aygıtının foto elektrolüminesans ölçümleri

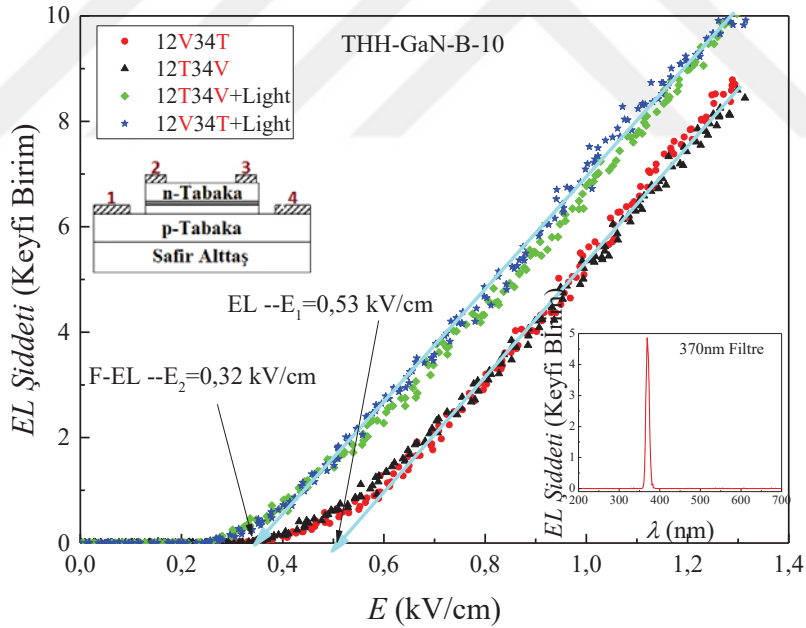
Foto-elektrolüminesans (*F-EL*) ölçümlerinde aygıt elektriksel olarak uyarılırken, eş zamanlı olarak aygıtın yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlarla da uyarıldı. Işık kaynağı olarak 500 W'lık bir civa lambası 370 nm geçirgen filtre ile kullanıldı. Düzenegün geri kalanı pulslu elektrolüminesans deney düzenegünün aynısıdır. Şekil 6.26'da 370 nm dalgaboylu ışık altında elektrik alan ile akımın değişimi verildi. Işık ile uyarılmadığı durumdaki pulslu elektrolüminesans sonuçları ile karşılaştırıldı. Aygıt foton ile uyarıldığında düşük elektrik alan değerlerinde bir değişim gözükmedi, elektrik alan arttıkça ışıkla uyarılarda daha fazla akım geçmiştir. 370 nm geçirgen filtrenin de dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafiği Şekil 6.22'nin iç grafiği (*inset*) olarak çizdirildi.

*F-EL* şiddetinin elektrik alan ile değişim grafiğinden ışık ile uyarıldığında aygıtın emisyonuna başlama elektrik alanı elde edildi ve *EL* şiddeti grafiği ile karşılaştırıldı (Şekil 6.23). Foton ile uyarım yapıldığında aygıtın emisyonuna başlama elektrik alanı 0,53 kV/cm'den 0,32 kV/cm'e düşmüştür. Bunun nedeni ışık ile uyarılmaya başlandığında ortamdan daha fazla taşıyıcı oluşturulmasıdır.





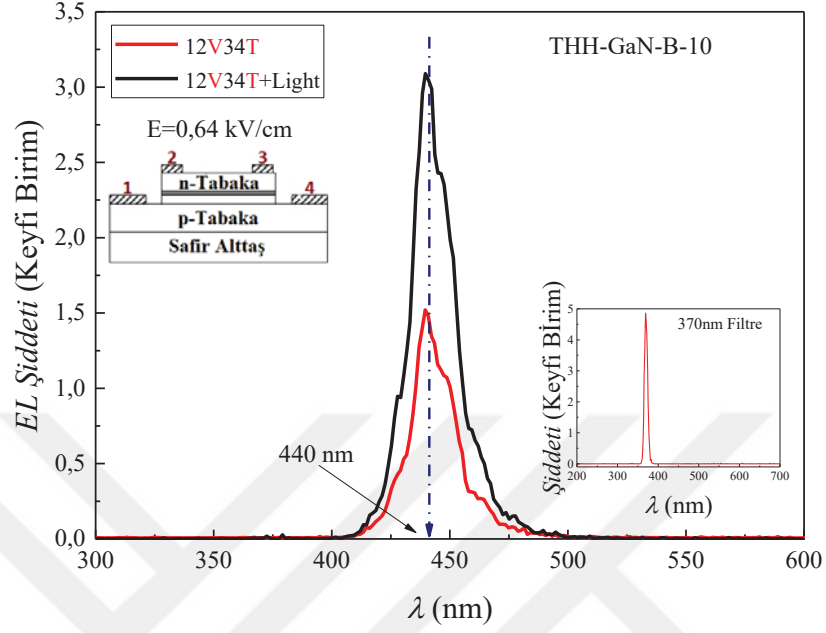
Şekil 6.22. İki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- akım değişimi. Elektrik alan arttıkça ışıkla uyarılan ölçümde daha fazla akım geçtiği görüldü.



Şekil 6.23. İki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- EL değişimi. Mavi ve yeşil noktalarla gösterilen ölçüm F-EL şiddeti iken siyah ve kırmızı noktalarla gösterilen ölçüm EL şiddetidir. Aygıtın emisyonu başlama elektrik alanı 0,53 kV/cm'den 0,32 kV/cm'e düşmüştür.

Şekil 6.24'de ise F-EL ve EL spektrumları karşılaştırıldı. 0,64 kV/cm'lik elektrik alanda elde edilen EL spektrumu üzerine ışık düşürüldüğünde F-EL şiddeti iki kat şiddetlendi. Aygıtın bu şekilde bir özellik göstermesi bir yükselteç (amplifikatör) olarak çalışabileceğinin göstergesidir. Aynı zamanda bu ölçümde 370 nm dalgaboyundaki ışığı

440nm'ye dönüştürerek emisyon yapmıştır. Bu özelliği ile de aygıt dalgaboyu dönüştürücü (*converter*) olarak çalışma potansiyelinin olduğu görüldü.



**Şekil 6.24.** F-EL spektrumu (siyah spektrum) ve EL spektrumunun (kırmızı spektrum) karşılaştırılması. EL spektrumu üzerine ışık ile uyarım yapıldığında EL spektrumunun 2 kat daha şiddetlendiği görüldü.

## 6.2. THH-GaN-B-5 Aygıt Ölçümleri

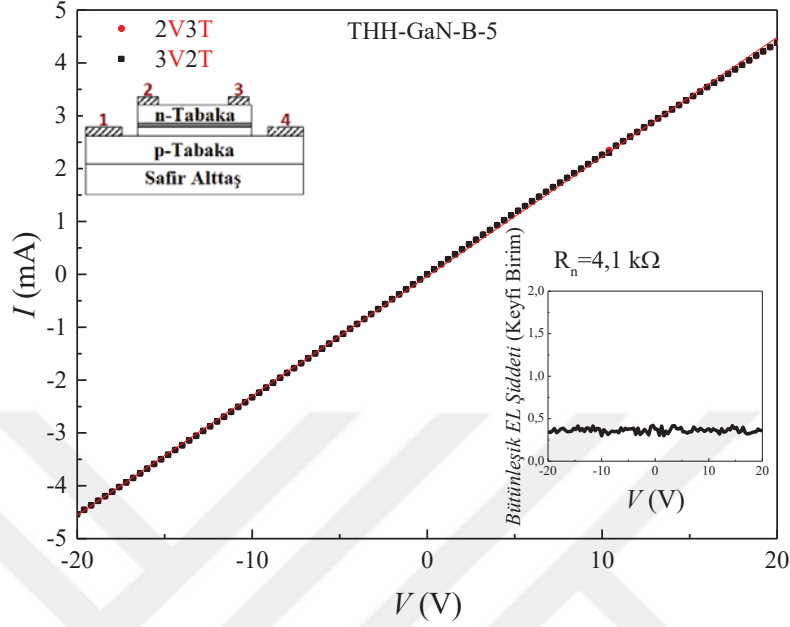
THH-GaN-B-5, 500  $\mu\text{m}$  n-kanal uzunluğuna sahip olan bir THH aygıtıdır. Aygıtın n-kanalı, 900  $\mu\text{m}$  uzunluğuna sahip p-kanalı üzerine simetrik olarak yerleştirildi. THH-GaN-B-5 nolu aygıt THH-GaN-B-10 nolu aygıtın n-kanal uzunluğu olarak yarısı olacak şekilde tasarlandı. n-kanal boyu yarıya indirildiğinde aynı aranda aygıtın genişliği de değiştirildi. THH-GaN-B-5 kodlu aygıtta, DC elektrolüminesans ölçümleri aygıt bünyesindeki iki adet klasik LED'in çalışması incelemek için, pulslu elektrolüminesans ve foto-elektrolüminesans ölçümleri de aygıtın THH olarak çalışmasını incelemek için gerçekleştirildi. Tüm sonuçlar oda sıcaklığında elde edildi.

### 6.2.1. THH-GaN-B-5 Aygıtının dc elektrolüminesans ölçümleri

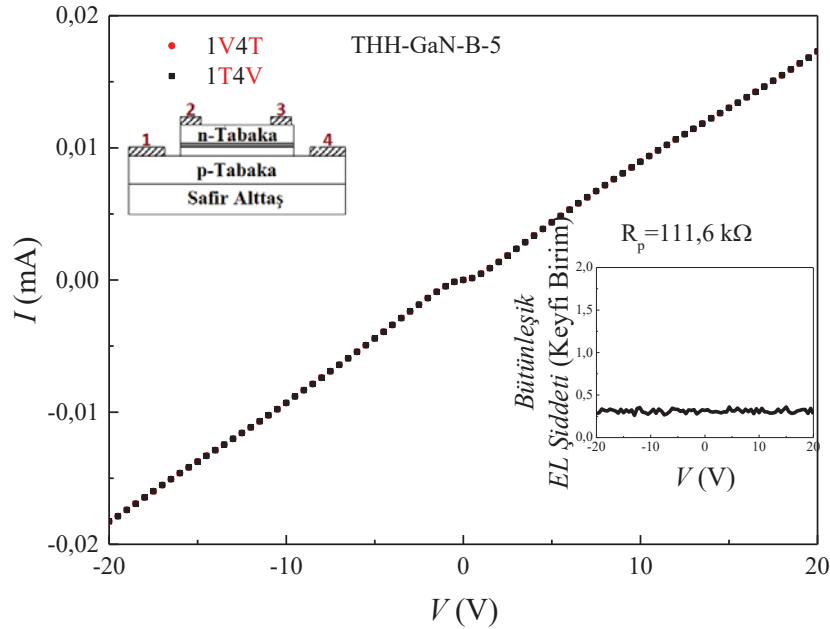
DC elektrolüminesans ölçümleri THH-GaN-B-5 aygıtının 2 ve 3 nolu n-tipi kontakları arasında yapıldı. n-tipi kontakların *I-V* ve eş zamanlı olarak voltaj-ışık şiddeti grafikleri elde edildi. n-tipi kontaklar arasında yapılan *I-V* ölçümleri -20 V ve +20 V aralığında 0,4 V aralıklarda, 2V3T ve 2T3V bağlantıları ile yapıldı. Her iki kontak konfigürasyonu için uygulanan voltaj aralığında herhangi bir ışımaya şiddeti görülmedi. n-tipi kontakların *I-V* grafiği lineerdir. Böylece n-tipi kontakların omik davranış sergilediği görüldü. *I-V* grafiği eğimi kullanılarak n-tipi kontak direnci 4,10  $\text{k}\Omega$  olarak elde edildi. n-tipi kontakların *I-V* grafiği Şekil 6.25'de verildi.

Aygıtın 1 ve 4 nolu p-tipi kontakları arasında elde edilen *I-V* grafiği ve uygulanan voltaja göre bütünleşik elektrolüminesans şiddetinin değişimi grafiği Şekil 6.26'da verildi. Ölçümlerde 1V4T ve 1T4V kontak konfigürasyonlarında uygulanan potansiyel fark -20 V ve +20 V aralığında 0,4 V adımlarda uygulandı ve herhangi bir ışımaya şiddeti görülmedi. p-tipi kontakların *I-V* grafiği doğrusal bir davranışa yakındır, -0,6 ve +0,6 V aralığında akımın geçmesine engel olan küçük bir sapma göstermektedir. Bu kontak davranışı çok iyi olmayan bir omik kontak davranışı olarak tanımlanabilir. Bu da p-tipi omik kontakların düşük kalitede kontaklar olduğunun bir göstergesidir. *I-V* grafiği eğimi kullanılarak p-tipi kontak direnci 111,6  $\text{k}\Omega$  olarak elde edildi. THH-GaN-B-10 aygıtının p-tipi kontak direnci ile karşılaştırıldığında THH-GaN-B-5 aygıtının p-tipi kontak direncinin yaklaşık üç kat azaldığı görüldü. Aygıtın p-tipi kontak öz direnci  $0,67 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$  olarak hesaplandı. Bu değer aynı kontak kalınlığı ve ısıl işleme tabi tutulmuş literatür değerleri ( $1 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$  [53, 149]) ile karşılaştırıldığında çok yakın bir değerdir.

Diğer aygıt ile farklı öz direnç elde edilmesinin nedeni THH-GaN-B-10 p-tipi kontaktlarının birinde gümüş pasta kullanılması olarak düşünüldü.



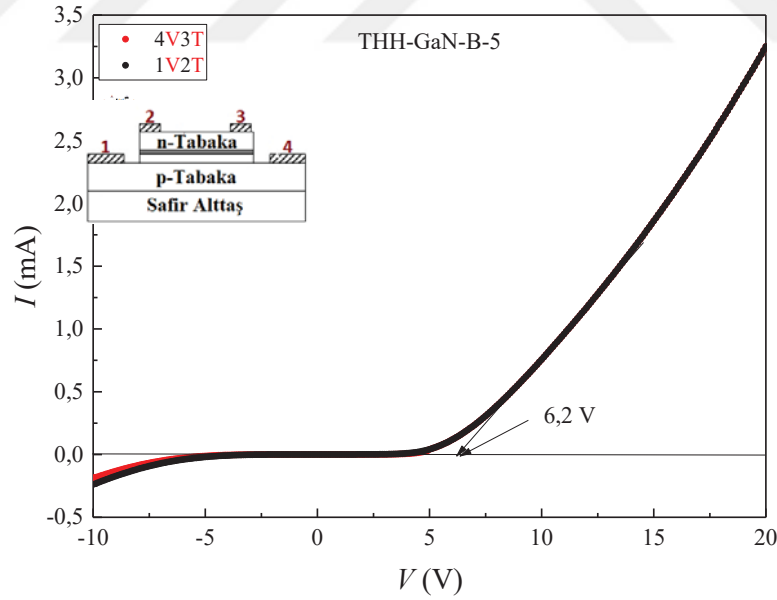
**Şekil 6.25.** n-tipi kontaktların I-V grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışınma şiddeti değişimi (iç grafik). 2 nolu kantağa potansiyel uygulanıp 3 nolu kantağın topraklandığı konfigürasyon 2V3T olarak ifade edildi. 3 nolu kantağa potansiyel uygulanıp 2 nolu kantağın topraklandığı konfigürasyon 2T3V'dur.



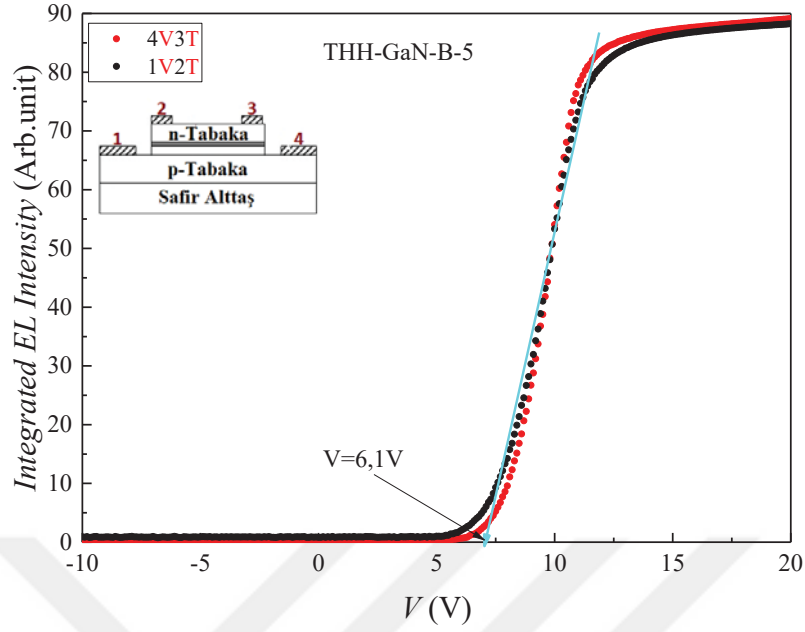
**Şekil 6.26.** p-tipi kontaktların 1V4T ve 1T4V kontak konfigürasyonlarında I-V grafiği ve uygulanan voltaja bağlı ışınma şiddeti değişimi (iç grafik). 1 nolu kantağa potansiyel uygulanıp 4 nolu kantağın topraklandığı konfigürasyon 1V4T olarak, 1 nolu kantağın topraklanıp 4 nolu kantağa potansiyel uygulandığı konfigürasyon 1T4V olarak gösterildi.

Aygıtın 1V2T ve 3T4V konfigürasyonlarındaki kontaklarına -10 V'dan +20 V'a kadar 0,5 V aralıklarla potansiyel uygulandı ve elde edilen  $I$ - $V$  grafiği Şekil 6.27'de verildi. Geri besleme voltajlarında çok küçük sızıntı akımları görülürken ileri beslemede klasik LED davranışı gözlemlendi. Her iki kontak diziliminde  $I$ - $V$  grafiği aynı elde edildi. Şekil 6.28'de aygıtın ışımaya başladığı besleme voltajını elde etmek için uygulanan voltaja karşı bütünselik  $EL$  şiddeti değişimi verildi. Klasik LED yapılarına 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonlarında aynı ileri besleme voltajında ışımaya başlamaya başlamıştır. İleri besleme voltajı arttıkça bütünselik  $EL$  şiddeti hızlı bir şekilde artmış ve ardından doyuma ulaşarak sabitlendi. Geri beslemede ise herhangi bir ışımaya şiddeti gözlemlenmedi. Bu ölçümler, monokromatörün giriş ve çıkış açıklıkları tamamen açılarak (3000  $\mu$ m) ve monokromatör 0 nm konumuna getirilerek gerçekleştirildi.

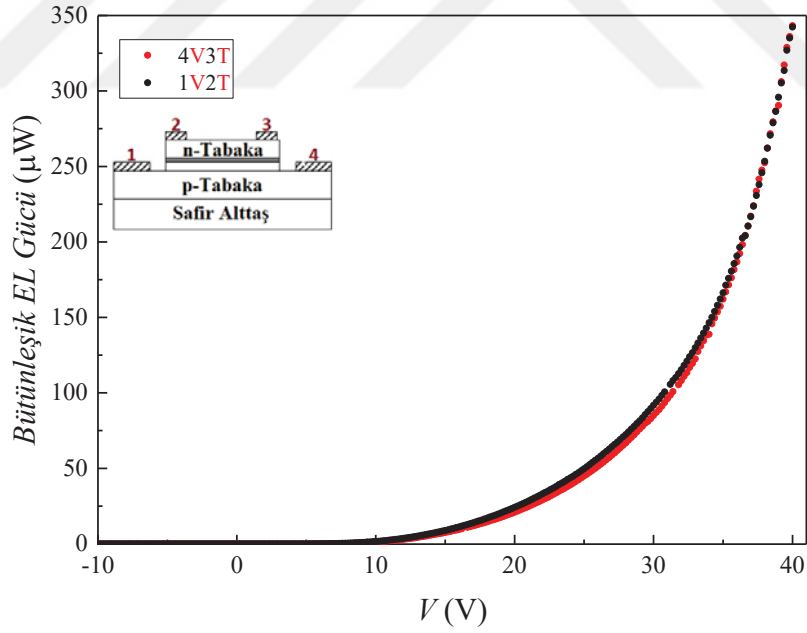
Uygulanan voltaja bağlı olarak değişen bütünselik  $EL$  gücü grafiği Şekil 6.29'da verildi. Her iki klasik LED'in bütünselik  $EL$  gücünün uygulanan voltaja göre değişimlerinin aynı olduğu görüldü. 40 V maksimum uygulama voltajında 343,2  $\mu$ W ışımaya gücü elde edildi.



Şekil 6.27. 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının  $I$ - $V$  grafiği. Her iki yapıda klasik LED davranışı göstermiştir.



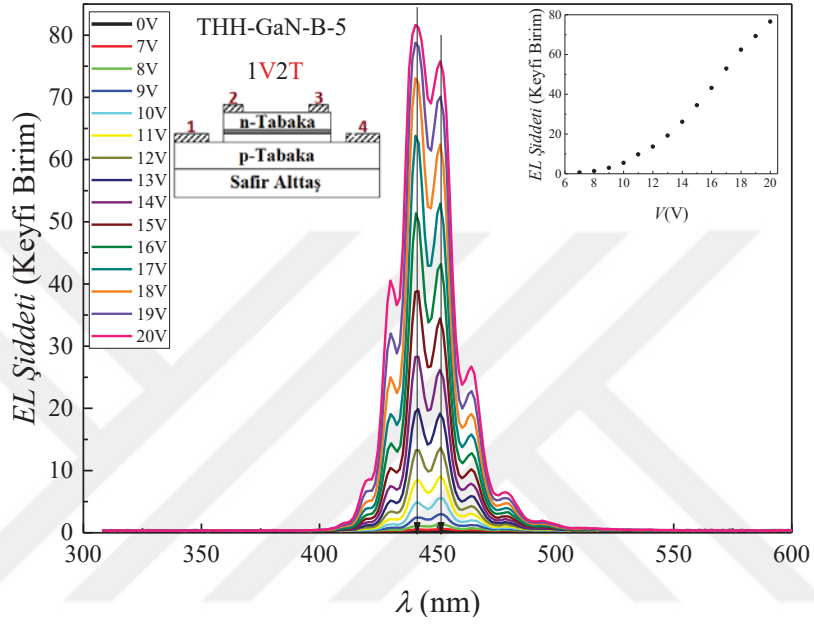
**Şekil 6.28.** 1V2T ve 3T4V kontak besleme konfigürasyonlarında klasik LED yapılarının uygulanan voltaj ile bütünleşik EL şiddetinin değişimi. THH-GaN-B-5 aygıtı 6,1 V ileri besleme voltajında ışımaya başlamaya başladı.



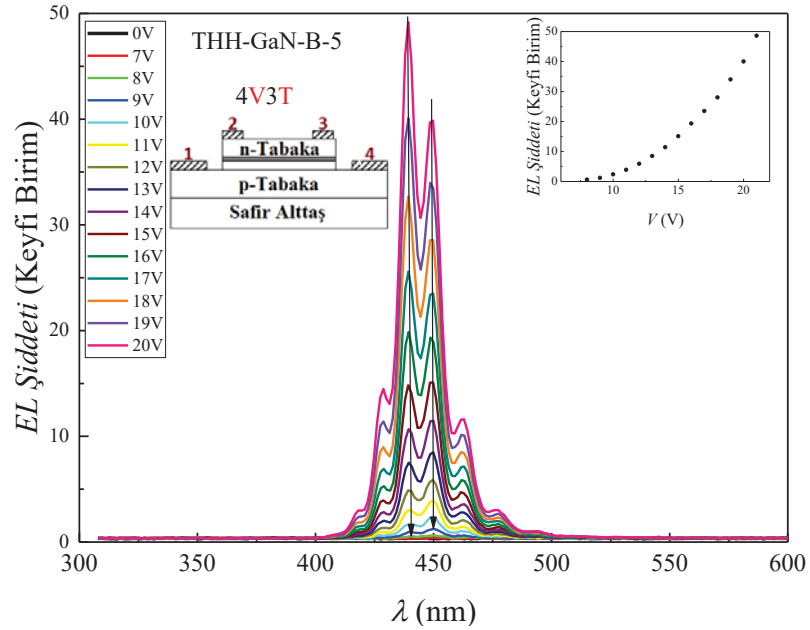
**Şekil 6.29.** THH-GaN-B-5 aygıtında klasik LED'in ileri beslemede bütünleşik EL gücünün uygulanan voltaj ile değişimi. 40 V ileri besleme voltajında 343,2  $\mu W$  ışımaya gücü elde edildi.

Farklı ileri besleme voltajlarında dalgaboyuna bağlı *EL* şiddetinin değişimi ölçümlerinde monokromatörün giriş ve çıkış açıklıkları 50  $\mu m$ 'ye ayarlandı ve 300-600 nm arasında spektrum alındı. Hamamatsu PMT'ye -1000 V uygulandı. 1V2T kontak konfigürasyonunda alınan *EL* spektrumu Şekil 6.30'da, 3T4V kontak konfigürasyonunda

alınan *EL* spektrumu Şekil 6.31’de verildi. Her iki klasik LED için de 7V ile 20V aralığında voltajlar 1V adımlarla uygulanarak gerçekleştirilen ölçümlerde *EL* şiddetinin artan voltaj ile doğrusal arttığı görüldü. Uygulanan voltaj arttırıldığında emisyon piklerinin dalgaboylarında bir kayma görülmedi. İki klasik LED’de  $440\pm 1$  ve  $450\pm 1$  nm dalgaboylarında kuvvetli emisyon pikine sahiptir.



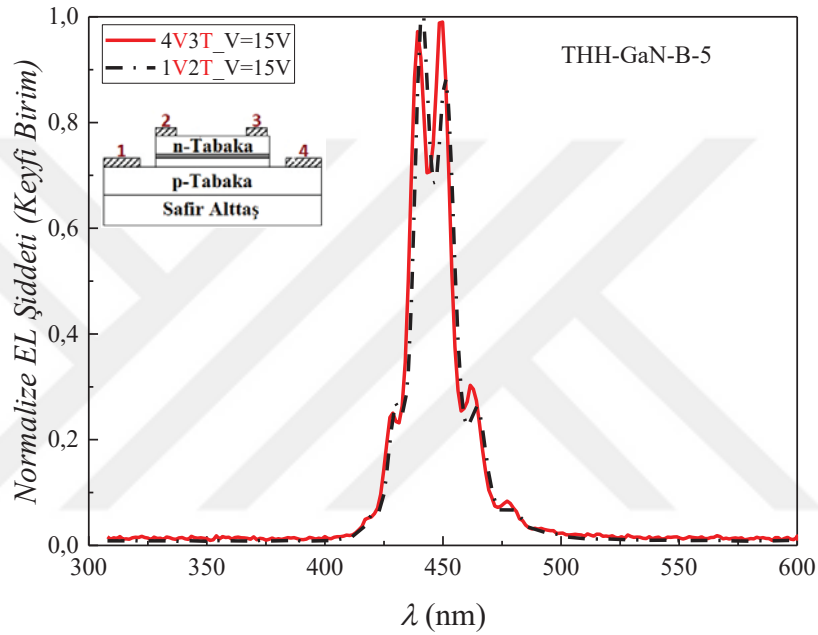
Şekil 6.30. 1V2T kontak konfigürasyonunda alınan *EL* spektrumu.



Şekil 6.31. 3T4V kontak konfigürasyonunda alınan *EL* spektrumu.



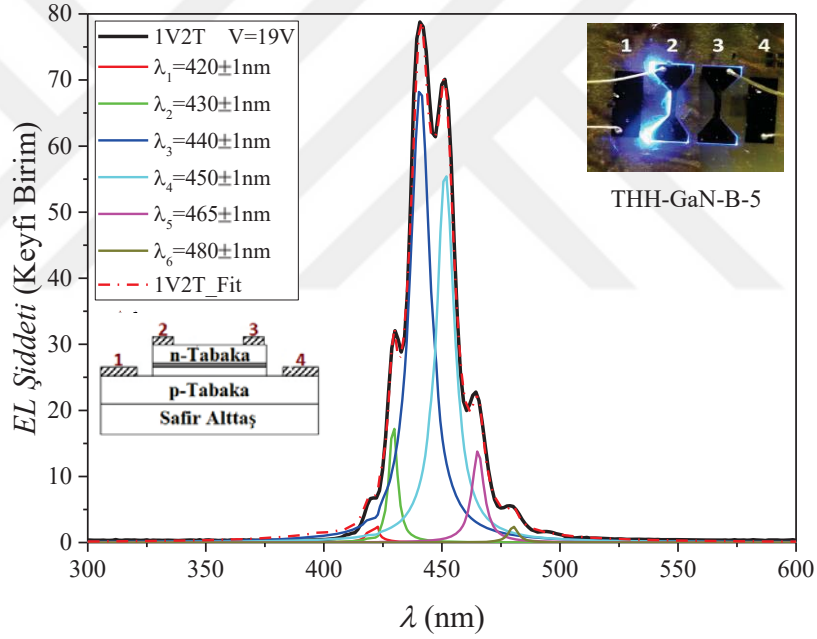
İki klasik LED yapısının *EL* spektrumlarını karşılaştırmak için, her iki LED'e 15 V ileri besleme uygulandığında alınan *EL* spektrumları normalize edildi ve üst üste çizdirildiğinde emisyon piklerinin birbirleri ile örtüştüğü görüldü (Şekil 6.32). Şekilde kesik çizgiler ile gösterilen spektrum 1V2T konfigürasyonundaki LED'e ait iken kırmızı çizgi ile çizilen spektrum 3T4V konfigürasyonu ile beslenen LED'e aittir. İki LED'de aynı spektruma sahip olduğu için THH-GaN-B-5 nolu aygıtının sadece 3T4V konfigürasyonuna ait olan LED sonuçları verilecektir.



Şekil 6.32. Her iki konfigürasyonda 15 V ileri besleme voltajında alınan *EL* spektrumlarının normalize edilerek karşılaştırılması.

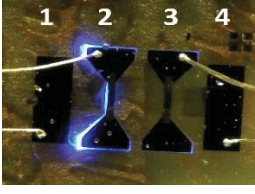
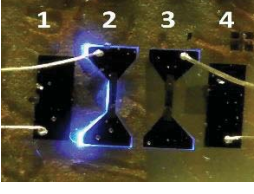
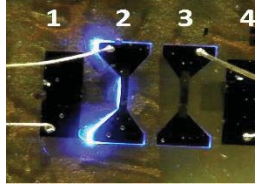
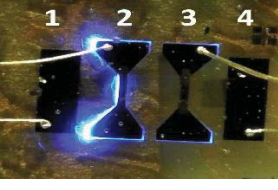
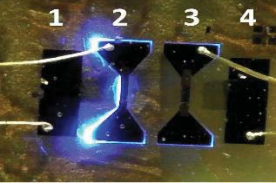
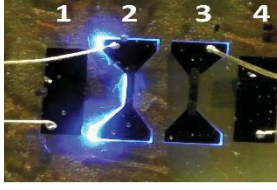
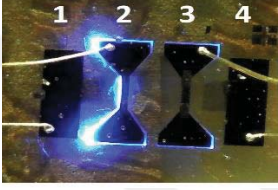
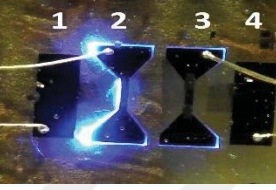
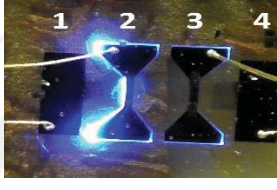
Şekil 6.33'de 1V2T konfigürasyonunda 19 V ileri besleme voltajında elde edilen *EL* spektrumu verildi. Bu spektrum *magic plot* programı ile piklerine ayrıldı ve  $\lambda_1=420\pm 1$  nm,  $\lambda_2=430\pm 1$  nm,  $\lambda_3=440\pm 1$  nm,  $\lambda_4=450\pm 1$  nm,  $\lambda_5=465\pm 1$  nm ve  $\lambda_6=480\pm 1$  nm olmak üzere 6 farklı dalgaboyunda emisyon piki elde edildi. Ayrıca 3T4V kontak konfigürasyonundaki klasik LED'in ışımaya yaptığı fotoğraf da Şekil 6.33'de verildi. Emisyonun 1 ve 2 nolu kontaklar arasındaki aygıt kenarından çıktığı görüldü. Işıma dalgaboyları teker teker incelendiğinde, en şiddetli pik  $\lambda_3=440\pm 1$  nm ve  $\lambda_4=450\pm 1$  nm dalgaboylarındaki emisyon pikleri olduğu görüldü.  $\lambda_4$  kuantum kuyu içerisindeki Ee1-Ehh1 optik geçişinden meydana gelmektedir [150, 159]. FWHM değeri ise  $8,5\pm 0,2$  nm'dir. Diğer optik geçiş enerjilerine bakıldığında Ee1-Elh1 geçişi de  $\lambda_3=440\pm 1$  nm'ye karşılık gelmektedir [152].  $\lambda_3$  piki  $10,2\pm 0,2$  nm FWHM değerine sahiptir.  $\lambda_5=465\pm 1$  nm

dalgaboyundaki ışığa ise Ee1 seviyesinden yapı içerisindeki indiyumların kümelenmesi sonucu oluşturdukları tuzak seviyesine olan ışıklı geçişlerden oluşmaktadır [153–156, 158]. FWHM değeri ise  $6,1\pm 0,2$  nm olarak elde edildi. GaN tabakaları içerisinde Ga eksikliklerinden (Galyum atomlarının olması gereken yerde boşluk olması) kaynaklanan değerlik bandının yaklaşık 1 eV üzerindeki tuzak seviyesi ve iletkenlik bandı geçişleri ise  $\lambda_6=480\pm 1$  nm dalgaboyundadır [150, 153, 155]. FWHM değeri ise  $7,1\pm 0,2$  nm'dir. Çok düşük şiddete sahip olan  $\lambda_1=420\pm 1$  nm dalgaboyundaki emisyon Ee1-Elh2 geçişleri enerjisinde olduğu düşünüldü. Bu geçişler olasılığı düşük geçişler olduğundan şiddeti de çok düşük elde edilmiştir. Bu pik THH-GaN-B-10 aygıtının EL spektrumunda gözlenmedi.  $\lambda_2=430\pm 1$  nm dalgaboylu pik ise MOCVD veya HVPE ile büyütülen Si-katkılı n-tipi GaN spektrumlarında sıklıkla gözlenebilen zayıf bir piktir [153].

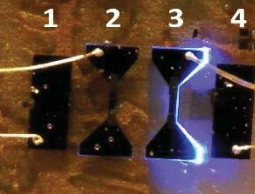
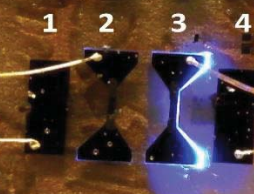
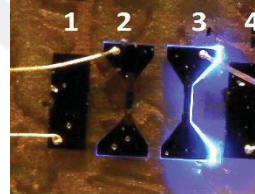
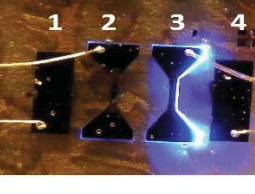
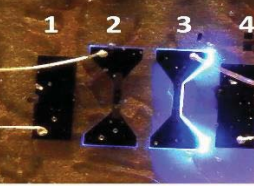
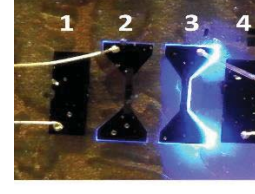
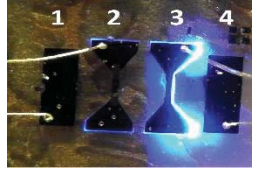
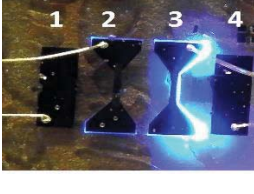
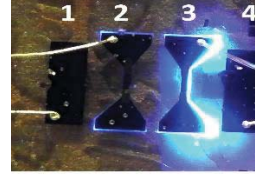


**Şekil 6.33.** 1V2T konfigürasyonunda 19 V ileri besleme voltajında elde edilen EL spektrumu. Siyah sürekli çizgi ile gösterilen deneysel elde edilen spektrumdur. Kesikli kırmızı çizgi ile gösterilen spektrum ise ayrılan piklerin toplamı olan fit spektrumudur. Deneysel spektrum 6 farklı emisyon dalgaboyuna sahiptir.

Görsel 6.5’de 1V2T ve Görsel 6.6’da 3T4V kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED’lerin 11 V ileri besleme voltajından 19 V’a kadar 1 V aralıklarla yaptıkları ışığa fotoğrafları verildi.

		
THH-GaN-B-5 1V2T-11V	THH-GaN-B-5 1V2T-12 V	THH-GaN-B-5 1V2T-13 V
		
THH-GaN-B-5 1V2T-14V	THH-GaN-B-5 1V2T-15 V	THH-GaN-B-5 1V2T-16 V
		
THH-GaN-B-5 1V2T-17V	THH-GaN-B-5 1V2T-18 V	THH-GaN-B-5 1V2T-19 V

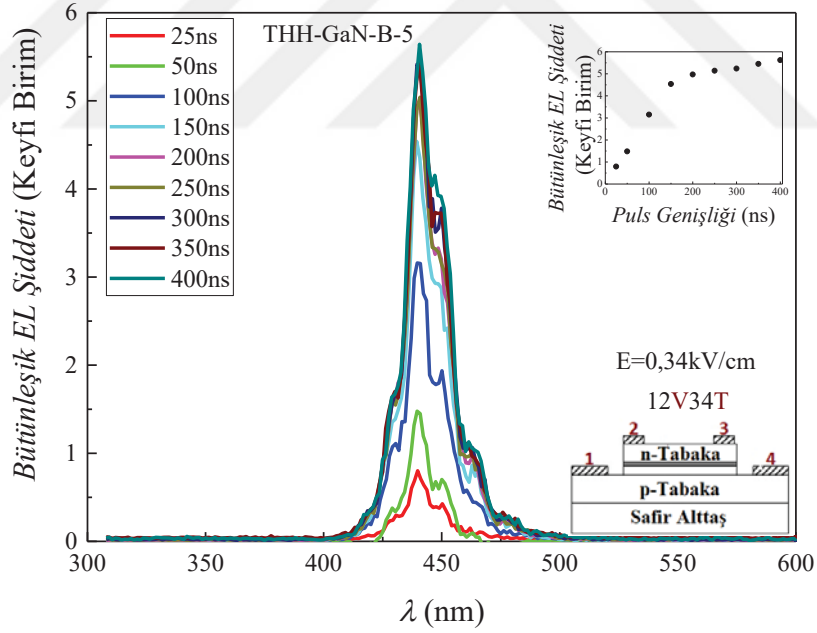
**Görsel 6.5.** 1V2T kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları.

		
THH-GaN-B-53T4V-11V	THH-GaN-B-5 3T4V -12 V	THH-GaN-B-5 3T4V -13 V
		
THH-GaN-B-53T4V-14V	THH-GaN-B-5 3T4V -15 V	THH-GaN-B-5 3T4V -16 V
		
THH-GaN-B-53T4V-17V	THH-GaN-B-5 3T4V -18 V	THH-GaN-B-5 3T4V -19 V

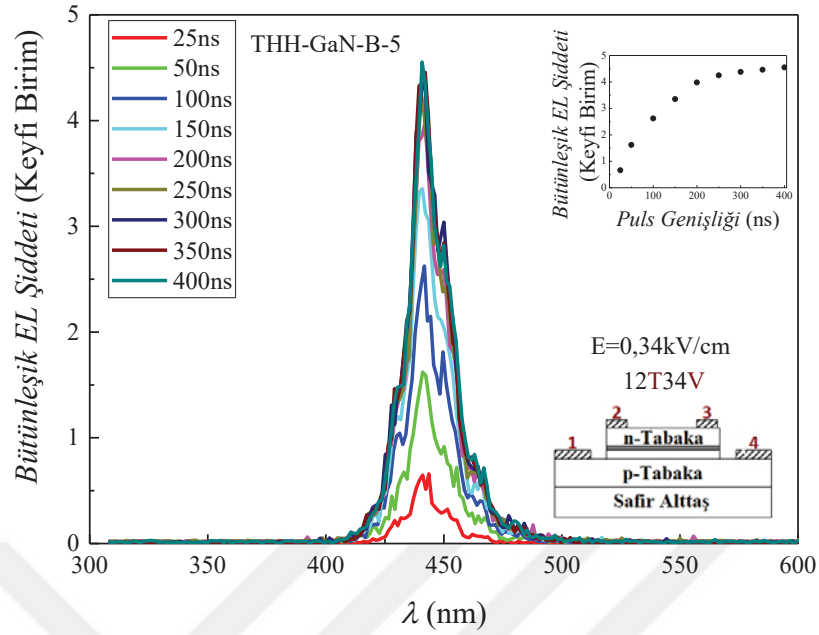
**Görsel 6.6.** 3T4V kontak konfigürasyonunda beslenen klasik LED'in 11 V ileri besleme voltajından 19 V'a kadar 1 V aralıkla yaptıkları ışımaya fotoğrafları.

## 6.2.2. THH-GaN-B-5 Aygıtının pulslu elektrolüminesans ölçümleri

THH-GaN-B-5 aygıtının pulslu elektrolüminesans ölçümlerinde kullanılacak pulslu voltajların puls genişliğini belirlemek için sabit bir elektrik alanda puls genişliğine bağlı bütünleşik *EL* şiddeti ölçümleri yapıldı. Sırasıyla 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde gerçekleştirilen sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine göre bütünleşik *EL* şiddetinin grafikleri Şekil 6.34 ve Şekil 6.35’de verildi. Ölçümlerde aygıtın iki kontak diziliminde de rahatlıkla gözle görünebilen bir ışımaya yaptığı 0,34 kV/cm’lik elektrik alan uygulandı. 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde 25 ve 400 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik *EL* şiddetleri gözlemlendi. Ölçümlerde 300 ns puls genişliğine kadar *EL* şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra *EL* şiddeti değişimi sabit olduğu gözlemlendi. *EL* şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns’lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi. Bütünleşik *EL* şiddeti ölçümlerinde monokromatör 0 nm konumuna alınıp giriş ve çıkış açıklıkları tamamen (3000  $\mu\text{m}$ ) açıldı.



**Şekil 6.34.** 12V34T kontak diziliminde 0,34 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik *EL* şiddeti değişimi. 25 ve 400 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik *EL* şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar *EL* şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. *EL* şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns’lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi.

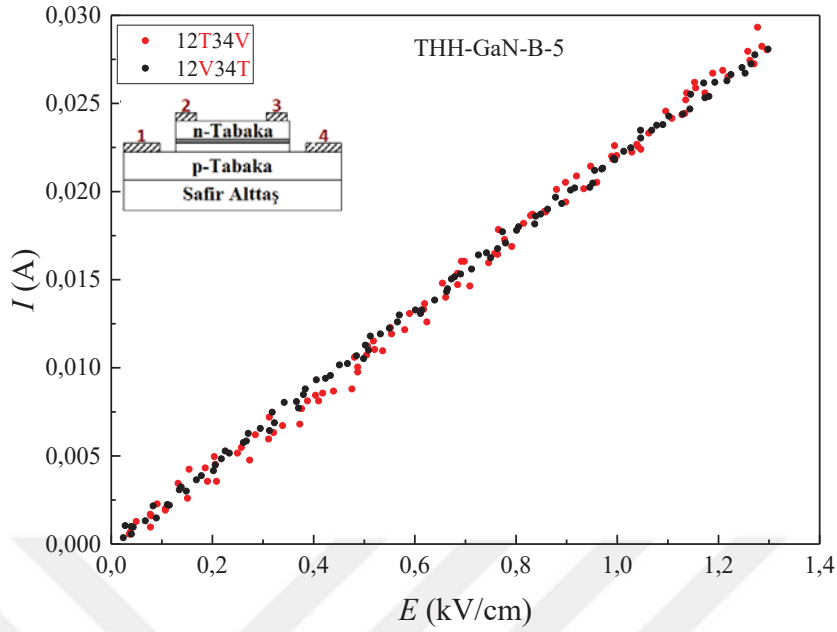


**Şekil 6.35.** 12T34V kontak diziliminde 0,34 kV/cm sabit elektrik alan değerinde puls genişliğine bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 25 ve 400 ns arasındaki puls genişliklerinde bütünleşik EL şiddetleri gözlemlendi. 300 ns puls genişliğine kadar EL şiddetinde büyük artışlar görüldü fakat 300 ns puls genişliğinden sonra bu artış çok küçük değerlerde gözlemlendi. EL şiddetinin sabit olmaya başladığı puls genişliği olan 300 ns'lik puls genişliği ölçümler için uygun olan puls genişliği olarak kabul edildi.

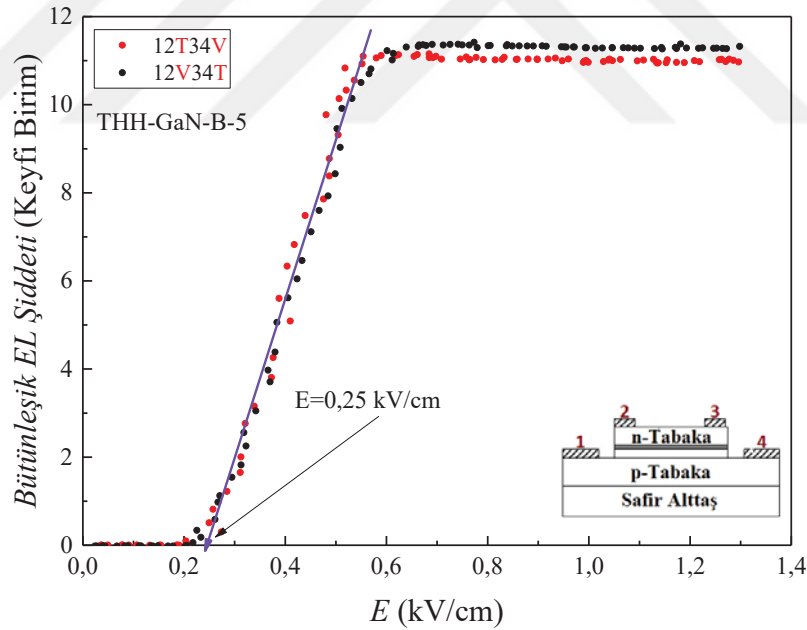
THH-GaN-B-5 aygıtının akım-elektrik alan ( $I-E$ ) ölçümleri 490 Hz frekansında 300 ns puls genişliğine sahip voltaj pulsları ile 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde gerçekleştirildi (Şekil 6.36). Ölçümlerde kullanılan frekans ve puls genişliği değerlerine göre iş döngüsü %0,0147 altında tutuldu ve Joule ısınması etkileri en aza indirildi.  $I-E$  alan ölçümlerinde her iki kontak dizilimi de aynı doğrusal artış davranışını gösterdi. Bu ölçümlerde aygıt üzerine maksimum 1,3 kV/cm'lik elektrik alan uygulandı.

Şekil 6.37'de 12V34T ve 12T34V kontak diziliminde, uygulanan elektrik alana bağlı bütünleşik  $EL$  şiddeti değişimi verildi. İki besleme diziliminde de aynı davranış elde edildi. 0,25 kV/cm'lik elektrik alan değerinde  $EL$  emisyonunun başladığı görüldü. 0,25 kV/cm'lik elektrik alan aygıtta 12,5 V uygulanarak elde edildi.  $l_1=0$ ,  $l_2=0,2$  mm,  $l_3=0,7$  mm ve  $l_4=0,9$  mm sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 nolu kontakların aygıt üzerindeki konumları olmak üzere,  $X = [l_4 - (l_3 - l_2)]/2l_4$  eşitliği ile verilen boyutsuz THH parametresi  $X = 0,222$  olarak bulundu. Klasik LED yapısının 6,2 V'da ışımaya başladığı göz önüne alındığında, Eşitlik 4.6 ile THH çalışma voltajı 27,9 V olarak hesaplandı. THH-GaN-B-10 aygıtının hesaplanan çalışma voltajından çok daha düşük bir voltaj değerinde emisyon yapmaya başladığı görüldü. İki polaritede 0,54 kV/cm elektrik alan değerinde bütünleşik  $EL$  şiddeti doyuma ulaştığı elde edildi.



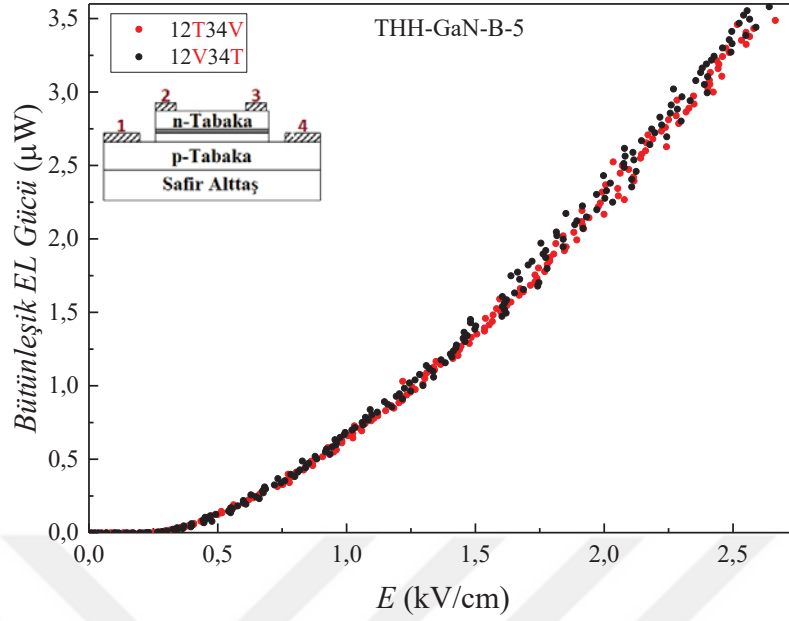


Şekil 6.36. THH-GaN-B-5 aygıtının 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında uygulanan elektrik alana bağlı akımın değişimi. İki polaritede de aynı doğrusal artış elde edildi



Şekil 6.37. THH-GaN-B-5 aygıtının 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı bütünleşik EL şiddeti değişimi. 0,25 kV/cm'lik elektrik alanda EL emisyonunun başladığı görüldü. İki polaritede de aynı davranış elde edildi.

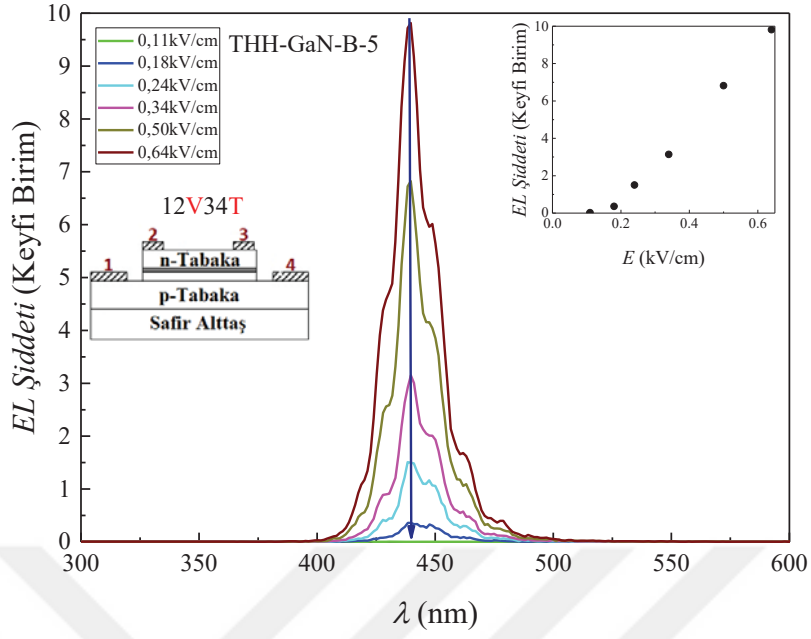
12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı elde edilen bütünleşik EL gücü değişimi Şekil 6.38'de verildi. İki polaritede de aynı elektrik alan değerlerinde aynı güçte ışımalar elde edildi. 2,5 kV/cm'lik maksimum elektrik alan değerindeki maksimum emisyon gücü 3,5  $\mu$ W'tır.



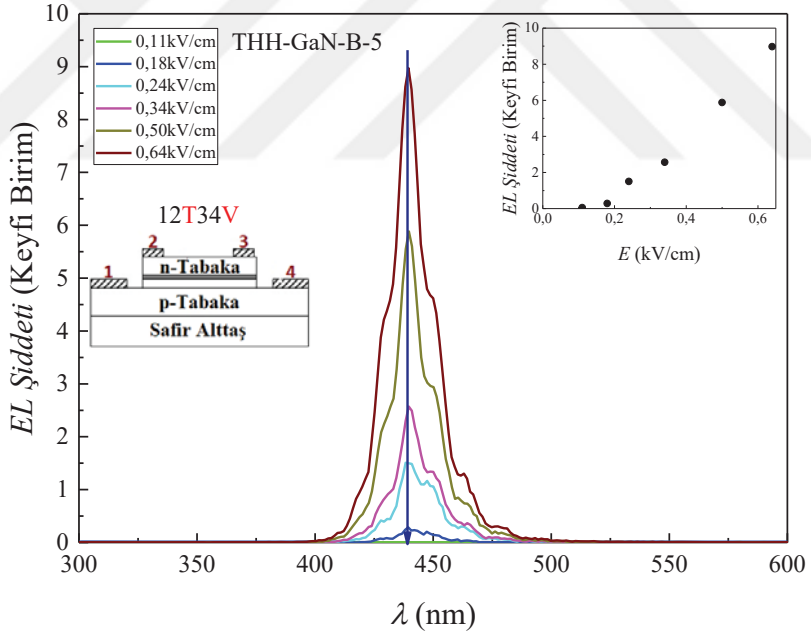
**Şekil 6.38.** THH-GaN-B-5 aygıtına 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde uygulanan elektrik alana bağlı elde edilen bütünleşik EL gücü değişimi. İki polaritede de aynı elektrik alan değerlerinde aynı güçte ışımalar elde edildi. 2,5 kV/cm'lik maksimum elektrik alan değerindeki maksimum emisyon gücü 3,5  $\mu W$ 'tır.

Şekil 6.39'da 12V34 kontak konfigürasyonundaki 300-600 nm aralığındaki *EL* spektrumu verildi. Spektrumun merkez piki  $440 \pm 1$  nm dalgaboyundadır. Uygulanan elektrik alan arttıkça *EL* şiddeti lineer bir şekilde artmıştır. Elektrik alanın artışı *EL* spektrumunun dalgaboyunda bir değişim görülmedi. Benzer davranış 12V34T kontak dizilimi ile elde edilen *EL* spektrumunda da görüldü (Şekil 6.40). Aygıtın her iki kontak diziliminde de aynı *I-E*, aynı E-ışık şiddeti, aynı E-güç, aynı E alan değerinde emisyon başlama ve aynı dalgaboyunda spektrum vermesi polariteden bağımsız çalışmasının göstergesidir. Bu durumda THH-GaN-B-5 aygıtı özel veya (XOR) mantıksal kapıların ışık ile çalışması olarak kullanılabilir. XOR mantıksal kapısı, girişlerinin herhangi birine potansiyel uygulandığında çıkış veren, girişlerinin her ikisine birden potansiyel uygulandığında çıkış vermeyen çalışma prensibine sahiptir.



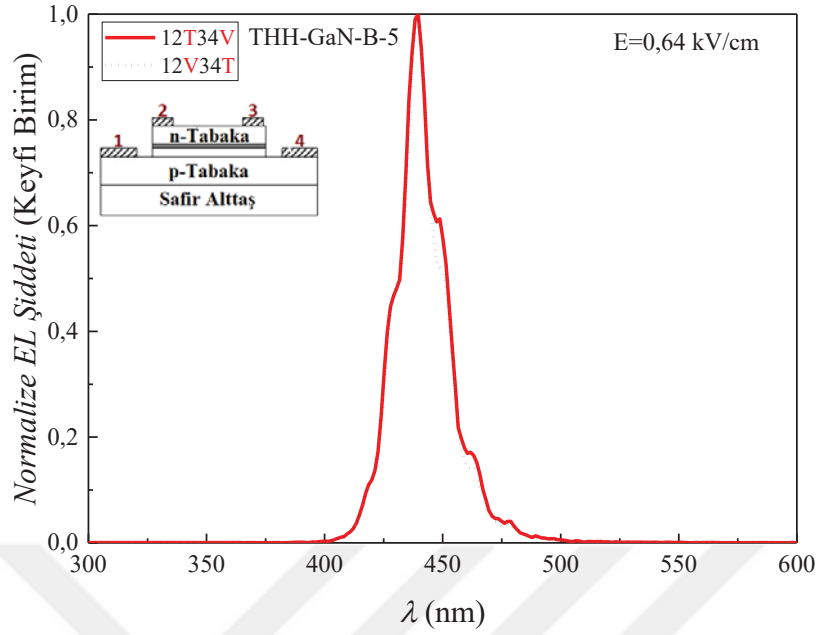


Şekil 6.39. THH-GaN-B-5 aygıtında 12V34T kontak diziliminde EL spektrumu.



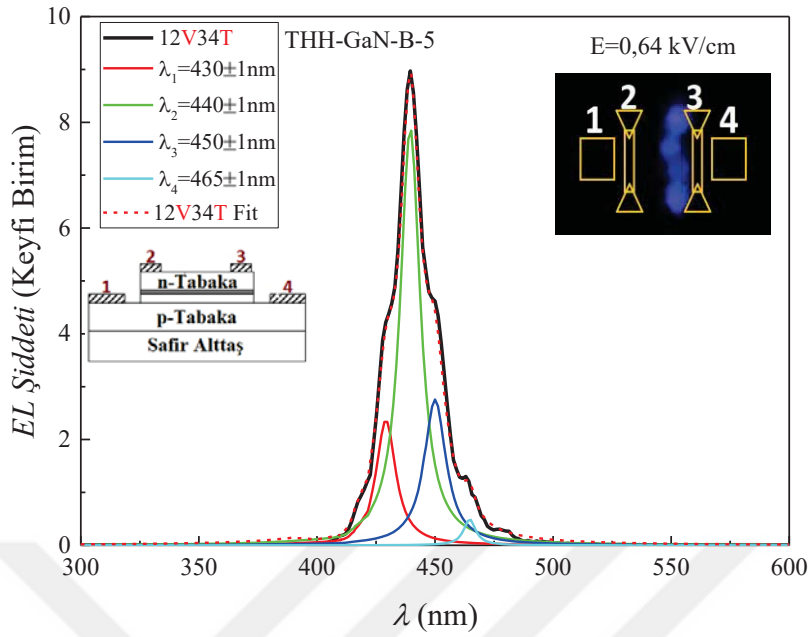
Şekil 6.40. THH-GaN-B-5 aygıtında 12T34V kontak diziliminde EL spektrumu.

12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde elde edilen *EL* spektrumlarını karşılaştırmak için, 0,64 kV/cm'lik elektrik alandaki iki *EL* spektrumları normalize edildi ve üst üste çizdirildiğinde *EL* emisyon piklerinin birebir örtüştüğü görüldü (Şekil 6.41). İki *EL* spektrumu aynı olduğu için THH-GaN-B-5 nolu aygıtının sadece bir konfigürasyonuna ait olan sonuçları verilmesi yeterli olacaktır.



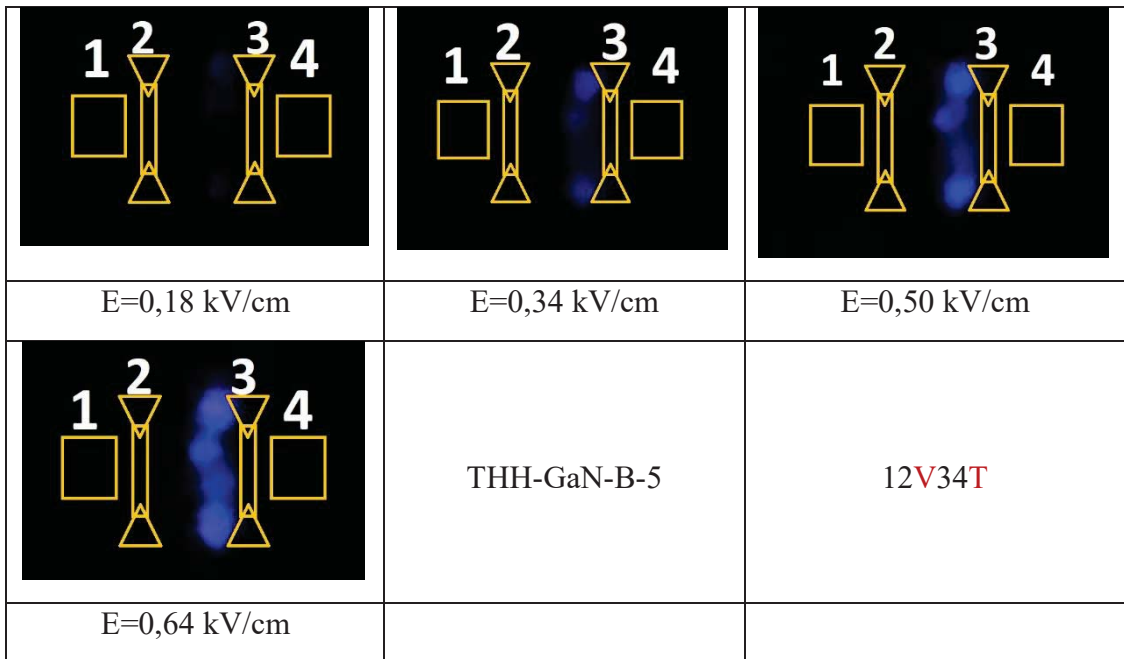
**Şekil 6.41.** THH-GaN-B-5 aygıtında iki polaritedeki, 0,64 kV/cm'lik elektrik alan değerinde alınan EL spektrumunun normalize edilerek karşılaştırılması. İki polaritede elde edilen EL spektrumları aynıdır.

THH-GaN-B-5 aygıtına 12V34T konfigürasyonunda 0,64 kV/cm elektrik alan değerinde elde edilen *EL* spektrumu Şekil 6.42'de verildi. Bu spektrum piklerine ayrıldığında  $\lambda_1=430\pm 1$  nm,  $\lambda_2=440\pm 1$  nm,  $\lambda_3=450\pm 1$  nm,  $\lambda_4=465\pm 1$  nm dalgalıboylarında 4 farklı emisyon piki elde edildi. Ayrılan pikler. THH-GaN-B-5 aygıtının uygulanan elektrik alanda yaptığı ışımının fotoğrafı Şekil 6.42'de verildi. Emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü. Işıma dalgalıboyları teker teker incelendiğinde,  $\lambda_3=450\pm 1$  nm dalgalıboylu emisyon piki Ee1-Ehh1 optik geçişine karşılık geldiği görüldü [150, 151]. Tam yüksekliğin yarı genişliğı ise  $9,6\pm 0,2$  nm'dir. Ee1-Elh1 optik geçişi de  $\lambda_2=440\pm 1$  nm'ye karşılık gelmektedir [152].  $\lambda_2$  11,2 $\pm$ 0,2 nm FWHM değerine sahiptir.  $\lambda_1=430\pm 1$  nm dalgalıboylu pik ise MOCVD veya HVPE ile büyütölen Si-katkılı n-tipi GaN spektrumlarında sıklıkla gözlenebilen zayıf bir piktir [153]. FWHM değeri 8,7 $\pm$ 0,2 nm'dir.  $\lambda_4=465\pm 1$  nm dalgalıboylundaki ışıma ise Ee1 seviyesinden yapı içerisindeki indiyumların kümelenmesi sonucu oluşturdukları tuzak seviyesine olan ışımalı geçişler olduğu düşünöldü [153–156]. FWHM değeri ise 7,8 $\pm$ 0,2 nm olarak elde edildi. Elde edilen bu değerler THH-GaN-B-5 aygıtının klasik LED ışıma sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen piklerin aynı olduğu görüldü. Sadece klasik LED ışımındaki 480 nm dalgalıboylu ışıma yüksek elektrik alan ölçümlerinde rastlanmadı. Elde edilen piklerin FWHM değerleri de birbirlerine çok yakındır.

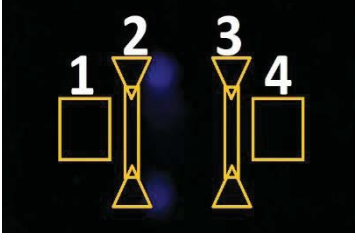
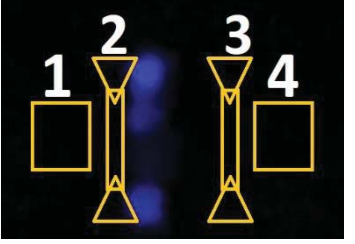
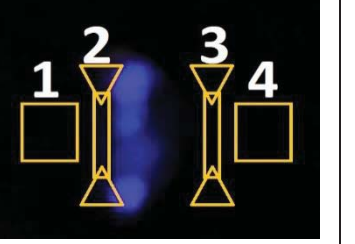
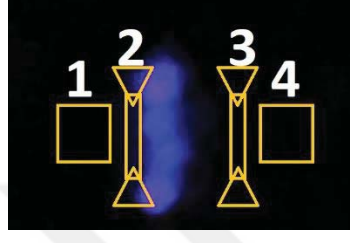


**Şekil 6.42.** 12V34T kontak konfigürasyonunda, THH-GaN-B-5 aygıtına 0,64 kV/cm'lik elektrik alan uygulandığı durumda EL spektrumunun piklerine ayrılması. 4 farklı pik elde edildi. Emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü.

Görsel 6.7 ve Görsel 6.8'de sırasıyla 12V34T ve 12T34V kontak dizilimlerinde THH-GaN-B-5 aygıtının belli elektrik alan değerlerinde yaptıkları EL emisyonlarının fotoğrafları verildi. Her iki polarizede de emisyonun yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıktığı görüldü.



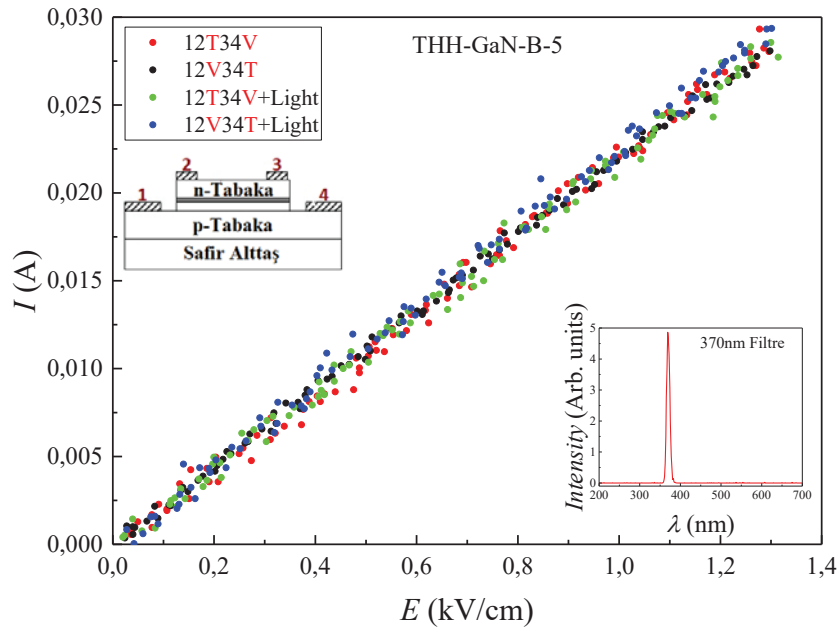
**Görsel 6.7.** 12V34T kontak diziliminde THH-GaN-B-5 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.

		
E=0,18 kV/cm	E=0,34 kV/cm	E=0,50 kV/cm
	THH-GaN-B-5	12T34V
E=0,64 kV/cm		

**Görsel 6.8.** 12T34V kontak diziliminde THH-GaN-B-5 aygıtının belli elektrik alan değerlerindeki EL emisyonlarının fotoğrafları. Emisyon yüzeyden ve toprağa bağlı kontaklara yakın çıkmıştır.

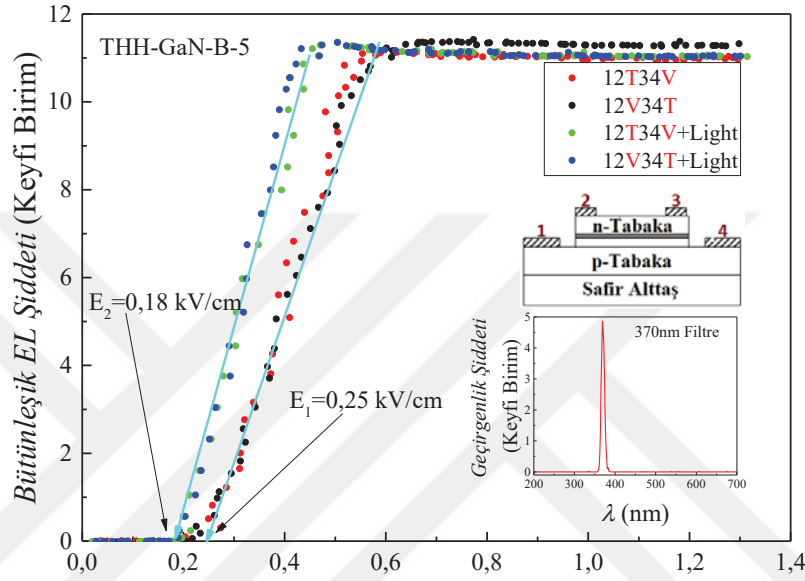
### 6.2.3. THH-GaN-B-5 Aygıtının foto elektrolüminesans ölçümleri

Şekil 6.43’de 370 nm dalgaboylu ışık uyarımında elektrik alan ile akımın değişimi verildi. Işık ile uyarılmadığı durumdaki pulslu elektrolüminesans sonuçları ile karşılaştırıldı. 370 nm geçirgen filtrenin de dalgaboyuna bağlı geçirgenlik grafiği Şekil 6.43’ün iç grafiği olarak çizdirildi.



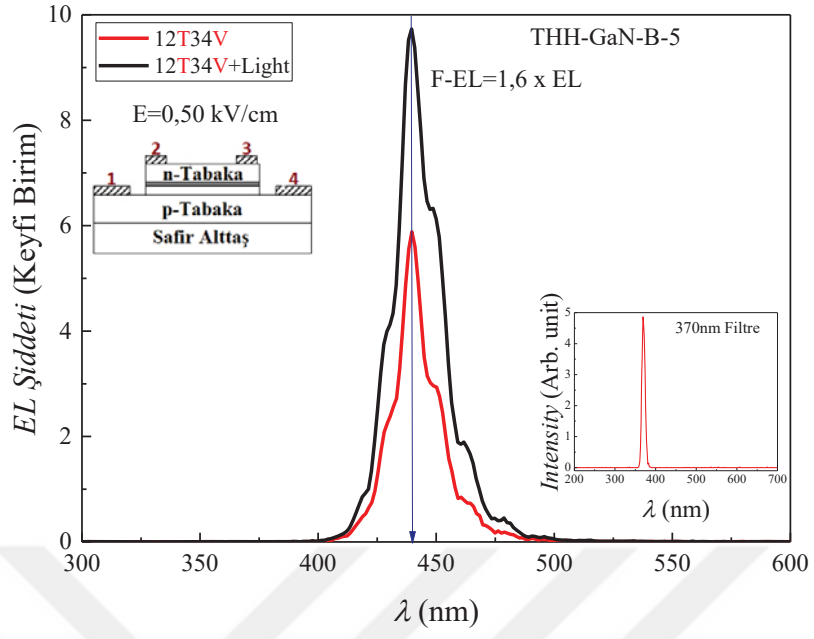
**Şekil 6.43.** THH-GaN-B-5 aygıtında iki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan- akım değişimi.

Şekil 6.44'de  $F-EL$  şiddetinin elektrik alan ile değişim grafiğinden ışık ile uyarıldığında aygıtın emisyona başlama elektrik alanı elde edildi.  $EL$  şiddeti grafiği ile karşılaştırıldı. Foton ile uyarım yapıldığında aygıtın emisyona başlama elektrik alanı 0,25 kV/cm'den 0,18 kV/cm'e düşmüştür. Bunun nedeni ışık ile uyarılmaya başlandığında ortamdan daha fazla taşıyıcı oluşturulmasıdır.



**Şekil 6.44.** THH-GaN-B-5 aygıtında iki polaritede ışık uyarımlı ve uyarımsız elektrik alan-  $EL$  değişimi. Mavi ve yeşil noktalarla gösterilen ölçüm  $F-EL$  şiddeti iken siyah ve kırmızı noktalarla gösterilen ölçüm  $EL$  şiddetidir. Aygıtın emisyona başlama elektrik alanı 0,25 kV/cm'den 0,18 kV/cm'e düşmüştür

Şekil 6.45'de ise  $F-EL$  ve  $EL$  spektrumları karşılaştırıldı. 0,50 kV/cm'lik elektrik alanda  $EL$  spektrumu üzerine ışık düşürüldüğünde  $F-EL$  şiddeti 1,6 kat şiddetlendi. Aygıtın bu şekilde bir özellik göstermesi bir yükselteç olarak çalışabileceğinin göstergesidir. Aynı zamanda bu ölçümde 370 nm dalgaboyundaki ışığı 440 nm'ye dönüştürerek emisyon yapmıştır. Bu özelliği ile de aygıt, dalgaboyu dönüştürücü olarak çalışma potansiyelinin olduğu görüldü.



**Şekil 6.45.** THH-GaN-B-5 aygıtının F-EL spektrumu (siyah spektrum) ve EL spektrumunun (kırmızı spektrum) karşılaştırılması. EL spektrumu üzerine ışık ile uyarım yapıldığında EL spektrumunun 1,6 kat daha şiddetlendiği görüldü.

## 7. GENEL SONUÇLAR

Bu tez kapsamında aynı katmanlı yapıdan üretilen fakat n-kanal uzunluğu farklı olan THH-GaN-B-10 ve THH-GaN-B-5 kodlu örneklerde elde edilen sonuçlar Tablo 7.1’de verilmiştir. Tablo 7.1’de aygıtların genel özelliklerinin yanı sıra bünyelerinde bulunan klasik ışık yayan diyot (*Light Emitting Diode*; LED) ve Top Hat HELLISH (THH) yapılarının parametreleri ve sonuçları da yer almaktadır.

**Tablo 7.1.** THH-GaN-B-10 ve THH-GaN-B-5 kodlu örneklerde sonuçların karşılaştırılması.

	THH-GaN-B-10				THH-GaN-B-5			
n-tipi kontak metalleri kalınlıkları (nm)	Ti/Al/Ni/Au 15/150/40/100				Ti/Al/Ni/Au 15/150/40/100			
n-tipi kontak ısıtım işlemi	850 °C’de 30 s N <sub>2</sub>				850 °C’de 30 s N <sub>2</sub>			
n-tipi kontak davranışı	Omik				Omik			
n-tipi kontak direnci (kΩ)	3,4				4,1			
öz direnci (Ωcm <sup>2</sup> )	4,1x10 <sup>-4</sup> (lit.:1x10 <sup>-7</sup> Ωcm <sup>2</sup> )				3,9x10 <sup>-4</sup> [145]			
p-tipi kontak metalleri kalınlıkları	Ni/Au 10nm/10nm				Ni/Au 10nm/10nm			
p-tipi kontak ısıtım işlemi	450 °C’de 60 s O <sub>2</sub>				450 °C’de 60 s O <sub>2</sub>			
p-tipi kontak davranışı	Kötü Omik				Omik			
n-tipi kontak direnci (Ω)	289 kΩ				111 kΩ			
öz direnci (Ωcm <sup>2</sup> )	1,3x10 <sup>-2</sup> (lit.:1x10 <sup>-4</sup> Ωcm <sup>2</sup> )				5x10 <sup>-3</sup> [53]			
<b>Kontakt Dizilimi</b>	<b>1V2T</b>	<b>3T4V</b>	<b>12V34T</b>	<b>12T34V</b>	<b>1V2T</b>	<b>3T4V</b>	<b>12V34T</b>	<b>12T34V</b>
Işıma voltajı (V) (elektrik alanı kV/cm) E alan karşılı V değeri Hesaplanan V değeri	6,1	5,9	D:0,53 53 H:42,5	D:0,53 53	6,2	6,2	D:0,25 12,5 H:27,9	D:0,25 12,5 H:27,9
EL spektrumu pik sayısı	5	5	4	4	6	6	4	4
Pik dalgaboyları (nm)	430±1 440±1 450±1 465±1 480±1	430±1 440±1 450±1 465±1 480±1	430±1 440±1 450±1 465±1	430±1 440±1 450±1 465±1	420±1 430±1 440±1 450±1 465±1 480±1	420±1 430±1 440±1 450±1 465±1 480±1	430±1 440±1 450±1 465±1	430±1 440±1 450±1 465±1
F-EL ışımaya elektrik alanı (kV/cm) E alan karşılı V değeri	----- -	-----	0,32 32	0,32 32	-----	-----	0,18 9	0,18 9
Işık şiddetini yükseltme katsayısı	----- -	-----	X 2	X 2	-----	-----	X 1,6	X 1,6



Tablo 7.1'deki sonuçlara bakıldığında her iki THH yapısının da 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarındaki sonuçları aynıdır. Bu iki aygıt için THH yapılarının polariteden bağımsız çalıştıkları söylenebilir. Aynı sonuç THH-GaN-B-5 kodlu aygıt bünyesinde bulunan iki klasik LED'in ileri besleme durumları için de aynı deneysel sonuçlar elde edildi. Fakat aynı durum THH-GaN-B-10 kodlu aygıt bünyesinde bulunan iki klasik LED'in ileri besleme durumları için farklıdır. İki klasik LED yapısının sonuçları arasındaki farklılık LED yapılarının birinin p-tipi kontakın üretim aşamaları sonunda hasar görmesi ve hasarın gümüş pasta kullanılarak giderilmesidir. Sonuç olarak gümüş pasta kontak üzerinde farklı direnç gösteren bir malzeme olarak p-tipi kontak malzemelerine karışmış bu da kontakın direncini diğer p-tipi kontakta farklılaştırmıştır. Bu sonuç yapının kontak direncinin oldukça yüksek ölçülmesinden de anlaşılmaktadır. Ayrıca ışımaya başladığı eşik voltajı da oldukça yüksek bir voltaj değerini almıştır. Literatürde bulunan klasik LED eşik voltajlar  $4 \pm 1V$  civarındadır [151, 157, 158, 160–164].

THH yapılarının eşik elektrik alanları her iki yapıda da polariteden bağımsız elde edildi. THH-GaN-B-10 kodlu aygıtta Eşitlik 4.6 ile hesaplanan eşik voltajı  $42,5 \pm 1 V$ 'tur. Deneysel olarak ise  $0,53 kV/cm$ 'lik elektrik alan değerine karşılık gelen  $53 V$  eşik voltajı elde edildi. Hesaplanan ve deneysel edilen eşik voltajları birbiriyle çok az fark gösterse de uyumludur. THH-GaN-B-5 kodlu aygıtta Eşitlik 4.6 ile hesaplanan eşik voltajı  $27,9 \pm 1 V$  olmasına rağmen deneysel olarak elde edilen eşik voltajı  $12,5 V$ 'tur. Deneysel olarak beklenenin çok daha altında bir ışımaya elde edildi. Bunun nedeni aygıtın daha kaliteli kontaklara sahip olması ve boyut olarak daha küçük olması gösterilebilir.

THH yapılarının EL spektrumlarında elde edilen pik sayısı ve piklerin dalgalı boyları birbiriyle uyumludur. Klasik LED yapılarının EL spektrumlarında ise kendi aralarında yani THH-GaN-B-10 kodlu aygıtını klasik LED'leri 1V2T ve 3V4T kendi aralarında uyumludur. Piklerin sayıları ve dalgalı boyları aynıdır. Fakat THH-GaN-B-10 kodlu ve THH-GaN-B-5 kodlu aygıtların klasik LED'leri karşılaştırıldığında, THH-GaN-B-5 kodlu aygıt LED ışımada 6 farklı uyum eğrisinin toplamı deneysel olarak elde edilen verilere uyum gösterirken, THH-GaN-B-10 kodlu aygıt ışımada 5 farklı uyum eğrisinin toplamı deneysel olarak elde edilen verilere uyum gösterdi. Dalgalı boyları aynı değerlerde iken THH-GaN-B-5 kodlu aygıt LED ışımada  $420 nm$  dalgalı boyunda bir uyum eğrisi fazladır. Bu uyum eğrisinin pik değeri Ee1-Elh2 optik geçiş enerjisine karşılık gelen değer olduğu düşünüldü [156]. Ee1-Elh2 optik geçişleri çok düşük olasılıklı

geçişlerdir. Bu nedenden dolayı THH-GaN-B-10 kodlu aygıt ışımada yer almaması açıklanabilir.

THH aygıtlarına EL emisyonu sırasında yüksek enerjili ışık ile uyarımı yapıldığında, THH-GaN-B-10 kodlu aygıtın EL spektrumu şiddetini 2 kat, THH-GaN-B-5 kodlu aygıtın EL spektrumu şiddetini 1,6 kat yükselttiği elde edildi. Farklı oranda yükseltme katsayısı elde edilmesinin nedeni THH-GaN-B-10 kodlu aygıtın boyutunun daha büyük olduğunda daha fazla alanda ışık uyarımı yapıldığından olabilir.

Bu aygıtların çok daha yüksek performanslarda çalışabilmesi için n ve p kanal arasındaki simetri bozulmadan ve doğrusal olmayan potansiyel dağılımı oluşturabilecek şekilde aygıtın boyutları küçültülebilecek tasarımlar yapılabilir. Böylece daha düşük eşik voltajları elde edilebilmesi olasıdır. THH aygıtlarının boyutlarını belirleyerek tasarım yapmak çok önemlidir. Tasarım yaparken fabrikasyon aşamaları da göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin n ve p-kontaklar arasındaki mesafe fotolitografi yapılamayacak kadar yakın olmamalıdır. Tasarım yapılırken boyutsuz THH parametresi mutlaka incelenmelidir. Çünkü bu katsayı aygıtın çalışma voltajını önemli etkiler. n ve p-kanallar arasındaki simetri bozulmadan ne kadar büyük bir THH parametresi elde edilebilecek tasarım yapılırsa THH çalışma voltajı da o kadar aşağıya iner.

THH yapılarının bünyesinde bulundurdukları iki klasik LED'in THH aygıtlarının eşik voltajına ya da elektrik alanına etkisi büyüktür. Bu klasik LED'ler ne kadar düşük eşik voltajlarında çalışırlarsa THH aygıtlarının da eşik voltajı bu oranda düşer. Klasik LED yapılarının eşik voltajını etkileyen önemli faktörlerden biri de kontakların kalitesidir. Yapılarda daha düşük dirençli omik kontak oluşturulabilecek kontak iletim malzemesi seçilerek, LED çalışma voltajları daha da düşürülebilir.

Yukarıda bahsedilen iki parametre de çok önemlidir. Birinin diğerine karşı bir üstünlüğü yoktur. Bundan dolayı farklı parametreler göz önünde bulundurularak yapının optimizasyonun yapılması gerekir. Çok düşük çalışma voltajında klasik LED'ler üretilse bile THH parametresinin uygun olmadığı bir boyutlandırma tasarlanırsa THH aygıtı yine yüksek voltaj değerlerinde çalışabilir. Bunun tersi durum da geçerlidir. THH parametresi uygun elde edilip çalışma voltajı yüksek LED'ler üretilirse THH aygıtı yine yüksek voltajlarda çalışacaktır.

Bir diğer önemli parametre de kullanılan yarıiletken malzemelerin aygıt performansını yükseltecek katkı oranları ile büyütülmesidir. Katkı oranları taşıyıcı sayısını etkilediğinden bu parametrede tasarım aşamalarında göz önünde tutulmalıdır.

THH-GaN aygıtlarının performansını etkileyebilecek bir başka parametre de  $n$  ve  $p$ -kanalların yerleri değiştirmek tasarım yaparken düşünülebilir.  $p$ -kanalı kısa tutulup  $n$ -kanal üzerine simetrik olarak yerleştirildiğinde yine doğrusal olmayan potansiyel dağılımı sağlayabilir. Ayrıca  $p$ -kanalın yukarıda olması  $p$ -GaN'ün aktivasyonu için önemlidir.  $p$ -tabakasının yukarıda olması ve üzerinde başka bir tabakanın bulunmaması yapı içerisindeki H-Mg bağlarının ısı işlem kırıldıktan sonra açığa çıkan H'lerin tekrar Mg ile bağ yapmasını önlemek için yapıdan uzaklaştırılması daha kolay olması beklenir [38, 151, 158, 165, 166]. Böylece  $p$ -GaN tabakasında serbest boşluk sayısı artacaktır ve elektriksel olarak daha fazla boşluk aktif olacaktır. Bu durum ile aygıtların hem  $p$  kontak direnci hem de çalışma voltajı düşürülürken, aygıtların ışımaya şiddeti artırılır (hem klasik LED'ler için hem de THH aygıtları için geçerlidir).

Aygıtları geliştirmek adına yapılacak iş paketleri arasında, farklı yarıiletken malzemeler kullanılarak yukarıda anlatılan bilgiler ışığında tasarımlar yer alabilir. Farklı yarıiletken malzemeler kullanılarak farklı dalgaboyunda ışımaya yapan THH aygıtların tasarlanması ve üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yapılar içerisinde farklı katmanlarda bariyer tabakaları kullanılarak taşıyıcıları uzaysal olarak ayırarak kendi kanallarında tutulmaları sağlanabilir. Bu durum sızıntı akımını azaltabilecek bir etkidir. Taşıyıcıların herhangi bir sızıntı akımına katkısı olmaması bu taşıyıcıların iletme katkısı vereceği ve ışımaya şiddetini artırıcı etki yapması beklenebilir. AlGaIn, InGaIn, hetero-eklem yapıları aynı aygıtta kullanılarak bu planlamalar gerçekleştirilebilir.

THH aygıtlar, geliştirilme potansiyelleri çok yüksek ve mümkün olan aygıtlardır. Planlı ve sistematik bir çalışma ile çok daha yüksek performanslı aygıtlar üretilebilir.

Bu tez çalışması sonucunda bir patent başvurusu hazırlandı ve Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından "26/11/2019 tarihinde yapılan 36 sayılı yönetim kurulu kararı ile "Sıcak Elektron Tabanlı Yüzey Işımaya Yapan Lojik Işık Yayıncı Aygıt" başlıklı teknolojiniz için hizmet buluşu kararı verilmiştir. İstanbul Üniversitesinin hizmet buluşu kararı vermesi sonrası hak sahipliği oranlarında ortak ulusal başvuru yapılmasına karar verilmiştir." kararı alınmıştır.

## KAYNAKÇA

- [1] Johnson, W.C., Parsons, J.B., and Crew, M.C. (1930) Nitrogen Compounds of Gallium. *J. Am. Chem. Soc.* 52 (1912), 2651.
- [2] Maruska, H.P. and Tietjen, J.J. (1969) The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN. *Applied Physics Letters.* 15 (10), 327–329.
- [3] Liu, S.S., Cass, T.R., and Stevenson, D.A. (1977) Characterization of GaN epitaxial layers using. *Journal of Electronic Materials.* 6 (3), 237–252.
- [4] Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., and Akasaki, I. (1989) P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI). *Japanese Journal of Applied Physics.* 28 (12 A), L2112–L2114.
- [5] Maruska, H.P., Rhines, W.C., and Stevenson, D.A. (1972) Preparation of Mg-doped GaN diodes exhibiting violet electroluminescence. *Materials Research Bulletin.* 7 (8), 777–781.
- [6] Nakamura, S. (2015) Background Story of the Invention of Efficient InGaN Blue-Light-Emitting Diodes (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie - International Edition.* 54 (27), 7770–7788.
- [7] Amano, H. (2015) Growth of GaN on sapphire via low-temperature deposited buffer layer and realization of p-type GaN by Mg doping followed by low-energy electron beam irradiation. *International Journal of Modern Physics B.* 29 (32), 43–53.
- [8] Nakamura, S., Senoh, M., Iwasa, N., and Nagahama, S.I. (1995) High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures. *Japanese Journal of Applied Physics.* 34 (7), L797–L799.
- [9] Nakamura, S., Iwasa, N., Senoh, M., and Mukai, T. (1992) No Title. *Japanese Journal of Applied Physics.* 31 L258.
- [10] Takeuchi, T., Sota, S., Katsuragawa, M., Komori, M., Takeuchi, H., Amano, H., et al. (1997) Quantum-Confined Stark Effect due to Piezoelectric Fields in GaInN Strained Quantum Wells. *Japanese Journal of Applied Physics.* 36 (Part 2, No. 4A), L382–L385.
- [11] Pearton, S.J., Ren, F., Zhang, A.P., and Lee, K.P. (2000) Fabrication and performance of GaN electronic devices. *Materials Science & Engineering R.* 30 (3–6), 55–212.
- [12] Tolbert, L.M., Ozpineci, B., Islam, S.K., and Chinthavali, M.S. (2003) Wide

- bandgap semiconductors for utility applications. *Proceedings of the IASTED Multi-Conference- Power and Energy Systems*. 7 317–321.
- [13] Sumiyoshi, K., Okada, M., Ueno, M., Kiyama, M., and Nakamura, T. (2013) Low on-resistance high breakdown voltage GaN diodes on low dislocation density GaN substrates. *SEI Technical Review*. (77), 113–117.
- [14] Golio, M. (1392) RF and MICROWAVE SEMICONDUCTOR DEVICE HANDBOOK. .
- [15] Atmaca, G., Narin, P., Kutlu, E., Malin, T.V., Mansurov, V.G., Zhuravlev, K.S., et al. (2018) Negative Differential Resistance Observation and a New Fitting Model for Electron Drift Velocity in GaN-Based Heterostructures. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 65 (3), 950–956.
- [16] SÖNMEZ, F. (2017) GaN TABANLI SICAK ELEKTRON IŞIN YAYICI HETERO-YAPILAR Feyza, Anadolu Üniversitesi, 2017.
- [17] Morkoç, H. (2008) Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. .
- [18] Morkoç, H. (2008) Nitride Semiconductor Devices : Principles and Simulation Properties of Group-IV , III-V and II-VI Semiconductors Nitride Semiconductors.
- [19] BUNGO, P.(.) (2010) Characterization and reliability of blue and white GaN-based LEDs submitted to current and thermal stress.
- [20] Rezaei, B., Asgari, A., and Kalafi, M. (2006) Electronic band structure pseudopotential calculation of wurtzite III-nitride materials. *Physica B: Condensed Matter*. 371 (1), 107–111.
- [21] Vurgaftman, I., Meyer, J.R., and Ram-Mohan, L.R. (2001) Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. 89 (11 D), 5815–5875.
- [22] Vurgaftman, I. and Meyer, J.R. (2003) Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 94 (6), 3675–3696.
- [23] Nakamura, S., Senoh, M., and Mukai, T. (1993) High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 62 (19), 2390–2392.
- [24] Poschenrieder, M., Fehse, K., Schulz, F., Bläsing, J., Witte, H., Krtschil, A., et al. (2002) MOCVD-grown InGaN/GaN MQW LEDs on Si(111). *Physica Status Solidi C: Conferences*. 271 (1), 267–271.
- [25] Chang, S.J., Chang, C.S., Su, Y.K., Lee, C.T., Chen, W.S., Shen, C.F., et al. (2005)

- Nitride-based flip-chip ITO LEDs. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 28 (2), 273–277.
- [26] Lee, K.J., Oh, T.S., Kim, T.K., Yang, G.M., and Lim, K.Y. (2005) Growth and properties of blue/green InGaN/GaN MQWs on Si(111) substrates. *Journal of the Korean Physical Society*. 47 (SUPPL. 3), 512–516.
- [27] You, A., Be, M.A.Y., and In, I. (1999) emitting diodes grown by molecular beam epitaxy. 3616 (April), 23–26.
- [28] ACAR, M. (2009) FABRICATION, MODELING AND CHARACTERIZATION OF GaN HEMTs, AND DESIGN OF HIGH POWER MMIC AMPLIFIERS, BILKENT UNIVERSITY, 2009.
- [29] Boguslawski, P., Briggs, E.L., and Bernholc, J. (1995) Native defects in gallium nitride. *Physical Review B*. 51 (23), 17255–17258.
- [30] Koide, N., Kato, H., Sassa, M., Yamasaki, S., Manabe, K., Hashimoto, M., et al. (1991) Doping of GaN with Si and properties of blue m/i/n/n+ GaN LED with Si-doped n+-layer by MOVPE. *Journal of Crystal Growth*. 115 (1–4), 639–642.
- [31] Janotti, A. and Van De Walle, C.G. (2008) Sources of unintentional conductivity in InN. *Applied Physics Letters*. 92 (3), 21–24.
- [32] Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M., and Iwasa, N. (1992) Thermal annealing effects on P-type Mg-doped GaN films. *Japanese Journal of Applied Physics*. 31 (2), 139–142.
- [33] Youn, D.H., Lachab, M., Hao, M., Sugahara, T., Takenaka, H., Naoi, Y., et al. (1999) Investigation on the P-type activation mechanism in Mg-doped GaN films grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*. 38 (2 A), 631–634.
- [34] Kozodoy, P., Xing, H., DenBaars, S.P., Mishra, U.K., Saxler, A., Perrin, R., et al. (2000) Heavy doping effects in Mg-doped GaN. *Journal of Applied Physics*. 87 (4), 1832–1835.
- [35] Götz, W., Johnson, N.M., Walker, J., Bour, D.P., and Street, R.A. (1995) Activation of acceptors in Mg-doped GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*. 667 (1996), 667.
- [36] Kumakura, K., Makimoto, T., and Kobayashi, N. (2000) Activation Energy and Electrical Activity of Mg in Mg-Doped In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x<0.2). *Japanese Journal of*



- Applied Physics*. 39 (Part 2, No. 4B), L337–L339.
- [37] Wen, T.C., Lee, S.C., Lee, W.I., Chen, T.Y., Chan, S.H., and Tsang, J.S. (2001) Activation of p-type GaN in a pure oxygen ambient. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*. 40 (5 B), 38–41.
- [38] Kuo, C.H., Chang, S.J., Su, Y.K., Wu, L.W., Sheu, J.K., Chen, C.H., et al. (2002) Low temperature activation of Mg-doped GaN in O<sub>2</sub> ambient. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*. 41 (2 A),.
- [39] Stocker, D.A., Goepfert, I.D., Schubert, E.F., Boutros, K.S., and Redwing, J.M. (2000) Crystallographic wet chemical etching of p-type GaN. *Journal of the Electrochemical Society*. 147 (2), 763–764.
- [40] Wu, L.W., Chang, S.J., Su, Y.K., Chuang, R.W., Hsu, Y.P., Kuo, C.H., et al. (2003) In<sub>0.23</sub>Ga<sub>0.77</sub>N/GaN MQW LEDs with a low temperature GaN cap layer. *Solid-State Electronics*. 47 (11), 2027–2030.
- [41] Fan, Z., Mohammad, S.N., Kim, W., Aktas, Ö., Botchkarev, A.E., and Morkoç, H. (1996) Very low resistance multilayer Ohmic contact to n-GaN. *Applied Physics Letters*. 68 (12), 1672–1674.
- [42] Luther, B.P., Mohny, S.E., Jackson, T.N., Asif Khan, M., Chen, Q., and Yang, J.W. (1997) Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN. *Applied Physics Letters*. 70 (1), 57–59.
- [43] Lee, H.J., Yu, S.J., Asahi, H., Gonda, S.I., Kim, Y.H., Rhee, J.K., et al. (1998) Very low resistance ohmic contacts to n-GaN. *Journal of Electronic Materials*. 27 (7), 829–832.
- [44] Boudart, B., Trassaert, S., Wallart, X., Pesant, J.C., Yaradou, O., Théron, D., et al. (2000) Comparison between TiAl and TiAlNiAu ohmic contacts to n-type GaN. *Journal of Electronic Materials*. 29 (5), 603–606.
- [45] Bright, A.N., Thomas, P.J., Weyland, M., Tricker, D.M., Humphreys, C.J., and Davies, R. (2001) Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaIn/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy. *Journal of Applied Physics*. 89 (6), 3143–3150.
- [46] Foresi, J.S. and Moustakas, T.D. (1993) Metal contacts to gallium nitride. *Applied Physics Letters*. 62 (22), 2859–2861.
- [47] Lin, M.E., Ma, Z., Huang, F.Y., Fan, Z.F., Allen, L.H., and Morkoç, H. (1994) Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN. *Applied Physics Letters*.



- 64 (8), 1003–1005.
- [48] Liu, Q.Z. and Lau, S.S. (1998) A review of the metal-GaN contact technology. *Solid-State Electronics*. 42 (5), 677–691.
- [49] Mahajan, S.S., Dhau, A., Laishram, R., Kapoor, S., Vinayak, S., and Sehgal, B.K. (2014) Micro-structural evaluation of Ti / Al / Ni / Au ohmic contacts with different Ti / Al thicknesses in AlGaN / GaN HEMTs. *Materials Science & Engineering B*. 183 47–53.
- [50] Shashikala, B.N. and Nagabhushana, B.S. (2015) Ohmic contact characterization using image processing. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 5 (6), 1347–1353.
- [51] Singh, K., Chauhan, A., Mathew, M., Punia, R., Meena, S.S., Gupta, N., et al. (2019) Formation of non-alloyed Ti/Al/Ni/Au low-resistance ohmic contacts on reactively ion-etched n-type GaN by surface treatment for GaN light-emitting diodes applications. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 125 (1), 0.
- [52] Figge, S., Kröger, R., Böttcher, T., Ryder, P.L., Hommel, D., and Bo, T. (2010) Magnesium segregation and the formation of pyramidal defects in p-GaN Magnesium segregation and the formation of pyramidal defects in p -GaN. 4748 (2002), 2000–2003.
- [53] Chen, J. and Brewer, W.D. (2015) Ohmic Contacts on p-GaN. *Advanced Electronic Materials*. 1 (8), 1–7.
- [54] Mori, T., Kozawa, T., Ohwaki, T., Taga, Y., Nagai, S., Mori, T., et al. (1996) Schottky barriers and contact resistances on p-type GaN. 3537 1–4.
- [55] Shiojima, K., Sugahara, T., and Sakai, S. (2006) Current transport mechanism of p-GaN Schottky contacts Current transport mechanism of p-GaN Schottky contacts. 4353 (2000), 10–13.
- [56] Rickert, K.A., Ellis, A.B., Kim, J.K., Lee, J., Himpsel, F.J., Dwikusuma, F., et al. (2006) X-ray photoemission determination of the Schottky barrier height of metal contacts to. 6671 (2002),.
- [57] Ho, J., Jong, C., Chiu, C.C., Huang, C., Chen, C., Shih, K., et al. (1999) Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN. 1275.
- [58] Qiao, D., Yu, L.S., Lau, S.S., Lin, J.Y., Jiang, H.X., and Haynes, T.E. (2000) A

- study of the Au/Ni ohmic contact on p-GaN. *Journal of Applied Physics*. 88 (7), 4196–4200.
- [59] Li, Y.L., Schubert, E.F., Graff, J.W., Osinsky, A., and Schaff, W.F. (2000) Low-resistance ohmic contacts to p-type GaN. *Applied Physics Letters*. 76 (19), 2728–2730.
- [60] Jang, J.S., Park, S.J., and Seong, T.Y. (2000) Ultrahigh transparency of Ni/Au ohmic contacts to surface-treated p-type GaN. *Journal of Applied Physics*. 88 (9), 5490–5492.
- [61] Li, X.J., Zhao, D.G., Jiang, D.S., Chen, P., Zhu, J.J., Liu, Z.S., et al. (2015) Low contact resistivity between Ni/Au and p-GaN through thin heavily Mg-doped p-GaN and p-InGaN compound contact layer. *Chinese Physics B*. 24 (11),.
- [62] Sheu, J.K., Su, Y.K., Chi, G.C., Chen, W.C., Chen, C.Y., Huang, C.N., et al. (1998) The effect of thermal annealing on the Ni/Au contact of p-type GaN. *Journal of Applied Physics*. 83 (6), 3172–3175.
- [63] Koide, Y., Maeda, T., Kawakami, T., Fujita, S., Uemura, T., Shibata, N., et al. (1999) Effects of annealing in an oxygen ambient on electrical properties of ohmic contacts to p-type GaN. *Journal of Electronic Materials*. 28 (3), 341–346.
- [64] Maruyama, T., Hagio, Y., Miyajima, T., Kijima, S., Nanishi, Y., and Akimoto, K. (2001) Effects of Annealing on the Interface Properties between Ni and p-GaN. *Physica Status Solidi (A) Applied Research*. 188 (1), 375–378.
- [65] Jang, H.W., Kim, S.Y., and Lee, J.L. (2003) Mechanism for Ohmic contact formation of oxidized Ni/Au on p-type GaN. *Journal of Applied Physics*. 94 (3), 1748–1752.
- [66] Lee, C.T., Lin, Y.J., and Lee, T.H. (2003) Mechanism investigation of NiOx in Au/Ni/p-type GaN ohmic contacts annealed in air. *Journal of Electronic Materials*. 32 (5), 341–345.
- [67] Hu, C.Y., Qin, Z.X., Feng, Z.X., Chen, Z.Z., Ding, Z.B., Yang, Z.J., et al. (2006) Temperature dependent diffusion and epitaxial behavior of oxidized Au/Ni/p-GaN ohmic contact. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 128 (1–3), 37–43.
- [68] Chary, I., Chandolu, A., Borisov, B., Kuryatkov, V., Nikishin, S., and Holtz, M. (2009) Influence of surface treatment and annealing temperature on the formation of low-resistance Au/Ni ohmic contacts to p-GaN. *Journal of Electronic Materials*.

- 38 (4), 545–550.
- [69] Zhao, S., McFavilen, H., Wang, S., Ponce, F.A., Arena, C., Goodnick, S., et al. (2016) Temperature Dependence and High-Temperature Stability of the Annealed Ni/Au Ohmic Contact to p-Type GaN in Air. *Journal of Electronic Materials*. 45 (4), 2087–2091.
- [70] Chen, L.C., Ho, J.K., Jong, C.S., Chiu, C.C., Shih, K.K., Chen, F.R., et al. (2000) Oxidized Ni/Pt and Ni/Au ohmic contacts to p-type GaN. *Applied Physics Letters*. 76 (25), 3703–3705.
- [71] Omiya, H., Ponce, F.A., Marui, H., Tanaka, S., and Mukai, T. (2004) Atomic arrangement at the Au / p - Ga N interface in low-resistance contacts Atomic arrangement at the Au / p-GaN interface in low-resistance contacts. 6143 1–4.
- [72] Chen, P., Lee, C., Yan, J., and Lee, C. (2007) Performance Improvement and Mechanism of Chlorine-Treated InGaN – GaN Light-Emitting Diodes. 165–167.
- [73] Lee, C., Lin, Y., Lee, C., and Lee, C. (2001) Investigation of oxidation mechanism for ohmic formation in Ni / Au contacts to p -type GaN layers contacts to p-type GaN layers. 3815 (November), 1999–2002.
- [74] Oh, M., Kwon, M., Park, I., Baek, S., Park, S., Lee, S.H., et al. (2006) Improvement of green LED by growing p-GaN on In 0 . 25 GaN / GaN MQWs at low temperature. 289 107–112.
- [75] Kalaitzakis, F.G., Pelekanos, N.T., Prystawko, P., Leszczynski, M., and Konstantinidis, G. (2007) Low resistance as-deposited Cr / Au contacts on p -type GaN Low resistance as-deposited Cr / Au contacts on p -type GaN. 261103 89–92.
- [76] Adivarahan, V., Lunev, A., Khan, M.A., Yang, J., Simin, G., Shur, M.S., et al. (2006) Very-low-specific-resistance Pd/Ag/Au/Ti/Au alloyed ohmic contact to p GaN for high- current devices Very-low-specific-resistance Pd/Ag/Au/Ti/Au alloyed ohmic contact to p GaN for high-current devices. 2781 (2001),.
- [77] Voss, L.F., Stafford, L., Gila, B.P., Pearton, S.J., and Ren, F. (2008) Ir-based diffusion barriers for Ohmic contacts to p-GaN. 254 4134–4138.
- [78] Voss, L.F., Stafford, L., Wright, J.S., Pearton, S.J., Ren, F., Kravchenko, I.I., et al. (2007) W<sub>2</sub>B and CrB<sub>2</sub> diffusion barriers for Ni/Au contacts to p-GaN W<sub>2</sub>B and CrB<sub>2</sub> diffusion barriers for Ni/Au contacts to p -GaN. 042105 1–4.
- [79] Voss, L.F., Stafford, L., Khanna, R., Gila, B.P., Abernathy, C.R., Pearton, S.J., et al. (2009) Ohmic contacts to p -type GaN based on TaN , TiN , and ZrN. 212107

- (2007), 93–96.
- [80] Kumakura, K., Makimoto, T., and Kobayashi, N. (2001) Low-resistance nonalloyed ohmic contact to p -type GaN using strained InGaN contact layer Low-resistance nonalloyed ohmic contact to p -type GaN using strained InGaN contact layer. 2588 1999–2002.
- [81] Chichibu, S.F., Abare, A.C., Minsky, M.S., Keller, S., Fleischer, S.B., Bowers, J.E., et al. (1998) Effective band gap inhomogeneity and piezoelectric field in InGaN/GaN multiquantum well structures. *Applied Physics Letters*. 73 (14), 2006–2008.
- [82] Davydov, V.Y., Klochikhin, A.A., and Emtsev, V. V (2002) Band Gap of Hexagonal InN and InGaN Alloys. 795 (3), 787–795.
- [83] Yam, F.K. and Hassan, Z. (2008) InGaN : An overview of the growth kinetics , physical properties and emission mechanisms. 43 1–23.
- [84] Armakavicius, N., Stanishev, V., Knight, S., Kühne, P., Schubert, M., and Darakchieva, V. (2018) Electron effective mass in In<sub>0.33</sub>Ga<sub>0.67</sub>N determined by mid-infrared optical Hall effect. *Applied Physics Letters*. 112 (8), 0–5.
- [85] Ho, I. and Stringfellow, G.B. (1996) Solid phase immiscibility in GaInN Solid phase immiscibility in GaInN. 2701.
- [86] Wetzell, C., Takeuchi, T., Yamaguchi, S., Katoh, H., Amano, H., and Akasaki, I. (1998) Optical band gap in Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N (0<x<0.2) on GaN by photoreflection spectroscopy. *Applied Physics Letters*. 73 (14), 1994–1996.
- [87] Pugh, S. k., Dugdale, D., Brand, S., and Abram, R.. (1999) Band-gap and k . p . parameters for GaAlN and GaInN alloys. 3768 (September 1999),.
- [88] Cade, N.A. (1987) Band bowing in semiconductor alloys and superlattices. *Semiconductor Science and Technology*. 2 (5), 255–260.
- [89] Ferhat, M. (2004) Computational optical band gap bowing of III-V semiconductor alloys. *Physica Status Solidi (B) Basic Research*. 241 (10), 38–41.
- [90] Sandu, T. and Iftimie, R.I. (2010) Bandgaps and band bowing in semiconductor alloys. *Solid State Communications*. 150 (17–18), 888–892.
- [91] Liou, B. (2005) First-principles calculation for bowing parameter of wurtzite In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. *Optics Communications*. 249 217–223.
- [92] Piner, E.L., McIntosh, F.G., Roberts, J.C., Aumer, M.E., Joshkin, V.A., Bedair, S.M., et al. (1996) MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research.

- (1996),.
- [93] Noh, S.K. (1997) Characteristics of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{GaN}$  grown by LPMOVPE with the variation of growth temperature. *Journal of Crystal Growth*. 182 6–10.
- [94] Stricht, W. Van der, Moerman, I., Demeester, P., Considine, L., Thrush, E.J., Crawley, J.A., et al. (1997) MOVPE growth optimization of high quality InGaN films. 2.
- [95] Lin, H., Shu, C., Ou, J., Pan, Y., Chen, W., Chen, W., et al. (1998) Growth temperature effects on InGaN films studied V by X-ray and photoluminescence. 190 57–60.
- [96] Sohmer, A., Off, J., Bolay, H., Syganow, V., Im, J.S., Wagner, V., et al. (1997) GaInN/GaN-Heterostructures and Quantum Wells Grown by Metalorganic. (1997),.
- [97] Erol, A. and Balkan, N. (2013) Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş., .
- [98] Kasap, S.. (2013) Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices. .
- [99] Balkan, N., Teke, A., Gupta, R., Straw, A., Wolter, J.H., and Van Der Vleuten, W. (1995) Tunable wavelength hot electron light emitter. *Applied Physics Letters*. 67 (7), 935.
- [100] Gupta, R., Balkan, N., Teke, A., Straw, A., and Cunha, A. (1995) Hot electron light-emitting semiconductor heterostructure device-type 2.
- [101] Straw, A., Balkan, N., O'Brien, A., Cunha, A., Gupta, R., and Arıkan, M.Ç. (1995) Hot electron light-emitting and lasing semiconductor heterostructures-type 1.
- [102] Balkan, N., Cunha, A., O'Brien, A., Teke, A., Gupta, R., Straw, A., et al. (1996) HOT ELECTRON LIGHT EMITTING SEMICONDUCTOR HETEROJUNCTION DEVICES (HELLISH) - TYPE - 1 AND TYPE - 2. 603–604.
- [103] Wah, J.Y. (2003) top Hat Hellish Hot Electron Light Emitting and Lasing in Heterostructures, Essex University, 2003.
- [104] O'Brien, A., Balkan, N., Boland-Thoms, A., Adams, M., Bek, A., Serpengüzel, A., et al. (1999) Super-radiant surface emission from a quasi-cavity hot electron light emitter. *Optical and Quantum Electronics*. 31 (2), 183–190.
- [105] Erol, A. (2002) YÜZEY IŞIMASI YAPAN DÜŞÜK BOYUTLU YAPILARDA BRAGG YANSIMA OLAYLARININ İNCELENMESİ, İstanbul Üniversitesi,

2002.

- [106] Chaqmaqchee, F.A.I. (2012) Electrically Pumped GaInNAs Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers for Operation at 1.3  $\mu\text{m}$  Wavelength, Essex University, 2012.
- [107] Luryi, S. (1991) Light-emitting devices based on the real-space transfer of hot electrons. *Applied Physics Letters*. 58 (16), 1727–1729.
- [108] Naundorf, H., Gupta, R., and Schöll, E. (1998) A model for hot electron light emission from semiconductor heterostructures. *Semiconductor Science and Technology*. 13 (6), 548–556.
- [109] Sceats, R., Dyson, A., Boland-Thoms, A., Balkan, N., Adams, M.J., and Button, C.C. (2000) Hot electron GaInAsP/InP surface emitter. *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices VIII*. 3944 882.
- [110] Turkoglu, A., Amca, R., Ergun, Y., Sokmen, I., and Balkan, N. (2003) Tilted magnetic field effect on the subbands of a GaAlAs diode with a GaAs quantum well. *Superlattices and Microstructures*. 33 (4), 235–245.
- [111] O'Brien, A., Balkan, N., and Roberts, J. (1997) Ultra bright surface emission from a distributed Bragg reflector hot electron light emitter. *Applied Physics Letters*. 70 (3), 366–368.
- [112] Sceats, R., Dyson, A., Hepburn, C.J., Potter, R.J., Boland-Thoms, A., Balkan, N., et al. (2003) Hot electron light emission from GaInAsP/InP structures with distributed Bragg reflectors. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 17 (1–4), 607–609.
- [113] O'Brien-Davies, A., Balkan, N., Boland-Thoms, A., Adams, M.J., and Roberts, J. (1999) Hellish-VCSEL: A hot electron laser. *Turkish Journal of Physics*. 23 (4), 681–688.
- [114] Balkan, N., Serpengüzel, A., O'Brien-Davies, A., Sökmen, I., Hepburn, C., Potter, R., et al. (2000) VCSEL structure hot electron light emitter. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 74 (1), 96–100.
- [115] Wah, J.Y., Balkan, N., Potter, R.J., and Roberts, J.S. (2003) The operation of a wavelength converter based on a field effect light emitting and absorbing heterojunction. *Physica Status Solidi (A) Applied Research*. 196 (2), 496–503.
- [116] Wah, J.Y., Balkan, N., Boland-Thoms, A., and Roberts, J.S. (2003) Hot electron light emission and absorption processes in a Top Hat structured bi-directional



- wavelength converter/amplifier. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 17 (1–4), 610–612.
- [117] Serpenguzel, A., Balkan, N., Erol, A., Arikan, M.C., and Roberts, J. (2005) Temperature dependence of the threshold electric field in a hot electron VCSEL (Invited Paper). *Ultrafast Phenomena in Semiconductors and Nanostructure Materials IX*. 5725 194.
- [118] Hepburn, C.J., Wah, J.Y., Boland-Thoms, A., and Balkan, N. (2005) GaInNAs and GaAs, top-hat vertical-cavity semiconductor optical amplifier (VCSEA) based on longitudinal current transport. *Physica Status Solidi C: Conferences*. 2 (8), 3096–3099.
- [119] Chaqmaqchee, F.A.I., Mazzucato, S., Oduncuoglu, M., Balkan, N., Sun, Y., Gunes, M., et al. (2011) Gainnas-based hellish-vertical cavity semiconductor optical amplifier for 1.3  $\mu\text{m}$  operation. *Nanoscale Research Letters*. 6 1–7.
- [120] Chaqmaqchee, F., Mazzucato, S., and Balkan, N. (2011) 1.3  $\mu\text{m}$  dilute nitride HELLISH-VCSEAs. *International Conference on Transparent Optical Networks*. 1–3.
- [121] Chaqmaqchee, F.A.I., Balkan, N., and Herrero, J.M.U. (2012) Top-Hat HELLISH-VCSEA for optical amplification and wavelength conversion for 0.85 to 1.3 $\mu\text{m}$  operation. *Nanoscale Research Letters*. 7 1–6.
- [122] Chaqmaqchee, F.A.I., Mazzucato, S., Balkan, N., Hugues, M., and Hopkinson, M. (2013) Gain characteristic of dilute nitride HELLISH-VCSEA for 1.3  $\mu\text{m}$  wavelength operation. *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*. 10 (4), 564–566.
- [123] Chaqmaqchee, F.A.I. and Balkan, N. (2014) Ga<sub>0.35</sub>In<sub>0.65</sub>N<sub>0.02</sub>As<sub>0.08</sub>/GaAs bidirectional light-emitting and light-absorbing heterojunction operating at 1.3  $\mu\text{m}$ . 5–9.
- [124] Chaqmaqchee, F.A.I. (2015) Optical Amplification in Dilute Nitride Hot Electron Light Emission–VCSEAs Devices. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 40 (7), 2111–2115.
- [125] Balkan, N. (1999) Non-linear carrier dynamics in hot electron vertical cavity surface emitting laser. *Physica B: Condensed Matter*. 272 (1–4), 480–483.
- [126] Wah, J.Y. and Balkan, N. (2005) Low field operation of hot electron light emitting devices: quasi-flat-band model. 152 (6), 299–320.



- [127] Smith, L.L., King, S.W., Nemanich, R.J., and Davis, R.F. (n.d.) Cleaning of GaN Surfaces.
- [128] King, S.W., Barnak, J.P., Bremser, M.D., Tracy, K.M., Ronning, C., Davis, R.F., et al. (1998) Cleaning of AlN and GaN surfaces. *Journal of Applied Physics*. 84 (9), 5248–5260.
- [129] Diale, M., Auret, F.D., Van Der Berg, N.G., Odendaal, R.Q., and Roos, W.D. (2005) Analysis of GaN cleaning procedures. *Applied Surface Science*. 246 (1–3), 279–289.
- [130] Tut, T. (2008) GaN / AlGaIn-BASED UV PHOTODETECTORS WITH PERFORMANCES EXCEEDING THE PMTS, BILKENT UNIVERSITY IN, 2008.
- [131] Zanato, D. (2005) Optoelectronic Properties of Group III-N Semiconductors, 2005.
- [132] MicroChemicals GmbH (2013) Image reversal resists and their processing. 1–7.
- [133] Sari, E. (2007) InGaIn/GaN QUANTUM ELECTROABSORPTION MODULATORS WITH RECORD BREAKING By, BILKENT UNIVERSITY IN, 2007.
- [134] Minsky, M.S., White, M., and Hu, E.L. (1996) Room-temperature photoenhanced wet etching of GaN. *Applied Physics Letters*. 68 (11), 1531–1533.
- [135] Youtsey, C., Adesida, I., and Bulman, G. (1997) Highly anisotropic photoenhanced wet etching of n-type GaN. *Applied Physics Letters*. 71 (15), 2151–2153.
- [136] Youtsey, C., Adesida, I., Romano, L.T., and Bulman, G. (1998) Smooth n-type GaN surfaces by photoenhanced wet etching. *Applied Physics Letters*. 72 (5), 560–562.
- [137] Youtsey, C., Bulman, G., and Adesida, I. (1998) Dopant-selective photoenhanced wet etching of GaN. *Journal of Electronic Materials*. 27 (4), 282–287.
- [138] Bardwell, J.A., Foulds, I.G., Webb, J.B., Tang, H., Fraser, J., Moisa, S., et al. (1999) Simple wet etch for GaN. *Journal of Electronic Materials*. 28 (10), 24–26.
- [139] Stonas, A.R., Margalith, T., DenBaars, S.P., Coldren, L.A., and Hu, E.L. (2001) Development of selective lateral photoelectrochemical etching of InGaIn/GaN for lift-off applications. *Applied Physics Letters*. 78 (13), 1945–1947.
- [140] Borton, J.E., Cai, C., Nathan, M.I., Chow, P., Van Hove, J.M., Wowchak, A., et

- al. (2000) Bias-assisted photoelectrochemical etching of p-GaN at 300 k. *Applied Physics Letters*. 77 (8), 1227–1229.
- [141] Yang, B. and Fay, P. (2004) Etch rate and surface morphology control in photoelectrochemical etching of GaN. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 22 (4), 1750–1754.
- [142] Tiginyanu, I.M., Popa, V., and Volciuc, O. (2005) Surface-charge lithography for GaN microstructuring based on photoelectrochemical etching techniques. *Applied Physics Letters*. 86 (17), 1–3.
- [143] Nakamura, S., Senoh, M., and Mukai, T. (1991) Highly p-typed mg-doped gan films grown with gan buffer layers. *Japanese Journal of Applied Physics*. 30 (10A), L1708–L1711.
- [144] Ruvimov, S., Liliental-Weber, Z., Washburn, J., Duxstad, K.J., Haller, E.E., Fan, Z.F., et al. (1996) Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts for n-GaN. *Applied Physics Letters*. 69 (11), 1556–1558.
- [145] Qin, Z.X., Chen, Z.Z., Tong, Y.Z., Ding, X.M., Hu, X.D., Yu, T.J., et al. (2004) Study of Ti/Au, Ti/Al/Au, and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-GaN. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 78 (5), 729–731.
- [146] Lin, Y.C., Chang, S.J., Kuo, C.W., and Chen, S.C. (2003) InGaN / GaN light emitting diodes with Ni / Au , Ni / ITO and ITO p-type contacts. 47 849–853.
- [147] Romero, N.A. (1998) Johnson Noise. 02139 2–7.
- [148] Mutlu, S. (2013) ELEKTRONİK TRANSPORT MEKANİZMALARININ PULSLU ÖLÇÜM TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ, Anadolu Üniversitesi, 2013.
- [149] Chen, L., Chen, F., Kai, J., Chang, L., Ho, J., Jong, C., et al. (1999) Microstructural investigation of oxidized Ni / Au ohmic contact to p-type GaN Microstructural investigation of oxidized Ni / Au ohmic contact to p-type GaN. 3826 (1999), 1–8.
- [150] Yuan, M., Li, H., Zeng, J., Fan, H., Dai, Q., Lan, S., et al. (2014) multiple quantum wells excited by 2 . 48-  $\mu$  m femtosecond laser pulses. 39 (12), 3555–3558.
- [151] Ekinci, H., Kuryatkov, V. V., Forgey, C., Dabiran, A., Jorgenson, R., and Nikishin, S.A. (2018) Properties of InGaN/GaN MQW LEDs grown by MOCVD with and without hydrogen carrier gas. *Vacuum*. 148 168–172.
- [152] Chen, Z., Xu, K., Qin, Z., Yu, T., Tong, Y., Song, J., et al. (2007) Origins of double emission peaks in electroluminescence spectrum from InGaN/GaN MQW

- LED. *Pan Tao Ti Hsueh Pao/Chinese Journal of Semiconductors*. 28 (7), 1121–1124.
- [153] Reshchikov, M.A. and Morkoç, H. (2005) Luminescence properties of defects in GaN. *Journal of Applied Physics*. 97 (6),.
- [154] Arif, R.A., Zhao, H., Ee, Y.K., and Tansu, N. (2008) Spontaneous emission and characteristics of staggered InGaN quantum-well light-emitting diodes. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 44 (6), 573–580.
- [155] Bezyazychnaya, T. V., Kabanau, D.M., Kabanov, V. V., Lebiadok, Y. V., Ryabtsev, A.G., Ryabtsev, G.I., et al. (2015) Influence of vacancies on indium atom distribution in InGaAs and InGaN compounds. *Lithuanian Journal of Physics*. 55 (1), 10–16.
- [156] Zhang, F., Ikeda, M., Zhou, K., Liu, Z., Liu, J., Zhang, S., et al. (2015) Injection current dependences of electroluminescence transition energy in InGaN/GaN multiple quantum wells light emitting diodes under pulsed current conditions. *Journal of Applied Physics*. 118 (3),.
- [157] Cai, W., Yang, Y., Gao, X., Yuan, J., Yuan, W., Zhu, H., et al. (2016) On-chip integration of suspended InGaN/GaN multiple-quantum-well devices with versatile functionalities. *Optics Express*. 24 (6), 6004.
- [158] Hu, X.L., Wang, H., and Zhang, X.C. (2015) Fabrication and characterization of GaN-based light-emitting diodes without pre-activation of p-type GaN. *Nanoscale Research Letters*. 10 (1),.
- [159] Ekinci, H., Kuryatkov, V. V., Forgey, C., Dabiran, A., Jorgenson, R., and Nikishin, S.A. (2018) Properties of InGaN / GaN MQW LEDs grown by MOCVD with and without hydrogen carrier gas. *Vacuum*. 148 168–172.
- [160] Nguyen, X.L., Nguyen, T.N.N., Chau, V.T., and Dang, M.C. (2010) The fabrication of GaN-based light emitting diodes (LEDs). *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 1 (2),.
- [161] Seo, D.J. and Lee, D.S. (2016) Improvement of light extraction for a target wavelength in InGaN/GaN LEDs with an indium tin oxide dual layer by oblique angle deposition. *Applied Physics Express*. 9 (8),.
- [162] Chen, C.H., Chang, S.J., Su, Y.K., Chi, G.C., Sheu, J.K., and Chen, J.F. (2002) High-efficiency InGaN-GaN MQW green light-emitting diodes with CART and DBR structures. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 8 (2),

284–288.

- [163] Otsuji, N., Fujiwara, K., and Sheu, J.K. (2006) Electroluminescence efficiency of blue InGaN/GaN quantum-well diodes with and without an n-InGaN electron reservoir layer. *Journal of Applied Physics*. 100 (11),.
- [164] Tsai, S.C., Li, M.J., Fang, H.C., Tu, C.H., and Liu, C.P. (2018) Efficiency enhancement of blue light emitting diodes by eliminating V-defects from InGaN/GaN multiple quantum well structures through GaN capping layer control. *Applied Surface Science*. 439 1127–1132.
- [165] Kim, K., Hua, M., Liu, D., Kim, J., Chen, K.J., and Ma, Z. (2018) Efficiency enhancement of InGaN/GaN blue light-emitting diodes with top surface deposition of AlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Nano Energy*. 43 (November 2017), 259–269.
- [166] Kuo, C.H., Chang, S.J., Su, Y.K., Chen, J.F., Wu, L.W., Sheu, J.K., et al. (2002) InGaN/GaN light emitting diodes activated in O<sub>2</sub> ambient. *IEEE Electron Device Letters*. 23 (5), 240–242.

Click or tap here to enter text.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Selman MUTLU  
Yabancı Dili : İngilizce  
Doğum Yeri ve Yılı : Eskişehir / 1981  
E-Posta : selman.mutlu@istanbul.edu.tr

### Eğitim Geçmişi:

Lise: Eskişehir Anadolu Teknik Lisesi, 1999

Önlisans: Anadolu Üniversitesi, Porsuk MYO Bilgisayar Programcılığı, 2002

Lisans: Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, 2008

Yüksek Lisans: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilimdalı, 2013

### Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. SARCAN FAHRETTİN, MUTLU SELMAN, ÇOKDUYGULULAR ERMAN, DÖNMEZ ÖMER, EROL AYSE, Puustinen Janne, Guina Mircea (2018). A study of electric transport in n- and p-type modulation-doped GaInNAs/GaAs quantum well structures under a high electric field. Semiconductor Science and Technology, 33(6), 64003, Doi: 10.1088/1361-6641/aabc39 (Yayın
2. ÇETİNKAYA ÇAĞLAR, MUTLU SELMAN, DÖNMEZ ÖMER, EROL AYSE (2017). Characterization of emitted light from travelling Gunn domains in Al<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>As alloy based Gunn devices. Superlattices and Microstructures, 111, 744-753., Doi: 10.1016/j.spmi.2017.07.028 (Yayın No: 3660867)
3. NUTKU REFHAT, ÇOKDUYGULULAR ERMAN, DÖNMEZ ÖMER, SARCAN FAHRETTİN, KURUOĞLU FURKAN, MUTLU SELMAN, YILDIRIM SAFFETTİN, EROL AYSE (2017). Effect of thermal annealing and nitrogen composition on quantum transport in GaInNAs alloy based modulation doped quantum well structures. Journal of Alloys and Compounds, 695, 404-409., Doi: 10.1016/j.jallcom.2016.11.101 (Yayın No: 3660864)

4. TIRAS ENGIN, MUTLU SELMAN, Naci Balkan (2016). Power Loss Mechanisms in Indium Rich InGaN Samples. Journal of Electronic Materials, 45(2), 867-871., Doi: 10.1007/s11664-015-4250-2 (Yayın No: 1712498)
5. Fahrettin Sarcan, NUTKU FERHAT, DÖNMEZ ÖMER, KURUOĞLU FURKAN, MUTLU SELMAN, EROL AYŞE, YILDIRIM SAFFETTİN, ARIKAN MEHMET ÇETİN (2015). Quantum oscillations and interference effects in strained n and p type modulation doped GaInNAs GaAs quantum wells. Journal of Physics D: Applied Physics, 48(30), 305108, Doi: 10.1088/0022-3727/48/30/305108 (Yayın No: 1712419)
6. TIRAS ENGIN, Ozlem Celik, MUTLU SELMAN, Sükrü Ardalı, LİŞESİVDİN SEFER BORA, ÖZBAY EKMELE (2012). Temperature dependent energy relaxation time in AlGaIn GaN heterostructures. Superlattices and Microstructures, 51(6), 733-744., Doi: 10.1016/j.spmi.2012.03.029 (Yayın No: 1717673)
7. Khalil Mohammed Khalil, Mazzucato Simone, Ardalı Şükrü, Çelik Özlem, Mutlu Selman, Royall Ben, Tıraş Engin, Naci Balkan, Janne Puustinen, Ville Marcus Korpijärvi, Mircea Guina (2012). Temperature and magnetic field effect on oscillations observed in GaInNAs GaAs multiple quantum wells structures. Materials Science and Engineering: B, 177(10), 729-733., Doi: 10.1016/j.mseb.2011.12.022 (Yayın No: 1717515)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler :

1. EROL AYŞE, MUTLU SELMAN, LİŞESİVDİN SEFER BORA, TIRAŞ ENGIN (2017). Hot electron transport based devices for optoelectronics. International Conference on Condensed Matter and Materials Science (Özet Bildiri/Davetli Konuşmacı)(Yayın No:3847488).
2. MUTLU SELMAN, TIRAŞ ENGIN, EROL AYŞE, LİŞESİVDİN SEFER BORA (2017). Evolution of HELLISH devices: Colourful story of HELLISH Devices from IR to VIS light. The Physics of Optoelectronic Materials and Devices (Özet Bildiri/Davetli Konuşmacı)(Yayın No:3847601).

3. Çetinkaya Çağlar,MUTLU SELMAN,DÖNMEZ ÖMER,EROL AYŞE (2016). Light Emission from  $Al_{0,08}Ga_{0,92}As$  Gunn Device. Nanophotonics and Micro/Nano Optics International Conference 2016 (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:3102450).
4. Çetinkaya Çağlar,MUTLU SELMAN,DÖNMEZ ÖMER,EROL AYŞE (2016). STIMULATED LIGHT EMISSION from GUNN DOMAINS in FABRY PÉROT  $Al_{0,08}Ga_{0,92}As$  GUNN DEVİCE. Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3098433).
5. NUTKU FERHAT,DÖNMEZ ÖMER,Çokduygulular Erman,SARCAN FAHRETTİN,KURUOĞLU FURKAN,MUTLU SELMAN,YILDIRIM SAFFETTİN,EROL AYŞE (2016). INVESTIGATION OF ELECTRONIC TRANSPORT PROPERTIES IN  $GaInNAs$   $GaAs$  QUANTUM WELL STRUCTURES. Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3098508).
6. MUTLU SELMAN,Çokduygulular Erman,Çetinkaya Çağlar,SARCAN FAHRETTİN,DÖNMEZ ÖMER,EROL AYŞE (2016). ELECTRONIC TRANSPORT PROPERTIES OF P TYPE  $GaInNAs$   $GaAs$  QUANTUM WELL STRUCTURES. Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:3098560).
7. NUTKU FERHAT,SARCAN FAHRETTİN,DÖNMEZ ÖMER,KURUOĞLU FURKAN,MUTLU SELMAN,EROL AYŞE,YILDIRIM SAFFETTİN,ARIKAN MEHMET ÇETİN (2015). Temperature and electric field dependence of localization in modulation doped  $GaInNAs$   $GaAs$  quantum well structures. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union-BPU9, 161 (/)(Yayın No:1718418).
8. Çetinkaya Çağlar,MUTLU SELMAN,DÖNMEZ ÖMER,EROL AYŞE (2015). Investigation of Light Emission Based on Gunn Effect in n type  $GaAs$ . 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (/)(Yayın No:1718351).
9. TIRAŞ ENGİN,MUTLU SELMAN,Şükrü ardalı,NACİ BALKAN (2015). Power loss mechanisms in  $InGaN$   $GaN$  Samples. European Materials Search Society (/)(Yayın No:2260961).
10. ARDALI ŞÜKRÜ,MUTLU SELMAN,TIRAŞ ENGİN,ARSLAN ENGİN, ÖZBAY EKMEK (2013). Hot Electron Energy Relaxation in  $Al_{0,83}In_{0,17}N/AlN$



GaN heterostructure. Scientific final meeting of the COST-MP0805 action (/)(Yayın No:1718177).

11. MUTLU SELMAN, ARDALI ŞÜKRÜ, TIRAŞ ENGİN, NACİ BALKAN (2013). High Field Hot Electron Energy Relaxation in InGaN GaN Samples. Scientific final meeting of the COST-MP0805 action. (Novel gain materials and devices based on III-V-N compounds) (/)(Yayın No:1718210).

#### Ulusal ve Uluslararası Projeler

- Geniş yasak enerji aralıklı sıcak elektron lazer ve ışın yayıcı yarıiletken hetero yapılar, BAP, Araştırmacı, 2014 -2017 (ULUSAL).
- Manyeto fotoluminesans Shubnikov de Haas ve Raman Ölçümlerinden III/V-N Yapılardaki Taşıyıcıların Etkin Kütle Tayini, Avrupa Birliği, Bursiyer, 2010-2013 (ULUSLARARASI).

III/V-N Yapıların Elektronik Transport Özelliklerinin Manyeto Fotoluminesans Shubnikov de Haas ve Raman Kayması Yöntemiyle İncelenmesi, TÜBİTAK PROJESİ, Bursiyer, 2010-2012 (ULUSAL).