



**SICAK ELEKTRON TABANLI OPTİK
SENSÖRLER**

Doktora Tezi

FEYZA SÖNMEZ

Eskişehir 2024

SICAK ELEKTRON TABANLI OPTİK SENSÖRLER

Feyza SÖNMEZ

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2024

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından kabul edilen 121F181 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Feyza SÖNMEZ'in SICAK ELEKTRON TABANLI OPTİK SENSÖRLER başlıklı çalışması 18/01/2024 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	: Prof. Dr. Engin TIRAŞ	
Üye	: Prof. Dr. İbrahim KANI	
Üye	: Prof. Dr. Uğur SERİNCAN	
Üye	: Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Selman MUTLU	

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

18/01/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ęrencisi Feyza SÖNMEZ, SICAK ELEKTRON TABANLI OPTİK SENSÖRLER başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun grlmştir.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Engin TIRAş

ÖZET

SICAK ELEKTRON TABANLI OPTİK SENSÖRLER

Feyza SÖNMEZ

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2024

Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

Bu çalışmada, sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer yarıiletken heteroeklem (*Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure*, HELLISH) bir aygıt olarak tasarlanan farklı kuantum kuyu genişliğine sahip olan GaAs/Al_{0.31}Ga_{0.69}As yapısının XOR, NOT, OR ve NAND optik mantık kapıları olarak çalışabilme özellikleri araştırıldı. GaAs/AlGaAs heteroeklem yapısı, *p*-tipi ve *n*-tipi Al_{0.31}Ga_{0.69}As tabakalarının arasında *n*-tipi Al_{0.31}Ga_{0.69}As tabaka içine GaAs kuantum kuyusunun yerleştirilmesi şeklinde tasarlandı. GaAs/ Al_{0.31}Ga_{0.69}As tabakaları yarı-yalıtkan GaAs alttaş üzerine, Moleküler Demet Epitaksi (*Molecular Beam Epitaxy*, MBE) sistemi kullanılarak büyütüldü. *p-n* eklemine doğrusal olmayan bir potansiyel dağılımı elde edebilmek için büyütülen aygıtların Top Hat HELLISH (THH) geometrisinde fabrikasyonu yapıldı. Sıcaklığa bağlı fotoluminesans, farklı gerilim değerleri altında dalga boyuna bağlı elektrolüminesans ve akım-voltaj ölçümleri gerçekleştirilerek THH aygıtların ışın aygıt parametreleri elde edildi. Elektriksel kontak bağlantısı yapılan THH aygıtlara atmalı gerilimler uygulanarak XOR, NOT, OR ve NAND mantık kapılarının çalışma prensibine göre aygıttan ışın elde edildi. Girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının elde edilmesi araştırıldı. Fiber optik kablodan gelen ışının var ("1") ve yok ("0") olması durumunda, XOR, NOT OR ve NAND mantık kapısı çalışma prensibine göre THH aygıttan ışın elde edildi. Bu THH yapıların girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapısı olarak kullanılabileceği gösterildi.

Anahtar Sözcükler: Top Hat HELLISH (THH) 1, Sıcak elektron 2, GaAs/AlGaAs 3, Optik mantık kapısı 4

ABSTRACT

HOT ELECTRON BASED OPTICAL SENSORS

Feyza SÖNMEZ

Department of Physics

Programme in Solid State Physics

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2024

Supervisor: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

In this study, the ability of a GaAs/ $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ structure with different quantum well widths, designed as Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure (HELLISH), is investigated to operate as XOR, NOT, OR, and NAND optical logic gates. The GaAs/ $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ heterojunction structure is designed by placing the GaAs quantum well in the n-side depletion layer between the p-type and n-type $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ layers. GaAs/ $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ epi-layers are grown on semi-insulating GaAs substrates by the Molecular Beam Epitaxy (MBE) system. In order to obtain a nonlinear potential distribution at the p-n junction, the grown devices are fabricated in Top Hat HELLISH (THH) geometry. Temperature-dependent photoluminescence, wavelength-dependent electroluminescence under different voltage values, and current-voltage measurements are performed to obtain the radiation device parameters of THH devices. By applying a pulsed voltage to the contacts of the THH devices, emission was obtained from the device according to the operating principle of XOR, NOT, OR, and NAND logic gates. It is investigated to obtain optical logic gates with input and output light. In the presence ("1") and absence ("0") of the light coming from the fiber optic cable, emission from the THH device is obtained according to the XOR, NOT OR, and NAND logic gate operating principle. It is shown that these THH structures can be used as an optical logic gate whose input light and output light.

Keywords: Top Hat HELLISH (THH) 1, Hot electron 2, GaAs/AlGaAs 3, Optical logic gate 4.

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım ve tez çalışmam süresince, değerli bilgilerini, tecrübelerini, ilgi ve yardımını hiçbir koşulda esirgemeyen, yol göstericiliğini ve ilham veren çalışma azmini akademik hayatım boyunca benimseyeceğim danışman hocam **Prof. Dr. Engin TIRAŞ**'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen **Öğr. Gör. TULAY TIRAŞ**'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın ve akademik yolculuğumun her anında yanımda olan destek ve bilgilerini esirgemeyen **Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ARDALI**'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tezim süresince incelediğim yapıların üretim sürecindeki destek ve sağladıkları imkanlardan dolayı **Prof. Dr. Uğur SERİNCAN**'a, **Dr. Öğr. Üyesi Burcu ARPAPAY**'a ve Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı ekibine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

2023 yılında aramızdan ayrılan, tez çalışmalarım sırasında her türlü fikir ve bilgileri ile yön gösteren **Prof. Dr. Engin ARSLAN**'ı saygı ve rahmetle anıyorum.

Tez izleme jürimde bulunan bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren **Prof. Dr. İbrahim KANI**'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında bilgi paylaşımları ve destekleri için **Prof. Dr. Ayşe EROL**'a ve **Dr. Öğr. Üyesi Selman MUTLU**'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen **Umut BAY**'a ve **Hasan OLĞAR**'a teşekkür ederim.

Beni yetiştiren, hayatımın her anında yanımda olan varlıklarıyla mutlu olduğum canım babam **Adem SÖNMEZ**'e, biricik annem **Hatice SÖNMEZ**'e kardeşlerim **İrfan SÖNMEZ** ve **Tuğba SÖNMEZ BAYRAKTAR**'a, gösterdikleri fedakârlık ve destekleri için sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum. Her teyze dediğinde mutlu olduğum yeğenim **Arda BAYRAKTAR**'a sevgilerimi sunuyorum. Kaybettiğim canım dayım **Nurettin DÖNDER**'i rahmetle anıyorum.

Doktora sürecimde desteklerinden dolayı Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK 100/2000 Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı Sensör Teknolojileri) ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı Mikro/Nano/Opto-elektromekanik Sistemler alanı ve TÜBİTAK 2250-Lisansüstü Bursları Performans Programı) teşekkürlerimi sunarım.

Feyza SÖNMEZ

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.

Feyza SÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XVIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIX
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XXI
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. GaAs ve AlGaAs Yarıiletkenleri.....	3
2.1.1. Kristal yapısı	3
2.1.2. Bant yapısı.....	4
2.2. Optik Mantık Kapıları.....	7
2.3. Işık Yayan Diyotlar (LED)	11
2.4. p-n Eklem.....	11
2.5. Sıcak Elektron Işın Yayıcı ve Lazer Yarıiletken Heteroeklem (<i>Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure, HELLISH</i>)	14
2.6. HELLISH Yapılar.....	15
2.7. Top Hat HELLISH (THH) Yapılar.....	24

3. ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI VE DENEYSEL YÖNTEMLER.....	29
3.1. THH Örneklerin Yapısı.....	29
3.2. Fabrikasyon Aşamaları	31
3.2.1. Kristal kesme	31
3.2.2. Kristal temizleme.....	32
3.2.3. Fotolitografi	33
3.2.4. Banyolama (Develop)	35
3.2.5. Aşındırma.....	35
3.2.6. Metalizasyon	37
3.2.7. Isıl işlem (Tavlama).....	39
3.2.8. Altın tel bağlama	40
3.2.9. Aygıt üretim reçetesi	41
3.3. Aygıt Karakterizasyonu.....	46
3.3.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı (HR-XRD) ölçümleri	46
3.3.2. Sıcaklığa bağlı fotoluminesans ölçümleri.....	48
3.3.3. Elektrolümenisans deney düzeneği.....	50
3.3.4. Foto-akım ölçümleri.....	53
4. DENEYSEL SONUÇLAR	54
4.1. Yapısal Karakterizasyon Bulguları.....	54
4.2. Fotoluminesans Ölçümleri.....	58
4.3. Foto-Akım Ölçüm Sonuçları	62
4.4. Optik Mantık Kapısı Ölçümleri.....	66
4.4.1. Klasik LED ölçümleri	67
4.4.1.1. THH-GaAs-5 aygıtı.....	67
4.4.1.2. THH-GaAs-13 aygıtı.....	71
4.4.2. Özel VEYA (XOR) mantık kapısı ölçümleri.....	75
4.4.2.1. THH-GaAs-5 aygıtı.....	75
4.4.2.2. THH-GaAs-13 aygıtı.....	81
4.4.3. DEĞİL (NOT) mantık kapısı ölçümleri	88
4.4.4. VEYA (OR) mantık kapısı ölçümleri	88
4.4.4.1. THH-GaAs-5 aygıtı.....	89
4.4.4.2. THH-GaAs-13 aygıtı.....	93

4.4.5. VE DEĞİL (NAND) mantık kapısı ölçümleri.....	98
4.4.5.1. THH-GaAs-5 aygıtı.....	98
4.4.5.2. THH-GaAs-13 aygıtı.....	103
4.5. Giriş Işın Çıkışı Işın Olan Mantık Kapısının Elde Edilmesi.....	108
5. GENEL SONUÇLAR.....	114
KAYNAKÇA.....	117
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. T=300 K’de GaAs ve Al _x Ga _{1-x} As’ın bazı fiziksel parametreleri [22,23]	6
Tablo 2.2. Temel mantık kapılarının sembol ve doğruluk tabloları (A ile B ikili giriş değerleri ve X, mantık kapısı çıkışını temsil etmektedir)	7
Tablo 4.1. GaAs-5 ve GaAs-13 kodlu örneklere ait deneysel fotolüminesans verilerine Varshni kuramsal uyum eğrisinin geçirilmesiyle elde edilen parametreler	61



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. GaAs kristalografik yapısı [17]	4
Şekil 2.2. GaAs bileşiğinin enerji bant diyagramı [19]	5
Şekil 2.3. Silikon tabanlı fotonik kristal ile XOR optik mantık kapısının gösterimi (a) tek bir ışık sinyalinin A girişinden (b) B girişinden enjekte olması ve (c) iki ışık sinyalinin hem A hem de B den enjekte edilmesiyle, C çıkışından ışık sinyalinin eldesi [51]	10
Şekil 2.4. Denge durumunda p-n eklem bant diyagramı	12
Şekil 2.5. İleri yönde beslenen heteroeklem LED	13
Şekil 2.6. HELLISH-1 aygıt yapısının şematik gösterimi [3]	15
Şekil 2.7. Tabakalara paralel uygulanan elektrik alan altında HELLISH-1 aygıtının enerji bant profilinin şematik gösterimi (I_{th} ve I_{tu} sırasıyla termiyonik ve tünelleme akımıdır. I_{de} ve I_{dh} sırasıyla, elektron ve boşluk sürüklenme akımıdır. I_{th} sıcak boşlukların kuyu içerisine difüzyon akımıdır.) [70,79]	16
Şekil 2.8. HELLISH-2 aygıt yapısının şematik gösterimi [79]	17
Şekil 2.9. HELLISH-2 aygıtın bant profilinin gösterimi [67,80,82]	18
Şekil 2.10. UB-HELLISH aygıtın tabaka yapısı [70]	19
Şekil 2.11. HELLISH-VCSEL aygıtın tabaka yapısı [73,88]	20
Şekil 2.12. Standart HELLISH aygıtı için 3D enerji bant modeli. Değerlik bandı ve iletim bandı üzerindeki yarı-düz bant (kesikli çizgi) oluşumun şematik gösterimi. Beyaz ve siyah oklar sırasıyla boşlukların ve elektronların sürüklenme ve difüzyonunu gösterir. Dolu olmayan ok ise yeniden birleşmenin olduğu kısmı gösterir ve hV_1 enerjili ışıma meydana gelir [85,89,90]	21
Şekil 2.13. HELLISH aygıtının yarı-düz bant koşulları altında uygulanan dış bir boyuna elektrik alan ile enerji bantlarında meydana gelen eğilmeler ve aygıtın ışıma durumu. (CB iletim bandı ve VB değerlik bandını göstermektedir) (a) $E_a = 0$ V/cm, (b) ($E_a < V_{bi}/l$) (c) ($E_a = V_{bi}/l$), (d) ($E_a > V_{bi}/l$) [76,89]	23
Şekil 2.14. Farklı eğilme yönlerine sahip HELLISH aygıtının çift yönlülüğünün gösterimi [76]	24

Şekil 2.15. Uzunluğu l_0 olan HELLISH aygıtının p-kanal boyunca doğrusal olmayan potansiyel dağılımı. Buruda n-kanal kontaktları ohmik iken p-kanal kontaktları ohmik değildir [76]	25
Şekil 2.16. (a) THH aygıt ve kontak yapısının şematik gösterimi. (b) p-kanal ve n-kanal boyunca oluşan potansiyel dağılımı. Aygıt, $V_p > V_n$ bölgesinde ileri besleme, $V_n > V_p$ bölgesinde geri besleme durumundadır [76,77,91]......	27
Şekil 2.17. Heteroeklem boyunca potansiyel dağılımı. V_r ve V_f sırasıyla eklem bölgesinde maksimum geri ve ileri besleme, V_a ise uygulanan ve ΔV voltaj farkıdır. l_1, l_2, l_3 ve l_4 ise kontak konumlarıdır [76].	28
Şekil 2.18. InGaN/GaN THH aygıtının farklı elektrik alan değerleri altında (a) pozitif ve (b) negatif beslemede elektrolüminesans spektrumu [4].....	28
Şekil 3.1. Örneğin tabaka yapısı ve kalınlıklarının şematik gösterimi	30
Şekil 3.2. Elmas kesici ile kristal yonganın kesilmesinin şematik gösterimi.	32
Şekil 3.3. Maske üzerindeki dörtlü THH desen tasarımı.....	34
Şekil 3.4. Islak aşındırma sürecinin şematik gösterimi.	36
Şekil 3.5. THH aygıt fabrikasyon aşamalarının şematik gösterimi. (Kristal yonga kesimi (1), örneğin fotodirenç kaplanması (2), hafif ısıtma (3), mesa deseni maskeleme (4), banyolama (5), sert ısıtma (6), ıslak aşındırma (7), fotodirenç kaplama (8), hafif ısıtma (9), n-tipi kontak maskeleme (10), banyolama (11), metal kaplama (12), lift-off (13), fotodirenç kaplama (14), hafif ısıtma (15), p-tipi kontak maskeleme (16), banyolama (17), metal kaplama (18), fabrikasyonu tamamlanan aygıt (19).).....	41
Şekil 3.6. Bir kristaldeki X-ışını kırınımı.	47
Şekil 3.7. Bir yarıiletken de ışımalı ışımasız olası geçişler.	49
Şekil 3.8. THH aygıtlarının ölçümleri için hazırlanan EL deney düzeneği.	51
Şekil 3.9. Kare dalga için iş döngü şeması. (V_H , kare dalga'nın tepe noktasındaki, V_L , ise çukurdaki değerini ifade eder)......	52
Şekil 4.1. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerle ait farklı noktalardan alınan GaAs (004) civarında X-ışını sallantı eğrisi grafiği	55
Şekil 4.2. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin GaAs (004) civarında X-ışını sallantı eğrisi grafiği	56

Şekil 4.3. X'Pert Epitaxy programında yapılan (a) GaAs-13 ve (b) GaAs-5 kodlu örnek yapılarının simülasyonu. Mavi renk, ölçülen ω -2 θ ölçüm grafiğini, kırmızı renk simülasyon işleminin sonucunu temsil etmektedir.....	58
Şekil 4.4. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin oda sıcaklığına ait fotoluminesans spektrumu.....	59
Şekil 4.5. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumu.....	60
Şekil 4.6. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin GaAs kuyuya ait geçişlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri	62
Şekil 4.7. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu aygıtlar için farklı sıcaklıklarda uygulanan voltaja bağlı akım değişimi.....	63
Şekil 4.8. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu aygıtların uyarıcı lazer altında uygulanan voltaja karşı fotoakım yoğunluğu değişimi	65
Şekil 4.9. Özel veya (XOR) mantık kapısı için fabrikasyonu tamamlanan THH aygıtın tabaka yapısı ve elektriksel bağlantıların şematik gösterimi.....	66
Şekil 4.10. THH-GaAs-5 aygıtının (a) n-tipi kontakların (b) p-tipi kontakların I-V değişim grafiği	68
Şekil 4.11. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen I-V grafiği.....	69
Şekil 4.12. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen EL grafiği.....	70
Şekil 4.13. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen normalize EL grafiği.....	71
Şekil 4.14. THH-GaAs-13 aygıtının (a) n-tipi kontakların (b) p-tipi kontakların I-V değişim grafiği	72
Şekil 4.15. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen I-V grafiği	73
Şekil 4.16. THH-GaAs-13 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen EL grafiği.....	74
Şekil 4.17. THH-GaAs-13 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen normalize EL grafiği.....	75

Şekil 4.18. 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında THH-GaAs-5 aygıtının voltaja bağlı akım değişimi.....	76
Şekil 4.19. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) 12V34T ve (b) 12T34V kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu.....	77
Şekil 4.20. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonunda uygulanan elektrik alana bağlı EL şiddeti grafiği	78
Şekil 4.21. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın sıcaklığa bağlı (a) 12T34V (b) 12V34T ve (c) 3 K sıcaklığında 12V34V kontak konfigürasyonunda elde edilen elektrolüminesans spektrumu.....	79
Şekil 4.22. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 12T34V ve 12V34T kontak konfigürasyonunda normalize edilmiş elektrolüminesans spektrumunun karşılaştırılması	81
Şekil 4.23. 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında THH-GaAs-13 aygıtının voltaja bağlı akım değişimi.....	82
Şekil 4.24. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) 12V34T ve (b) 12T34V kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu.....	83
Şekil 4.25. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonunda uygulanan elektrik alana bağlı EL şiddeti grafiği	84
Şekil 4.26. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın sıcaklığa bağlı (a) 12T34V (b) 12V34T ve (c) 3 K sıcaklığında 12V34V kontak konfigürasyonunda elde edilen elektrolüminesans spektrumu.....	85
Şekil 4.27. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 12T34V ve 12V34T kontak konfigürasyonunda normalize edilmiş elektrolüminesans spektrumunun karşılaştırılması	87
Şekil 4.28. THH yapıda OR ve NAND mantık kapıları için elektriksel bağlantıların şematik gösterimi.....	88
Şekil 4.29. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumu.....	89

Şekil 4.30. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu.....	91
Şekil 4.31. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 200 V atma voltajı altında A0B1C0, A1B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonlarının için elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu.....	93
Şekil 4.32. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumu.....	94
Şekil 4.33. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu.....	96
Şekil 4.34. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın sabit atma voltajı altında A0B1C0, A1B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonlarında elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu.....	98
Şekil 4.35. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A0B0C1, (b) A0B1C1, (c) A1B0C1 için sıcaklığa bağlı ve (d) A1B1C1 kontak konfigürasyonu için 3 K sıcaklığında elektrolüminesans spektrumu	99
Şekil 4.36. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A0B0C1 (b) A0B1C1 ve (c) A1B0C1 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu.....	101
Şekil 4.37. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın sabit atma voltajı altında A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonlarında elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu.....	103
Şekil 4.38. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A0B0C1 (b) A0B1C1 (c) A1B0C1 ve (d) A1B1C1 kontak konfigürasyonunda elde edilen sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumu.....	104
Şekil 4.39. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A0B0C1 (b) A0B1C1 ve (c) A1B0C1 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu.....	106
Şekil 4.40. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın sabit atma voltajı altında A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonlarında elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu.....	108

Şekil 4.41. Giriş ve çıkışı ışın olması tasarlanan mantık kapıların çalışma prensibi ...	109
Şekil 4.42. Girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının elde edilmesi için kurulan deney üç boyutlu tasarımı	109
Şekil 4.43. PC aygıttan üretilen fotoakım değerlerinin yükseltilmesi için tasarlanan elektronik kartın üç boyutlu görünümü	112



GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Örneklerin büyütüldüğü MBE sisteminin genel görünümü	29
Görsel 3.2. MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı	35
Görsel 3.3. Fotolitografi yöntemi ile hazırlanan THH geometrisindeki dörtlü aygıt.....	40
Görsel 3.4. Altın tel bağlantısı tamamlanan THH geometrisindeki dörtlü aygıt	40
Görsel 3.5. Halka kontak geometrisinde fabrikasyonu tamamlanan örnek	45
Görsel 3.6. Panalytical X'Pert Pro MRD marka yüksek çözünürlüklü X-ray kırınımı sistemi (HR-XRD)	48
Görsel 3.7. Sıcaklığa bağlı fotolüminesans deney düzeneği	50
Görsel 3.8. THH aygıtların elektrolüminesans ölçümleri sırasında elde edilen osiloskop ekran görüntüsü.	53
Görsel 4.1. Girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının elde edilmesi için kurulan deney düzeneği	110
Görsel 4.2. Fiber optik uç tutucu ve altı eksenli konumlandırıcı üzerine yerleştirilen PC aygıtın görünümü	111
Görsel 4.3. THH aygıttan yayılan ışının (a) toplandığı deney düzeneği ve (b) elde edilen spektrumun görünümü	112

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

%DC	: Yüzde İş Döngüsü
AlGaAs	: Alüminyum Galyum Arsenik
AlN	: Alüminyum Nitrür
AND	: Ve Mantık Kapısı
DBR	: Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları
DC	: Doğru Akım
DI	: De İyonize
FCC	: Yüzey Merkezli Kübik
FWHM	: Tam Yüksekliğin Yarı Genişliği
GaAs	: Galyum Arsenik
GaN	: Galyum Nitrür
HNLF	: Yüksek Düzeyde Doğrusal Olmayan Fiber
HELLISH	: Sıcak Elektron Işın Yayıncı ve Lazer Yarıiletken Heteroeklem
InGaN	: İndiyum Galyum Nitrür
LED	: Işık yayan diyot
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
NAND	: Ve Değil Mantık Kapısı

NOT	: Değil Mantık Kapısı
OR	: Veya Mantık Kapısı
PL	: Fotolüminesans
PW	: Atma (<i>Pulse</i>) Genişliği
RHEED	: Yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı
RTA	: Hızlı Isıl İşlem
THH	: Top Hat HELLISH
UB	: Ultra Parlak
UV	: Ultra Viyole
VCSEL	: Dikey Oyuklu Yüzey Işımalı Lazer
VC SOA	: Dikey Oyuklu Yarıiletken Optik Yükselteç
XOR	: Özel veya Mantık Kapısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Au	: Altın
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
E _{lh1}	: Birinci Hafif Boşluk Enerji Seviyesi
E _{lh2}	: İkinci Hafif Boşluk Enerji Seviyesi
E _v	: Değerlilik Bandı Enerji Seviyesi
Ge	: Germanyum
hh	: Ağır Boşluk
I _d	: Difüzyon Akımı
In	: İndiyum
I _{örnek}	: Örnek Akımı

I_s	: Sürüklenme Akımı
I_{th}	: Termoiyonik Akım
I_{tu}	: Tünelleme Akım
J_{therm}	: Termoiyonik Akım Yoğunluğu
J_{tun}	: Tünelleme Akım Yoğunluğu
k_B	: Boltzman Sabiti
l_h	: Hafif Boşluk
L_z	: Kuantum Kuyu Genişliği
N_A	: Alıcı Katkı Yoğunluğu
N_D	: Verici Katkı Yoğunluğu
n_i	: Katkısız Katkı Yoğunluğu
n_n	: n Tipi Bölgedeki Elektronlar
n_p	: p Tipi Bölgedeki Elektronlar
p_n	: n Tipi Bölgedeki Boşluklar
p_p	: p Tipi Bölgedeki Boşluklar
$R_{eş}$	: Eşdeğer Direnç
$R_{yük}$	: Yük Direnci
Si	: Silisyum
T	: Sıcaklık

T_e	: Elektron Sıcaklığı
T_L	: Örgü Sıcaklığı
V_a	: Uygulanan Voltaj
V_b	: Bariyer Yüksekliği
V_{bi}	: Kontak Potansiyeli
V_H	: Kare Dalganın Tepe Noktası Değeri
V_f	: İleri Besleme Voltajı
$V_{giriş}$	: Atmalı Giriş Voltajı
V_r	: Geri Besleme Voltajı
V_R	: Yük Voltajı
V_s	: Sürüklenme Hızı
V_L	: Kare Dalganın Çukur Noktası Değeri
W	: Tüketim Bölge Genişliği
x	: Alaşım Konsantrasyonu
X	: Boyutsuz THH Parametresi
α	: Varshni Parametresi
β	: Debye Sıcaklığı
λ	: Dalgaboyu

1. GİRİŞ

Günümüzde, daha küçük boyutlarda ve daha yüksek hızda bilgi taşıma ve işleme sistemlerine yönelik sürekli ve giderek artan ihtiyacın doğması, bilgi taşıyıcısı olarak elektronlar yerine fotonların kullanılması fikrinin yaygınlaşmasına yol açmıştır. Bilgi iletimi ve işlemesi alanında elektronikten optiğe geçiş, hızlı veri iletimi, düşük güç tüketimi ve daha yüksek bant genişliği gibi avantajlar sunan bir dönüşüm olmuştur. Elektronikten optiğe geçişin temelini optik bileşenlerin geliştirilmesi ve entegrasyonu oluşturur.

Fiber optik iletişimi, temelde fotonlar aracılığıyla bilginin taşındığı hızla yayılan ve optik sinyallerin işlenmesi konusundaki ilgiyi arttıran bir teknolojidir. Dünya çapında her gün optik fiberler aracılığıyla büyük miktarda veri iletilmekte ve iletilen verilerin optik sinyal işlemesi için optik mantık kapılarından yararlanılmaktadır. Ayrıca, optik bilgisayarlarda da optik mantık kapıları, geleneksel elektronik devrelerden daha hızlı ve daha enerji verimli mantık işlemleri yapmak için kullanılır. Optik mantık kapıları, temel olarak optik sinyalleri giriş olarak alır, bu sinyalleri işler ve sonuç olarak optik bir çıkış üretir. Elektronik mantık kapıları gibi, optik mantık kapıları da temel mantıksal işlemleri (NOT, AND, OR, XOR) gerçekleştirebilir. Bir mikroişlemcinin ve buna bağlı olarak tüm elektronik devre elemanlarının yaptığı tüm aritmetik ve mantıksal işlemler, mantık kapılarıyla sağlanır. Optik mantık kapıları, optik sinyallerin ışık hızında iletilmesi sayesinde son derece yüksek işleme hızlarına ve paralel işlem yeteneği sayesinde çok sayıda işlemi aynı anda gerçekleştirebilme özelliğine sahiptir. Fotonik alanında, optik mantık kapılarını gerçekleştirmek için yaygın olarak fotonik kristaller olarak adlandırılan periyodik olarak kırılma indisinin değişimi ile belirli frekans aralıklarında ışığın geçebildiği veya engellendiği bölgeler olan fotonik bant yapısına sahip olan özel yapılar kullanılmaktadır. Fotonik kristaller, optik iletişim ve veri işleme alanında temel yapılar olan optik filtreler, optik anahtarlar, optik dalga kılavuzları ve optik mantık kapıları gibi optik cihazların tasarımlarında kullanılmakta ve gelişmekte olan teknolojidir [1]. Üretiminde karşılaşılabilecek kristal yapı karmaşıklığı, tasarımındaki zorluklar ve çalışma sıcaklık değerleri nedeniyle fotonik kristal yapılar optik mantık kapılarının pratik uygulamaları için zorlayıcı olabilmektedir.

İlk kez 1995 yılında Prof. Dr. Balkan ve grubu tarafından sıcak elektron etkisinden yararlanarak ışıma yapan bir aygıt olarak tasarlanan, sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer

yarıiletken heteroeklem (*Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure*, HELLISH) yapılar da optik mantık kapısı işlevini görmektedir [2]. Oldukça küçük boyutlarda üretilen sıcak elektron etkisi ile yüzey ışıması yapan HELLISH yapılar üretim kolaylığı ve oda sıcaklığı koşullarında çalışmasıyla optik mantık kapıları için fotonik kristallere alternatif olarak dikkat çekmektedir. HELLISH yapısı bir p - n eklemine yüklerden arındırılmış tüketim bölge (*depletion region*) tabakasının n -tarafına tek bir kuantum kuyusunun yerleştirilmesiyle elde edilir. Tüm katmanlara difüze olmuş iki elektriksel kontak ve katmanlara paralel olarak uygulanan elektrik alanla taşıyıcılar kendi kanallarında (elektronlar n -tarafında ve boşluklar p -tarafında) ısınarak daha yüksek enerji seviyelerine ulaşırlar. Sıcak elektron ve boşlukların kuantum kuyusu içinde ışımalı yeniden birleşmesiyle aygıtta yüzey ışıması meydana gelir [3]. Yaygın olarak, ışıma yapan aygıtlarda ışıma büyütme eksenini doğrultusunda polaritesi belirlenmiş elektrik alan uygulayarak elde edilirken, HELLISH yapılarda ışıma uygulanan elektrik alanın polaritesinden bağımsız olarak gözlenebilmektedir. Bununla birlikte ışıma dalga boyu kuantum kuyu katmanının genişliğine ve türüne bağlıdır.

Önceki çalışmalarda, HELLISH yapılar kuantum kuyu katmanları GaAs, GaInNAs, GaInAsP ve InGaN kullanılarak üretilmiş ve XOR (*özel veya*) optik mantık kapısı çalışma prensibi elde edilmiştir [4,5]. HELLISH yapılar; kuantum kuyu genişliği ve kuantum kuyusu malzemesi değiştirilerek istenilen bir dalgaboyunda; ışın yayıcı, fotodiyot, dalgaboyu dönüştürücü veya optik yükselteç aygıt olarak kullanılabilir [6]. Aygıtın bu özellikleri ve boyutlarının oldukça küçük olmasından dolayı, bu yapılar küçük bir alana ardı sıra dizilerek iki boyutlu bir matris şeklinde aygıt üretimi sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında, 850 nm dalgaboyunda çalışan fiber optik iletişim ağlarında kullanıma potansiyeli olan GaAs tabanlı HELLISH yapıların tasarım ve üretimleri yapılarak, girişi ve çıkışı ışın olarak çalışan mantık kapıların elektriksel ve optik özellikleri araştırıldı.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. GaAs ve AlGaAs Yarıiletkenleri

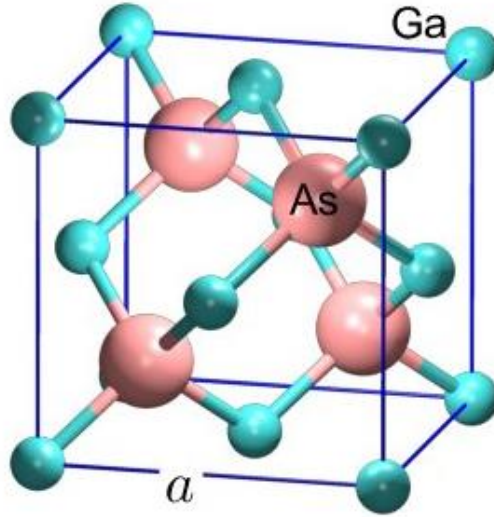
Doğrudan (*direkt*) bant aralığına sahip olan galyum arsenik (GaAs), periyodik tablonun III-A grubu galyum (Ga) ve V-A grubu arsenik (As) elementlerinden oluşan yarıiletken bileşimidir. GaAs bileşiği yüksek elektron mobilitesine sahip olduğundan, yüksek frekansta ve sıcaklıklarda düşük gürültü performansı sayesinde transistör, mikrodalga uygulamaları, uydu iletişimi, radar gibi aygıtların üretiminde kullanılırken, sahip olduğu doğrudan bant aralığı sayesinde; ışık algılayıcı ve ışık yayıcı aygıtlar olan LED, lazer, güneş hücreleri, fotodedektör, dalga kılavuzları ve fiber optik teknolojisi gibi alanlarda geniş uygulamaları mevcuttur [7–11].

GaAs bileşiği ilk kez 1929 yılında Goldschmidt tarafından sentezlenmiştir [12]. Güneş hücrelerinde kullanılma amacıyla GaAs kristali, 1955 yılında *Czochralski* yöntemiyle büyütülmüştür. Daha sonra 1965 yılında, Mead tarafından ilk GaAs temelli alan etkili transistörler (FET) üretilmiştir [13]. Ardından 1970 yılında Cho o zaman çağına göre yeni büyüme tekniği olan moleküler demet epitaksi (MBE) yöntemiyle yüksek vakum ortamında kaliteli optik ve elektriksel özelliklere sahip olan GaAs üzerine $Al_xGa_{1-x}As$ heteroeklem yapısını başarılı bir şekilde büyütülmüştür. Cho'nun bu çalışmaları ile GaAs/AlGaAs periyodik heteroeklem yapıların başarılı bir şekilde büyütülmesi, yüksek elektron mobilitesine sahip transistör, lazer ve fotodedektör aygıtlarının geliştirilmesine yol açmıştır [14]. GaAs, fiber optik iletişim, uydu haberleşme gibi alanlarda ise 1980'li yıllardan itibaren yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [15]. Günümüzde ise GaAs tabanlı aygıtlar, yüksek performansı ve geniş kullanım alanları nedeniyle yarıiletken teknolojisinde büyük yer almaktadır.

2.1.1. Kristal yapısı

GaAs bileşiğinin kristal yapısı *zinc-blende* yapısındadır. Bu yapıda, (0,0,0) konumuna yerleşmiş Ga atomlarından oluşan birinci yüzey merkezli kübik (*face centered cubic, fcc*) birim hücrenin içinde, $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ a kadar ötelenerek konumlanan As atomlarından oluşan ikinci yüzey merkezli kübik birim hücrenin iç içe geçmesiyle oluşur. Burada, “*a*” GaAs kristal örgü sabitidir. Şekil 2.1’de GaAs *zinc-blende* kristal yapısı görülmektedir. Her Ga atomu, dört komşu As atomuna sahiptir. Benzer şekilde, her As atomu, dört komşu Ga atomuna sahiptir. Ga ve As komşu atomları arasında bağ uzunluğu, $r_0 = 3a/4$ kadardır ve birbirinden $109,47^\circ$ ’lik açı kadar dört yüzlü bağ (tetrahedral) ile

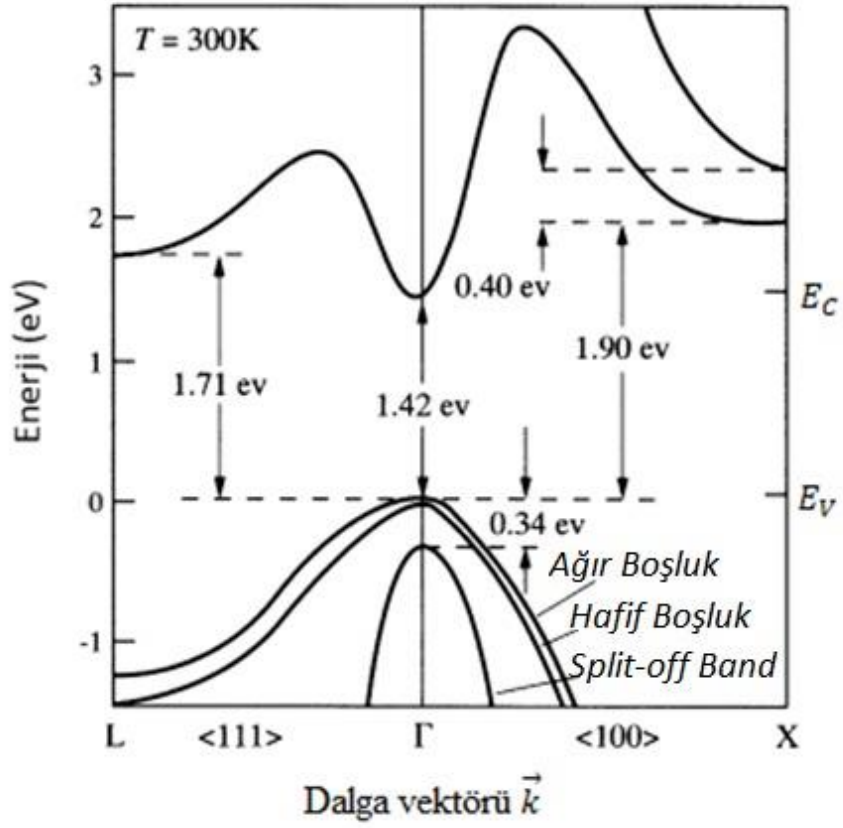
birbirinden ayrılır [16]. GaAs, atomların elektronlarının paylaşılması sonucu oluşan kovalent bağ yapısına sahiptir.



Şekil 2.1. GaAs kristalografik yapısı [17]

2.1.2. Bant yapısı

Şekil 2.2’de GaAs bileşiğinin enerji bant diyagramı görülmektedir. Enerji-momentum ($E-k$) ilişkisi incelendiğinde GaAs bileşiğinin doğrudan bant aralığına sahip olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında katkısız GaAs bileşiğinin enerji bant aralığı (E_g) 1,42 eV değerindedir [18]. GaAs bileşiğinin değerlik bandı $k = 0$ civarında üç alt banda ayrılır. Bu iki bant, sırasıyla ağır boşluk (*heavy hole*, hh), hafif boşluk (*light hole*, lh) ve spin yörünge etkileşiminden kaynaklanan ayrılma (*split-off*) bandıdır.



Şekil 2.2. GaAs bileşiğinin enerji bant diyagramı [19]

GaAs bileşiğinde, diğer bütün yarıiletkenler gibi, sıcaklığa bağlı olarak enerji bant aralığında bir kayma gösterir. Bu kayma, sıcaklığın artmasıyla birlikte, enerji bant aralığının azalmasına neden olur. GaAs enerji bant aralığının sıcaklığa bağlı değişimini veren ifade, Varshni tarafından türetilmiştir. Bu ifade, aşağıdaki gibidir:

$$E_g(T) = E_0 - (\alpha T^2 / (T + \beta)). \quad (2.1)$$

Burada, E_0 , $T=0$ K'de GaAs enerji bant aralığı, $E_g(T)$ ise T sıcaklığında GaAs enerji bant aralığı, α ile β (Debye sıcaklığı) ise Varshni katsayılarıdır ve malzemenin karakteristik özelliğini temsil eder [20].

İki ve daha fazla yarıiletken bileşiği bir araya getirilerek, üçlü ve dörtlü alaşımlar elde edilebilir. Yüksek kristal kalitesine sahip yarıiletken alaşımlar elde edilebilmesi için, örgü parametreleri birbirine yakın olan yarıiletkenler seçilmelidir. Böylece, yüksek hız ve verime sahip elektronik ve optoelektronik aygıtlar üretilebilir. Aksi durumda

birbirinden farklı örgü parametrelerine sahip yarıiletken tabakalar büyütüldüğünde, örgü uyumsuzluğu nedeniyle yapıda gerilme, sıkışma ve dislokasyonların meydana gelerek homojen tabakaların oluşması yerine belli bölgelerde atomik yoğunlaşma oluşur ve adacıklı tabakalar oluşur.

GaAs ve AlAs bileşiklerinin örgü sabitleri birbiri ile uyumlu olduğu için yüksek kristal kalitesine sahip $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımı elde edilebilir. Böylelikle GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heteroyapıları arayüzey gerilmeleri olmadan büyütülebilir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımında, x Al konsantrasyonudur ve Al konsantrasyonuna bağlı olarak enerji bant aralığı,

$$E_g = \begin{cases} 1,424 + 1,427x & (0 \leq x \leq 0,45) \\ 1,9 + 0,125x + 0,143x^2 & (0,45 \leq x \leq 1) \end{cases} \quad (2.2)$$

ifadeleri ile verilmektedir [21]. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımında, $x \leq 0,45$ olduğu durumlar için direkt bant aralığına sahiptir. Ancak, $x \geq 0,45$ olduğu değerler için dolaylı bant aralığına sahiptir. Tablo 2.1’de GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ’ın önemli bazı fiziksel parametreleri verilmiştir.

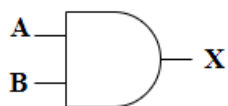
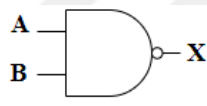
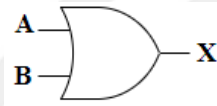
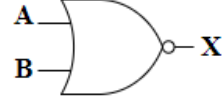
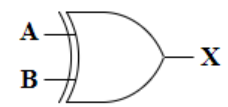
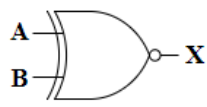
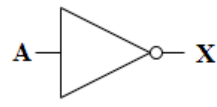
Tablo 2.1. $T=300\text{ K}$ ’de GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ’ın bazı fiziksel parametreleri [22,23]

	GaAs	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
Kristal Yapısı	<i>Zinc-blende</i>	<i>Zinc-blende</i>
Enerji Bant Aralığı (eV)	1,424	$1,424 + 1,427x$ ($0 \leq x \leq 0,45$) Doğrudan
		$1,9 + 0,125x + 0,143x^2$ ($0,45 \leq x \leq 1$) Dolaylı
Örgü Sabiti (Å)	5,65325	$(5,65325 + 0,00809x)$
Statik Dielektrik Sabiti	12,4	$(12,40 - 2,84x)$
Yüksek Frekans Dielektrik Sabiti	10,89	$(10,89 - 2,73x)$
Atom/cm ³	$4,42 \times 10^{22}$	$(4,42 - 0,17x) * 10^{22}$
Elektron Etkin Kütlesi (m_e)	0,063	$(0,063 + 0,083x)m_0$
Boşluk Etkin Kütlesi (m_h)	$m_{hh} = 0,51m_0$	$m_{hh} = (0,51 + 0,25x)m_0$
	$m_{lh} = 0,082m_0$	$m_{lh} = (0,62 + 0,14x)m_0$
Erime Noktası (K)	1513	$T_s = 1511 - 58x + 560x^2$ (Katılaşmış yüzey)
		$T_l = 1511 + 1082x - 580x^2$ (Sıvılaşmış yüzey)
Isısal Genleşme Katsayısı (10^{-6} K^{-1})	6,03	$\alpha_x = 5,97 - 1,76x$
Kristal yoğunluğu ρ (g/cm ³)	5,360	$(5,36 - 1,6x)$
Elektron Çekiciliği (eV)	4,07	$(4,07 - 1,1x)$ ($0 \leq x \leq 0,45$)
		$(3,64 - 0,14x)$ ($0,45 \leq x \leq 1$)

2.2. Optik Mantık Kapıları

Mantık kapıları içerisindeki transistörleri kullanarak mantıksal işlemleri gerçekleştiren, bilgiyi işleyen dijital elektronik teknolojinin temel yapı taşlarıdır. Mantık kapıları, Boolean cebirini kullanarak giriş sinyallerini alır, belirli mantıksal kurallara göre değerlendirir ve bir çıkış sinyali üretir. Bu çıkış sinyali, devrelerin birbirleriyle iletişim kurmasını ve dijital bilginin işlenmesini sağlar. Tablo 2.2’de temel mantık kapılarının (AND (VE), NAND (VE DEĞİL), OR (VEYA), NOR (VEYA DEĞİL), XOR (ÖZEL VEYA), NXOR (ÖZEL VEYA DEĞİL) ve NOT (DEĞİL)) sembol ve doğruluk tabloları verilmiştir.

Tablo 2.2. Temel mantık kapılarının sembol ve doğruluk tabloları (A ile B ikili giriş değerleri ve X, mantık kapısı çıkışını temsil etmektedir)

AND 	NAND 	OR 	NOR 																																																												
<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	X	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	X	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	X	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	X	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	X																																																													
0	0	0																																																													
0	1	0																																																													
1	0	0																																																													
1	1	1																																																													
A	B	X																																																													
0	0	1																																																													
0	1	1																																																													
1	0	1																																																													
1	1	0																																																													
A	B	X																																																													
0	0	0																																																													
0	1	1																																																													
1	0	1																																																													
1	1	1																																																													
A	B	X																																																													
0	0	1																																																													
0	1	0																																																													
1	0	0																																																													
1	1	0																																																													
XOR 	NXOR 	NOT 																																																													
<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	B	X	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	A	B	X	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table><tr><th>A</th><th>X</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	A	X	0	1	1	0																									
A	B	X																																																													
0	0	0																																																													
0	1	1																																																													
1	0	1																																																													
1	1	0																																																													
A	B	X																																																													
0	0	1																																																													
0	1	0																																																													
1	0	0																																																													
1	1	1																																																													
A	X																																																														
0	1																																																														
1	0																																																														

Modern dijital dünyada, mantık kapıları, temel aritmetik ve lojik işlemleri gerçekleştirmek için bilgisayarlar, cep telefonu ve tablet gibi elektronik cihazların işlemci birimlerinde milyarlarca adet bulunmaktadır. İşlemcilerdeki transistör boyutları, nano silikon transistör teknolojilerin gelişmesi sayesinde birkaç nanometreye kadar küçülmüştür [24]. Bu boyut küçültme hem enerji tasarrufunu hem de aynı zamanda işlem gücünü artırır. Ancak, bu hızlı küçülme süreci ile, transistörler boyutsal fiziki sınırına ulaştığı için tek bir işlemci içindeki transistör sayısını artırma yeteneğini sınırlar. Bu yüzden, işlemcilerin güçlerini ve performanslarını artırmak için çok sayıda işlemci paralel olarak kullanılmaktadır. Böylece, paralel işlemci ve çoklu çekirdekli işlemciler yaygınlaşmıştır [25–27]. Bu durum işlemcilerde ısınma problemine yol açarak soğutma sistemlerini gerekli kılar. Ayrıca yüksek hızlı iletişim veri işlemede bu yapılar elektron hızı ile sınırlı kalmaktadır.

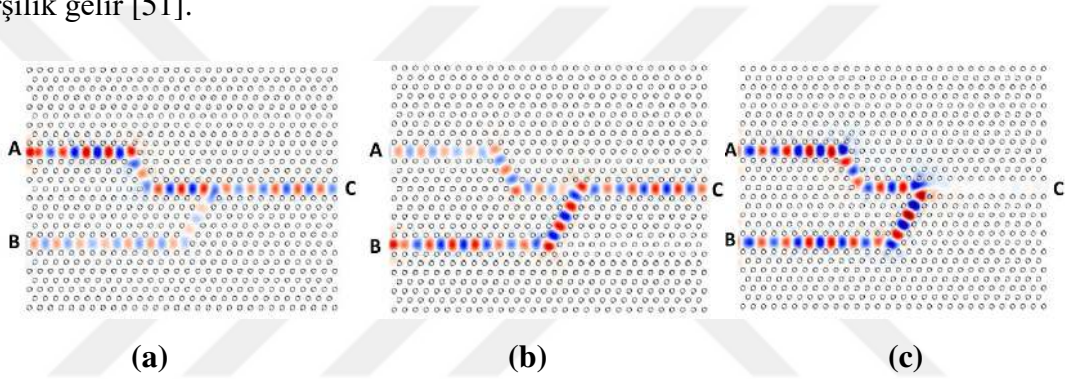
Günümüz teknolojisinde, elektron hızına bağlı sınırlamaları aşmak için elektronik bileşenler yerine fotonik bileşenlere geçiş cazip gözükmemektedir. Yüksek hız, küçük boyut, geniş bant aralığı, düşük tepki süresi, büyük veri işleme ihtiyacı ve düşük güç tüketiminden dolayı ışık yani fotonlar kullanılarak optik bilgi işlem ve optik iletişim sistemlerine doğru bir geçiş süreci oluşmuştur [28,29]. Optik iletişim sistemlerinin uygulama alanlarından biri optik sinyallerin yüksek veri aktarım hızıyla uzak mesafelere iletilmesini sağlayan fiber optik haberleşme teknolojisidir. Ancak, fiber optik kabloda bilgi taşıyan optik sinyalin bir yarıiletken mikroişlemciye ulaştığında optikten elektroniğe dönüşümü, devamında elektriksel sinyal olarak devam etmesi, optik haberleşmede veri aktarım hızını düşürmekte ve dolayısıyla optik sistemin tam kapasitesinden yararlanılamamaktadır [30]. Bu sorunu çözmeye yönelik bir yaklaşım veri işleme sistemlerini tamamen optiğe dayalı olanlara dönüştürmek olacaktır. Bu başarı sağlandığı takdirde tamamen optik bilgi işlem çağına erişim olacaktır.

Optik iletişim ve optik sinyalleri işleme sürecinin en temel bileşenleri optik mantık kapılarıdır. Elektronik mantık kapılarının optiğe dönüştürülmesi oldukça dikkat çekici bir teknolojidir ve temel olarak, bir ışık sinyalinin çıkış durumunu bir başka ışık sinyali ile kontrol etme prensibine dayanır. Optik mantık kapıları, günümüzde veri merkezleri, optik işlemciler, yüksek performanslı fotonik bilgisayarlar, optik iletişim sistemleri, telekomünikasyon ağları ve optik sensörler gibi cihazlarda kullanılmaktadır. Bu cihazlarda, optik mantık kapıları, anahtarlama, adresleme, veri kodlama ve çözme, şifreleme, basit ve karmaşık hesaplama gibi işlevleri gerçek zamanlı olarak

gerçekleştirebilir [29, 31–33]. Optik mantık kapıları, ışık sinyallerini kullanarak AND, NAND, OR, NOR, XOR ve NOT gibi temel mantıksal işlemleri gerçekleştirebilir.

İkili bilginin taşındığı optik mantık kapıları üzerine çalışmalar 1980’li yıllarda ışığın yoğunluk, faz, polarizasyon veya diğer özelliklerini kullanarak ışık alanlarının uzaysal kodlamasıyla başlamıştır. Ardından bu çalışmalar yarıiletken optik yükselteçler (*Semiconductor optical amplifiers*, SOAs), yüksek düzeyde doğrusal olmayan fiber (*Highly nonlinear fiber*, HNLF), mikro ve nano ölçekli dalga kılavuzları çalışmalarıyla devam etmiştir [28,33–39]. Bu yöntemler optik mantık kapılarının geliştirilmesi için büyük öneme sahip olan gelişmelerdir. Ancak, bu yöntemlerin yüksek güç tüketimi, düşük hız, üretimindeki tekrarlanabilir zorluk, kendiliğinden emisyon gürültüsü, polarizasyon hassasiyeti ve büyük boyutlarından dolayı çip entegrasyonundaki zorluklar gibi dezavantajları mevcuttur [40–42]. Bu olumsuzlukların üstesinden gelebilecek yeni yapılar olan fotonik kristal tabanlı optik mantık kapıları üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Fotonik kristaller kompakt boyutları, yüksek hızları ve düşük güç tüketimleriyle bu diğer yöntemlerden üstündür [41]. Fotonik kristaller, farklı kırılma indisine sahip periyodik yapay özel yapılardır. Fotonik kristaller, başlangıçta yapay materyaller olarak düşünülmelerine karşın doğada varlıkları da kanıtlanmıştır. Özellikle opaller, doğal fotonik kristallerin en tanınmış örneklerinden biridir [43]. Biyolojik sistemlerde ise kelebek kanatları, tavus kuşu tüyleri, bazı kabuklu böcekler ve mürekkep balığı gibi canlılar renk pigmentleri içermemesine rağmen, belli bir geometrik düzende dizilmiş minik fotonik kristalleri sayesinde etkileyici renklenmelere sahiptirler [44–46]. Fotonik kristallerin doğada var olmasına rağmen, ancak 20. yüzyılın başlarında yapay olarak üretilmeye başlanmış ve çeşitli uygulamaları geliştirilmiştir. 1987 yılında, E. Yablonovitch ilk kez fotonik bant aralıklı periyodik yapılar üretmiş ve bu yapılarda örgü kusurları oluşturarak ışığın küçük bir alanda hapsedilip yönlendirilmesini sağlamıştır [47,48]. Fotonik kristal yapıları, silikon, polimer, bileşik yarıiletken (GaAs, InP vb.) gibi malzemelerden yapılmıştır [49–52]. Fotonik kristallerde çizgi ve nokta kusurlarının varlığı oldukça önemlidir. Nokta kusurları özellikle ışığın yapı içerisinde ilerlerken lokalize olmasına neden olarak ışığı tuzaklayan bir optik tuzaklama seviyesi gibi davranır. Çizgi kusurları ise, dalga kılavuzu gibi davranarak ışığın dalga kılavuzu boyunca ilerlemesini sağlar. Böylece, ışık fotonik bant aralıklı yapılarda oluşturulan kusurlar sayesinde hapsedilir ve kılavuzlanabilir [53,54]. Fotonik kristallerin bu özelliklerinden yararlanılarak gerçekleştirilen AND, OR, NAND, NOT, XOR ve NOR optik mantık

kapıları üzerine çalışmalar çok sayıda mevcuttur [42, 51, 55, 56]. Şekil 2.3’de silikon tabanlı bir fotonik kristal yapıda, örnek bir XOR optik mantık kapısının elde edilmesi verilmiştir. Şekil 2.3’den görüldüğü gibi A ve B olmak üzere iki adet giriş ve bir adet C çıkışı vardır. Şekil 2.3 a’da A girişinden bir ışık sinyali verilmiştir ve bu sinyal AC optik dalga kılavuzu boyunca ilerleyerek C çıkışından çıkar, $A=1$ ve $B=0$ ($1 \text{ XOR } 0 = 1$) durumuna karşılık gelir. Benzer şekilde Şekil 2.3 b’de B girişinden bir ışık sinyali verilirse BC optik dalga kılavuzu boyunca ilerleyerek C çıkışından çıkar, $A=0$ ve $B=1$ ($0 \text{ XOR } 1 = 1$) durumuna karşılık gelir. Şekil 2.3 c’de, A ve B girişinde iki adet ışık sinyalinin girmesiyle, bir örgü sabiti kadar yol farkından dolayı ışık sinyalleri arasında yıkıcı girişim olur ve C çıkışında ışık sinyali gözlenmez, ve $A=1$ ve $B=1$ ($1 \text{ XOR } 1 = 0$) durumuna karşılık gelir [51].



Şekil 2.3. Silikon tabanlı fotonik kristal ile XOR optik mantık kapısının gösterimi (a) tek bir ışık sinyalinin A girişinden (b) B girişinden enjekte olması ve (c) iki ışık sinyalinin hem A hem de B den enjekte edilmesiyle, C çıkışından ışık sinyalinin eldesi [51]

Fotonik kristal yapılar kullanarak optik mantık kapısı oluşturulmasında, her mantık kapısı için sisteminin ayrı ayrı dizayn edilmesi ve üretilmesi gereklidir. Belki de en önemli zorlayıcı etken ise açığa çıkan ışının diğer mantık kapısının girişi için uygun olup olmadığıdır.

Bu tez çalışması kapsamında, fotonik kristal yapılara alternatif olarak, optik mantık kapısı olarak işlev görme potansiyeli bulunan, sıcak elektron ışın yayıcı ve lazer yarıiletken hetero-eklem (*Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure*, HELLISH) yapılar tasarlanıp üretildi ve optik ölçümleri elde edildi. Top Hat HELLISH (THH) yapılarıyla, fotonik kristallerdeki, kristal oyuk yapısı oluşturma zorluğu ve belirlenmiş ışın şiddeti ile çalışma yerine, büyütülmesi nispeten fotonik kristallere göre daha kolay olan yapılardır. Aşağıda bu yapıların gelişim süreci ve fiziksel özellikleri hakkında detaylı bilgi sunulmaktadır.

2.3. Işık Yayan Diyotlar (LED)

Işık yayan diyot (*Light Emitting Diode*, LED) teknolojisi, ilk kez 1962 yılında GaAs diyot kullanılarak kızılötesi ışın elde edilmesine dayanır [57]. Daha sonra LED teknolojisi üzerine yapılan araştırmaların artmasıyla yeşil, sarı ve 1990'larda InGaN/GaN tabanlı mavi LED'lerin keşfedilmesiyle [58], beyaz ışık elde edilmiş, böylece LED teknolojisi daha geniş uygulama alanlarına yönelik olarak ilerlemiştir [57, 59]. Günümüzde, LED'ler küçük boyutları, enerji verimliliği, uzun ömürleri ve farklı dalga boyunda ışın yapma özelliklerinden dolayı aydınlatma, gösterge sistemleri ve optik haberleşme gibi geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

En basit haliyle LED bir $p-n$ eklemine ileri yönde kutuplanması (dış bir gerilim kaynağının negatif kutbu eklemine n -bölgese ve pozitif kutbu eklemine p -bölgese bağlanması) durumunda, ışın yapan bir aygıttır. LED tarafından yayılan ışının dalga boyu dolayısı ile rengi, yapısında kullanılan yarıiletken malzemenin enerji bant aralığına bağlıdır ve elektromanyetik spektrumun farklı dalga boylarında (kızılötesi, görünür ve morötesi) olabilir.

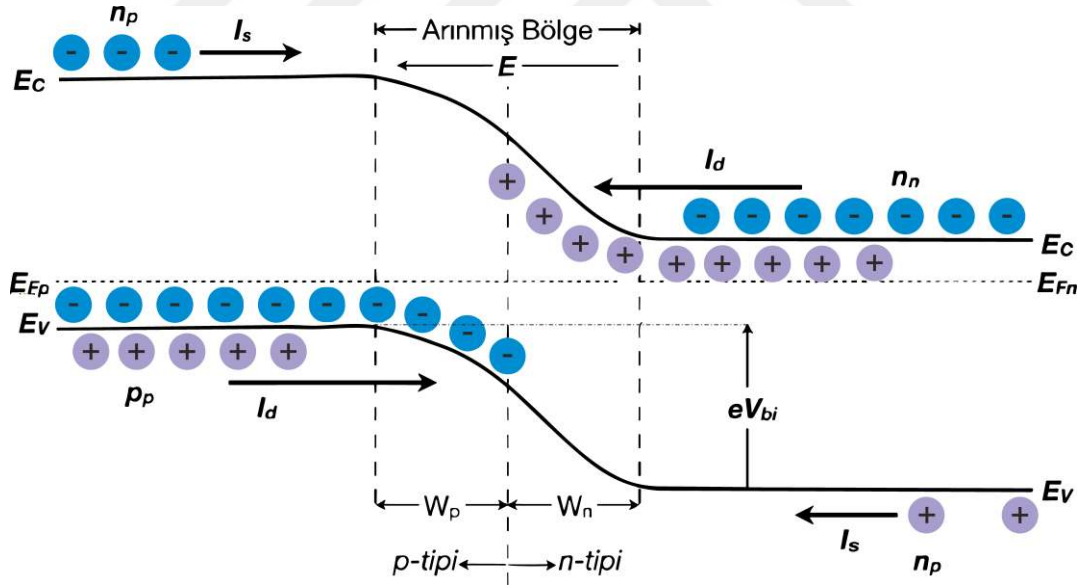
2.4. $p-n$ Eklem

$p-n$ eklem, LED, transistör, güneş pili gibi birçok elektronik ve optoelektronik yarıiletken aygıt teknolojisinin temel yapı taşlarıdır. n -tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu, p -tipi yarıiletkende ise boşluk konsantrasyonu fazladır. n -tipi yarıiletkenlerde, Fermi enerji seviyesi (E_{Fn}), iletkenlik bandına yakın bir konumda bulunurken, p -tipi yarıiletkenlerde ise Fermi enerji seviyesi (E_{Fp}), değerlik bandına yakın bir konumda yer alır. Bir $p-n$ eklemi temel olarak p -tipi bir yarıiletken malzeme ile n -tipi bir yarıiletken malzemenin birleşimi sonucunda elde edilir. Bu iki farklı taşıyıcı yoğunluğuna sahip yarıiletkenler bir araya getirildiğinde taşıyıcı konsantrasyonunda konuma bağlı bir değişim oluşur ve iki yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar difüzyon süreci devam eder. Difüzyon sırasında, n -bölgende çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar p -bölgese arkalarında pozitif yüklü hareketsiz iyonize verici atomlarını, p -bölgende çoğunluk taşıyıcı olan boşluklar ise arkalarında negatif yüklü hareketsiz iyonize alıcı atomlarını bırakarak eklemine diğer bölgese doğru geçme eğilimindedir. p -tarafına süzülen elektronların çoğu boşluklarla ve n -tarafına süzülen boşlukların çoğu da elektronlarla tekrar birleşirler. Böylece $p-n$ eklemine arayüzeyine yakın bölgede hareketli yüklerden arındırılmış tüketim bölgesi/uzay yükü bölgesi/eklem bölgesi olarak

adlandırılan bölge oluşur [60, 61]. Bu iyonize yükler, bulunduğu eklem bölgesinde, n -tarafından p -tarafında doğru (pozitif yüklerden negatif yüklere doğru) bir iç elektrik alanı oluşturur ve bu elektrik alanı altında eklem bölgesine giren taşıyıcılar sürüklenir.

Böylece, bu iç elektrik alan n ve p tarafındaki taşıyıcı farklarından dolayı oluşan difüzyon akımına ters yönlü bir sürüklenme akımı oluşturur. Denge durumunda, eklem bölgesinden net bir akım akmaz ve difüzyon akımı sürüklenme akımına eşittir [62]. Şekil 2.4’de denge durumunda, bir p - n eklem bant profili verilmiştir.

Burada E_c iletim bandı enerjisi, E_v değerlik 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 (eklem potansiyeli), 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) [63, 64].



Şekil 2.4. Denge durumunda p - n eklem bant diyagramı

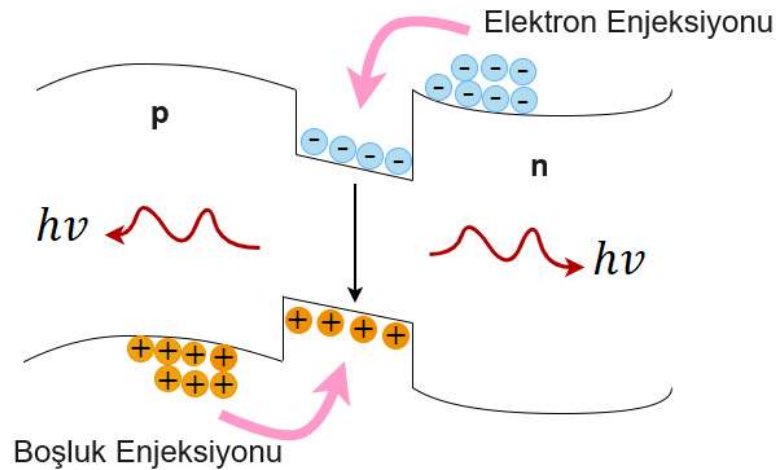
Kontak potansiyeli V_{bi} şu şekilde ifade edilir:

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right). \quad (2.3)$$

Burada, k_B , Boltzmann sabiti, T , sıcaklık, e , elektron yükü, n_i , katkısız (*intristic*) taşıyıcı yoğunluğu, N_A , ve N_D sırasıyla, alıcı ve verici katkı yoğunluğudur.

Bir p - n eklemi, ileri yönde beslendiğinde iç elektrik alan ile uygulanan dış elektrik alan birbirine zıt yöndedir ve bu durum yüklerden arındırılmış eklem bölgesinin daralmasına neden olur. Bu durumda kontak potansiyeli azalır ve boşluklar eklem p -tarafından n -tarafına, elektronlar ise eklem n -tarafından p -tarafına geçebilir. Bu enjekte olan elektron ve boşluklar, p - n eklem bölgesinin yakın çevresinde yeniden birleşebilir ve yarıiletkenin enerji bant aralığına karşılık gelen dalga boyunda foton yayarak doğal ışıma yapar. Geri yönde besleme durumunda (negatif kutbu eklem p -bölgesine ve pozitif kutbu eklem n -bölgesine bağlanması) ise dış elektrik alan iç elektrik alan ile aynı yönde olduğundan kontak potansiyeli uygulanan dış potansiyel kadar artar ve yüklerden arındırılmış eklem bölgesi genişler. Böylece, taşıyıcıların geçişleri engellenmiş olur. Bu durum, farklı tür kakılamaya sahip aynı tür yarıiletken malzemeden oluşan homo-eklem LED için geçerlidir.

Heteroeklem LED yapısı, p - ve n -tipi bölgeler geniş bant aralıklı bir yarıiletkenden ve p - n eklem n -tipi bölgesi ise asal ve daha dar bant aralığına sahip bir yarıiletkenden oluşmaktadır. Böyle bir yapıya ileri doğru besleme uygulandığında, elektron ve boşluklar daha geniş bant aralığına sahip yarıiletkenden daha dar bant aralığına sahip olan yarıiletkene enjekte olarak burada yeniden birleşirler ve foton yayarak ışıma yaparlar (Şekil 2.5). Elde edilen bu ışımının enerjisi p - ve n -tipi yarıiletkenin bant aralığından küçük olduğu için bu yarıiletken bölgelerde soğurulmazlar. Böylece homo-eklem LED'lere göre daha verimli ışıma elde edilir [64].



Şekil 2.5. İleri yönde beslenen heteroeklem LED

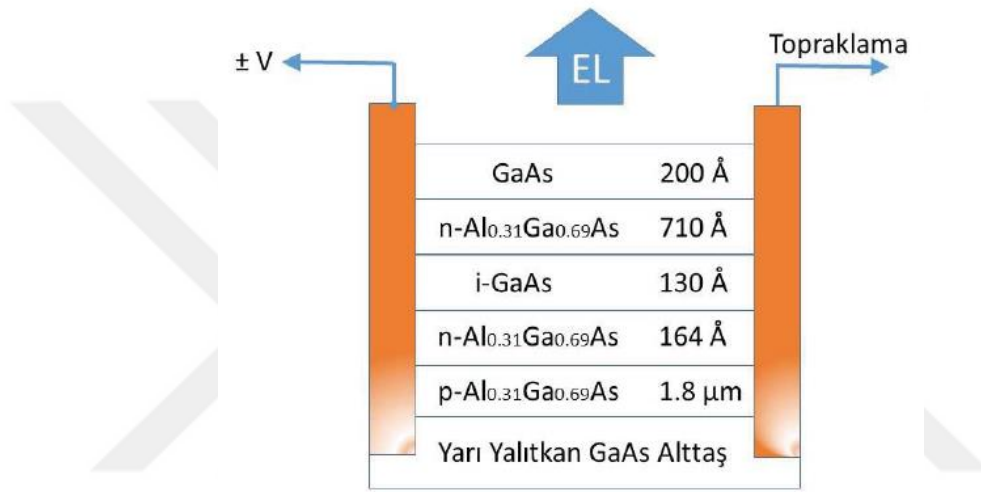
2.5. Sıcak Elektron Işın Yayıcı ve Lazer Yarıiletken Heteroeklem (*Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure, HELLISH*)

Sıcak elektron lazer ve ışın yayıcı yarıiletken çok eklemli yapılar (**H**ot **E**lectron **L**ight **E**mitting and **L**asing in **S**emiconductor **H**eterostructure, *HELLISH*) sıcak elektron etkisiyle ışıma yapan yüzey yayıcılarıdır. Isısal dengede ve çok zayıf elektrik alan altında elektronun sahip olduğu ortalama enerji $3k_B T/2$ kadardır. Ancak, uygulanan elektrik alan değeri arttırıldığında, elektronların daha fazla enerji kazanmasıyla sahip oldukları enerji değeri $3k_B T/2$ değerini aşar. Bu durumda, kristal içinde örgü sıcaklığı (T_L) ile dengede olmayan ve daha büyük sıcaklık değerine sahip olan elektronlar (T_e) oluşur [65,66]. Sıcak elektron kavramı, birkaç atomik kalınlıkta yarıiletken tabakaların büyütülmesine imkân sağlayan MBE ve MOCVD gibi büyütme tekniklerinin gelişmesiyle daha da önem kazanmıştır. Büyütülen bu küçük boyutlu aygıtlara uygulanan küçük gerilimler büyük elektrik alanların elde edilmesine olanak sağlar ve böylece yarıiletken aygıtı zarar vermeden sıcak elektronlar elde edilebilir.

Prof. Dr. Balkan ve grubu tarafından sıcak elektron etkisi ile ışıma yapan HELLISH yapılar ilk kez 1995 yılında çalışılmaya başlanmıştır [2]. HELLISH en temel haliyle, p - n ekleminin tükenim bölgesinin n -tarafına tek bir kuantum kuyunun yerleştirildiği bir yapı olarak tasarlanmış ve bu aygıt HELLISH-1 olarak isimlendirilmiştir [3, 67]. Daha sonraki çalışmalarda, tekli kuantum kuyu yerine birden fazla kuantum kuyu içeren ve HELLISH-2 olarak isimlendirilen aygıtlar tasarlanmıştır [68]. HELLISH-1 ve HELLISH-2 aygıtları bir LED yapısı olarak çalışmaktadır. Bu yapılardan elde edilen ışının şiddetinin ve veriminin arttırılması için, dağıtılmış Bragg yansıtıcı (*Distributed Bragg Reflector, DBR*) yapıları aktif tabakanın altına periyodik olarak eklenerek ultra parlak UB-HELLISH yapısı elde edilmiştir [69]. UB-HELLISH yapısının üst katmanına da DBR yapılar eklenerek dikey oyuklu yüzey ışıması yapan (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser, HELLISH-VCSEL*) ve dikey oyuklu yarıiletken optik yükselteç (*Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers, HELLISH-VCSOA*) lazer ve optik yükselteç yapıları elde edilmiştir [70–75]. Son olarak, *Top-Hat HELLISH* (THH) yapıları geliştirilmiştir. THH yapısının litografisi diğer HELLISH aygıtlardan farklı olarak tasarlanmıştır. THH aygıtta, n -kanal daha kısa, p -kanalı daha uzundur. THH, n - ve p - kanallarına ait dört adet ohmik kontaklara sahiptir [6, 76, 77]. Bu tez çalışmasında optik mantık kapısı olarak çalışabilen aygıtlar THH geometrisinde üretilerek optik ve elektriksel ölçümleri gerçekleştirildi. HELLISH yapılar hakkında genel bilgiler alt başlıklar halinde sunuldu.

2.6. HELLISH Yapılar

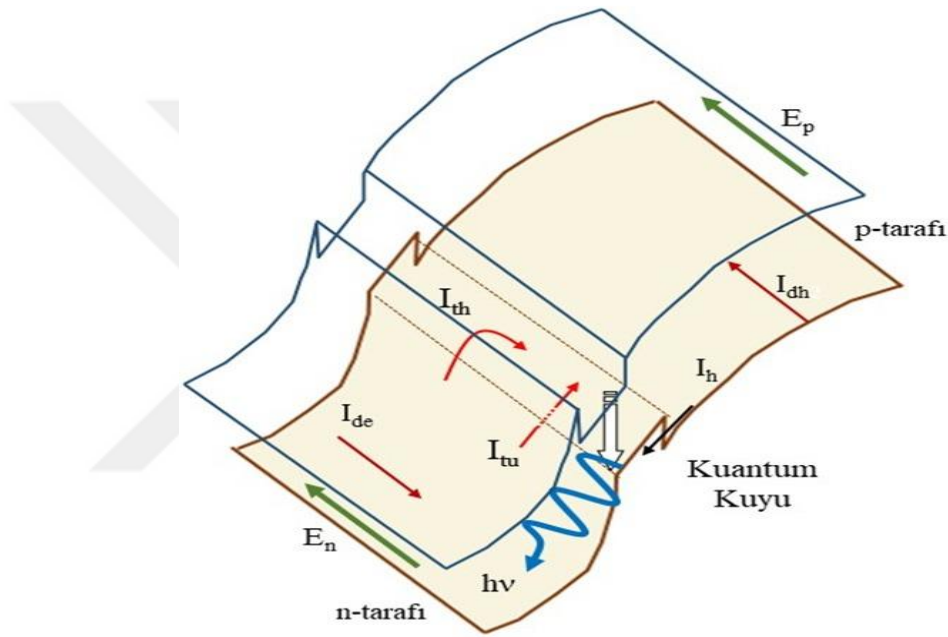
Yüzey ışıması yapan aygıt olarak tasarlanan ilk HELLISH-1 aygıtının tabaka yapısı Şekil 2.6'da verilmiştir. HELLISH-1 aygıtı bir AlGaAs p - n eklemine arındırılmış bölgesinin n -tarafına bir GaAs kuantum kuyu yerleştirilmesiyle oluşur. Bu yapıda, Ni/AuGe/Au alaşımları kullanılarak tüm tabakalar boyunca nüfuz olan iki adet ohmik kontak mevcuttur. Aygıt, uygulanan elektrik alan ile oluşan sıcak taşıyıcıların boyuna iletimi ile ışık yayar. Geleneksel yarıiletken ışık yayıcılar ise, ileri yönde beslenen bir p - n eklemine yük taşıyıcılarının dikey iletimi sonucunda ışıma yaparlar [2].



Şekil 2.6. HELLISH-1 aygıt yapısının şematik gösterimi [3]

Şekil 2.7'de HELLISH aygıtına uygulanan bir elektrik alan altında taşıyıcıların davranışı gösterilmiştir. HELLISH aygıtının elektriksel kontaklarına dış bir gerilim uygulandığı zaman, tüm tabakalara paralel bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan sayesinde, aygıtın n -tarafındaki elektronlar ile p -tarafındaki boşluklar kendi kanallarında ısınarak daha üst enerji seviyesine çıkarlar. Fakat, boşlukların etkin kütlelerinin elektronların etkin kütlelerinden daha büyük olmasından dolayı elektron sıcaklığı boşluk sıcaklığından daha yüksektir. Bu sıcak elektronlar, düşük elektrik alan değerlerinde tünelleme ve yüksek elektrik alan değerlerinde termiyonik emisyon süreçleriyle GaAs kuantum kuyu içerisine geçerler. Kuantum kuyu sıcak elektronlar için büyük bir tuzak gibi davranır ve kuyu içerisinde aşırı eksi yük birikir. Bu durumda, yük nötrallitesini korumak için eklemine enerji bant profili değişir. Eklemine n -tarafı sanki geri besleniyormuş gibi davranırken, p -tarafı sanki ileri besleniyormuş gibi davranır. Böylece, elektronlar için potansiyel engeli artarken, boşluklar için potansiyel engeli azalarak boşlukların kuantum kuyu içerisine geçişleri sağlanır. Kuantum kuyu içerisinde bu sıcak

taşıyıcıların yeniden birleşmesi ile aygıttan ışıma elde edilir [3, 70, 72]. HELLISH yapısının, geleneksel ışıık yayan aygıtlara göre en büyük avantajlarından biri fabrikasyon sürecinin basitliğidir, sadece tüm tabakalara nüfuz etmiş iki adet ohmik kontağa ihtiyaç vardır. Diğer bir üstünlüğü ise, HELLISH aygıttan çıkan ışınlar dışarıdan uygulanan elektrik alan tarafından ısınan taşıyıcılardan dolayı olduğu için uygulanan voltajın polaritesinden bağımsız şekilde ışın çıkışı elde edilmesidir. Uygulanan voltajın polaritesinden bağımsız olarak ışın çıkışı elde edilmesi, bu yapıların XOR mantık kapısı olarak çalışabileceğini gösterir [73, 78].



Şekil 2.7. Tabakalara paralel uygulanan elektrik alan altında HELLISH-1 aygıtının enerji bant profilinin şematik gösterimi (I_{th} ve I_{tu} sırasıyla termiyonik ve tünelleme akımıdır. I_{de} ve I_{dh} sırasıyla, elektron ve boşluk sürüklenme akımıdır. I_h sıcak boşlukların kuyusu içerisindeki difüzyon akımıdır.) [70,79]

Kuantum kuyusu içerisindeki akım yoğunluğuna katkı, üç boyutlu (3D) AlGaAs durumlarından, GaAs kuantum kuyusu içerisinde elektronların tünelleme ve termiyonik emisyonuyla olur [3]. Bu katkıların her ikisi de bariyer üzerindeki elektron sayısı, elektronların dikey hızı ve bariyer iletim katsayısı $T(E_z)$ ile verilir. Elektronların termiyonik emisyonunda, $T(E_z) = 1$ 'dir ve akım yoğunluğu,

$$J = \frac{em^*}{4\pi^3\hbar^3} \int f(E)T(E_z)dE_xdE_zd\vartheta \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada m^* , etkin kütle, E , toplam elektron enerjisidir ve $E_x + E_z = \hbar^2/2m^*(k_x^2 + k_z^2)$ ile ifade edilir. $f(E)$, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur ve ϑ ,

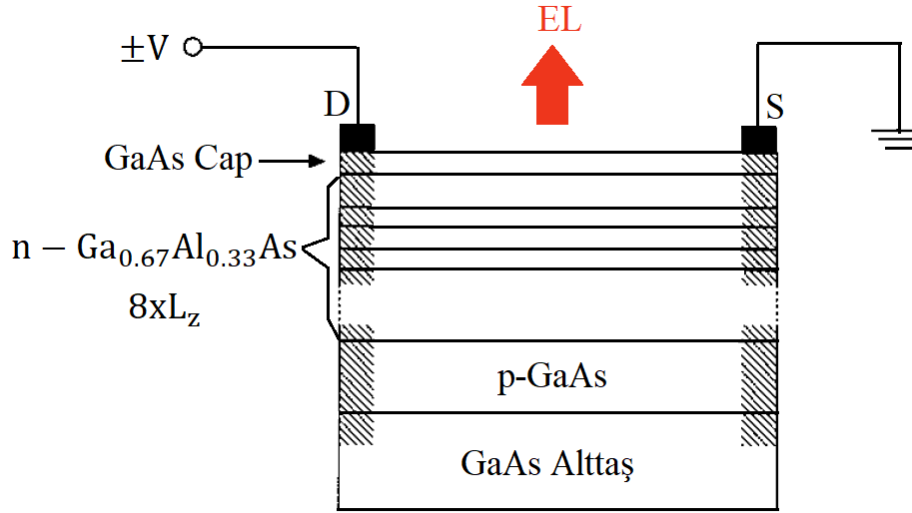
kuyuya dik bir düzlemdeki silindirik kutupsal koordinattır. Bu durumda, tünelleme akım yoğunluğu (J_{tun}) ve termiyonik akım yoğunluğu (J_{therm});

$$J_{tun} = \frac{em^*k_B T_e}{4\pi^3\hbar^3} \int_0^{V_b} T(E_z) \ln(1 + \exp(\frac{E_F - E_z}{k_B T_e})) dE_z \quad (2.5)$$

$$J_{therm} = \frac{em^*(k_B T_e)^2}{2\pi^2\hbar^3} \exp(\frac{E_F - V_b}{k_B T_e}) \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada, T_e elektron sıcaklığı, E_F Fermi seviyesi ve V_b bariyer yüksekliğidir [3,80].

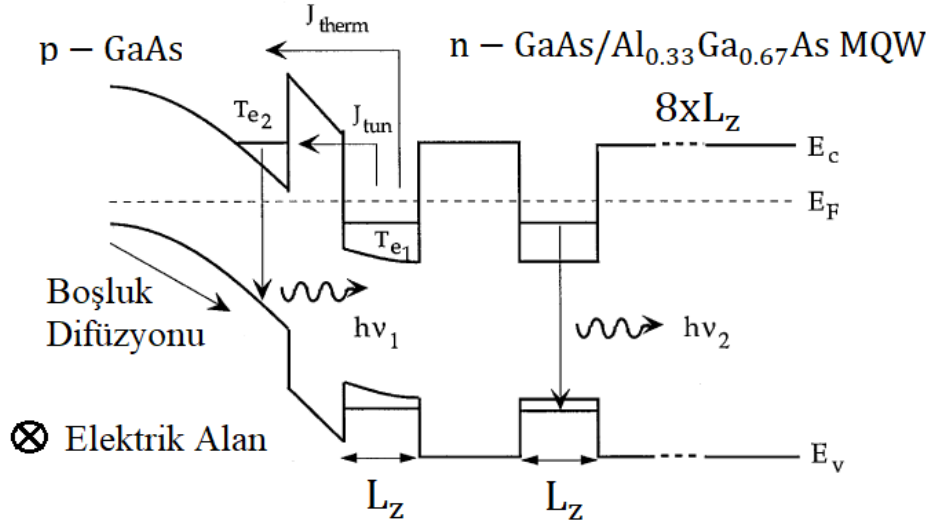
HELLISH-1 aygıtı tekli kuantum kuyuya sahiptir ve aygıttan çıkan ışın geniş ve nispeten zayıftır. Aygıttan yayılan ışının şiddetini arttırmak için, tekli kuantum kuyu yerine çoklu kuantum kuyu yerleştirilerek HELLISH-2 aygıtları tasarlanmıştır [80]. HELLISH-2 aygıtı aynı zamanda uygulanan elektrik alana bağlı olarak farklı dalga boylarında ışıma yapabilmektedir. Şekil 2.8’de HELLISH-2 aygıtının tabaka yapısı verilmiştir. Bu yapıda, p -tarafında bir terslenim tabakası içeren p -GaAs/ n -Al_xGa_{1-x}As heteroeklem ve n -tarafında GaAs çoklu kuantum kuyuları içermektedir [2].



Şekil 2.8. HELLISH-2 aygıt yapısının şematik gösterimi [79]

HELLISH-2 aygıtının tabakalarına paralel dış bir elektrik alan uygulandığı zaman, eklem düzlemine bitişik GaAs kuantum kuyu içerisindeki sıcak elektronlar fonon yardımlı tünelleme veya termiyonik emisyon ile terslenim bölgesine geçer. Fonon yardımlı tünelleme sürecinde, elektronlar bir optik fononun emilmesiyle kuantum kuyusundan terslenim bölgesine geçerler. Terslenim bölgesinde aşırı negatif yük

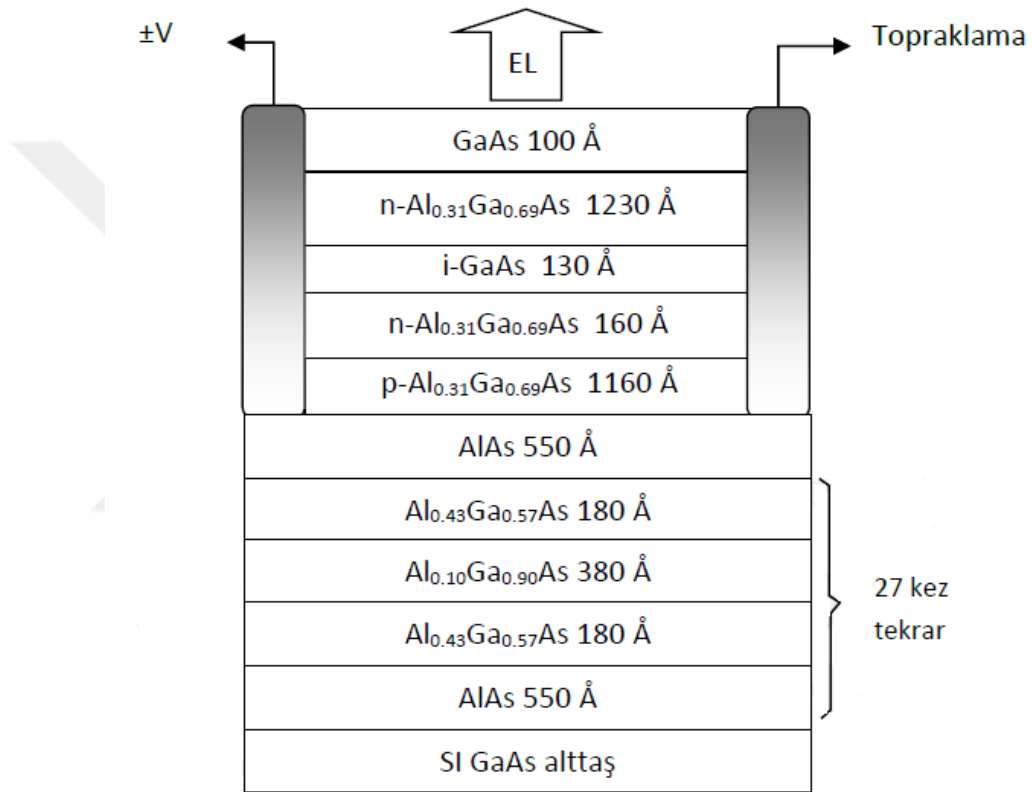
birikmesi, eklem bant profilinin değişmesine neden olur. Yük nötrallitesini korumak için tüketim bölgesinin p -tarafı azalır ve boşluklar eklem düzlemi boyunca enjekte olurlar. Böylece boşluk ve elektronların dalga fonksiyonları terslenim bölgesi civarında örtüşür ve GaAs iç bant geçişlerine karşılık gelen bir enerjide (hV_1) ışımalı yeniden birleşme meydana gelir. Uygulanan elektrik alan daha da arttırıldığı zaman, terslenim bölgesi içinde dengede olmayan elektronlar ısınır ve daha yüksek enerji durumlarını işgal ederler. Bu durumda, elektrolüminesans spektrumunda genliği artan yüksek enerjili bir emisyon piki elde edilir. Kuantum kuyu içerisindeki $e1-hh1$ geçiş enerjisinden daha büyük enerjilere sahip terslenim katmanından gelen fotonlar ($hV \geq hV_2$), kuantum kuyu tarafından soğrulur ve kuantum kuyusundaki $e1-hh1$ geçişine karşılık gelen enerjide (hV_2) yeniden ışıma yapar (Şekil 2.9). Sonuç olarak uygulanan elektrik alan değerine bağlı olarak yayılan ışının dalga boyu ayarlanabilir [2, 67, 80, 81].



Şekil 2.9. HELLISH-2 aygıtın bant profilinin gösterimi [67,80,82]

HELLISH-1 ve HELLISH-2 aygıtlarından elde edilen ışın çıkışı nispeten zayıftır ve LED yapısı olarak çalışmaktadır. Daha sonra yapılan çalışmalarda, aygıttan çıkan ışının şiddetini arttırıp çizgi genişliğini (*Full Width Half Maximum-FWHM*) azaltarak yüksek spektral saflığa sahip ve güçlü ışıma yapan ultra parlak (*Ultra Bright, UB*) UB-HELLISH yapılar geliştirilmiştir [70]. Şekil 2.10'da UB-HELLISH aygıt yapısı verilmiştir. Şekil 2.10'dan görüldüğü gibi, HELLISH-1 aygıtının aktif tabakasının altına DBR olarak isimlendirilen yapıların periyodik olarak büyültmesiyle DBR ve yarıiletken-hava ara yüzeyinden oluşan bir oyuga sahiptir. DBR aynaları, yüksek ve düşük kırılma

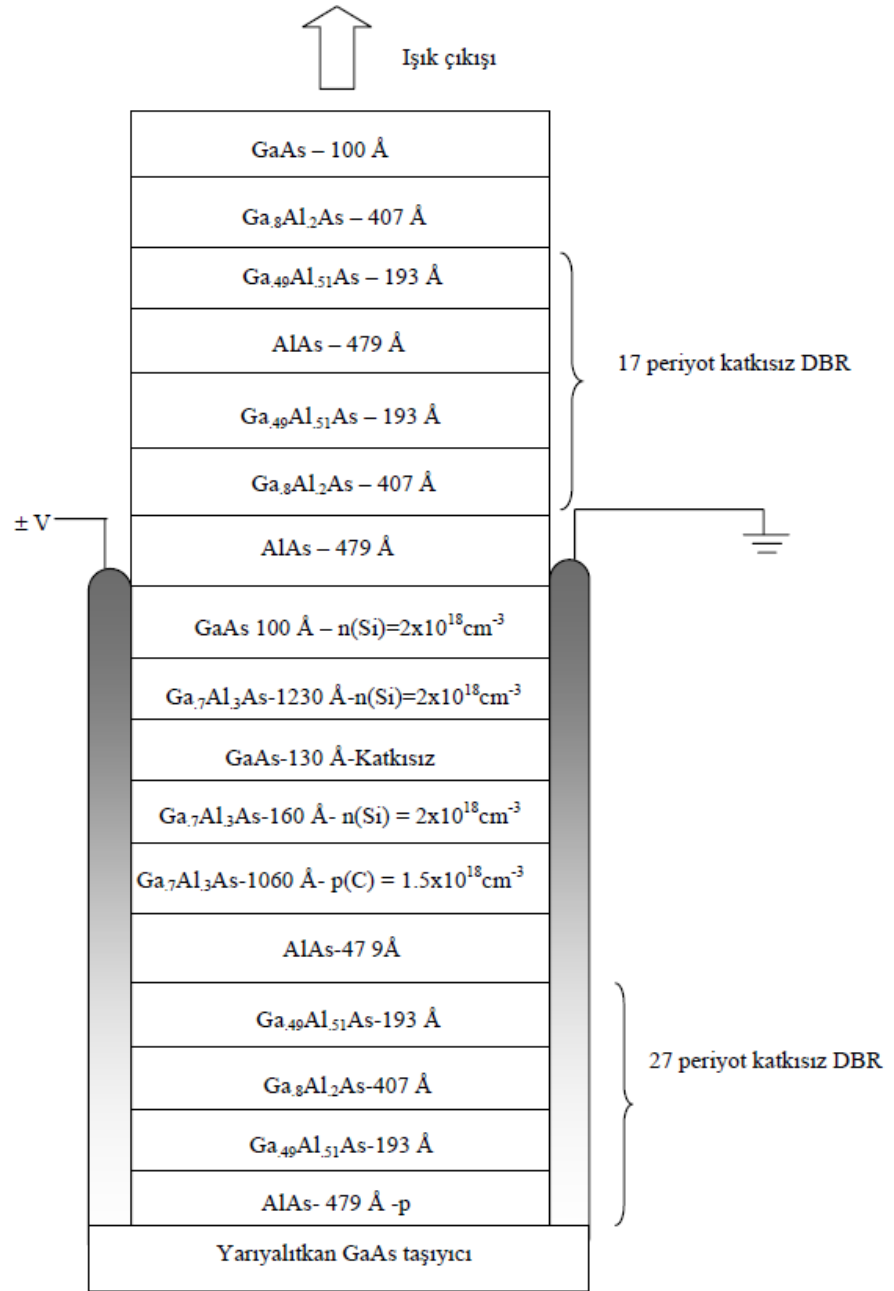
indisine sahip iki farklı malzemenin periyodik olarak sıralanmasıyla elde edilen tabakalardan oluşur. DBR aynalarının tabakalarının kalınlıkları genellikle aygıtın çalışma dalga boyunun dörtte birine eşit olacak şekilde düzenlenir. Bu, DBR aynalarının istenilen dalga boyunu yansıtmasını sağlar [83]. UB-HELLISH yapıda 27 periyot tekrar eden AlAs/AlGaAs DBR tabakalar %99,6 dan daha fazla yansıma sağlar. Dolayısıyla, bu yapının avantajlarından biri, alttaş üzerinden kaybolan ışığın büyük bir kısmının geriye yansıtılmasıdır [73].



Şekil 2.10. UB-HELLISH aygıtın tabaka yapısı [70]

UB-HELLISH aygıt üzerine yapılan çalışmalardan sonra, VCSEL ve VCSEA yapılar geliştirilmiştir [74, 75, 84, 85]. Bu yapıların, UB-HELLISH aygıt yapısından farkı üst tarafına da DBR aynaların eklenmesidir. Şekil 2.11’de HELLISH-VCSEL yapısının şematik gösterimi verilmiştir. Aktif tabakanın altına 27 periyot tekrar eden Al konsantrasyonu değişen AlGaAs DBR aynalar yer almaktadır ve %99’den daha fazla yansıma sağlamaktadır. En üstte ise 17 periyot daha ince DBR aynaları bulunmaktadır ve elde edilen ışımının üst yüzeyden çıkışına izin vermektedir. HELLISH-VCSEL yapılarında diğer HELLISH-1,2 ve UB-HELLISH yapılarının çalışma prensibi ile aynı şekilde ışım yapmaktadır. Ancak, HELLISH-VCSEL yapılarında, Au/Ge/Ni kontakların difüzyonu, üst

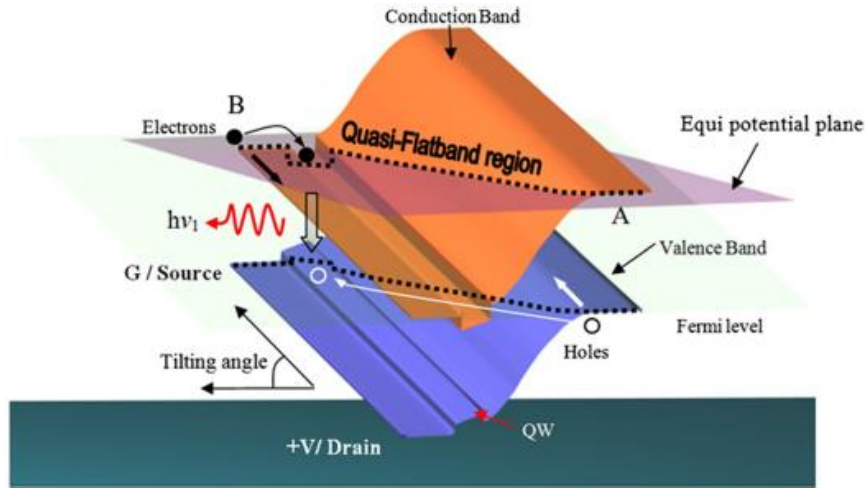
DBR tabakasının seçici aşındırma ile aşındırılmasıyla HELLISH tabakalardan itibaren başlayıp alt tabakaya ulaşır [71–73]. Böylece, HELLISH-VCSEL aygıtlara bir dış elektrik alan uygulandığında, üst taraftan enjekte olan akım DBR tabakadan değil doğrudan aktif bölgeden geçer. Dolayısı ile üst DBR tabakalarının akım yolu için oluşturacağı direnç etkisini yok ederek kararlı bir lazer ışıması elde edilir. Klasik VCSEL yapılarında kontaklar üst DBR tabakaların üstünde bulunur [86, 87]. Bu durum akım yolu üzerinde bir direnç dolayısı ile ısı etkisi ve ışıma dalga boyunda kaymalara neden olabilmektedir. HELLISH-VCSEL yapıların bu özelliği klasik VCSEL yapılara göre büyük avantaj sağlamaktadır.



Şekil 2.11. HELLISH-VCSEL aygıtın tabaka yapısı [73,88]

HELLISH temelli yapılar olan HELLISH 1-2, HELLISH-VSCEL ve HELLISH-VCSOA yapıları, boyuna sıcak elektron iletimine dayalı ışık yayılımını içerir. Bu aygıtların performansları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin, her HELLISH aygıt yapısının ışığa yapmaya başladığı elektrik alan değeri (eşik elektrik alanları) farklıdır. Bu eşik elektrik alan değerleri, HELLISH-1 aygıtlarında 50 ile 100 V/cm arasında, UB-HELLISH için 200 ile 600 V/cm arasında, HELLISH VCSEL için 50 ile 100 V/cm arasında, HELLISH VCSOA için 110 ile 290 V/cm arasında değişmektedir [76, 89].

HELLISH aygıtların çalışma prensibi, elektron ve boşluk çiftlerinin kendi kanallarında boyuna enjeksiyonuna dayanır. Şekil 2.12’de standart bir HELLISH aygıtı için üç boyutlu (3D) yarı düz bant modeli verilmiştir. HELLISH aygıtı düşük bir voltaj değeri uygulandığında, her iki kanalda eşit potansiyel durumlarını işgal eden büyüme yolundaki enerji bantlarının eğilmesiyle yarı düz bir bant oluşur. Böylece, taşıyıcıların küçük bir miktarı eklem içine diyagonal olarak sürüklenir ve boyuna iletim artar. Bu durumda, beklenildiği gibi zayıf bir ışık emisyonu oluşur. Şekil 2.12’den görüldüğü gibi boşluklar, yeniden birleşmenin gerçekleştiği kuantum kuyuya elektronlardan daha uzun bir yol kat eder ve dolayısıyla ışık emisyonunun verimliliği büyük ölçüde kuantum kuyusuna gelen boşlukların sayısına bağlıdır [85, 89].



Şekil 2.12. Standart HELLISH aygıtı için 3D enerji bant modeli. Değerlik bandı ve iletim bandı üzerindeki yarı-düz bant (kesikli çizgi) oluşumun şematik gösterimi. Beyaz ve siyah oklar sırasıyla boşlukların ve elektronların sürüklenme ve difüzyonunu gösterir. Dolu olmayan ok ise yeniden birleşmenin olduğu kısmı gösterir ve $h\nu_1$ enerjili ışığa meydana gelir [85,89,90]

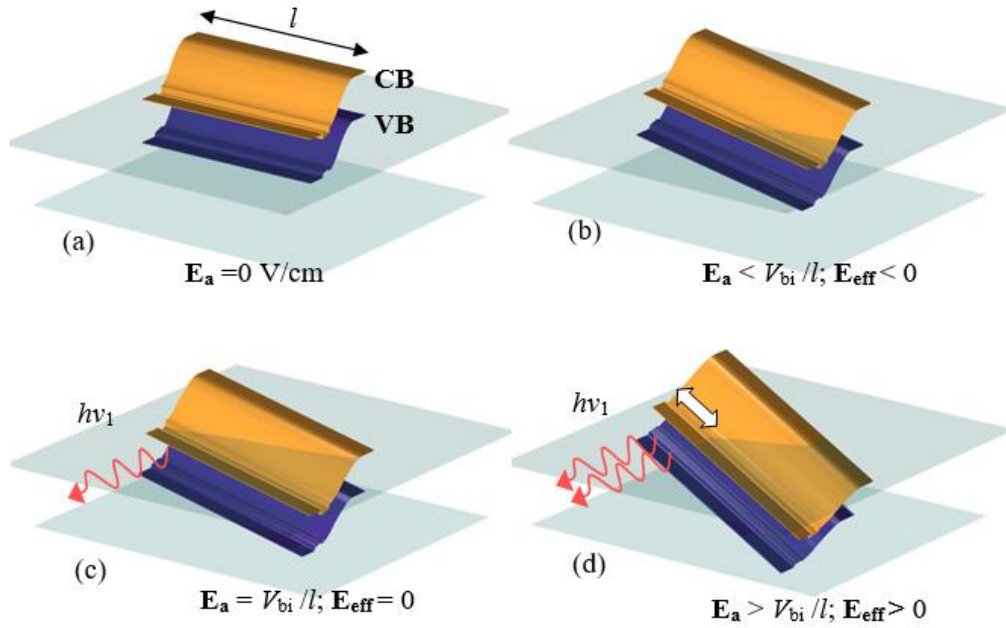
HELLISH aygıtına uygulanan voltajın polaritesine ve boyuna elektrik alanının miktarına göre enerji bantları eğilmektedir. Yüksek elektrik alan altında, iletim ve değerlik bantları sıcak elektronlar ve boşluklar tarafından doldurulur, yarı-düz bant

şartları tüm hetero-eklem yapı boyunca geçerli olur ve böylece sıcak elektron etkisiyle ışık emisyonu elde edilir. Yarı-düz bant durumu, aktif bölge boyunca etkin elektrik alan (E_{eff}) ile yorumlanabilir.

$$E_{eff} = \frac{V_a - V_{bi}}{\sqrt{l^2 + W_{depletion}^2}} \approx \frac{V_a - V_{bi}}{l} = E_a - \frac{V_{bi}}{l} \quad (2.7)$$

Burada, V_a dış voltaj, V_{bi} kontak (*built-in*) potansiyeli, E_a dış uygulanan elektrik alan, W tüketim bölgesinin genişliği, l ise geleneksel ileri yönde beslenmiş bir $p-n$ diyotun uzunluğudur. Eşitlik 2.7, ileri yönde beslenmiş geleneksel bir $p-n$ diyot (dikey iletim) ile HELLISH aygıtının (boyuna iletim) yöntemleri arasında bir bağlantı olarak düşünülebilir. İleri yönde beslenmiş geleneksel bir $p-n$ diyot uzunluğunun (l) aygıt çalışmasının belirlenmesinde hiçbir önemi yoktur, HELLISH aygıtları için ise tüketim bölgesinin genişliği (W) hesaplamalarda göz ardı edilebilirken ($W \ll l$ olarak) l önemli bir yere sahiptir [76, 89].

Şekil 2.13'de HELLISH aygıtına uygulanan gerilim değerine göre enerji bantlarında meydana gelen eğilmeler ve ışıma durumları verilmiştir. Şekil 2.13 (a)'da l cm uzunluğuna sahip bir HELLISH yapısına dış bir elektrik alan uygulanmadığı durumda ($E_a = 0$ V/cm) dengedeki enerji bantlarının profili verilmiştir. Uygulanan elektrik alanın değeri artıkça enerji bantlarında meydana gelen eğilmelerde artmaktadır. Şekil 2.13 (b)'de yarı-düz bant durumu altında dış bir elektrik alan uygulandığında ($E_a < V_{bi}/l$) yeterli boşluklar olmadığı için aygıt ışıma yapamaz, (c)'de uygulanan alan artıkça yarı-düz bant koşulu sağlanır ve ($E_a = V_{bi}/l$), aygıt ışıma yapmaya başlar ($E_{eff} = 0$), (d)'de daha güçlü bir elektrik alan uygulanmasıyla ($E_a > V_{bi}/l$), emisyon bölgesi boşaltma (*drain*) bölgesine doğru büyür ve daha güçlü bir ışıma elde edilir [76, 89].

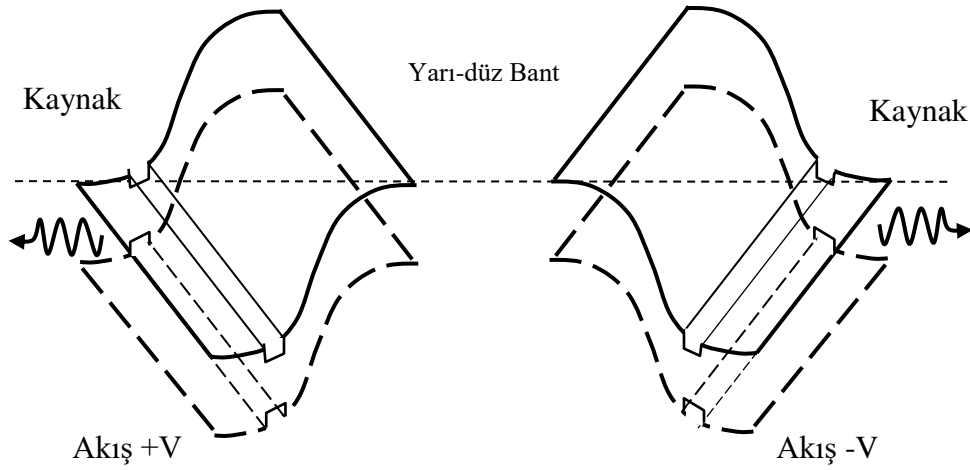


Şekil 2.13. HELLISH aygıtının yarı-düz bant koşulları altında uygulanan dış bir boyuna elektrik alan ile enerji bantlarında meydana gelen eğilmeler ve aygıtın ışıma durumu. (CB iletim bandı ve VB değerlik bandını göstermektedir) (a) $E_a = 0$ V/cm, (b) $(E_a < V_{bi}/l)$ (c) $(E_a = V_{bi}/l)$, (d) $(E_a > V_{bi}/l)$ [76,89]

Sonuç olarak, uygulanan yüksek alanlarda HELLISH aygıtı çalışmasında sıcak elektron etkileri hakimdir. Ancak, düşük elektrik rejiminde, alan sıcak elektron etkileri oluşturamayacak kadar düşüktür ve ışık emisyonunun temel olarak taşıyıcıların yarı düz bant koşul bölgesine yayılmasından dayanmaktadır.

HELLISH aygıtlarının en önemli özelliklerinden biri olan uygulanan voltajın polaritesine bağlı olmadan her iki polaritede de çift yönlü olarak ışıma yapabilmesidir. Uygulanan voltajın polaritesi tersine çevrilirse bantların eğilme yönü dolayısıyla emisyon bölgesi değiştirilebilir.

Şekil 2.14 (a)' da HELLISH aygıt pozitif polaritede beslendiğinde ışık emisyonu soldandır (b) negatif polaritede beslendiğinde bant ters yönde eğilir ve ışık emisyonu sağdandır [76, 77, 89].



Şekil 2.14. Farklı eğilme yönlerine sahip HELLISH aygıtının çift yönlülüğünün gösterimi [76]

HELLISH aygıtlarının sahip olduğu üstün özellikleri:

- Au/Ge/Ni alaşımlarının yayılması ile oluşturulmuş yalnızca iki elektriksel kontakla sahip olmasıyla aygıt üretiminin oldukça basit ve ucuz olması.
- Elde edilen ışık emisyonu uygulanan dış boyuna elektrik alan altında oluşan sıcak taşıyıcıların yeniden birleşmesinden dolayıdır, bu yüzden uygulanan voltajın polaritesinden bağımsız ışıma elde edilir.
- Bu iki özelliğinden dolayı, optik çıkışa sahip XOR ve NAND kapılarının iki boyutlu dizilerin üretimi kolayca gerçekleştirilebilir.

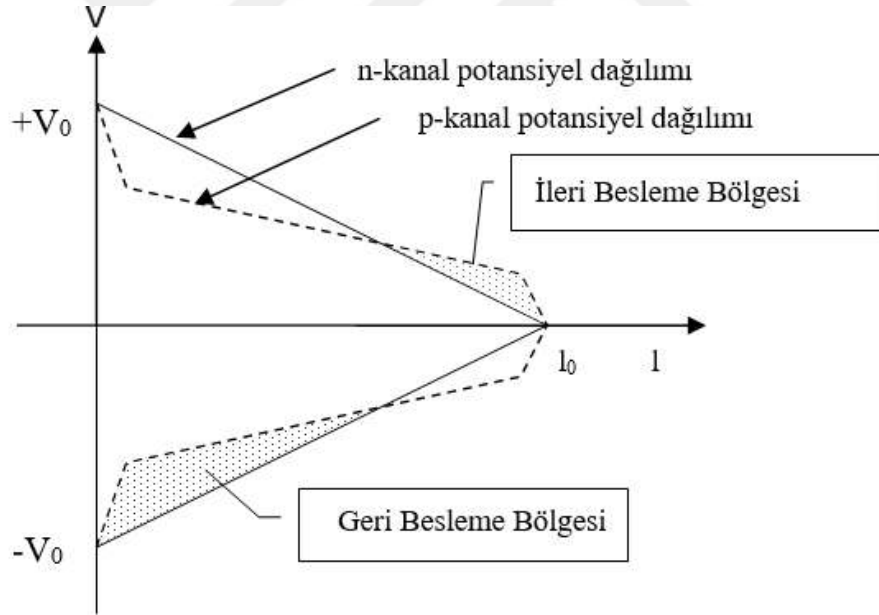
2.7. Top Hat HELLISH (THH) Yapılar

Top Hat HELLISH (THH) yapısı standart HELLISH yapılardan şekil ve kontak konfigürasyonu açısından farklıdır ve sahip olduğu silindirik şapka şeklinden dolayı bu isim ile anılmaktadır. THH yapıları, HELLISH aygıtların çalışma prensibindeki bazı durumların açıklanması fikri ile tasarlanmıştır. Bu durumlardan ilki, sıcak elektronların meydana gelemeyeceği kadar düşük elektrik alan bölgesinde dahi HELLISH aygıtın ışıma yapıyor olmasıdır. Bir diğer durum ise, HELLISH aygıtlarda yapılan bazı araştırmalar, p -kanalında difüze olan kontakların ohmik olmaması durumunda p -kanalında yüksek dirençli bir bölgenin oluşmasına yol açabileceğini gösterdi [77, 89].

Bu durum, p -kanalında oluşan elektrik alan gücünün n -kanalı tarafındaki elektrik alan gücünden daha az olmasına ve birleşme noktasının *built-in* potansiyelini azaltarak kaynak kontak yakınından daha güçlü ışın çıkışının elde edilmesine neden olmaktadır

[76, 77, 91]. THH aygıtı tam da bu bahsedilen durumları açıklamak için geliştirilen bir yapıdır.

Sonuç olarak HELLISH aygıtlarda, doğrusal olmayan elektrik alan dağılımı kontaklardan bir veya daha fazlasının ohmik olmadığı durumlarda meydana gelmektedir. n -kontakların ohmik ve p -kontakların yüksek dirençli ohmik olmadığı bir l_0 uzunluğuna sahip HELLISH aygıtı ele alınırsa, n -kanalı boyunca potansiyel dağılım doğrusal iken, p -kanal boyunca potansiyel dağılım doğrusal değildir. Şekil 2.15’de pozitif besleme altında ohmik olan n -kanal boyunca potansiyel dağılım aygıtın uzunluğu ile azaldığı görülebilir. p -kanal boyunca potansiyel dağılım doğrusal değildir ve aşamalı olarak azalmaktadır. HELLISH aygıt kontaklarında ohmik olmayan durum varlığında, p - ve n -kanalları boyunca hem boyuna iletim hem de ileri yönde beslenmiş eklem boyunca dikey iletim mekanizmaları hakimdir. Bu dikey iletimden dolayı, HELLISH aygıtının aynı p - n eklem düzleminde hem geri yönde hem de ileri yönde kutuplanma bölgelerinin oluşmasına neden olur [6].



Şekil 2.15. Uzunluğu l_0 olan HELLISH aygıtının p -kanal boyunca doğrusal olmayan potansiyel dağılımı. Buruda n -kanal kontakları ohmik iken p -kanal kontakları ohmik değildir [76]

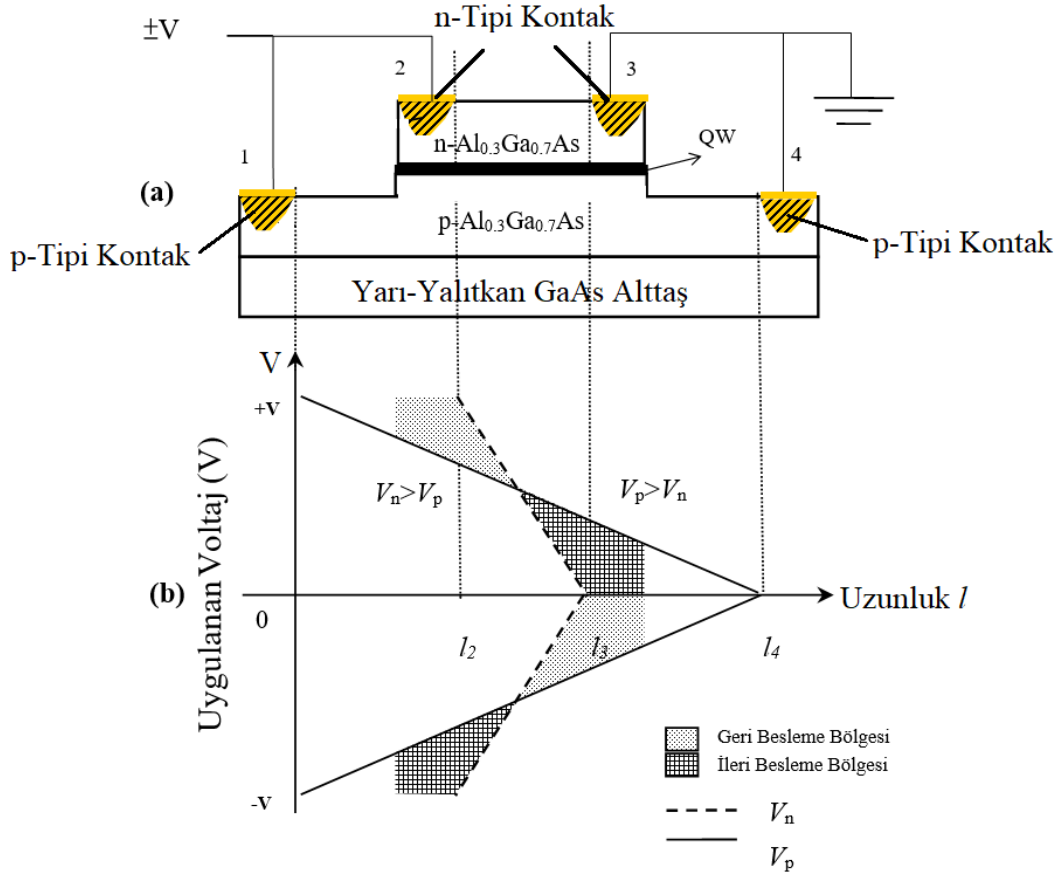
p -kanalında ohmik olmayan kontak davranışı sonucu elde edilen *built-in* potansiyelinin azalmasıyla daha fazla ışıma durumunun elde edilmesinin taklit edilerek geliştirilmesi için THH geometrisinde yapılar elde edilmiştir. Bir THH geometrisindeki yapı, n -kanaldan daha uzun bir p -kanal tabakasından oluşur ve n -kanal p -kanal üzerine simetrik olacak şekilde büyütülmüştür. THH yapısında, elektriksel kontaklar diğer

HELLISH aygıtlarda olan tüm kanallara difüze olmuş iki adet kontak konfigürasyonundan farklı olarak, *n*- ve *p*-kanalları için ayrı ayrı birbirinden bağımsız olarak oluşturulmuş dört adet kontakta oluşmaktadır. Her kontak birbirinden bağımsız olduğu için, *n*- ve *p*-kontakları oluşturulurken farklı metal malzemeleri kullanılabilir [6, 76, 89].

Şekil 2.16 (a)'da THH aygıt yapısı ve kontak konfigürasyonu, (b)'de *p*- ve *n*- kanal boyunca oluşan potansiyel dağılım verilmiştir. Burada, *n*-tabakasına ait *n*-tipi kontaklar 2 ve 3 numaralı ile, *p*-tabakasına ait *p*-tipi kontaklar ise 1 ve 4 numaralı ile gösterilmiştir. Böylece, doğrusal olmayan potansiyel dağılım kontakların konumlarıyla sağlanmıştır.

Normal çalışma şartlarında, 1 ve 2 numaralı kontaklar birleştirilerek bir atmalı/darbeli potansiyel fark uygulanırken ($\pm V$), 3 ve 4 numaralı kontaklar birleştirilip topraklanır ve bağlantı şekli 12V34T şeklinde ifade edilir. Aygıt pozitif polaritede beslendiğinde 1 ve 2 numaralı kontaklar akış kontağı, 3 ve 4 numaralı kontaklar ise kaynak kontakları olarak verilir. Negatif polaritede beslendiğinde 1 ve 2 numaralı kontaklar kaynak kontakları, 3 ve 4 numaralı kontaklar akış kontağıdır.

THH yapısına bir potansiyel fark uygulandığında, *n*-kanal ve *p*-kanal uzunlukları farklı olduğu için iki kanalda oluşan elektrik alan değeri farklıdır ve *n*-kanal daha fazla elektrik alana maruz kalır. Bu alan sayesinde kaynak bölgesi yakınlarında bir ileri besleme ve akış bölgesi yakınlarda geri besleme bölgesi yaratır. İleri ve geri besleme bölgeleri uygulanan potansiyel farkın polaritesine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, uygulanan potansiyel farkın polaritesi değiştiğinde ışıma yapan tarafta değişmektedir [76, 91].



Şekil 2.16. (a) THH aygıt ve kontak yapısının şematik gösterimi. (b) p-kanal ve n-kanal boyunca oluşan potansiyel dağılımı. Aygıt, $V_p > V_n$ bölgesinde ileri besleme, $V_n > V_p$ bölgesinde geri besleme durumundadır [76,77,91].

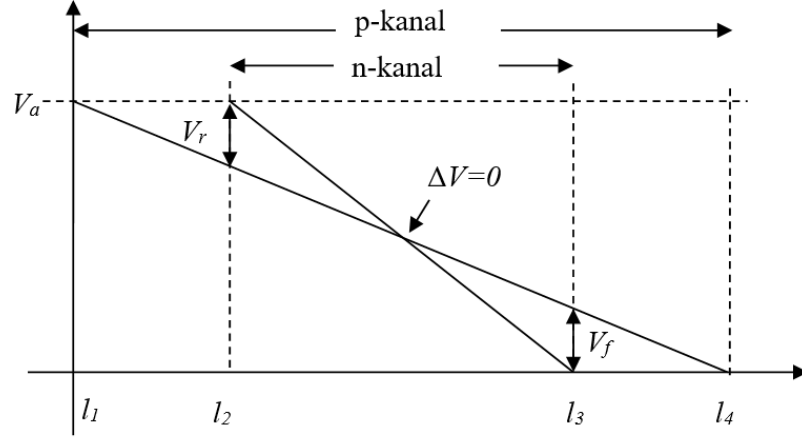
Şekil 2.17’de THH yapısında heteroeklem boyunca potansiyel dağılımı verilmiştir. Burada l_2 konumunda bulunan 2 numaralı kontakdan l_3 konumundaki 3 numaralı kontaklar boyunca voltaj dağılımı gösterilmiştir. Kontak konumları, 1 numaralı kontak için $l_1 = 0$, ve 2,3, 4 numaralı kontaklar için sırasıyla için l_2, l_3, l_4 olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.16’da n-kanal uzunluğu $l_3 - l_2$ ve p-kanal uzunluğu l_4 ile verilmiştir. Potansiyel farkı (ΔV) 2 ve 3 numaralı kontakların arasındaki orta noktada sıfırdır ve bantlar uygulanan alandan etkilenmezler. En büyük ΔV , geri besleme durumunda (V_r) l_2 uzunluğunda ve ileri besleme durumunda (V_f) l_3 uzunluğunda meydana gelir. Potansiyel farkı, ileri ve geri besleme voltajları;

$$\Delta V(V_a, l) = -\frac{XV_a}{l_2 - l_3} [2l - (l_2 + l_3)] \quad l_2 < l < l_3 \quad (2.8)$$

$$V_{r,l_2} = -\frac{l_4 - (l_3 - l_2)}{2l_4} V_a = -XV_a \quad l = l_2 \quad (2.9)$$

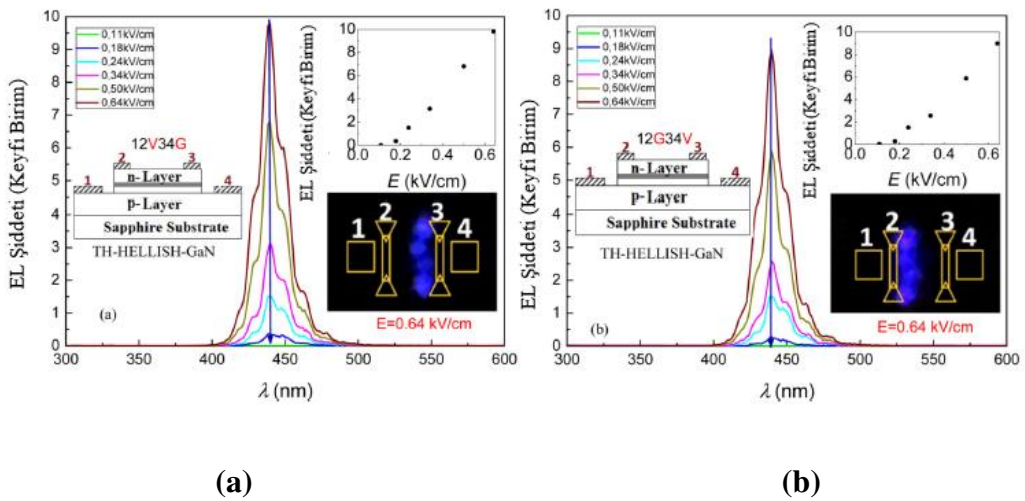
$$V_{f,l_3} = XV_a \quad l = l_3 \quad (2.10)$$

ile verilir. Burada X , boyutsuz THH parametresidir ve $X = [l_4 - (l_3 - l_2)]/2l_4$ ile verilir [76].



Şekil 2.17. Heteroeklem boyunca potansiyel dağılımı. V_r ve V_f sırasıyla eklem bölgesinde maksimum geri ve ileri besleme, V_a ise uygulanan ve ΔV voltaj farkıdır. l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 ise kontak konumlarıdır [76].

THH yapıları kullanılarak, literatürde en son gerçekleştirilen çalışmada indiyum oranı 0,16 olan InGaN kuantum kuyusunun, n -tipi ve p -tipi GaN heteroeklem tabakların n -tarafına yerleştirilmesiyle elde edilen dört kuantum kuyulu InGaN/GaN THH aygıtında XOR mantık kapısının ışık ile çalışması elde edilmiştir [4]. Şekil 2.18’de bu aygıt yapısı için negatif ve pozitif polaritede uygulanan farklı elektrik alan değerlerinde elektrolüminesans spektrumu verilmiştir. Aygıt her iki polaritede ışımaktadır ve XOR mantık kapısı olarak işlev görmektedir.



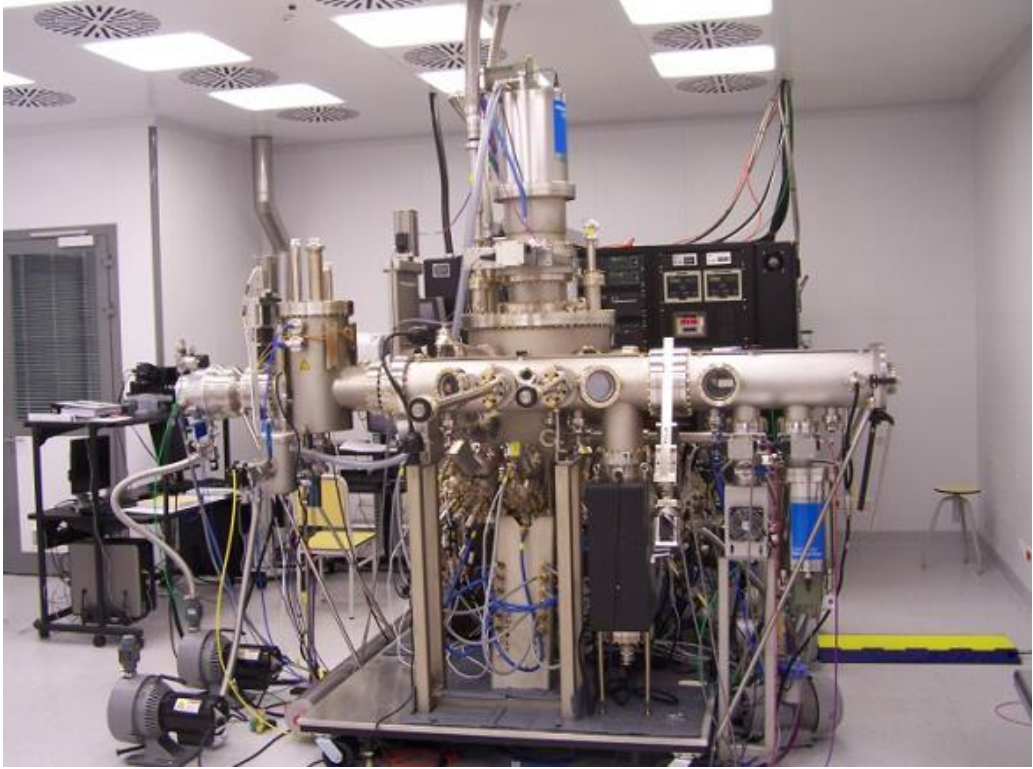
Şekil 2.18. InGaN/GaN THH aygıtının farklı elektrik alan değerleri altında (a) pozitif ve (b) negatif beslemede elektrolüminesans spektrumu [4]

3. ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI VE DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, tez kapsamında incelenen örneklerin tabaka yapısı, THH aygıt fabrikasyon süreçleri ve kullanılan deneysel düzenekler ile birlikte aygıt karakterizasyon yöntemleri hakkında detaylı bilgi verildi.

3.1. THH Örneklerin Yapısı

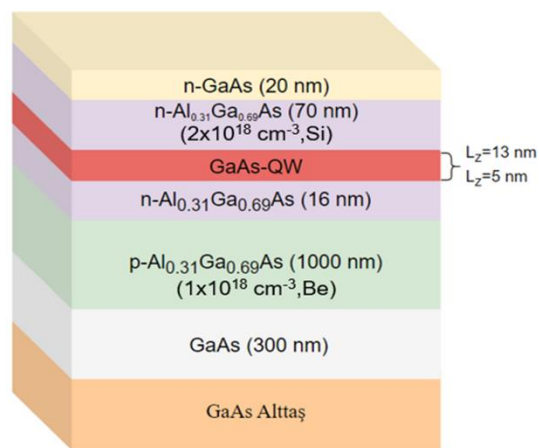
Tez kapsamında incelenen kuantum kuyu genişliği sırasıyla 13 ve 5 nm olan THH-GaAs-13 ve THH-GaAs-5 kodlu AlGaAs/GaAs tek kuantum kuyulu örnekler Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında 1000 sınıfı temiz odada bulunan Veeco GEN20MC moleküler demet epitaksi (MBE) büyütme sisteminde (Görsel 3.1), (100) yönelimli 3 inç çapında katkısız yarı-yalıtkan GaAs alttaş üzerine büyütüldü.



Görsel 3.1. Örneklerin büyütüldüğü MBE sisteminin genel görünümü

Büyütme işlemi başlamadan önce; alttaş, yükleme haznesinde 150 °C'ye ve hazırlık haznesinde yaklaşık 350-400 °C'ye kadar ısıtılarak su buharı ve karbon bazlı artık gazlardan kurtulmak için standart temizleme prosedürü olan kusturma işlemi uygulanarak GaAs alttaşın yüzey kirlilikleri giderildi. Daha sonra, GaAs alttaş büyütme haznesine alınarak yüzeyinde bulunan doğal oksit tabakasının kaldırılması için As akısı altında alttaş sıcaklığı 10 °C/dakika hızıyla 615 °C'ye kadar çıkartılarak pirometre ile ölçülen bu

sıcaklıkta 15 dakika ısı temizleme işlemine maruz bırakıldı. Oksit kaldırma sıcaklığı genellikle büyütme sıcaklığından daha yüksektir ve GaAs alttaş için bu değer yaklaşık 600-665 °C'dir [91–93]. Oksit kaldırma süreci boyunca yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (*Reflection high-energy electron diffraction*, RHEED) desenleri incelendi ve kırınım desenlerinin gözlenmesinin ardından GaAs alttaş sıcaklığı büyütme sıcaklığı olan 580 °C'ye indirildi. Alttaş yüzeyinde var olan karbon, oksijen gibi kirlilikler kristal kusurlarının oluşmasına neden olduğu için oksit kaldırma işlemi kaliteli kristal tabakaların büyütülmesi için oldukça önemlidir. Oksit kaldırma işlemi alttaş yüzeyinde bozulmalara neden olabileceğinden, ilk olarak temizlenen GaAs alttaş yüzeyi üzerine 580 °C'de 300 nm kalınlığında düzleştirici GaAs tabakası büyütüldü. Bu tabaka üzerine, 580 °C'de 1000 nm kalınlığında berilyum katkılı p-tipi $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ tabakası büyütüldü. Bu tabaka $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ berilyum ile katkılanarak boşluk taşıyıcılarının sayısı artırılmıştır. GaAs ve AlGaAs epi-katmanları ~14 V/III akı oranı altında büyütüldü. *n*-tipi $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ tabakası 580 °C'de 16 nm kalınlığında büyütüldü. Ardından, THH-GaAs-13 kodlu örnek için 13 nm ve THH-GaAs-5 kodlu örnek için 5 nm kalınlığına sahip GaAs kuyu tabakası büyütüldü. *n*-tipi $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ tabakası 580 °C'de 70 nm kalınlığında büyütüldü. Elektron taşıyıcılarının sayısını arttırmak için $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ bariyer tabakası $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ silisyum ile katkılandı. Son olarak, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ silisyum ile katkılı *n*-tipi GaAs tabakası kapak olarak büyütülerek örnek büyütme işlemi tamamlandı. Büyütülen örneklerin tabaka yapısı şematik olarak Şekil 3.1'de verildi.



Şekil 3.1. Örneğin tabaka yapısı ve kalınlıklarının şematik gösterimi

3.2. Fabrikasyon Aşamaları

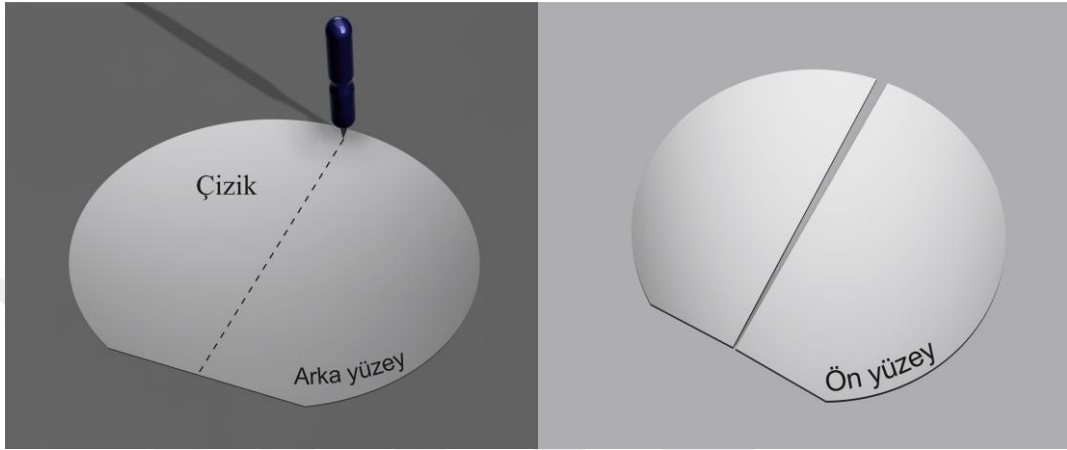
Gelişmiş büyütme sistemleri kullanılarak üretilen yarıiletken malzemeler elektronik ve opto-elektronik uygulama alanlarındaki kullanım amaçlarına göre farklı geometrilerde şekillendirilerek aygıt haline dönüştürülür. Büyütülen yarıiletken malzemenin aygıt olarak kullanım performanslarının belirlenebilmesi için gerekli ölçümlere hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Büyütülen bu yarıiletken malzemenin ölçülebilir ve aygıt olarak kullanılabilir duruma gelmesi için uygulanan işlem basamakları fabrikasyon olarak adlandırılır. Aygıt üretim sırasında ortamda bulunan parçacıkların kusurlara ve aygıt performansına olan negatif etkilerini azaltmak için fabrikasyon süreçleri temiz oda olarak adlandırılan ortamlarda gerçekleştirilir. Temiz odalar, havadaki toz ve diğer partikül sayılarının mümkün olduğunca düşük seviyelerde tutulduğu, sıcaklık ve nem değerlerinin sürekli kontrol altında tutulduğu hassas çalışma alanlarıdır.

Aygıt fabrikasyon aşamaları genel olarak; kristal kesme, temizleme, fotolitografi, aşındırma, metalizasyon, kaldır-at (*lift-off*) ve tel bağlama aşamalarından oluşmaktadır. Bu tez kapsamında üzerinde çalışılan kuantum kuyu kalınlıkları 13 ve 5 nm olan AlGaAs/GaAs tabanlı örneklerin THH ve fotoiletken aygıt üretimleri için fabrikasyon işlemleri Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında bulunan temiz odada gerçekleştirildi. Fabrikasyon sürecinde, kristal kesme, temizleme, fotolitografi ve aşındırma işlemleri 100 sınıfı (metre küpteki parçacık sayısı en fazla 100), metalizasyon, tavlama ve tel bağlama işlemleri ise 1000 sınıfı (metre küpteki parçacık sayısı en fazla 1000) temiz oda kısmında gerçekleştirildi. Büyütülen örneklerin, THH aygıtlar için THH geometrisinde, fotoiletken aygıtlar için halka kontak (*ring contact*) geometrisinde üretimleri için fabrikasyon sürecinde izlenen adımlar hakkında detaylı bilgi aşağıda maddeler halinde verildi.

3.2.1. Kristal kesme

Epitaksiyel olarak büyütülen kristal yongalar kristal kesme işlemiyle istenilen daha küçük boyutlarda ve uygun geometrik şekillerde kesilerek aygıt üretimi için kullanılabilir. Yarıiletken kristal yongaların belirli kristallografik doğrultular boyunca kesilmesinde elmas uçlu kesicilerin kullanımı yaygın bir yöntemdir. Elmas uç ile kristal kesme işlemi ilk önce, yonganın arka yüzeyine büyütme doğrultusunda boydan boya düz bir çizik veya tek bir kenarından küçük bir çentik atılarak yapılır. Ardından, yonga ters çevrilerek ön yüzeyinden çizik veya çentik atılan noktaya küçük bir kuvvet uygulanarak kristal

yonganın bu kısımdan düzgün bir şekilde kırılması sağlanır (Şekil 3.2). Bu tez çalışmasında incelenen farklı kuantum kuyu genişliğine sahip olan sıcak elektron tabanlı AlGaAs/GaAs THH aygıtların üretimi için 3" çaplı kristal yongadan elmas uç yardımı ile 6x6 mm² boyutlarında parçalar kesildi. Kristal yonganın elmas uç yardımı ile kesilme yöntemi Şekil 3.2’de şematik olarak verildi.



Şekil 3.2. Elmas kesici ile kristal yonganın kesilmesinin şematik gösterimi.

3.2.2. Kristal temizleme

İstenilen boyutlarda kesilme süreci tamamlanan örneklerin yüzeylerinde bulunan doğal oksit tabakası ve organik kirlilikler ile kesilme işlemi sırasında oluşan küçük kristal parçalarının temizlenmesi üretilen aygıtın performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle kesilen örnek parçaları fotolitografi sürecinden önce aseton, alkol ve de-iyonize su kullanılarak hafif temizleme işlemine tabi tutuldu. Örnek yüzeyindeki organik moleküllerin çözünerek temizlenmesi için oda sıcaklığında 5 dakika boyunca aseton içerisinde bekletildi. Asetonun kristal örnek yüzeyinde tutunarak bıraktığı yüzey kirliliklerini kaldırmak için örnek parçaları 5 dakika izopropanol içerisinde bekletildi. Ardından, örnek parçaları bol akan de-iyonize (18,2 MΩ.cm) su akışı ile yıkanarak filtrelenmiş yüksek saflıkta kuru azot (N₂) gazı ile kurutuldu. Son olarak, örneklerin yüzeyinde oluşan doğal oksit tabakasının kaldırılması için örnekler hidroklorik asitli çözelti HCl:H₂O (1:1) içerisinde 30 s bekletilerek daha güçlü bir temizleme prosedürü uygulandı. Literatürde, GaAs tabanlı alaşım yarıiletkenlerin temizlenme sürecinde HCl:H₂O (1:1) kullanılması oldukça yaygın bir yöntemdir [14, 94, 95]. Ardından örnekler bol akan de-iyonize su akışı ile yıkanıp, kuru azot gazı ile kurutuldu. Son olarak, örnekler 110 °C’de sıcak plaka üzerinde 1 dakika boyunca ısıtılarak yüzeylerindeki de-iyonize su kalıntıları yok edildi. Örnek yüzeyleri optik mikroskop yardımıyla incelenerek temiz olup

olmadıkları kontrol edilerek örneklerin temizlenme süreci tamamlandı. Örnek yüzeylerinin temizlenmediği durumda benzer süreçler tekrarlandı.

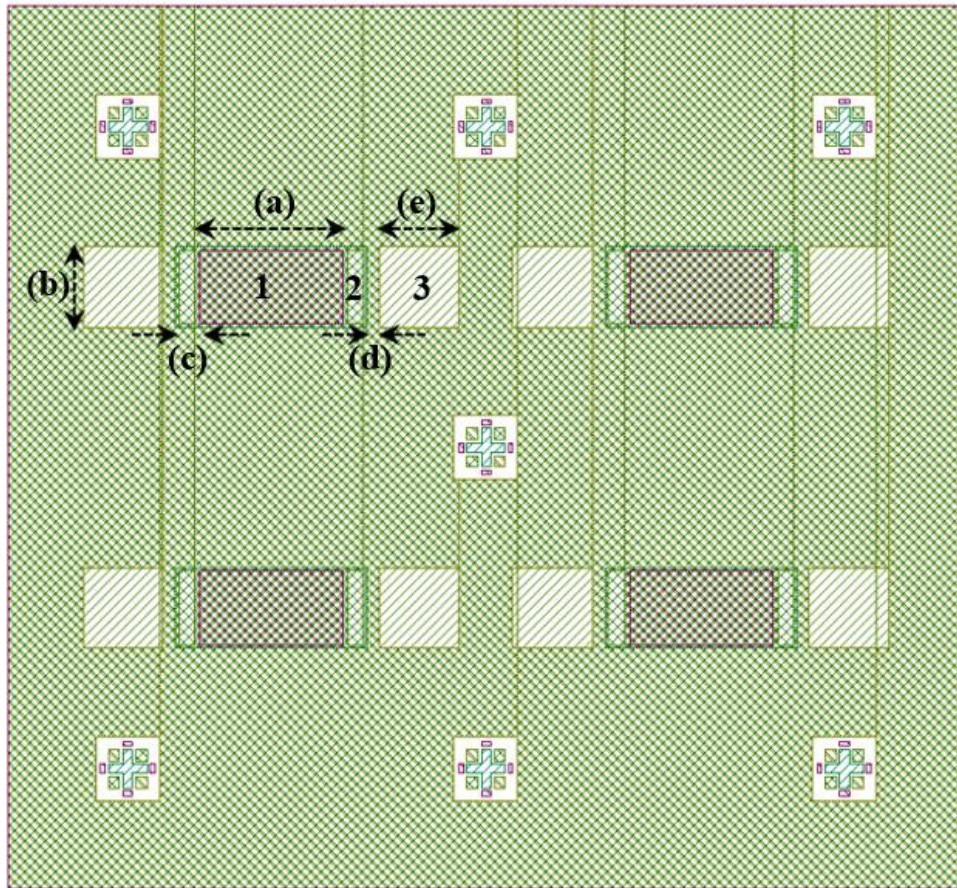
3.2.3. Fotolitografi

Fotolitografi, genellikle mor ötesi (*ultraviolet*, UV) ışın kaynağı kullanılarak bir maske üzerindeki desenin örnek yüzeyine aktarılması için fotodirenç olarak adlandırılan optik duyarlılığa sahip malzemelerin, örnek üzerine hassas bir şekilde uygulanması ve ardından optik ve kimyasal yollar ile örneğin bu desende şekillendirilmesi sürecini ifade eder. Yarıiletken endüstrisi, nanoteknoloji ve mikro elektronik gibi birçok alanda aygıt üretim sürecinde, yüksek hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Fotodirenç kullanımı, fotolitografi sürecinde desenlerin oluşturulmasını sağlar ve mikrofabrikasyonun temelini oluşturur. Fotodirençler, pozitif ve negatif olmak üzere iki türü mevcuttur. Pozitif fotodirenç kullanım sürecinde, UV ışına maruz kalan bölgelerde kimyasal bir reaksiyon başlar ve bu reaksiyon fotodirencin bağ yapısını zayıflatır. Bu kısımlar developer çözeltisi tarafından daha fazla çözünerek örnek yüzeyinden kalkar ve istenilen desen örnek yüzeyine aktarılmış olur. Negatif fotodirenç kullanım aşamasında ise, UV ışına maruz kalan bölgelerde bağlar kuvvetlenir, developer çözeltisi içerisinde krom maske altında UV ışını görmeyen yerler aşınarak örnek yüzeyinden kalkar ve istenilen desen örnek yüzeyine aktarılır.

Bu tez çalışmasında, “AZ9260” kodlu pozitif fotodirenç kullanıldı. Örneklerin yüzeyini fotodirenç kaplamak için döndürme ile kaplama metodundan yararlanıldı. Bu metotta, öncelikle temizlenen örnek döner kaplama cihazına (*spin coater*) yerleştirildi. Örnek yüzeyine bir miktar AZ9260 kodlu fotodirençten damlatıldı ve örnek yüzeyinin homojen bir şekilde fotodirenç malzemesi ile kaplanması için döner kaplama cihazıyla örnekler 4000 rpm döndürme hızında 1 dakika döndürülerek 2 µm kalınlığında homojen bir şekilde fotodirenç kaplandı. Homojen bir fotodirenç kaplama süreci, örnek ile maske arasında boşluk kalmayacak şekilde birbiri üzerine hizalanıp istenilen desenin düzgün bir şekilde elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Fotodirencin kuruyup örnek yüzeyine daha iyi tutunması ve içerisinde bulunan su molekülü ve çözücü maddelerin buharlaşması için sıcak plaka (*hot plate*) üzerinde 110 °C’de 1 dakika hafif ısıtma işlemine maruz bırakıldı.

Tez kapsamında, THH aygıt ve fotoiletken aygıtların üretilebilmesi için THH aygıt ve halka kontak (*ring contact*) desenlerine sahip kuvartz üzerine krom kaplı maske kullanıldı. Bu maskelerin üzerindeki krom kaplama UV ışını geçirmezken, kaplı olmayan

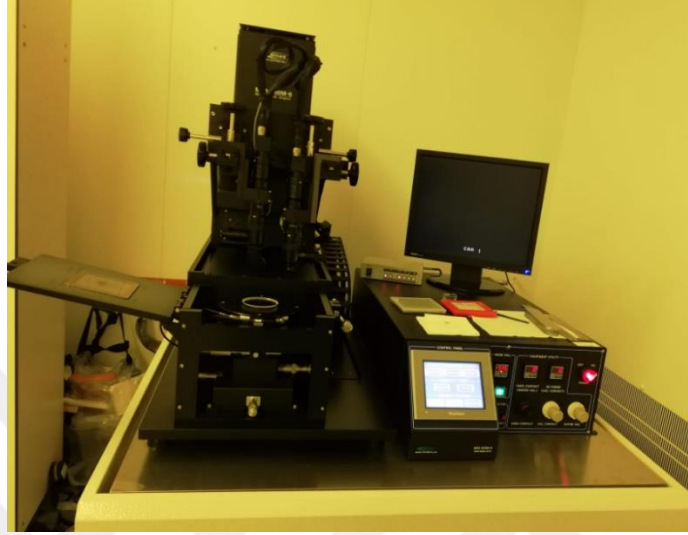
kuvartz kısım ışığı geçirerek fotodirencin yapısını değiştirir. Bu sayede maske üzerindeki desenler kolaylıkla örneğin yüzeyine aktarılır. Maske üzerindeki desenler, bilgisayar destekli tasarım (*Computer Aided Design*, CAD) tabanlı çizim programı kullanılarak oluşturuldu. Tasarlanan maske üzerindeki dörtlü THH aygıt deseni, Şekil 3.3'te gösterildi. Burada, 1 numara ile gösterilen alan aşındırma maskesi, 2 numara ile gösterilen alan n -tipi kontak maskesi, 3 numara ile gösterilen alan ise p -tipi kontak maskesini göstermektedir. Maske üzerindeki THH deseninde (a) n -tipi tabakanın kanal uzunluğu, (b) örnek genişliği, (c) n -tipi kontak genişliğini ve (d) n -tipi ve p -tipi kontaklar arası mesafeyi (e) ise p -tipi kontak genişliğini ifade etmektedir. Mesa deseni, n -tipi ve p -tipi kontak maskeleri üst üste çizdirildiğinde Şekil 3.3'deki maske görseli elde edilir. THH maskesi kullanılarak kuantum kuyu genişliği 13 nm ve 5 nm olan GaAs/AlGaAs örneklerin fotolitografi işlemleri gerçekleştirildi.



Şekil 3.3. Maske üzerindeki dörtlü THH desen tasarımı.

En yüksek yoğunluğu yaklaşık 365 nm dalgaboyu civarında olan cıva lambasına sahip MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı (Görsel 3.2) kullanılarak, maske ile örnek

hassas bir şekilde üst üste hizalandı ve ışınlama işlemi gerçekleştirildi. Örnekler, 200 mJ/cm^2 enerjili UV ışına 60 saniye boyunca maruz bırakıldı. Böylece, maske üzerindeki desen fotodirenç kaplı örneğe aktarıldı. UV ışığına maruz kalan bölgelerde, fotodirencin çözünürlüğü değişmektedir.



Görsel 3.2. MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı

3.2.4. Banyolama (Develop)

UV ışına maruz bırakılan fotodirenç kısımlarının uygun bir geliştirici çözeltisinde kalarak kaldırılmasıyla gizli aygıt modelinin örnek yüzeyinde belirmesi işlemi banyolama (*develop*) olarak adlandırılmaktadır. Bu amaçla, genellikle kullanılan fotodirenç türüne uygun çözücü kimyasal developer kullanılır. Bu tez çalışmasında, AZ9260 kodlu pozitif fotodirenç ile uyumlu olan AZ400K kodlu geliştirici kullanıldı. UV ışığa maruz kalan fotodirenç kaplı bölgelerin kaldırılması için, 1:4 oranında AZ400K:de-iyonize su çözeltisi hazırlandı. Çözelti içine konulan örneğin UV ışığı gören fotodirenç kısımlarının çözünmesi için örnekler developer çözeltisi içinde ~1,5-3 dakika tutuldu. Develop işlemi sırasında yüzeydeki renk değişiminden işlemin tamamlanıp tamamlanmadığı anlaşıldı. Çözelti içinden örnekler çıkarılıp, de-iyonize su ile temizlenerek kuru azot gazı ile kurutuldu. Develop işleminin sonunda tasarlanan THH aygıt maske deseni örnek üzerinde belirdi.

3.2.5. Aşındırma

Aşındırma süreci, örnek yüzeyinde önceden tanımlanmış bölgelerdeki katmanların kaldırılmasıyla örnek yüzeyini istenilen aygıt modelinde şekillendirmeyi ifade eder. Bu teknik, mikro ölçekte karmaşık şekillere sahip cihazların üretilmesine olanak tanır. Genel olarak iki tip aşındırma işlemi mevcuttur, bunlardan ilki kimyasal çözeltiler kullanılarak

Reaktanlar(1)

Ürünler (3)

Reaksiyon (2)

Film

Kuru aşındırma süreci, örnek yüzeyinde fiziksel olarak iyon bombardımanı (*Ion-beam or sputtering*), yüzeyde meydana gelen kimyasal reaksiyon (*plasma etching*) ve her iki mekanik ve kimyasal mekanizmanın bir arada bulunduğu (*Reactive Ion Etching*) süreçleri içerir. Anizotropik aşındırmayla, malzemeyi bir yönde diğerlerine göre daha hızlı bir şekilde kaldırarak daha düzgün ve dik duvarlı yapıların oluşturulmasını sağlar. Ancak, bu yöntem yüksek maliyetlidir, ıslak aşındırmaya kıyasla seçiciliği düşüktür ve

yüzeyde elektronik hasara neden olabilir. Reaksiyon sonucu oluşan ürünler uçucu olmalı ve gaz sistemi tarafından kolayca taşınabilir olmalıdır [14].

Bu tez çalışmasında kullanılan örneklerin aşındırma işleminde ıslak aşındırma yöntemi kullanıldı. GaAs ıslak aşındırma işleminde, ilk önce Ga ve As oksitleri oluşturularak yüzeyin oksitlenmesi sağlanır ve ardından asit veya baz çözeltileri kullanılarak bu oksit tabakanın çözülmesi ile süreç tamamlanır. GaAs yapılarında oksitlenmeyi sağlamak için hidrojen peroksit (H_2O_2) ve oksit tabakanın çözülmesi için sülfürik asit (H_2SO_4) kullanılır [97].

Aşındırma işlemine başlamadan önce örnekler sıcak plaka üzerinde $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 3 dakika boyunca sert ısıtma işlemine maruz bırakıldı. Böylece fotodirenç sağlamlaşarak aşınmaya karşı direnci artar.

H_2O_2 (%30) ve H_2SO_4 (95-97 %) kullanılarak aşındırma çözeltisi $H_2SO_4:H_2O:H_2O_2$ (1:8:160) oranlarında hazırlandı. Örnekler 2 dakika 30 saniye boyunca aşındırma çözeltisi içerisinde bekletildi. Örneklerin aşındırılma derinlikleri profilometre ile $\sim 650\text{ nm}$ olarak ölçüldü. Aşındırma işlemi sonucunda, aşındırma alanlarında kuantum kuyu genişliği 13 nm ve 5 nm olan her iki örnek için yaklaşık 120 nm kalınlığındaki *n*-tipi $Al_{0.31}Ga_{0.69}As$ tabakaları ile birlikte yaklaşık 530 nm kalınlığındaki *p*-tipi $AlGaAs$ tabakaları da aşındırıldı. Bu nedenle, örnek yüzeyinde yukarıda kalan dikdörtgen bölgeler *n*-tipi $AlGaAs$ tabakasından oluşurken, aşağıda kalan aşınan tüm yüzeyler *p*-tipi $Al_{0.31}Ga_{0.69}As$ tabakasından oluşmaktadır.

Islak aşındırma işleminden sonra örnekler sırası ile aseton, izopropanol ve de-iyonize su ile temizlenip ardından kuru azot gazı ile kurutuldu. Sıcak plaka üzerinde $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 dakika boyunca tutularak su buharı kalıntılarından örnekler arındırıldı. Hedeflenen aşındırma derinliği olan *p*- $Al_{0.31}Ga_{0.69}As$ tabakasının yaklaşık yarısına kadar ulaşıldı.

3.2.6. Metalizasyon

Metalizasyon, üretilen yarıiletken aygıtların elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için yarıiletken yüzeylere litografik işlemlerle belirlenen desenlere göre metal kontak tabakaların seçilen bölgelere uygulanma sürecini ifade eder. Bu metal/yarıiletken ara yüzeyde oluşturulan kontakların direnci, cihazın performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. İdeal bir ohmik kontak, yarıiletken örnek ve metal

kaplama arasında herhangi bir direnç engeli olmayan bir teması ifade eder. Bu tür bir temas, Ohm Kanunu'na tam olarak uyar ve temasın elektriksel direnci neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir.

Bu tez çalışmasında, *n*-tipi $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ tabakası üzerinde ohmik kontak elde edebilmek için sırasıyla Ni (30 nm)/Ge (70 nm)/Au (200 nm) metalleri, termal buharlaştırma sistemi kullanılarak belirtilen kalınlıklarda kaplandı.

Ohmik *n*-tipi kontak davranışı elde etmek için GaAs tabanlı yapılarda Ni/Ge/Au alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [98, 99]. Au, yarıiletken yüzeye yapıştırıcı bir katman olarak kullanılır. Bu, Au ile yarıiletken arasındaki kimyasal bağların güçlenmesine yardımcı olur ve kaplanacak olan metallerin yüzeye sıkıca tutunmasını sağlar. Ayrıca, Au, korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Kontakların zaman içinde oksitlenmesini önleyerek kontakın uzun ömürlü olmasını sağlar. Ni elementi metal alaşıma ıslatıcı bir madde olarak eklenir. Düşük yüzey gerilimine sahip olan Ni elementi, AuGe metalinin alaşım sırasında "toplanmasını" önlemeye ve kontak yapışkanlığını artırmaya yardımcı olur. Ayrıca, Ni elementinin diğer önemli rolü yüzey oksitlerini azaltmaya yardımcı olmasıdır. Bu azaltma, düşük bir elektriksel kontak direnci sağlamak için önemlidir. Ni, ayrıca Ge elementinin GaAs alt tabakasına difüzyonunu kolaylaştırarak yüksek iletkenliğe sahip *n*-tipi bir tabaka oluşumuna katkıda bulunur. Bu tabaka, düşük dirençli ohmik kontakların elde edilmesi için kritiktir [98, 100 – 102].

Metalizasyon işleminde, litografik işlemler metalizasyon maskesi kullanılarak tekrarlanır. Elde edilen *mesa* deseninin üzerine *n*-tipi kontak alanlarının oluşturulması için örnek AZ9260 fotodirenç malzemesi ile kaplanıp, sıcak plaka üzerinde 110 °C'de 1,5 dakika hafif ısıtma işlemine maruz bırakıldı. MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcısı ile krom maske üzerindeki *n*-tipi metal kontak desenleri 60 saniye UV ışın pozlaması ile örnek yüzeyine aktarılmıştır. Örnekler AZ400K/H₂O (1:4) çözeltisi içinde ~ 2,5 dakika tutuldu böylece UV ışına maruz kalan bölgelerdeki fotodirenç tabakaları örnek yüzeyinden kaldırıldı. Daha sonra, kontak alanlarına metal buharlaştırmadan önce, bu alanlarda oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için örnekler HCl:H₂O (1:10) içerisinde 15 saniye bekletildi. Ohmik kontak elde etmek için sırası ile Ni (30 nm)/Ge (70 nm)/Au (200 nm) metalleri, elektron demet buharlaştırma sistemi kullanılarak belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Metallerin kaplanması işleminden sonra örnekler aseton içine koyularak metal tabakalarının altında kalan fotodirenç tabakasının kaldırılması için

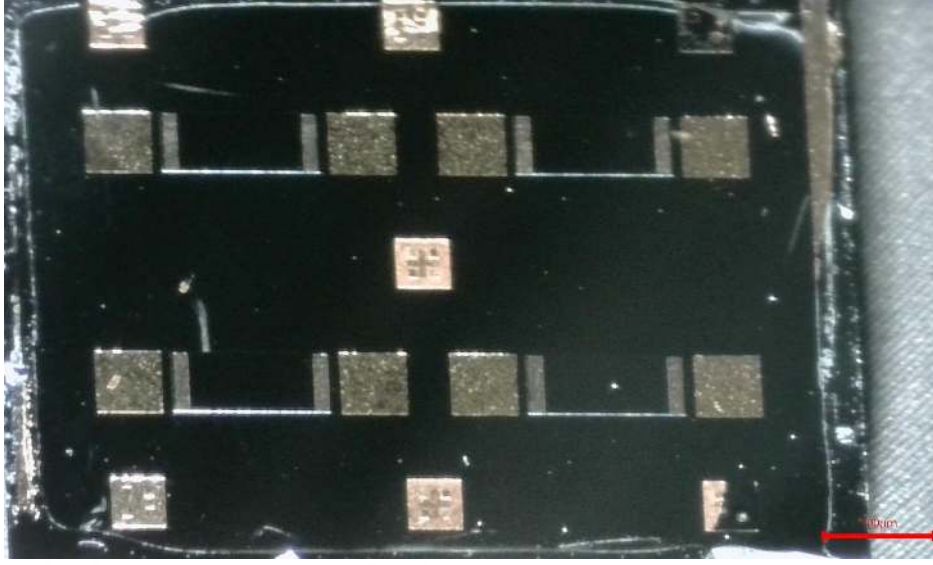
kaldır-at (*lift-off*) işlemi gerçekleştirildi. Böylece *mesa* üzerinde *n*-tipi metal kontaklar elde edildi.

p-tipi $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ tabakası üzerine ohmik kontakları oluşturmak için, Cr (20 nm)/ Au (200 nm) metalleri ısısal buharlaştırma sistemi kullanılarak belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Cr/Au *p*-tipi ohmik kontak oluşturmak için GaAs/ AlGaAs yapılarda kullanılmaktadır [102, 103]. Cr, tabaka üzerine iyi bir yapışma sağlamak amacıyla kullanılırken, Au genellikle GaAs üzerinde düşük dirençli ohmik kontak oluşturmak için kullanılır [104, 105].

p-tipi kontak alanlarının oluşturulması için örnek AZ9260 fotodirenç malzemesi ile kaplanıp, sıcak plaka üzerinde 110 °C'de 1,5 dakika hafif ısıtma işlemine maruz bırakılmıştır. MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcısı ile krom maske üzerindeki *p*-tipi metal kontak desenleri 60 saniye UV ışın pozlaması ile örnek yüzeyine aktarılmıştır. Örnekler AZ400K/H₂O (1:4) çözeltisi içinde ~ 2,5 dakika tutuldu böylece UV ışına maruz kalan bölgelerdeki fotodirenç tabakaları örnek yüzeyinden kaldırıldı. Kontak alanlarına metal buharlaştırmadan önce, bu alanlarda oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için örnekler HCl: H₂O (1:10) içerisinde 15 saniye bekletilmiştir. Ardından, omik kontak elde etmek için sırası ile Cr (20 nm)/ Au (200 nm) metalleri, elektron demet buharlaştırma sistemi kullanılarak belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Metallerin kaplanması işleminden sonra örnekler aseton içine koyularak metal tabakalarının altında kalan fotodirenç tabakasının kaldırılması için kaldır-at işlemi gerçekleştirildi. Böylece *p*-tipi metal kontaklar elde edildi.

3.2.7. Isıl işlem (Tavlama)

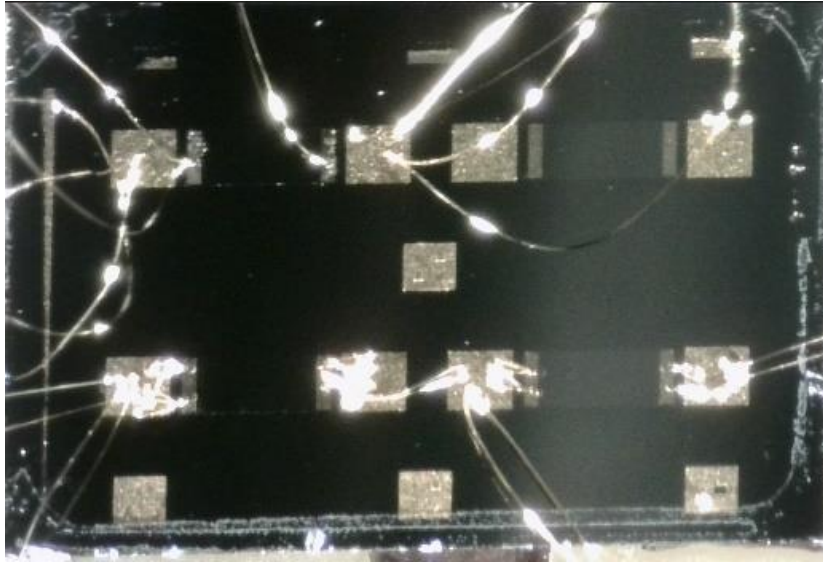
Metalizasyon işleminden sonra, metal alaşımlarının yarıiletken tabakalar boyunca difüzyonunu sağlamak, yarıiletken malzeme ile metal tabakalar arasındaki direncin azalmasını ve ohmik bir kontak davranışının elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, metalizasyon işleminden sonra örnekler, hızlı bir ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Oksidasyonu önlemek amacıyla ısıtma işlemi saf azot gazı (%99,999) ortamında (AS- ONE-100) çabuk ısıtma cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Ohmik *n*-tipi kontakların metalizasyon işleminden sonra, kontak direncini düşürmek için örnekler 420 °C' de 30 saniye azot ortamında hızlı ısıtma işlemi uygulandı. Böylece altın telleri bağlamak için gerekli olan kontak alanları oluşturuldu. Isıl tavlama sonucu elde edilen dördü THH aygıtının Görsel 3.3'de verildi.



Görsel 3.3. Fotolitografi yöntemi ile hazırlanan THH geometrisindeki dörtlü aygıt

3.2.8. Altın tel bağlama

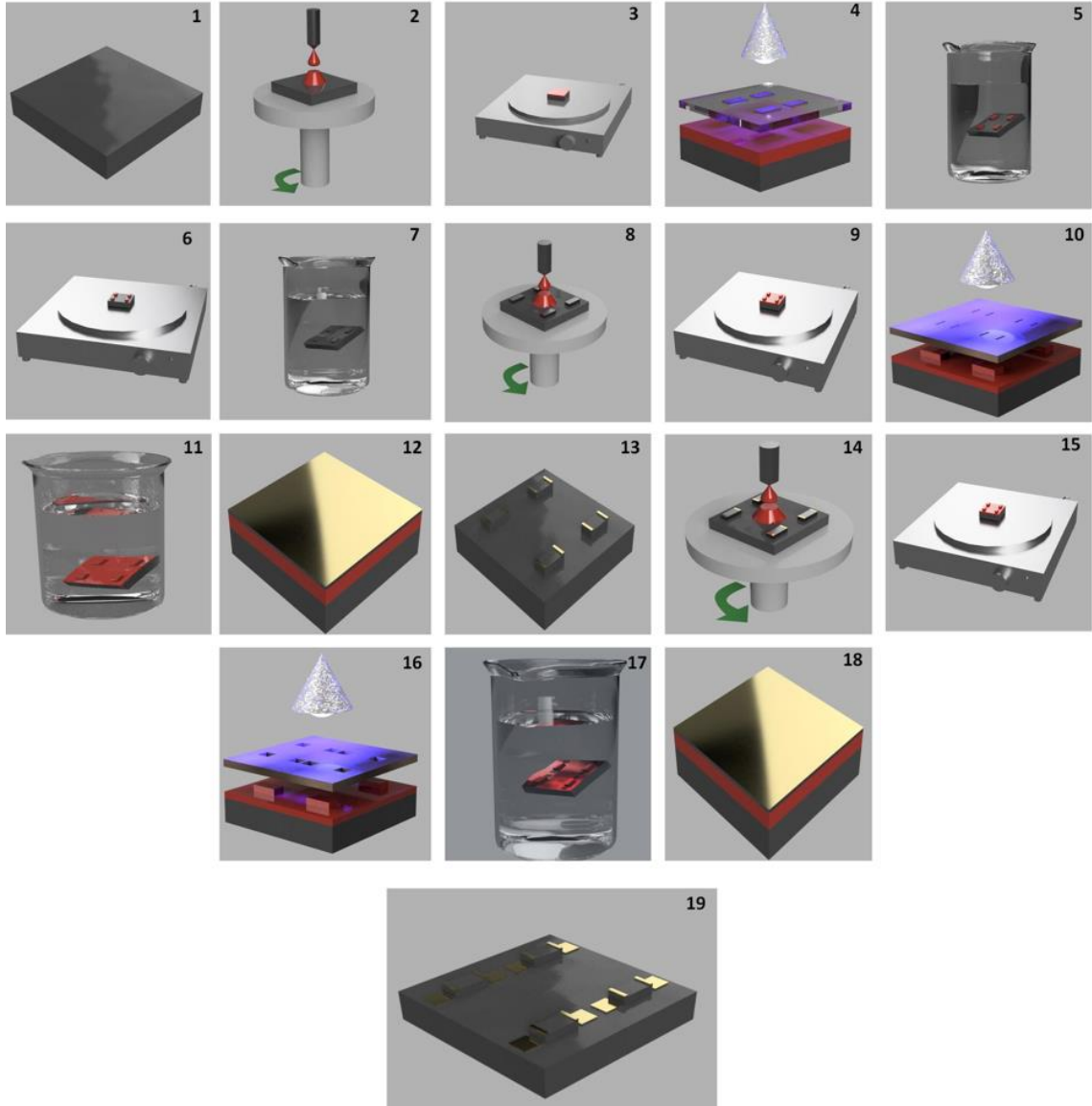
THH geometrisinde üretilen aygıtların elektriksel ölçümleri için, öncelikle örnekler üzerinde altın kontak alanları bulunan seramik altlıklar üzerine yapıştırılır. Yapıştırma işlemi ısısal iletkenliği iyi olan Ge verniği kullanılarak gerçekleştirildi. Ardından, tel bağlayıcı cihaz yardımıyla örnek üzerindeki kontak alanları ile seramik altlık üzerindeki altın kontak alanları arasında altın tel bağlantılarının yapılması ile THH geometrisinde aygıt elektriksel ölçümlere hazır hale getirildi. Altın tel bağlama sonrası elde edilen THH aygıtının görünümü Görsel 3.4’de verildi.



Görsel 3.4. Altın tel bağlantısı tamamlanan THH geometrisindeki dörtlü aygıt

3.2.9. Aygıt üretim reçetesi

Aygıt fabrikasyonu sürecinde izlenen tüm adımlar aşağıda maddelere halinde sunulmuştur ve bu adımları gösteren akış şeması Şekil 3.5’de verildi.



Şekil 3.5. THH aygıt fabrikasyon aşamalarının şematik gösterimi. (Kristal yonga kesimi (1), örneğin fotodirenç kaplanması (2), hafif ısıtma (3), mesa deseni maskeleme (4), banyolama (5), sert ısıtma (6), ıslak aşındırma (7), fotodirenç kaplama (8), hafif ısıtma (9), n-tipi kontak maskeleme (10), banyolama (11), metal kaplama (12), lift-off (13), fotodirenç kaplama (14), hafif ısıtma (15), p-tipi kontak maskeleme (16), banyolama (17), metal kaplama (18), fabrikasyonu tamamlanan aygıt (19).)

Birinci aşama;

- Büyütülen kristal yongadan 6x6 mm² boyutlarında küçük kristal yongalar kesildi.
- 5 dakika aseton içerisinde bekletildi.
- De-iyonize su akışı ile temizlendi.

- 5 dakika izopropanol içerisinde bekletildi.
- De-iyonize su akışı ile temizlendi.
- HCl:H₂O (1:1) çözeltisinde 30 s bekletildi.
- De-iyonize su akışı ile temizlendi.
- Kuru azot gazı ile kurutuldu.
- 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı.

İkinci aşama;

- Örnek, 4000 rpm hızında 1 dakika döndürülerek AZ9260 kodlu foto-direnç ile kaplandı.

Üçüncü aşama;

- 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı.

Dördüncü aşama;

- MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı ile aşındırma maskesi hizalandı. 60 saniye boyunca UV ışığa maruz bırakıldı.
- 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı.

Beşinci aşama;

- AZ400K developer: H₂O de-iyonize su (1:4) çözeltisinde ~1,5-3 dakika tutularak banyolama işlemi gerçekleştirildi.
- De-iyonize su akışı ile temizlendi.
- Kuru azot gazı ile kurutuldu.

Altıncı aşama;

- 120 °C’de 3 dakika boyunca sert ısıtma işlemi uygulandı.

Yedinci aşama;

- Foto-direnç kalınlığı profilmetre ile ölçüldü.
- H₂SO₄:H₂O:H₂O₂ (1:8:160) aşındırma çözeltisi içerisinde 2 dakika 30 saniye tutuldu.
- 5 dakika aseton içerisinde bekletildi.
- De-iyonize su akışı ile temizlendi.
- 5 dakika izopropanol içerisinde bekletildi.
- De-iyonize su akışı ile temizlendi.
- Kuru azot gazı ile kurutuldu.
- 100 °C’de 1 dakika ısıtıldı.

- Böylece p-tipi $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{As}$ tabakasının yarısına kadar aşındırılma sağlandı.

Sekizinci aşama;

- n-tipi kontak alanlarının oluşturulması için örnek 4000 rpm hızında 1 dakika döndürülerek AZ9260 kodlu foto-direnç ile kaplandı.

Dokuzuncu aşama;

- 110 °C’de 1,5 dakika ısıtıldı.

Onuncu aşama;

- Maske hizalayıcısı ile krom maske üzerindeki n-tipi metal kontak desenleri hizalandı ve 60 saniye UV ışığa maruz bırakıldı.
- 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı.

Onbirinci aşama;

- AZ400K developer: H_2O de-iyonize su (1:4) çözeltisi içinde ~ 2,5 dakika banyolama işlemi gerçekleştirildi.
- Metal buharlaştırmadan önce doğal oksit tabakasını kaldırmak için $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1:10) içerisinde 15 saniye bekletildi.

Onikinci aşama;

- Termal buharlaştırma yöntemi ile sırası ile Ni (30 nm)/Ge (70 nm)/Au (200 nm) metalleri belirtilen kalınlıklarda kaplandı.

Onüçüncü aşama;

- Metal tabakalarının altında kalan fotodirenç tabakasının kaldırılması için aseton ile (*lift-off*) işlemi gerçekleştirildi.
- Hızlı ısı tavlama yöntemi ile 420 °C’ de 30 saniye azot ortamında tavlama işlemi gerçekleştirildi. Böylece n-tipi kontaklar elde edildi.

Ondördüncü aşama;

- p-tipi kontak alanlarının oluşturulması için örnek 4000 rpm hızında 1 dakika döndürülerek AZ9260 kodlu foto-direnç ile kaplandı.

Onbeşinci aşama;

- 110 °C’de 1,5 dakika ısıtıldı.

Onaltıncı aşama;

- Maske hizalayıcısı ile krom maske üzerindeki p-tipi metal kontak desenleri hizalandı ve 60 saniye UV ışığa maruz bırakıldı.
- 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı.

Onyedinci aşama;

- AZ400K developer: H₂O de-iyonize su (1:4) çözeltisi içinde ~ 2,5 dakika banyolama işlemi gerçekleştirildi.
- Metal buharlaştırmadan önce doğal oksit tabakasını kaldırmak için HCl: H₂O (1:10) içerisinde 15 saniye bekletildi

Onsekizinci aşama;

- Termal buharlaştırma yöntemi ile sırası ile Cr (20 nm)/ Au (200 nm) metalleri belirtilen kalınlıklarda kaplandı.

Ondokuzuncu aşama;

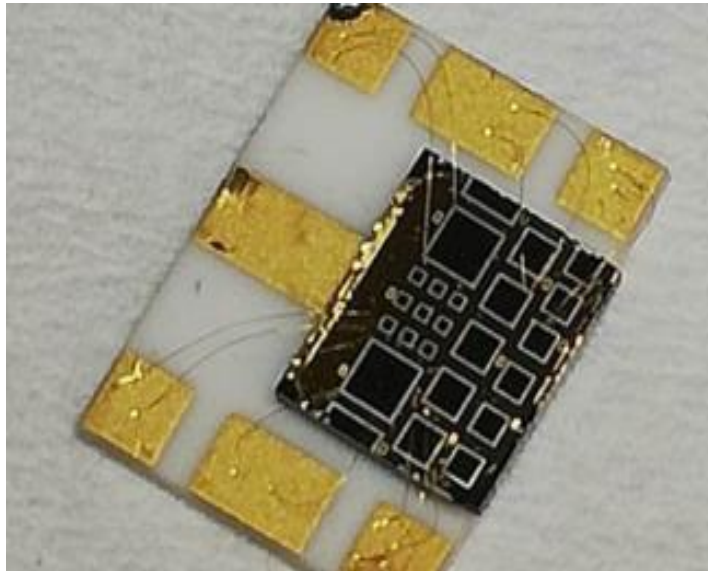
- Metal tabakalarının altında kalan fotodirenç tabakasının kaldırılması için aseton ile (*lift-off*) işlemi gerçekleştirildi. Böylece p-tipi kontaklar elde edildi.

Sonuç olarak; örnek üzerindeki kontak alanları ile seramik altlık üzerindeki altın kontak alanları arasında altın tel bağlantılarının yapılması ile THH geometrisinde aygıt fabrikasyonu tamamlandı. Kuantum kuyu genişliği 13 nm ve 5 nm olan örnek için elde edilen THH aygıtları, sırasıyla THH-GaAs-13 ve THH-GaAs-5 kodu ile ifade edilmektedir.

Büyütülen örneklerin fotoiletken aygıt üretimleri için detayları anlatılan benzer fotolitografi süreçleri halka kontak maskesi kullanılarak tekrarlandı. Fabrikasyon süreci 6x6 mm² örneklerin kesilmesiyle başladı. Fotolitografi aşamasında, örnek yüzeyleri döner kaplayıcının 4000 rpm hızında 1 dakika döndürülmesiyle AZ9260 kodlu fotodirenç kaplandı. Fotodirenç kaplı örnekler 110 °C'de 1 dakika ısıtıldı. MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı ile halka kontak mesa aşındırma maskesi hizalanıp, 60 saniye boyunca UV ışığa maruz bırakıldı. Ardından, 110 °C'de 1 dakika ısıtıldı. UV ışığa maruz kalan fotodirenç kaplı bölgelerin kaldırılması için, AZ400K developer: H₂O de-iyonize su (1:4) çözeltisinde ~1,5-3 dakika tutularak desenleme işlemi gerçekleştirildi. Örnekler de-iyonize su akışı ile temizlenip azot gazı ile kurutuldu. Aşındırma işleminden önce örnekler 120 °C'de 3 dakika boyunca sert ısıtma işlemi uygulandı. Aşındırma işleminde, H₂SO₄:H₂O:H₂O₂ (1:8:160) aşındırma çözeltisi içerisinde 2 dakika 30 saniye tutuldu. Ardından örnekler 5 dakika aseton, izopropanol ve de-iyonize su ile temizlendi ve 1 dakika 100 °C'de ısıtıldı. Aşındırma sonrası profilometre ile ölçülen aşındırılma derinlikleri ~660 nm olarak ölçüldü.

Elektriksel kontak alanlarının oluşturulması için, fotolitografi süreçleri tekrarlandı. Örnekler, 4000 rpm hızında 1 dakika döndürülmesiyle AZ9260 kodlu fotodirenç kaplandı

ve 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı. Maske hizalama cihazı kullanılarak, metal üst kontak maskesi örnek üzerine hizalandı ve 60 saniye boyunca UV ışığa maruz bırakıldı. Ardından, 110 °C’de 1 dakika ısıtıldı. AZ400K developer: H₂O de-iyonize su (1:4) çözeltisi içinde ~ 2,5 dakika desenleme işlemi gerçekleştirildi. Metal buharlaştırmadan önce doğal oksit tabakasını kaldırmak için HCl:H₂O (1:10) içerisinde 15 saniye bekletildi. Ohmik kontak elde etmek için üst kontaklar sırası ile Ni (30 nm)/Ge (70 nm)/Au (200 nm) metalleri, termal buharlaştırma sistemi kullanılarak belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Elektron demet buharlaştırma sistemi ile metallerin kaplanması işleminden sonra örnekler aseton içine koyularak metal tabakalarının altında kalan ışınlanıp bozulmuş fotodirenç tabakasının kaldırılması için kaldır-at işlemi gerçekleştirildi. Böylece *mesa* üzerinde *n*-tipi metal kontaklar elde edildi. Kontak direncini düşürmek için örnekler 420 °C’ de 30 saniye azot ortamında hızlı ısıtılma işlemine maruz bırakıldı. Alt *p*-tipi ohmik kontakları oluşturmak için ise benzer bir litografi süreci ile Cr (20 nm)/ Au (200 nm) metalleri elektron demet buharlaştırma sistemi kullanılarak belirtilen kalınlıklarda kaplandı. Böylece, halka kontak geometrisinde fotoiletken aygıtlar elde edildi. Aynı aygıt üzerinde 1500 x 1500 µm², 1000 x 1000 µm² ve 800 x 800 µm² olmak üzere farklı boyutlara sahip halka *mesa* yapıları bulunmaktadır. Aygıt üzerindeki kontak alanları ile seramik altlık üzerindeki altın kontak alanları arasında altın tel bağlantılarının yapılması sonucunda elde edilen fotoiletken aygıt görüntüsü Görsel 3.5’de verildi.



Görsel 3.5. Halka kontak geometrisinde fabrikasyonu tamamlanan örnek

3.3. Aygıt Karakterizasyonu

Aygıtların, yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı yöntemiyle yapısal karakterizasyonu ve sıcaklığa bağlı fotolüminesans ölçümleri Eskişehir Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı imkanları kullanılarak gerçekleştirildi. Halka kontak litografisinde üretilen örneklerin foto-akım ölçümleri ve THH geometrisinde üretilen aygıtların optik mantık kapısı ölçümleri için atmalı elektrolüminesans ölçümleri Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Optoelektronik Aygıt ve Malzeme Araştırma Laboratuvarları'nın olanakları kullanılarak yapıldı. Bu bölümde aygıtların yapısal, optik ve elektro-optik karakterizasyonları için kullanılan teknikler detaylıca sunuldu.

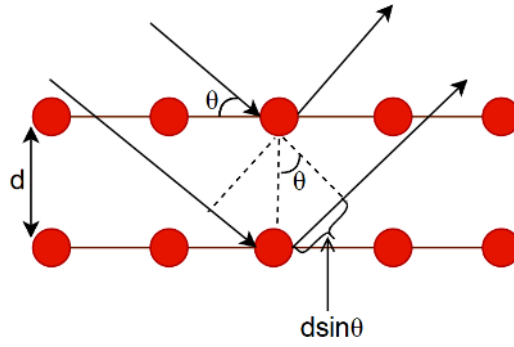
3.3.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı (HR-XRD) ölçümleri

HR-XRD tekniği kristal ile fiziksel bir temas gerektirmediği için kristale zarar vermeden yüksek teknoloji ile ince filmlerin kristal yapısını, epitaksiyel davranışını, örgü parametrelerini, gerilme, gevşeme, örgü kusurları, alaşım oranları, tabaka kalınlığı gibi önemli parametrelerin belirlenmesine imkân sağlayan yaygın olarak kullanılan hızlı bir yöntemdir.

X-ışınları elektromanyetik spektrumun morötesi ve gama ışınları bölgesi arasında yer alan dalga boyları 0,1-100 Å değerinde olan kısa dalga boylu yüksek enerjiye sahip malzeme içine nüfuz (girginlik) dereceleri yüksek olan elektromanyetik dalgalarıdır [106]. X-ışınlarının dalga boyu mertebesi bir kristaldeki atomlar arası mesafe ile benzerdir. Bu durum nedeniyle, kristale X-ışınları gönderildiğinde ışınlar kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılarak kırınım desenlerini oluşturur. Kırınım desenlerinin oluşması için gereken şart Bragg yasası ile açıklanabilir [107,108]. Bragg yasası;

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada, d düzlemler arası mesafeyi, θ gelme açısını, n bir tamsayı ve λ ise X-ışınlarının dalga boyudur. Yapıcı girişim oluşması için, yol farkı dalga boyunun tam katları şeklinde olmalıdır [108]. Yapıcı girişim olayı Şekil 3.6'da verilen görsel ile açıklanabilir.



Şekil 3.6. Bir kristaldeki X-ışını kırınımı.

Bir filament tarafından oluşturulan yüksek enerjili elektronların yüksek bir potansiyel fark (> 40 kV) altında hızlandırılarak hedef malzemeye çarpıp hızla yavaşlamasıyla hedef malzemenin türüne göre karakteristik X-ışınları oluşur. X-ışınlarını üretmek için en yaygın kullanılan hedef malzeme bakır (Cu) ve filtre olarak nikel (Ni) olduğunda, Cu $K_{\alpha 1}$ ışını üretilir. Üretilen bu X-ışınları numune üzerine yönlendirilir. Dedektörün kırınımına uğrayan X-ışınlarının yoğunluğu kaydetmesiyle ölçümler gerçekleştirilir.

HR-XRD sallantı eğrisi ölçümlerinde, gelen X-ışını ile numune yüzeyi arasındaki açı ω olarak gösterilirken, gelen ışın ve kırılan ışın tarafından çevrelenen açı 2θ olarak gösterilir. Bir sallantı eğrisi ölçümünde, 2θ açısı sabit tutulurken numune ω -ekseni etrafında döndürülür ve saçılan X-ışını yoğunluğunun ω 'nin bir fonksiyonu olarak elde edilir [109]. Ancak pratik olarak, sallantı eğrisi ölçümleri, X-ışını kaynağı ve dedektör eşzamanlı olarak aynı yöne doğru tarama yaparken numune sabit tutularak yapılır; böylece geliş açısı ω değişir ancak 2θ değişmeden kalır.

Örneklerin iki noktasından ((0,0) merkez noktası ve (20,20) noktası) (004) simetri düzlemin eksenine etrafında sallantı eğrisi (ω - 2θ) ölçümleri $0,0005^\circ$ hassasiyetinde ve Cu $K_{\alpha 1}$ ($\lambda = 0,15406$ nm) ışın kaynağına sahip Panalytical X'Pert Pro MRD marka HR-XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Görsel 3.6).



Görsel 3.6. *Panalytical X'Pert Pro MRD marka yüksek çözünürlüklü X-ray kırınımı sistemi (HR-XRD)*

3.3.2. Sıcaklığa bağlı fotolüminesans ölçümleri

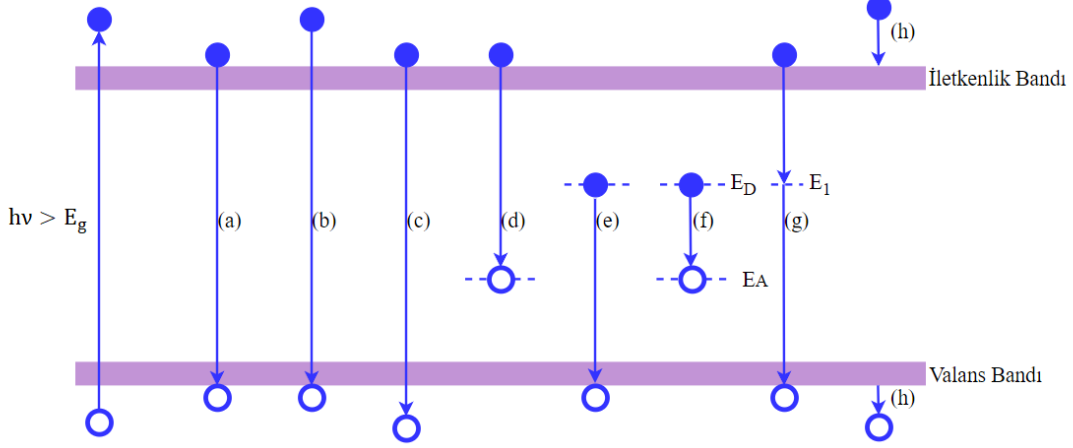
Yarıiletkenlerin optik özelliklerinin incelenmesinde fotolüminesans (PL) ölçüm tekniği örneğe zarar vermemesi ve litografi süreci gerektirmemesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. PL ölçümleri, yarıiletken örneğin enerji bant aralığını, yeniden birleşme mekanizmalarını ve ışımasız süreçlere neden olan safsızlık seviyesi ve kusurlar hakkında bilgi sağlar.

Bu ölçüm yöntemi, foton enerjisi yarıiletkenin enerji bant aralığı enerjisinden büyük olan bir optik uyarıcı kaynak ile yarıiletken aygıtın uyarılması temeline dayanır. Optik kaynak ile uyarılan yarıiletkendeki elektronlar kazandıkları enerji ile değerlik bandından iletkenlik bandına geçiş yapar, ancak bu durumda kararsızdır ve kazandığı fazla enerjisini kaybederek değerlik bandına dönme eğilimindedir. Bu dönüş sırasında, ışımalı ya da ışımasız geçişler meydana gelebilir ve bu geçişler yarıiletken yapı içerisindeki asal elektronik geçişler, katkı ve kusurlardan kaynaklanan geçişler hakkında bilgi verir.

Elektronların optik uyarıcı tarafından kazandığı enerji yarıiletkenin enerji bant aralığından büyükse, iletkenlik bandının üst seviyelerine çıkan elektron fononlar ile ışımasız olarak etkileşerek iletkenlik bandının en alt seviyesine iner. Daha sonra, iletkenlik bandının en alt seviyesinde, değerlik bandına ışımalı ya da ışımasız çeşitli

geçişler yaparak iner. Şekil 3.7’de olası geçişler şematik olarak gösterildi. Bu geçişler [88, 110, 111],

- (a) İletkenlik bandının en alt noktasından değerlik bandının en üstüne geçiş
- (b) İletkenlik bandındaki daha yüksek bir enerji seviyesinden değerlik bandına geçiş
- (c) İletkenlik bandının en alt seviyesinden değerlik bandındaki enerji seviyesine geçiş
- (d) İletkenlik bandından alıcı seviyesine geçiş
- (e) Verici seviyesinden değerlik bandına geçiş
- (f) Verici seviyesinden alıcı seviyesine geçiş
- (g) İletkenlik bandının en alt seviyesinden derin tuzak seviyesine, derin tuzak seviyesinden değerlik bandının en üst seviyesine geçiş
- (h) Bant içi geçişler



Şekil 3.7. Bir yarıiletkende ışımalı ışımasız olası geçişler.

Örneklerin PL ölçümleri 10-300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Düşük sıcaklıklarda, ısı genleşme ve ısı olarak aktif olan ışımasız yeniden birleşme süreçleri azaltılarak tüm spektral bilgi elde edilebilir.

Örneklerin sıcaklığa bağlı PL ölçümleri için Bruker VERTEX80/80v modeli FTIR (*Fourier Transform Infrared*) spektroskopisi cihazı kullanıldı (Görsel 3.7). Örnekler, 10-300 K sıcaklık aralığında ölçüm yapılmasına olanak sağlayan CaF_2 optik pencerelerine sahip kyrostat içine yerleştirildi. Uyarıcı kaynak olarak, 100 mW optik güce sahip 532 nm dalga boylu He-Ne lazer ve algılayıcı olarak Si APD (*Avalanche Photodiodes*) dedektör kullanıldı.



Görsel 3.7. Sıcaklığa bağlı fotolümenisans deney düzeneği

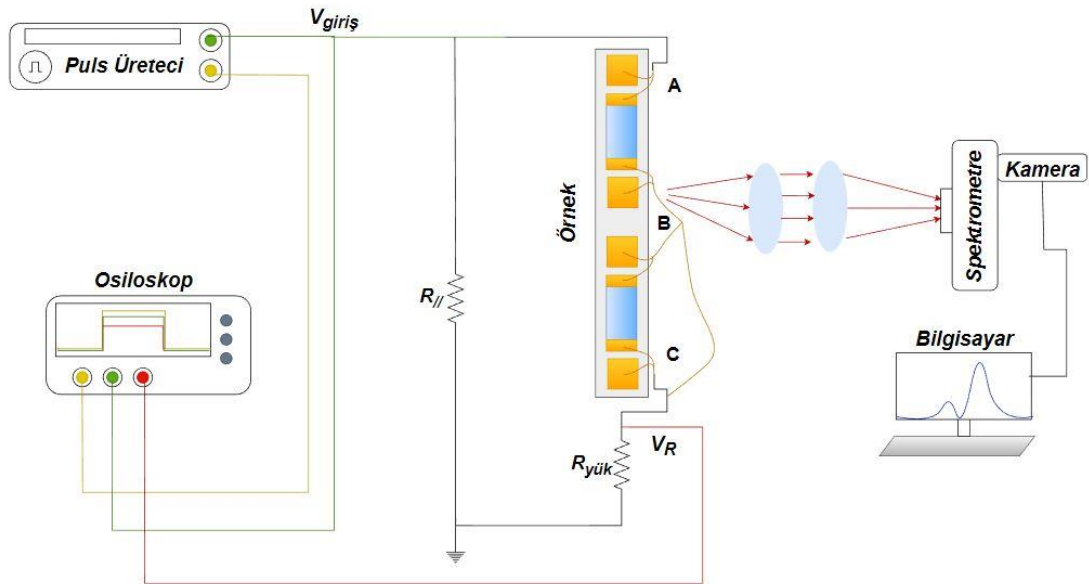
3.3.3. Elektrolümenisans deney düzeneği

Elektrolüminesans (EL) ölçümü, uygulanan dış bir elektrik alan ile, yarıiletken aygıtın uyarılması ve bu uyarılma sonucu elektron ve boşluk çiftlerinin kuantum kuyu veya bir $p-n$ eklemine aktif bölgesine enjekte edilerek birleşimi sonucu aygıttan yayılan ışının ölçüldüğü deneysel bir yöntemdir. EL ölçüm yöntemi, aygıttan yayılan ışını ölçerek bu aygıtın ışımalı yeniden birleşme mekanizmaları, yayılan ışığın spektral dağılımı, malzeme kalitesi ve kazanç gibi elektriksel ve optik özelliklerini incelemek için kullanılır.

Bu tez çalışmasında, THH aygıtların optik mantık kapısı ölçümleri için farklı sıcaklıklarda (3-300 K) atmalı EL ölçümü gerçekleştirildi. Bu ölçümler ile dalgaboyuna bağlı EL şiddeti değerleri farklı sıcaklık değerleri için bir görsel programa dili olan *Labview* arayüz yazılımı kullanılarak elde edildi.

Şekil 3.8’de THH aygıtların optik mantık kapısı ölçümleri için hazırlanan EL ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi verildi. Deney düzeneği incelendiğinde, ölçümlerde, 200 V’a kadar çıkabilen 2-200 ns atma genişliğine sahip Avtech-AVIR-4-B atma üretici ve dört kanallı 12 GHz band genişliğine sahip Tektronix TDS6124C osiloskop kullanıldı. Osiloskop girişlerinin yüksek voltajlardan zarar görmemesi için sinyal sönümleme (*attenuator*) elemanları kullanıldı. Atma üretici ile örnek arasında uzun kablolar kullanıldığında, malzemelerin dirençlerinden kaynaklanan termal gürültü (*Johnson*

noise) adı verilen sinyal parazitlenmesini önlemek için devreye bir paralel direnç ($R_{//}=50 \Omega$) bağlandı [112,113]. Ayrıca, bu direnç sayesinde atma üretici, iletim kabloları ve devre girişi arasında empedans eşleşmesi sağlandı. Atma üreticinin *sync* tetikleme çıkışı osiloskobun tetikleme kanalı olarak seçilen üçüncü kanalına bağlandı (deney düzeneğinde sarı renkli hat), böylece cihazın eş zamanlı ölçüm alması sağlandı. Devreye uygulanan $V_{giriş}$ voltajı osiloskobun birinci kanalından ölçüldü (deney düzeneğinde yeşil hat). Örnek üzerine düşen potansiyel farkın hesaplanması için, $R_{yük}=50 \Omega$ üzerine düşen voltaj (V_R) osiloskobun ikinci kanalından ölçüldü (deney düzeneğinde kırmızı renkli hat). Örnekler kapalı çevrimli helyum soğutmalı kryostat (3-300 K sıcaklık aralığında $\pm 0,1$ K hassasiyetle kontrol edilebilen) içerisine yerleştirilerek sıcaklığa bağlı ölçümler yapıldı. Örneğe uygulanan elektrik alan sonucunda oluşan ışıma, mercekler yardımı ile monokromatöre odaklandı ve dalga boyuna bağlı EL verileri elde edildi.



Şekil 3.8. THH aygıtlarının ölçümleri için hazırlanan EL deney düzeneği.

Atma giriş voltajı ($V_{giriş}$) ile yük direnci ($R_{yük}=50 \Omega$) üzerine düşen (V_R) farkından örnek üzerine düşen voltaj ($V_{örnek}$);

$$V_{örnek} = V_{giriş} - V_R \quad (3.2)$$

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

$$\frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_{yük}} - \frac{1}{R_{os}} \quad (3.3)$$

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

$$I_{\text{örnek}} = \frac{V_R}{R_{eş}} \quad (3.4)$$

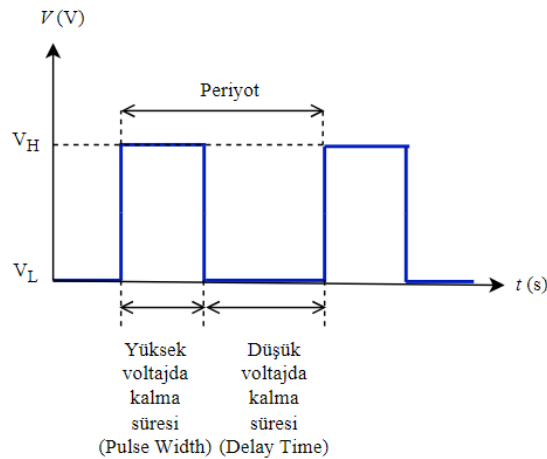
ile elde edilir.

Yarıiletken örneğe yüksek elektrik alanlar uygulandığında örneğin direncine, uygulanan alanın büyüklüğüne ve zamana bağlı olarak örgü sıcaklığının artmasına ve örneğin zarar görmesine yol açan joule ısınması (*joule heating*) meydana gelir.

EL ölçümleri sırasında, Joule ısınmasını önlemek ve örneğe zarar vermeden yüksek elektrik alan değerlerinde ölçüm yapılabilmesini mümkün kılmak için atmalı gerilim uygulandı. Joule ısınmasını engellemek için çok düşük iş döngüsü (*duty cycle*) değerine sahip elektrik sinyalleri uygulanmalıdır. İş döngüsü kare dalganın yüksekte kalma süresinin, periyot değerine oranıyla tanımlanır [114].

$$\%DC = \frac{PW}{T} \times 100 \quad (3.5)$$

Burada DC, iş döngüsünü ifade eder ve yüzde olarak verilir, PW (*pulse width*) atma genişliği diğer bir deyişle darbenin aktif süresini ve DT (*delay time*) gecikme zamanını ifade eder. Kare dalga iş döngüsü şeması Şekil 3.9’da verilmektedir. İş döngüsü değeri ne kadar küçük olursa, voltajın yüksekte kaldığı süre o kadar kısa olur. Bu durum, örneğin soğumasına verilen sürenin artmasına dolayısıyla aygıtın ısınma süresinin azalmasını yol açar.



Şekil 3.9. Kare dalga için iş döngü şeması. (V_H , kare dalganın tepe noktasındaki, V_L ise çukurdaki değerini ifade eder).

Görsel 3.8’de optik mantık kapısı olarak çalışan THH aygıtların EL ölçümleri sırasında alınmış osiloskop ekran görüntüsü verildi. Örneğe uygulanan atmalı gerilim, osiloskobun birinci kanalında sarı ile gösterilen kare dalga iken yük direnci üzerine düşen gerilim ise osiloskobun ikinci kanalından gösterilen yeşil renkli kare dalgadır.

Osiloskobun üçüncü kanalından gözlemlenen mor renkte olan sinyal tetikleme sinyalidir. Osiloskop ekranındaki kare sinyallerin düzgün şeklide olması, herhangi bir şekil bozukluğu olmaması deney sisteminde kullanılan tüm elemanların empedans uyumu içerisinde olduğunu gösterir.



Görsel 3.8. THH aygıtların elektrolüminesans ölçümleri sırasında elde edilen osiloskop ekran görüntüsü.

3.3.4. Foto-akım ölçümleri

Foto-akım ölçümleri için, farklı boyutlarda ($1500 \times 1500 \mu\text{m}^2$, $1000 \times 100 \mu\text{m}^2$ ve $800 \times 800 \mu\text{m}^2$) halka kontak geometrisinde üretilen (Görsel 3.5) aygıt yapısı kullanıldı. Örnekler, 3-300 K sıcaklık aralığında ölçüm yapılabilmesi için Oxford Instruments kryostat sistemine yerleştirildi. Gerilim kaynağı olarak, Keithley 238 yüksek akım ve gerilim kaynağı kullanıldı. İlk önce, farklı sıcaklıklar altında, 0,1 V aralıklarla -7 V ve 10 V aralığında ileri ve geri besleme gerilimleri uygulanarak akım-voltaj (I-V) ölçümleri gerçekleştirildi. Daha sonra aynı I-V ölçümü, bu sefer örneğin 100 mW çıkış gücüne sahip 325 nm dalgaboylu uyarıcı He-Cd lazer kaynağı ile uyarılmasıyla elde edildi. Sonuç olarak, lazer ile örneğin uyarıldığı ve uyarılmadığı durumda elde edilen akım değerlerinin farkı elde edilerek voltaja karşı fotoakım değerleri elde edildi.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Tez kapsamında, moleküler demet epitaksi (*Molecular Beam Epitaxy*, MBE) yöntemiyle büyütülen kuantum kuyu genişliği sırasıyla 5 ve 13 nm olan iki adet GaAs/Al_xGa_{1-x}As örneklerin yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı (*High Resolution-XRD*, HR-XRD) yöntemiyle yapısal karakterizasyonu gerçekleştirilerek tabaka kalınlıkları, alaşım konsantrasyonu ve kristal kalitesi belirlendi. Sıcaklığa bağlı PL ölçümleri ile bantlar arası geçiş (bandan banda tekrar birleşme geçişleri, yüksek enerji ışın yayılımı), bantlar içi geçişler, safsızlıklar ve kusurlar (iletim bandı alıcı/verici seviyeleri ile bunlar arası geçişler) incelenerek yapının bant profili elde edildi.

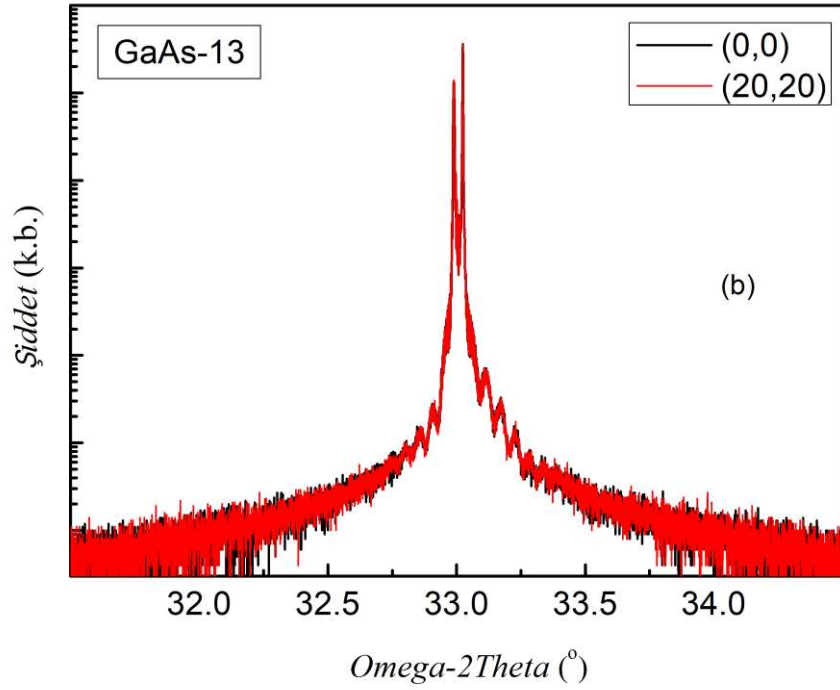
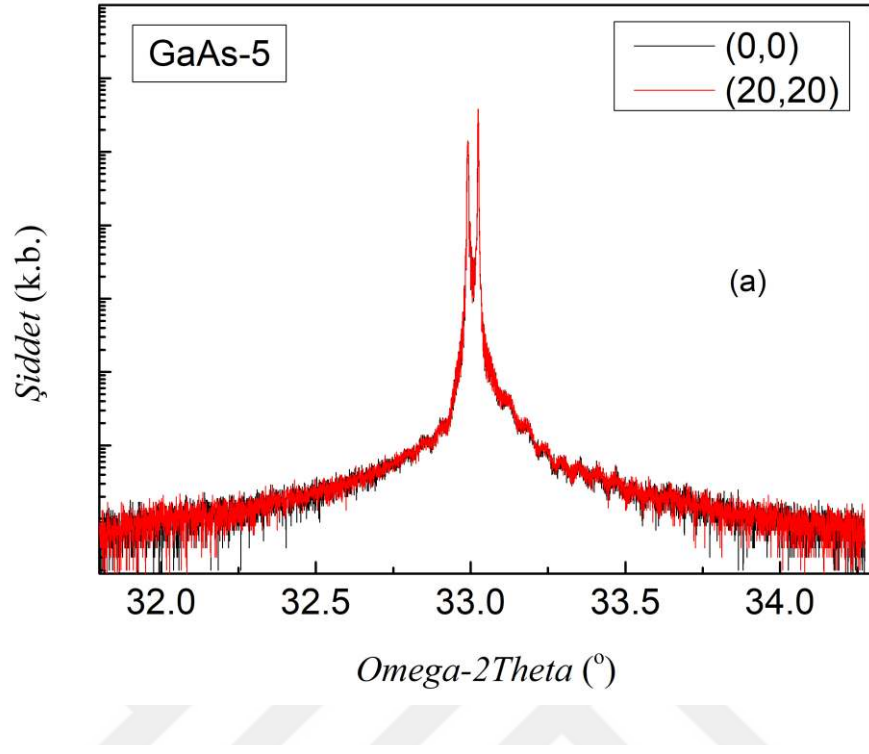
Yüksek kristal kalitesine sahip olan bu örneklerin Top-Hat-HELLISH (THH) geometrisinde fabrikasyonu gerçekleştirilerek, THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtlar optik mantık kapıları ölçümleri için hazır hale getirildi. EL ölçümleri ile THH aygıtların optik mantık kapısı olarak çalışması incelendi. Ayrıca fotoakım ölçümleri için halka kontak geometrisinde GaAs-5 ve GaAs-13 kodlu aygıtlar üretildi.

Tez kapsamında gerçekleştirilen bu yapısal, optik ve elektriksel ölçümler sonucunda elde edilen veriler bu bölümde ayrıntılarıyla sunuldu.

4.1. Yapısal Karakterizasyon Bulguları

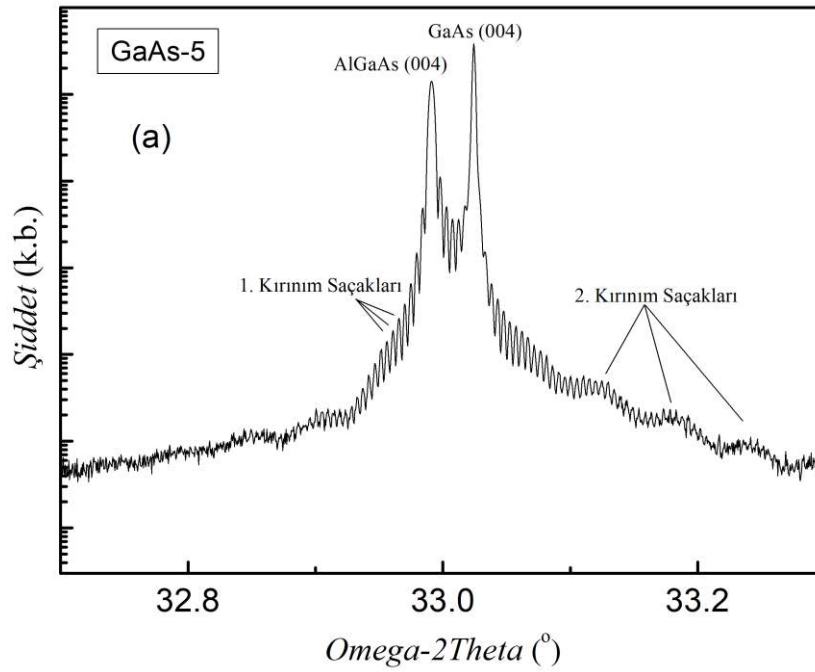
MBE sisteminde büyütülen GaAs/Al_xGa_{1-x}As örneklerin THH aygıt olarak litografisi yapılmadan önce örneklerde kristal kalitesi ve homojenliğin belirlenmesi için HR-XRD ölçüm ve analizleri gerçekleştirildi. Örneklerin iki noktasından ((0,0) merkez noktası ve (20,20) noktası) (004) düzlemin ekseni etrafında sallantı eğrisi ölçümleri gerçekleştirildi.

Şekil 4.1'de GaAs-5 ve GaAs-13 kodlu örneklerin farklı iki noktasından ((0,0) merkez noktası ve (20,20) noktası) (004) düzlemin ekseni etrafında elde edilen ω -2 θ ölçüm sonucu verildi. İki farklı noktadan elde edilen ω -2 θ tarama grafiğinin her iki örnek içinde birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir bu durum homojen bir büyütmenin sağlandığını gösterir.

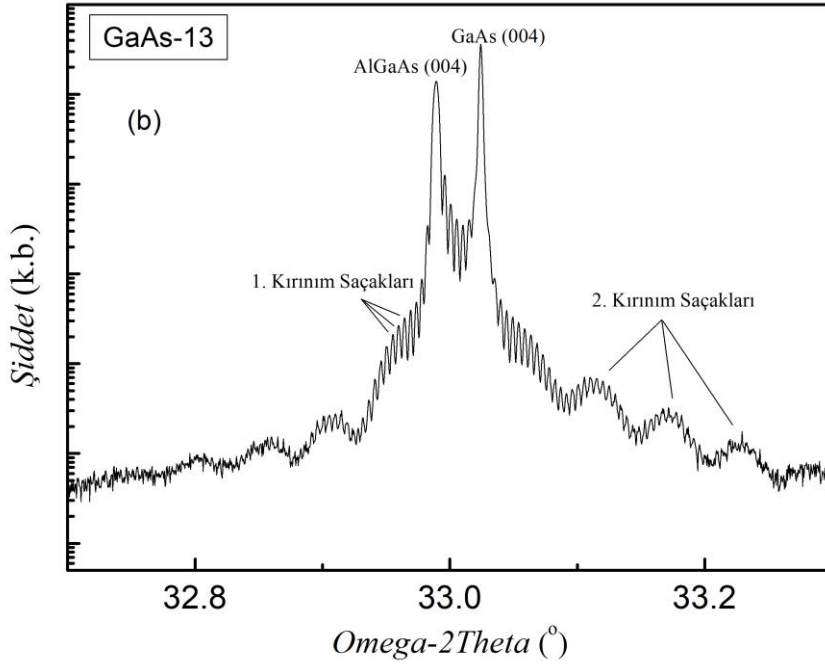


Şekil 4.1. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklere ait farklı noktalardan alınan GaAs (004) civarında X-ışını sallantı eğrisi grafiği

Şekil 4.2 (a)'da GaAs-5 ve (b)'de GaAs-13 kodlu örnekler için HR-XRD ölçümlerinden elde edilen (004) simetrik düzlemlerine ait ω -2 θ grafikler verildi. Şekil 4.2'de GaAs-5 ve GaAs-13 kodlu örnekler için gözlenen yüksek şiddetli ve yaklaşık 32,99° ve 33,02° değerlerinde gözlenen pikler sırasıyla AlGaAs ve GaAs alttaş'a ait kırınım pikleridir [115–117]. XRD tekniğinde, kırınım saçaklarının gözlenmesi kristal ara yüzeyi ve kristal kalitesinin belirlenmesinde önemlidir. Şekil 4.2'de her iki örnek içinde kırınım saçakları belirgin olarak gözlemlendiğinden örneklerin yüksek kristal kalitesine sahip olduğu sonucuna varılabilir [118].

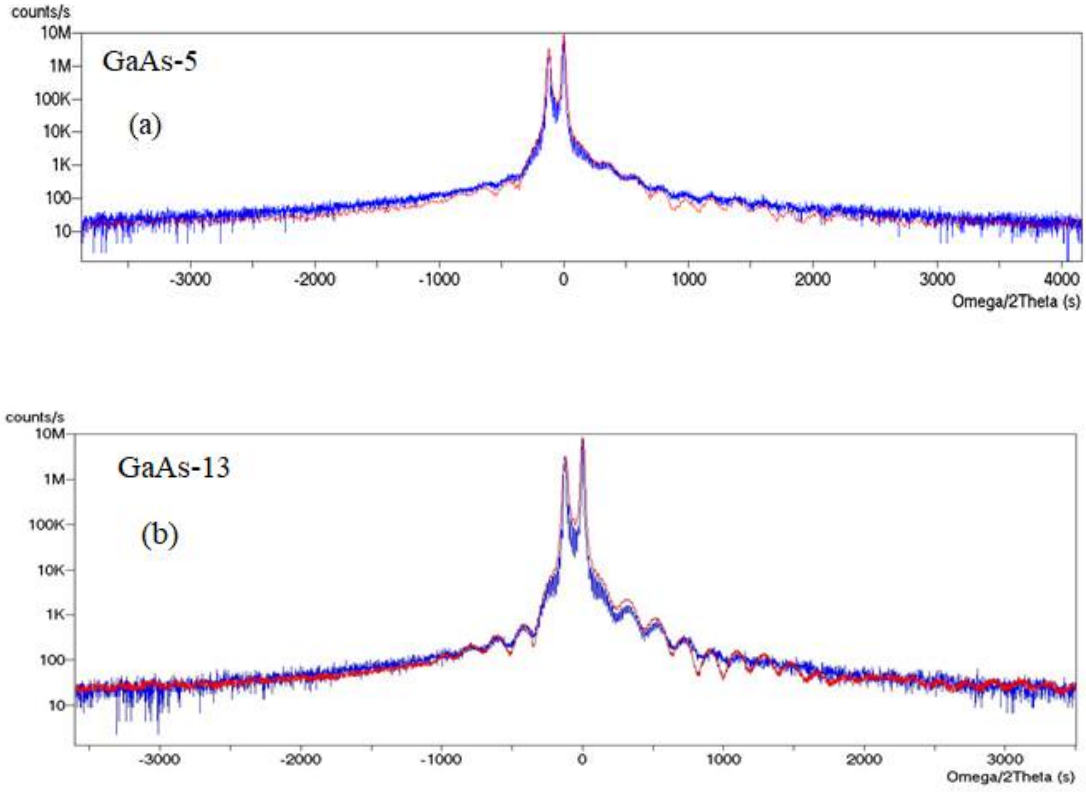


Şekil 4.2. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin GaAs (004) civarında X-ışını sallantı eğrisi grafiği



Şekil 4.2. (devamı)

Elde edilen HRXRD grafiğinin analizi için, X'Pert Epitaxy yazılımı kullanılarak ω -2 θ tarama grafiğine uyum eğrisi geçirildi. Şekil 4.3 (a)'da GaAs-5 ve (b)'de GaAs-13 kodlu örneklerin deneysel ω -2 θ tarama verilerine X'pert Epitaxy programı kullanılarak elde edilen simülasyon grafikleri verildi. Birbirine yakın tekrarlı olan saçaklar (1. Kırınım saçakları) büyütülen toplam yapı kalınlığına, ikinci kırınım saçakları arasındaki mesafe ise GaAs/AlGaAs/GaAs katman grubu kalınlığına karşılık gelmektedir. Kırınım saçakları (1. ve 2. için) hesaplamasına karşılık kalınlıklar sırasıyla GaAs-5 kodlu örnek için $1,12 \pm 0,03 \mu\text{m} - 0,092 \pm 0,005 \mu\text{m}$ ve GaAs-13 kodlu örnek için $1,15 \pm 0,04 \mu\text{m} - 0,100 \pm 0,008 \mu\text{m}$ olarak hesaplandı. Büyütülen AlGaAs katmanına ait pik pozisyonu Al konsantrasyonu hakkında bilgi vermektedir. Deneysel veri sonucuna göre yapılan simülasyon sonucunda tüm örneklerin AlGaAs katmanı için Al konsantrasyonu $\sim 33\%$ olarak belirlendi. Ayrıca, kristal kalitesinin göstergesi olan maksimum yükseklikteki yarı genişlik (*Full Width Half Maximum, FWHM*) değerleri hesaplandı. Tüm örnekler için GaAs alttaşa ait FWHM değeri 9 arcsec iken AlGaAs katmanına ait FWHM değeri 17 arcsec olarak bulundu. Tüm sonuçlar doğrultusunda yüksek kristal kaliteli yapıların büyütüldüğü ve hedeflenen büyütme kalınlıklarının tutturulduğu belirlendi.

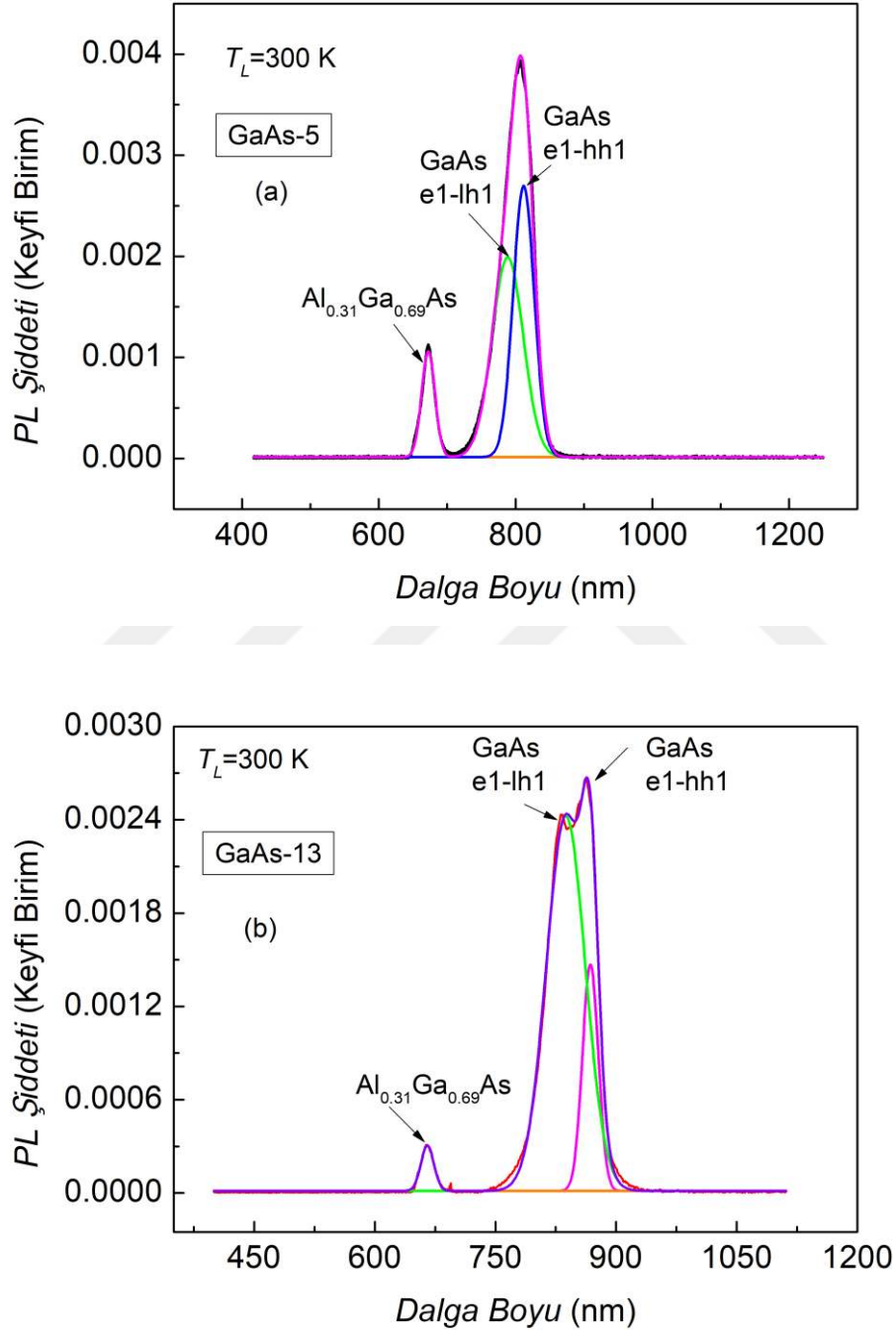


Şekil 4.3. *X'Pert Epitaxy* programında yapılan (a) GaAs-13 ve (b) GaAs-5 kodlu örnek yapılarının simülasyonu. Mavi renk, ölçülen ω - 2θ ölçüm grafiğini, kırmızı renk simülasyon işleminin sonucunu temsil etmektedir.

4.2. Fotolümenisans Ölçümleri

GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ örneklerin enerji bant aralığının ve yeniden birleşme mekanizmalarının incelenmesi amacıyla oda sıcaklığında ve sıcaklığa bağlı PL ölçümleri gerçekleştirildi. Şekil 4.4 (a)'da GaAs-5 ve (b)'de GaAs-13 kodlu örneklerin oda sıcaklığında ($T_L = 300$ K) elde edilen PL grafikleri verildi. Şekil 4.4 (a)'da GaAs-5 kodlu örneğin PL spektrumunda yaklaşık 672 nm (1,85 eV) dalga boyunda gözlenen pik AlGaAs katmanına ait piktir. GaAs kuyu piki incelendiğinde, iki adet pikin girişim yaptığı gözlemlendi. Bu pikler ayrıştırıldığında 789 nm (1,57 eV) ve 812 nm (1,53 eV) dalga boylarında pik elde edildi. Bu pikler sırası ile hafif boşluk (*electron-light hole*, e1-lh1) ve ağır boşluk (*electron-heavy hole*, e1-hh1) geçişlerine karşılık gelmektedir [119]. Şekil 4.4 (b)'de GaAs-13 kodlu örneğin PL spektrumunda, yaklaşık 666 nm (1,86 eV) dalga boyunda gözlenen pik AlGaAs katmanına ait piktir. GaAs kuyu piki incelendiğinde, iki adet pikin girişim yaptığı gözlenmiştir. Bu pikler ayrıştırıldığında 834 nm (1,49 eV) ve

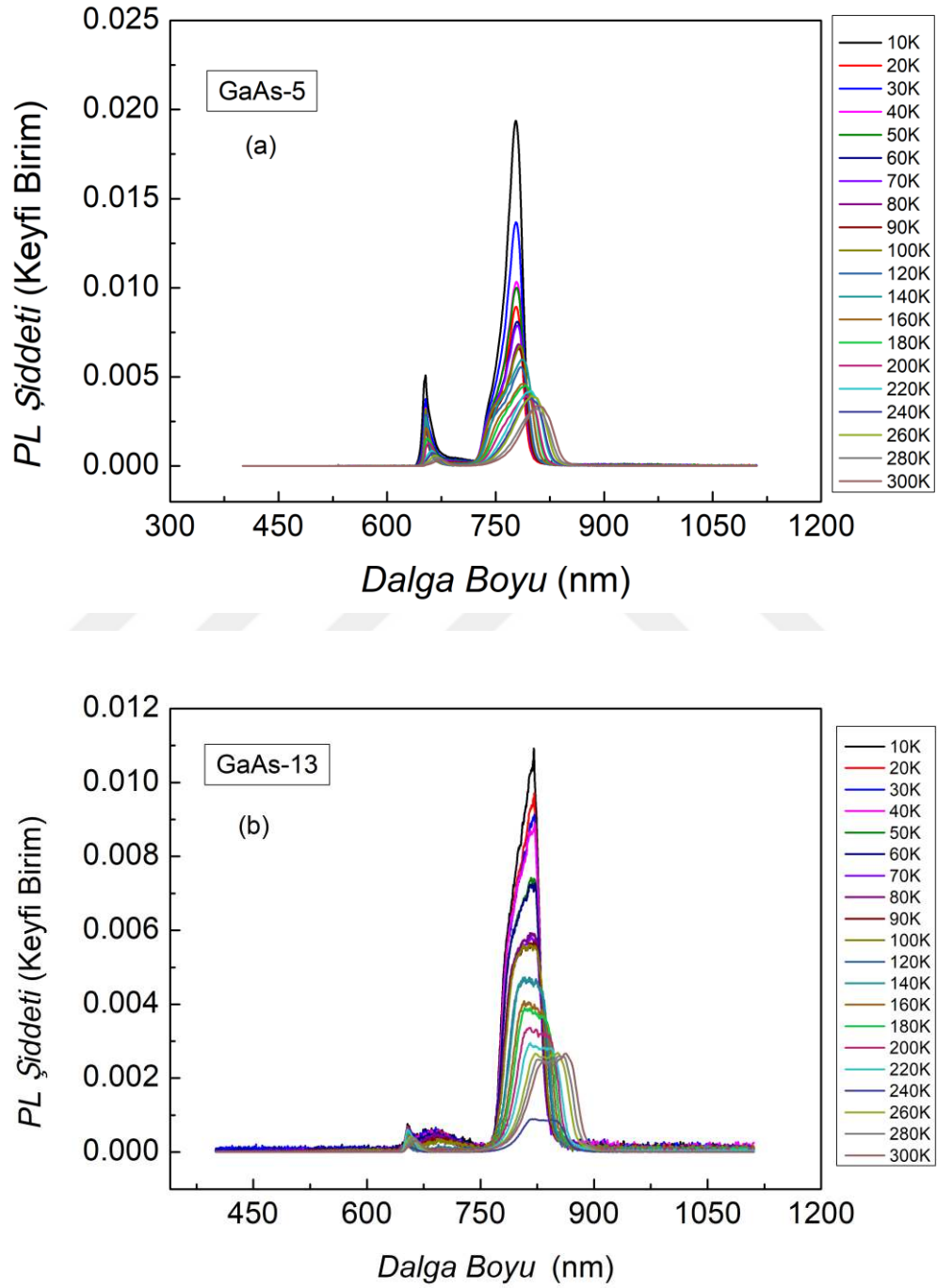
862 nm (1,44 eV) dalga boylarında pik elde edildi. Bu pikler sırası ile e1-lh1 ve e1-hh1 geçişlerine karşılık gelmektedir [119]. İki örnek içinde benzer PL davranışı elde edildi.



Şekil 4.4. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin oda sıcaklığına ait fotoluminesans spektrumu

Şekil 4.5 (a)'da GaAs-5 ve GaAs-13 kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı (10-300 K sıcaklık aralığı) PL spektrumu verildi. Şekil 4.5'den görüldüğü gibi en düşük sıcaklık değeri olan 10 K'de GaAs ve AlGaAs pikleri en büyük şiddete sahiptir ve PL piklerinin

şiddetleri sıcaklığın artmasıyla azalma eğilimi göstermektedir. Bu durum, artan sıcaklık ile beraber örgü titreşimleri ve fonon saçılmalarının aktifleşmeye başlamasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.5. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumu

Şekil 4.5’de sıcaklığa bağlı fotoluminesans grafiğinde elde edilen GaAs kuantum kuyusuna ait piklerin sıcaklığa bağlı enerji bant aralığı davranışı incelendi. Bant aralığının sıcaklığa bağlı davranışı yarı-deneysel *Varshni* bağıntısıyla açıklanabilir. *Varshni* eşitliği,

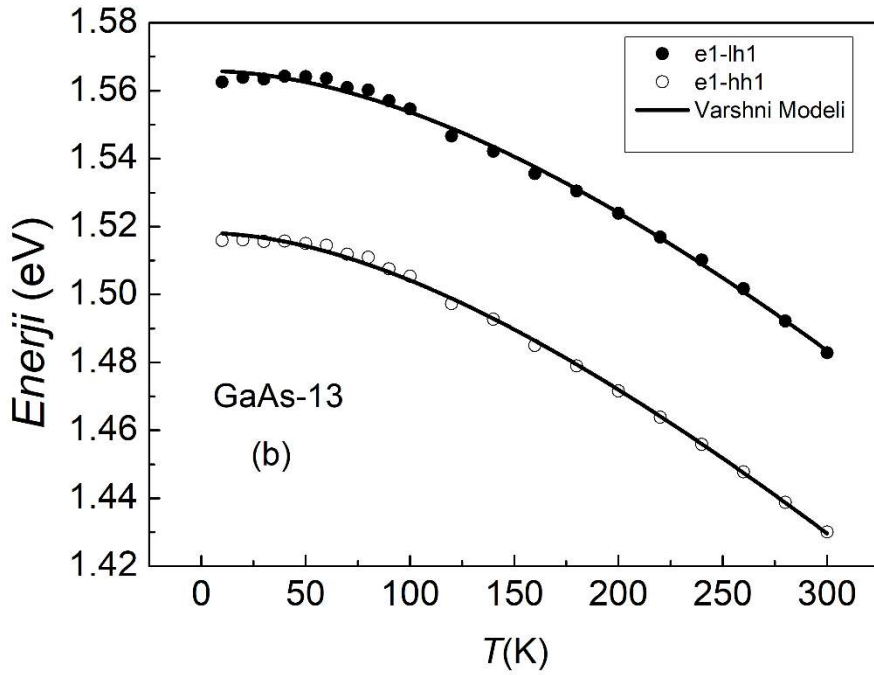
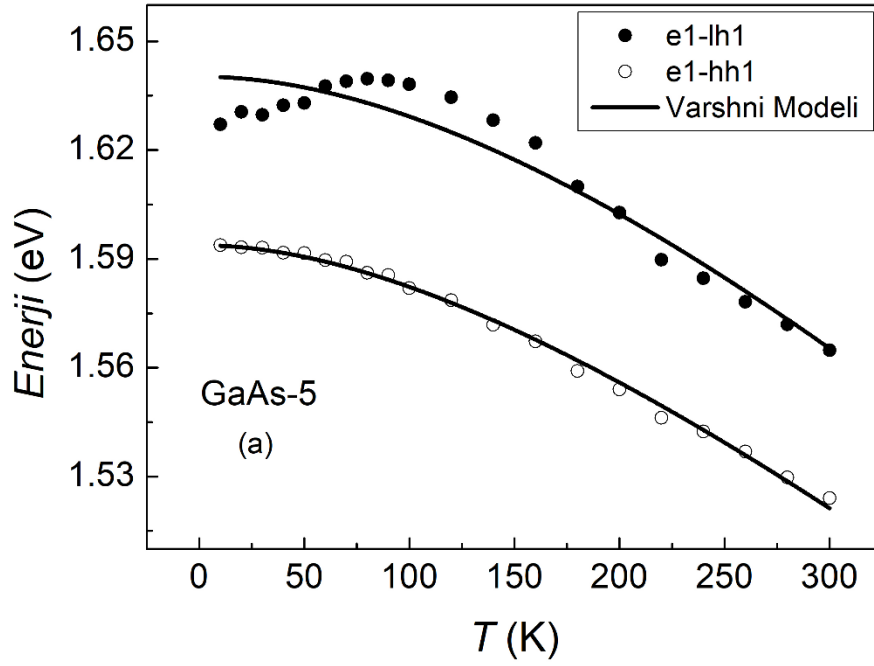
$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (4.1)$$

İfadesi ile verilir. Eşikliklerde $E_g(0)$, 0 K’deki bant aralığı, β Debye sıcaklığı ve α termal genleşme katsayısıdır [120]. *Varshni* eşitliğinden görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça enerji bant aralığı değeri azalmaktadır.

Şekil 4.6 (a)’da GaAs-5 ve (b)’de GaAs-13 kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı PL ölçümlerinden elde edilen GaAs kuantum kuyusuna ait geçişlerin sıcaklığa bağlı değişimi verildi. Deneysel verilere *Varshni* eşitliğine göre çizilen kuramsal uyum eğrisinden elde edilen veriler Tablo 4.1’ verildi. Bu değerler literatür ile uyum içindedir [121]. Şekil 4.6 (a)’dan görüldüğü gibi e1-lh1 geçişine karşılık gelen PL pik enerjisi yaklaşık 70 K sıcaklığa kadar bir artış göstermiş ve bu sıcaklıktan sonra hızla azalmaya başlamıştır. Bu durum lokalize durumların varlığını göstermektedir.

Tablo 4.1. GaAs-5 ve GaAs-13 kodlu örneklere ait deneysel fotoluminesans verilerine *Varshni* kuramsal uyum eğrisinin geçirilmesiyle elde edilen parametreler

Parametreler	GaAs-5		GaAs-13	
	e1-lh1	e1-hh1	e1-lh1	e1-hh1
E_0 (eV)	1,566	1,518	1,64	1,593
α ($\times 10^{-4}$)(eVK ⁻¹)	7,397	6,64	6,027	5,416
β (K)	507,94	375,08	525	372

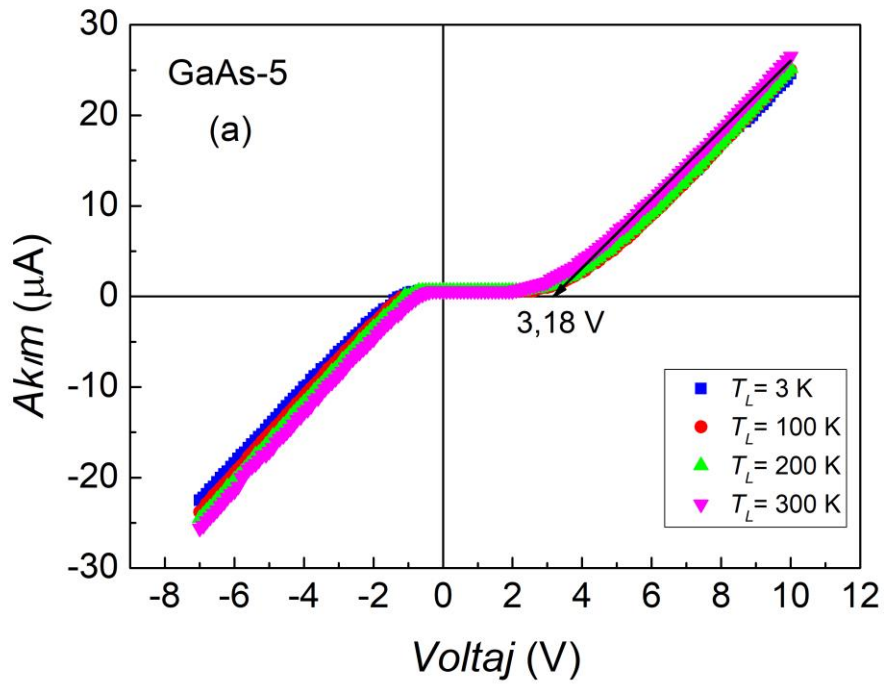


Şekil 4.6. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu örneklerin GaAs kuyuya ait geçişlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri

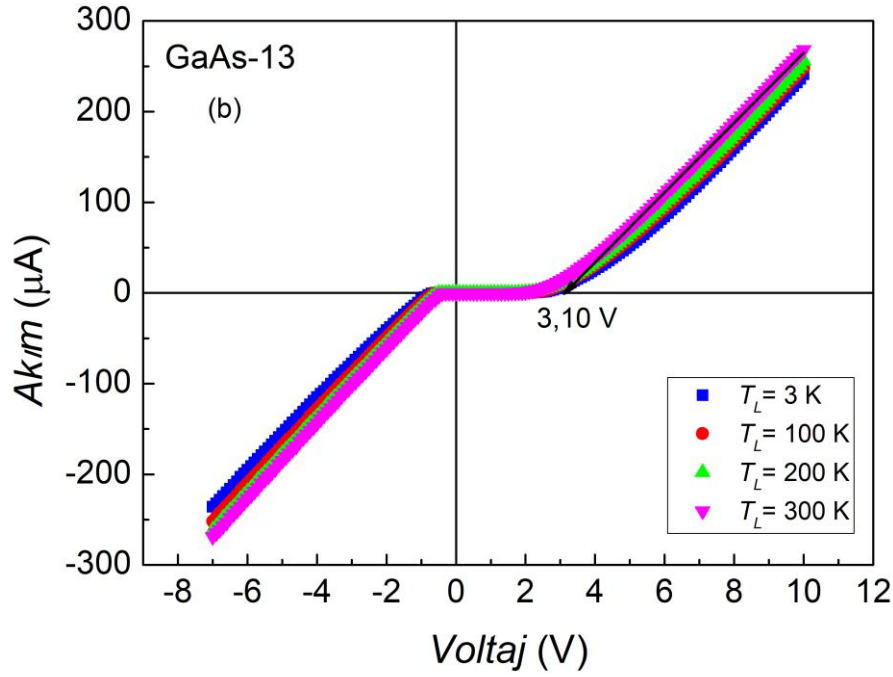
4.3. Foto-Akım Ölçüm Sonuçları

Halka kontak geometrisinde fabrikasyonu tamamlanan (Görsel 3.5) aygıtların fotoakım ölçümleri gerçekleştirildi. Aygıtlara, 3-300 K sıcaklık aralığında, voltaj aralığı

0,1 V olan -7 V değerinden 10 V'a kadar ileri ve geri besleme gerilimleri uygulanarak akım-voltaj (I - V) ölçümleri gerçekleştirildi. Uygulanan gerilim değerlerine karşı elde edilen akım-voltaj grafikleri Şekil 4.7'de verildi. Görüldüğü gibi örnekler p - n eklem diyot karakteristiğine sahiptir. Eşik voltaj değerleri yaklaşık olarak GaAs-5 kodlu aygıt için 3,18 V ve GaAs-13 kodlu aygıt için 3,10 V olarak elde edildi. Bu değerden sonra akım değeri daha hızlı artmaktadır.

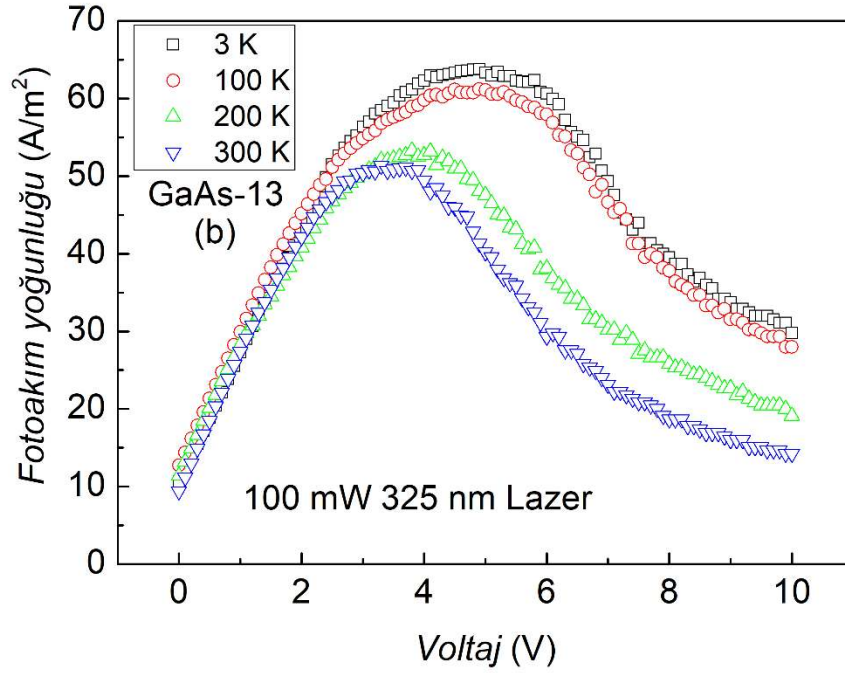
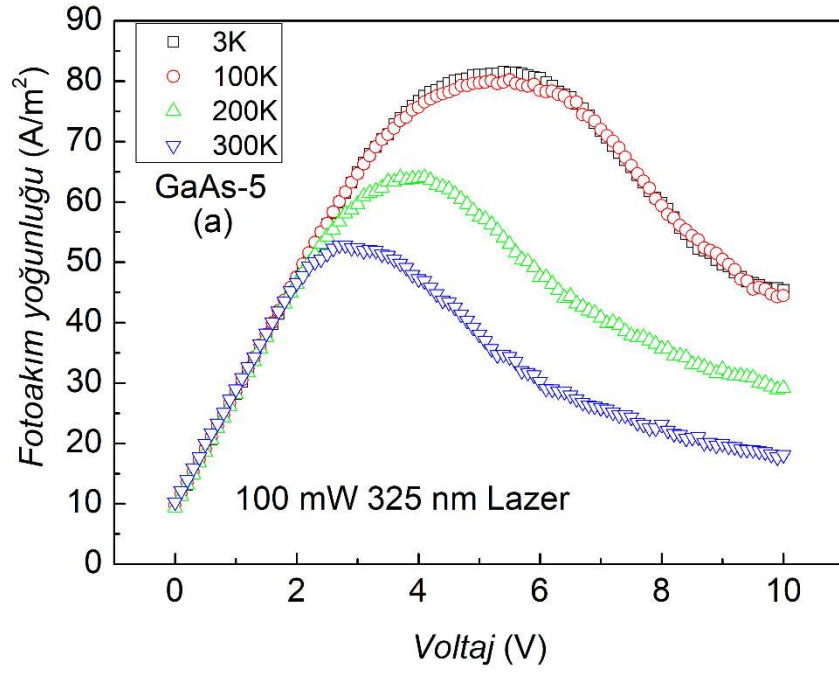


Şekil 4.7. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu aygıtlar için farklı sıcaklıklarda uygulanan voltaja bağlı akım değişimi



Şekil 4.7. (devamı)

Aygıtların fotoakım değerlerinin belirlenmesi için fotoakım ölçümleri gerçekleştirildi. Fotoakım lazer ile örneğin uyarıldığı ve uyarılmadığı durumda elde edilen akım değerlerinin farkı olarak tanımlanmaktadır. Fotoakım ölçümlerinde, 100 mW çıkış gücüne sahip 325 nm dalgaboylu uyarıcı He-Cd lazer kaynağı kullanılarak uygulanan voltaja karşı elde edilen fotoakım değerleri Şekil 4.8 (a)'da GaAs-5 ve (b)'de ise GaAs-13 aygıtı için verildi. Şekil 4.8'den görüldüğü gibi, düşük gerilim değerleri uygulandığında fotoakım doğrusal olarak artma eğilimindeyken gerilim değeri arttıkça doyuma ulaşmaktadır. Fotoakım, n kanaldaki ve tüketim bölgesindeki foto-üretici taşıyıcılardan kaynaklanıyor olabilir. Sıcaklık 300 K'de yaklaşık 3 V değerine kadar fotoakım değeri artmaktadır, ancak 3 V'dan sonra doyuma ulaşan fotoakım değeri azalmaya başlamaktadır. Bunun nedeni, sıcaklık arttıkça meydana gelen fonon emisyonu veya joule ısınması olabilir.

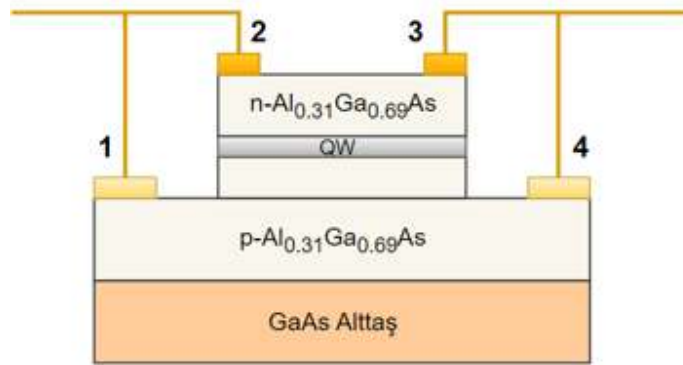


Şekil 4.8. (a) GaAs-5 ve (b) GaAs-13 kodlu aygıtların uyarıcı lazer altında uygulanan voltaja karşı fotoakım yoğunluğu değişimi

4.4. Optik Mantık Kapısı Ölçümleri

Tez kapsamında THH geometrisinde litografisi yapılan kuantum kuyu genişliği sırasıyla 5 ve 13 nm olan, THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtların optik mantık kapısı olarak çalışmasını incelemek için atmalı EL ölçümleri gerçekleştirildi. Şekil 4.9’da XOR mantık kapısı ölçümleri için THH geometrisinde fabrikasyonu tamamlanan aygıtın tabaka yapısı ve elektriksel bağlantıları şematik olarak verildi. Burada, 2 ve 3 numaraları ile gösterilen bölgeler *n*-tipi kontakları, 1 ve 4 numaraları ile gösterilen bölgeler ise *p*-tipi kontakları göstermektedir. Bu elektriksel bağlantılarda, 1 ve 2 numaralı kontaklar birleştirilip bu uca atmalı gerilimler uygulanırken, aynı zamanda 3 ve 4 numaralı kontaklar birleştirilip bu uç topraklandığında kontak konfigürasyonu 12V34T şeklinde ifade edilmektedir. Benzer şekilde, 1 ve 2 numaralı kontaklar birleştirilip topraklanırken, aynı zamanda 3 ve 4 numaralı kontaklar birleştirilip bu uca atmalı gerilim uygulandığında kontak konfigürasyonu 12T34V şeklinde ifade edilmektedir. Her iki uca da atmalı gerilim uygulandığında 12V34V kontak konfigürasyonu ile ifade edilir.

THH aygıtının karakterizasyon ölçümleri için Şekil 3.8’de verilen atmalı EL deney düzeneği kullanıldı. Ölçümler sırasında, atmalı gerilimin uygulanması mantık “1” durumunu temsil ederken, gerilimin uygulanmaması “0” mantık durumunu ifade etmektedir. Benzer şekilde, THH aygıtlardan ışımanın elde edildiği durum “1” mantık durumuna karşılık gelirken, ışıma elde edilmediği durum “0” mantık durumuna karşılık gelmektedir.



Şekil 4.9. Özel veya (XOR) mantık kapısı için fabrikasyonu tamamlanan THH aygıtın tabaka yapısı ve elektriksel bağlantılarının şematik gösterimi

THH aygıtı yapısında iki adet klasik ışık yayan diyot (*Light-Emitting Diode*, LED) içermektedir. Şekil 4.9’daki aygıt yapısı incelenirse, 1 numaralı kontakta gerilim

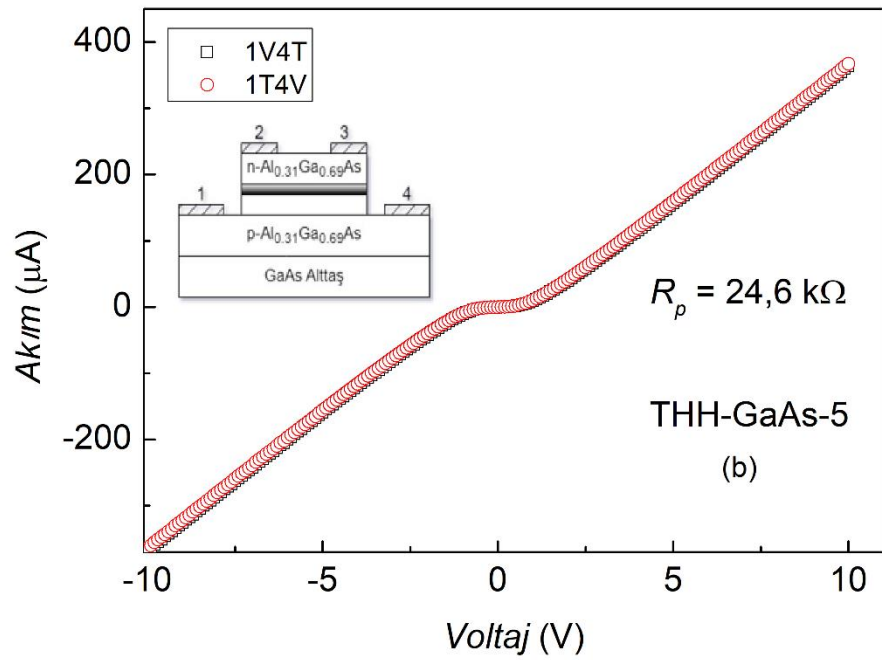
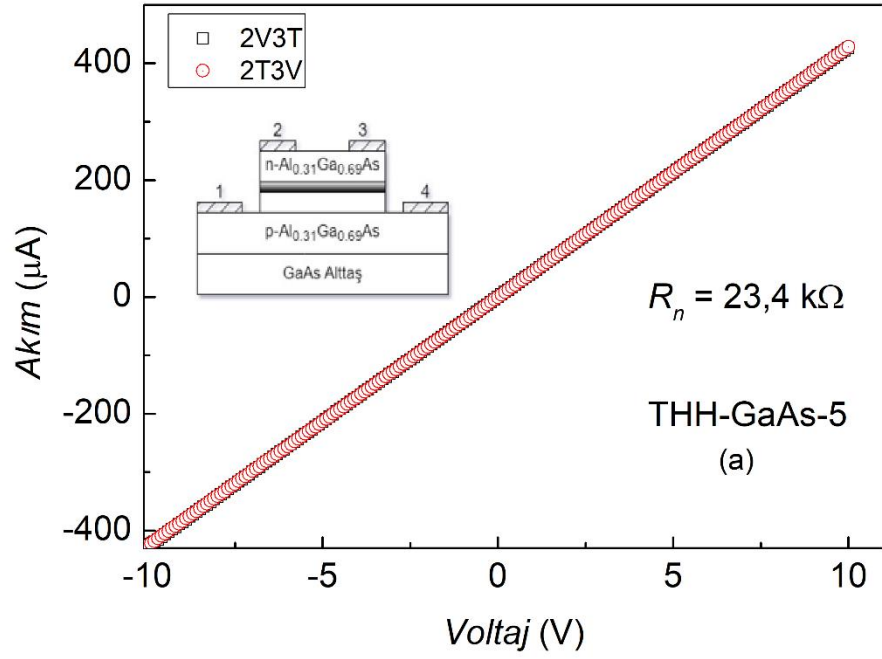
uygulanıp 2 numaralı kontak topraklandığında (1V2T) sol tarafta bulunan LED ışıma yapar. Benzer şekilde, 3 numaralı kontak topraklanırken 4 numaralı kontağa gerilim uygulanırsa (3T4V) sağ taraftaki LED ışıma verir. LED karakteristiği THH aygıtının ışıma davranışını anlamak için oldukça önemlidir. Bu yüzden optik mantık kapısı ölçümlerinden önce, aygıtların LED davranışını ve bunun yanında *n*-tipi ve *p*-tipi kontak kalitelerini belirlemek için DC akım-voltaj ölçümleri ile EL ölçümleri gerçekleştirildi.

4.4.1. Klasik LED ölçümleri

Klasik LED ölçümlerinden önce, *n*-tipi (2 ve 3 numaralı) ve *p*-tipi (1 ve 4 numaralı) kontak davranışlarının belirlenmesi için kontaklar arasına DC gerilim uygulanarak akım-voltaj (*I-V*) grafikleri elde edildi. *n*-tipi kontak ölçümleri için aygıtın 2T3V ve 2V3T şeklinde *p*-tipi kontak ölçümleri için ise 1V4T ve 1T4V şeklinde kontakların elektriksel bağlantısı yapıldı. Ölçümler sırasında aygıtta, 0,1 V aralıklarla -10 V ile +10 V arasında gerilim değerleri uygulandı.

4.4.1.1. THH-GaAs-5 aygıtı

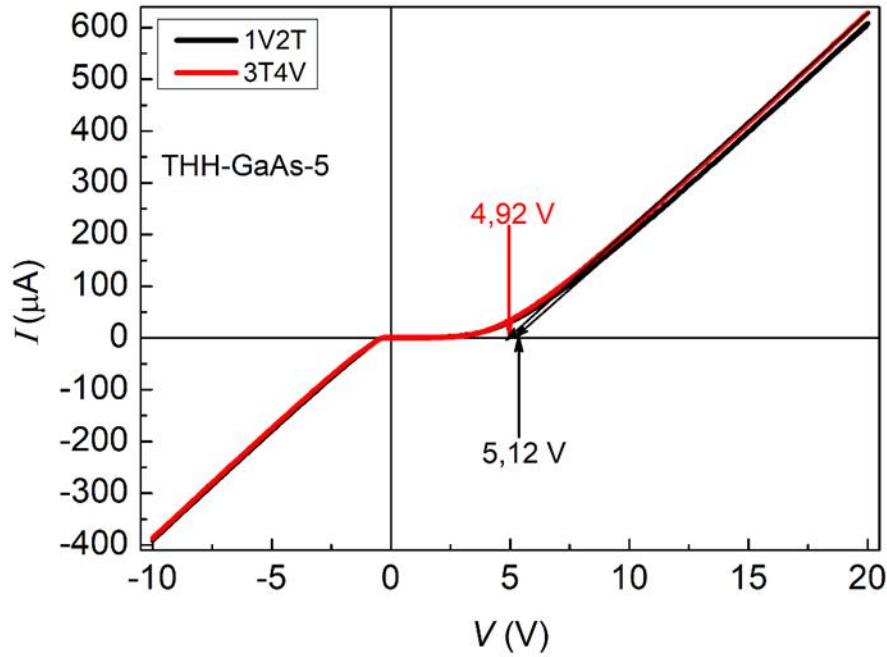
Şekil 4.10'da THH-GaAs-5 kodlu aygıtın *n*-tipi kontaklar arasından ve *p*-tipi kontaklar arasında elde edilen *I-V* değişim eğrileri görülmektedir. *n*-tipi kontaklar için elde edilen *I-V* değişimde, 2T3V ve 2V3T bağlantılarının uygulanan voltaj ile akım değişimi doğrusaldır ve birbiri ile örtüşmektedir. Bu durum *n*-tipi kontakların ohmik bir davranışa sahip olduğunu dolayısıyla simetrik kontakların elde edildiğini göstermektedir. *I-V* grafiğinin eğiminde *n*-tipi kontak direnci 23,4 k Ω olarak elde edildi. *p*-tipi kontakların *I-V* değişimi incelendiğinde, -1 V ile +1 V arasındaki voltaj değerlerinde akım değerini doğrusal davranışından saptıran bir etki meydana gelmektedir. Bu durum *p*-kontakların ohmik davranış göstermediğini işaret etmektedir. *p*-tipi kontakların direnci *I-V* grafiğinin eğiminden 24,6 k Ω olarak elde edildi.



Şekil 4.10. THH-GaAs-5 aygıtının (a) n-tipi kontakların (b) p-tipi kontakların I - V değişim grafiği

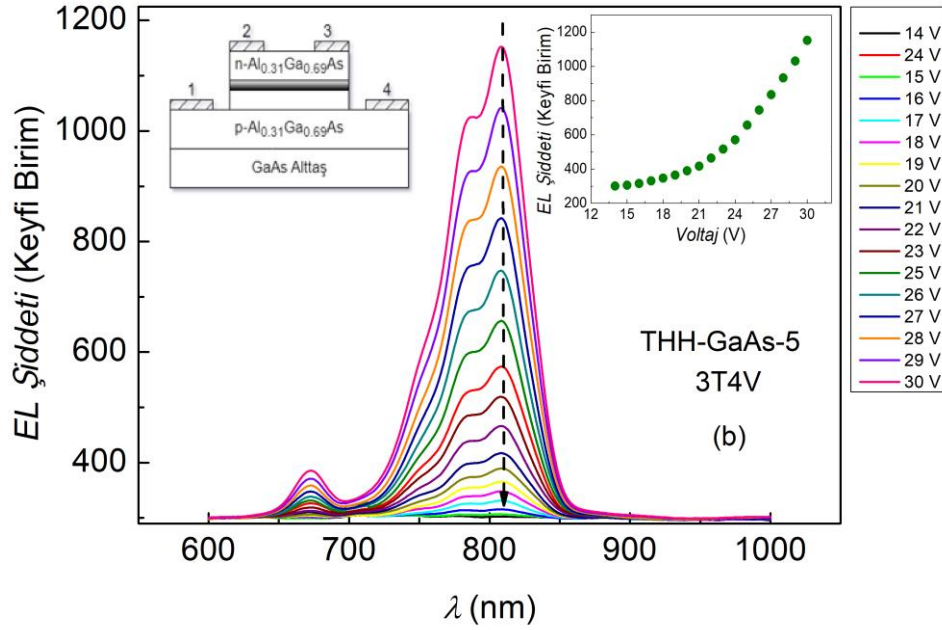
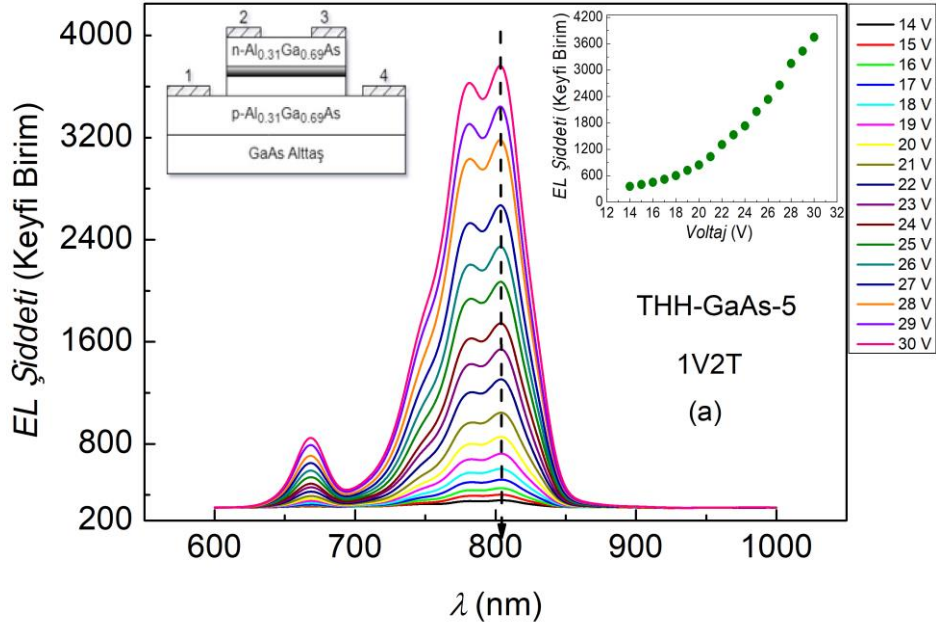
THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak bağlantılarına 0,1 aralıklarla -10 V ile 20 V arasında gerilim değerleri uygulanarak Şekil 4.11'deki I - V grafiği elde edildi. Aygıt ileri besleme geriliminde klasik LED davranışı gösterirken, geri beslemede ideal

LED davranışından sapma gözlemlendi. Bu durum aşındırma ve kontak kusurlarından kaynaklanabilir. 1V2T kontak konfigürasyonu için klasik LED 5,12 V ileri besleme geriliminde ışıma yapmaya başlarken, 3T4V kontak konfigürasyonu için ise 4,92 V ileri besleme geriliminde ışıma başladığı gözlemlendi. İki tarafta da bulunan klasik LED'lerin I - V davranışı benzer ve ışıma başladığı eşik gerilim değeri birbirine oldukça yakındır.



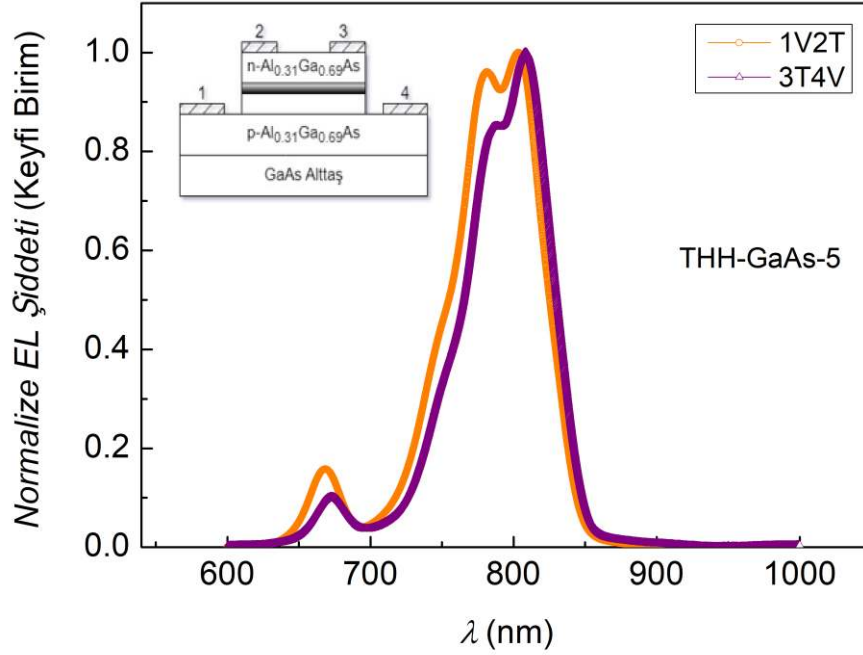
Şekil 4.11. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen I - V grafiği

Klasik LED yapılarının ışıma davranışının incelenebilmesi için, 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonlarında farklı ileri besleme gerilim değerleri altında dalga boyuna bağlı EL grafikleri elde edildi. Şekil 4.12 (a)'da 1V2T ve (b)'de 3T4V kontak konfigürasyonu için elde edilen EL grafikleri verildi. Her iki kontak bağlantısı içinde klasik LED davranışı benzerdir ve yaklaşık 808 ± 1 nm dalga boyunda ışıma gözlemlendi. Uygulanan gerilim değerleri arttıkça EL şiddeti doğrusala yakın artış göstermektedir ve ışıma dalgaboyunda kayma gözlenmedi.



Şekil 4.12. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen EL grafiği

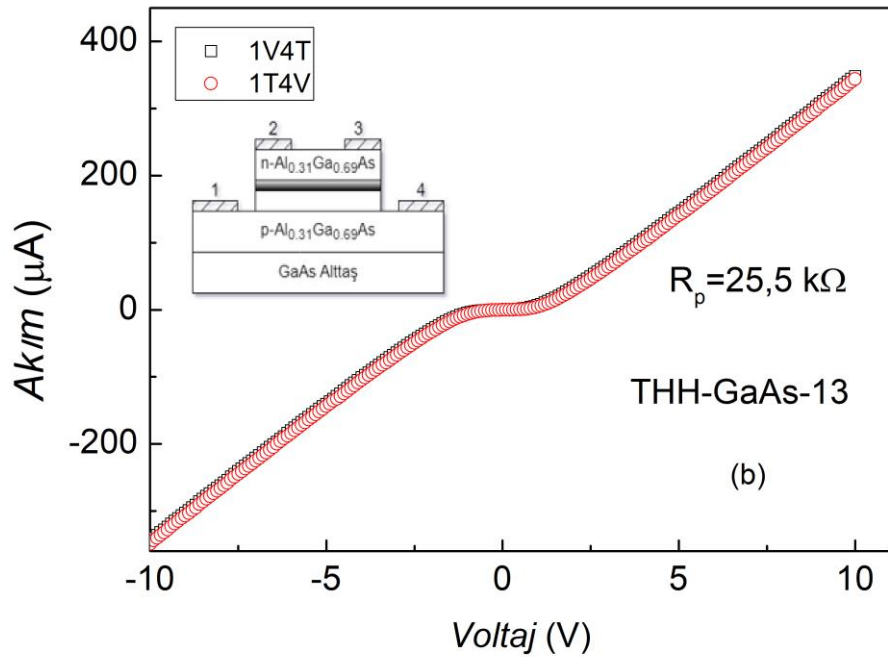
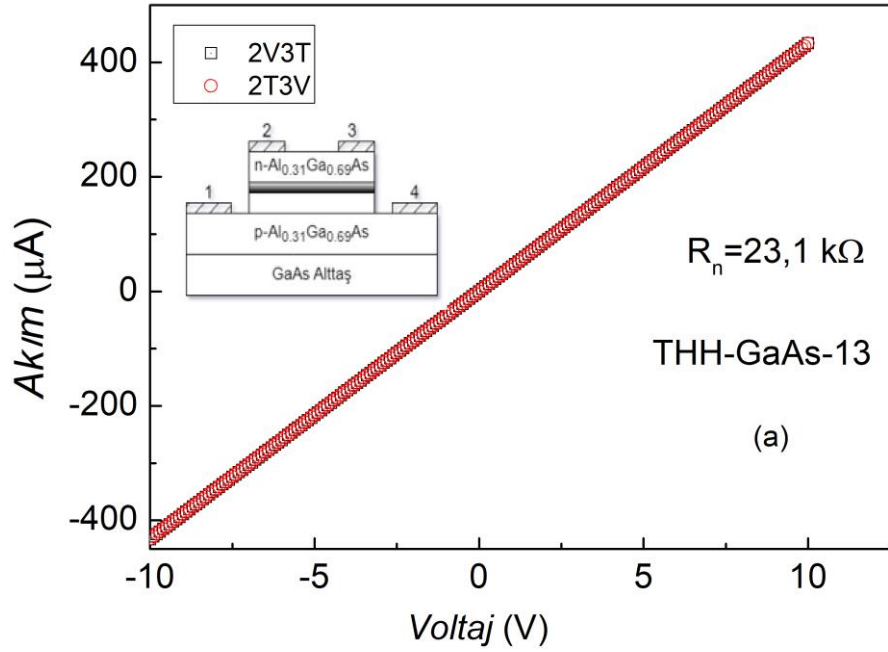
THH-GaAs-5 aygıtının yapısında bulunan iki klasik LED yapısının aynı davranışa sahip olduğunu göstermek için 30 V ileri besleme gerilim değeri altında elde edilen normalize edilmiş EL grafiği Şekil 4.13’de verildi. Her iki klasik LED yapısının normalize EL grafiklerinin üst üste çizdirildiğinde birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.13. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen normalize EL grafiği

4.4.1.2. THH-GaAs-13 aygıtı

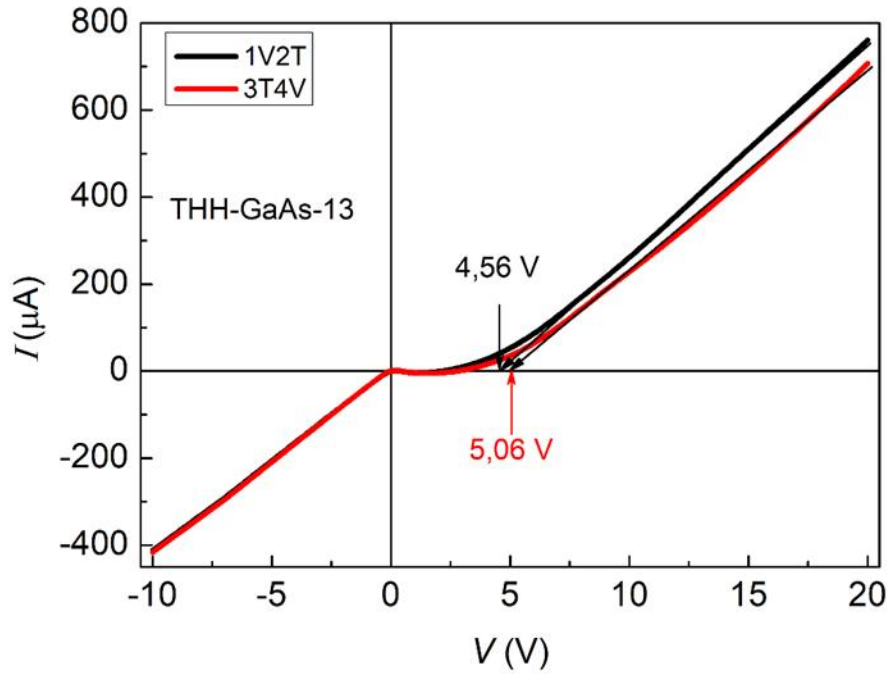
Şekil 4.14’de THH-GaAs-13 kodlu aygıtın *n*-tipi kontaklar arasından ve *p*-tipi kontaklar arasında elde edilen *I*-*V* değişim grafiği verildi. *n*-tipi kontaklar için elde edilen *I*-*V* grafiğinde, 2T3V ve 2V3T bağlantılarının uygulanan voltaj ile akım değişimi doğrusaldır ve birbiri ile örtüşmektedir. Bu durum *n*-tipi kontakların ohmik bir davranışa sahip olduğunu dolayısıyla simetrik kontakların elde edildiğini göstermektedir. *I*-*V* grafiğinin eğiminde *n*-tipi kontak direnci 23,1 k Ω olarak elde edildi. *p*-tipi kontakların *I*-*V* grafiği incelendiğinde, -1 V ile +1 V arasındaki gerilim değerlerinde akım değerini doğrusal davranıştan saptıran bir etki meydana gelmektedir. Bu durum *p*-kontakların ohmik olmadığını göstermektedir. Bu durum kontak metallerinin yeterince sızma derinliğine ulaşamamasından kaynaklanabilir. *p*-tipi kontakların direnci *I*-*V* grafiğinin eğiminden 25,5 k Ω olarak elde edildi.



Şekil 4.14. THH-GaAs-13 aygıtının (a) n-tipi kontakların (b) p-tipi kontakların I - V değişim grafiği

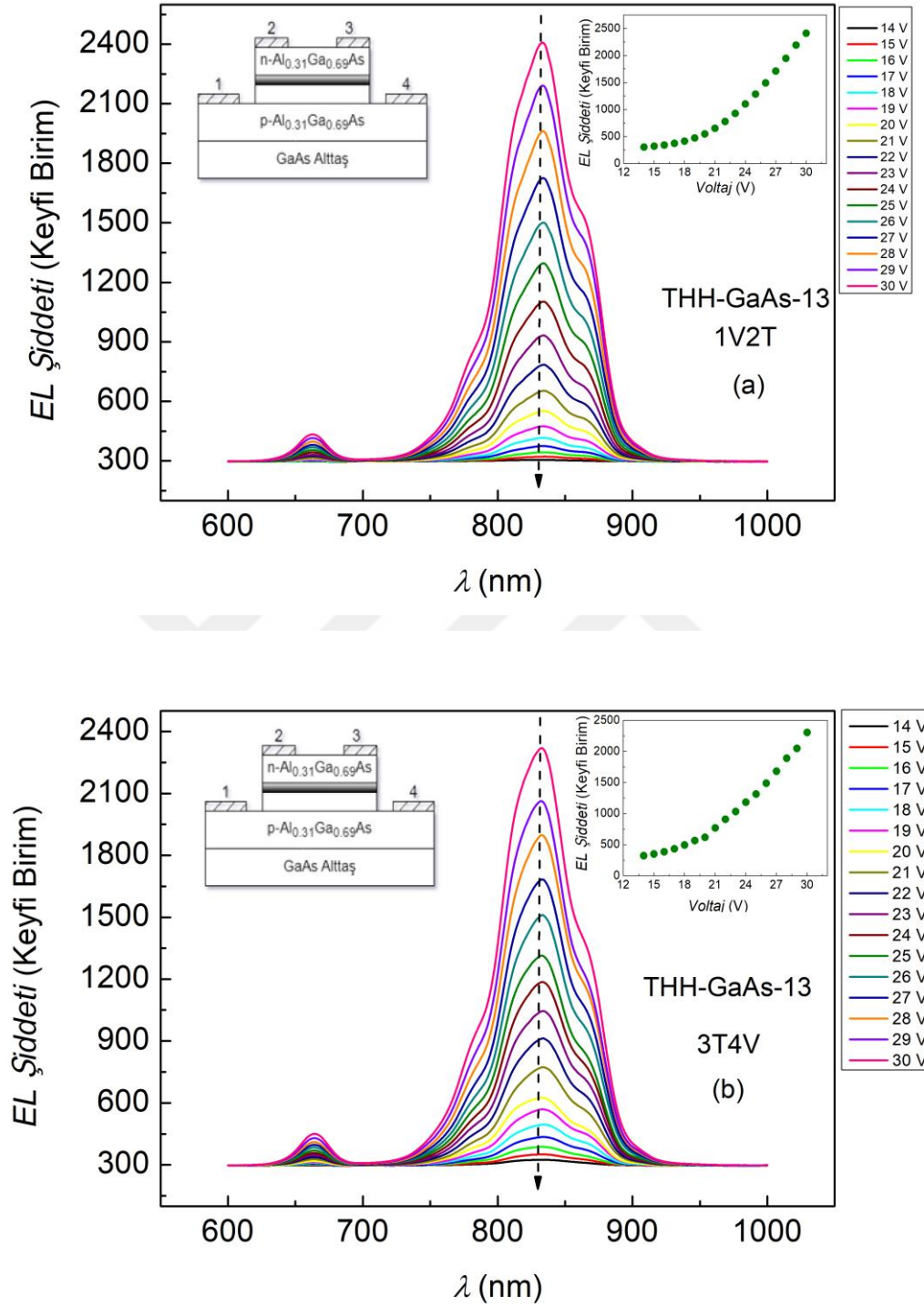
THH-GaAs-13 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak bağlantılarına 0,1 aralıklarla -10 V ile 20 V arasında gerilim değerleri uygulanarak Şekil 4.15'deki I - V grafiği elde edildi. Aygıt ileri besleme geriliminde klasik LED davranışı gösterirken, geri beslemede ideal

LED davranışından sapma gözlemlendi. Bu durum aşındırma ve kontak kusurlarından kaynaklanabilir. 1V2T kontak konfigürasyonu için klasik LED 4,56 V ileri besleme geriliminde ışıma yapmaya başlarken, 3T4V kontak konfigürasyonu için ise 5,06 V ileri besleme geriliminde ışıma başladığı gözlemlendi. İki tarafta da bulunan klasik LED'lerin I - V davranışı benzer ve ışıma başladığı eşik gerilim değeri birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.15. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen I - V grafiği

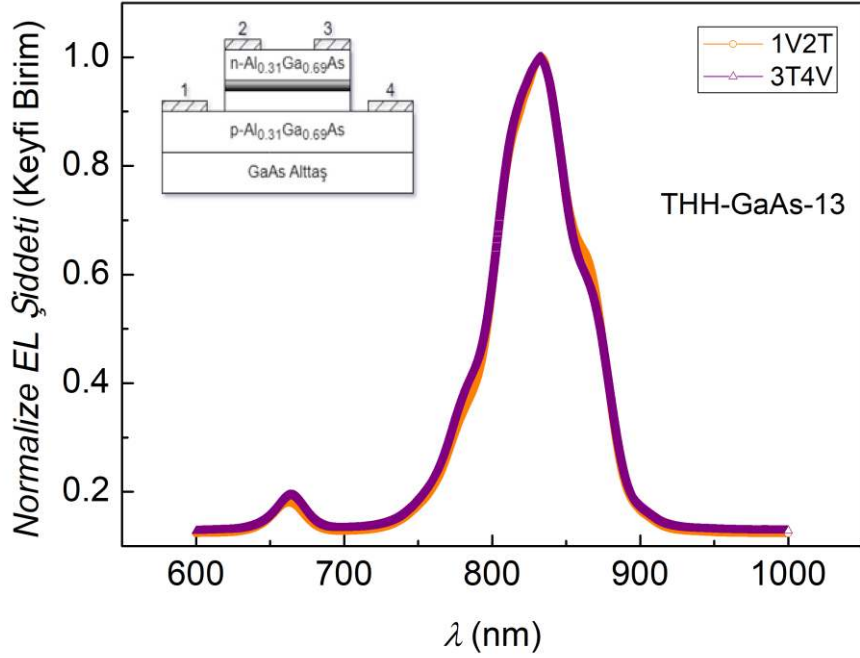
THH-GaAs-13 aygıtının klasik LED yapılarının ışıma davranışının araştırmak için, 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonlarında farklı ileri besleme gerilim değerleri altında dalga boyuna bağlı EL grafikleri elde edildi. Şekil 4.16 (a)'da 1V2T ve (b)'de 3T4V kontak konfigürasyonu için elde edilen EL grafikleri verildi. Her iki kontak bağlantısı içinde klasik LED davranışı benzerdir ve yaklaşık 832 ± 1 nm dalga boyunda ışıma gözlemlendi. Uygulanan gerilim değeri arttıkça EL şiddeti doğrusala yakın artış göstermektedir ve ışıma dalgaboyunda kayma gözlenmedi.



Şekil 4.16. THH-GaAs-13 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen EL grafiği

THH-GaAs-13 aygıtının yapısında bulunan iki klasik LED yapısının aynı davranışa sahip olduğunu göstermek için 30 V ileri besleme gerilim değeri altında elde edilen normalize edilmiş EL grafiği Şekil 4.17’de verildi. Her iki klasik LED yapısının

normalize EL grafiklerinin üst üste çizdirildiğinde birbiri ile uyumlu olduğu aynı dalga boyunda benzer karakteristikte ışıma yaptığı gözlemlendi.

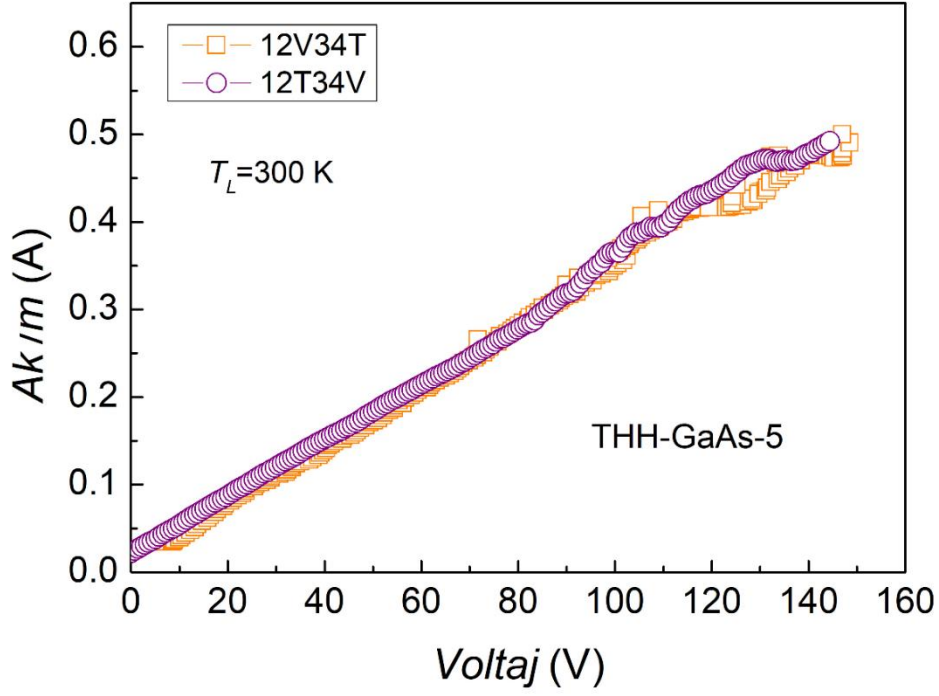


Şekil 4.17. THH-GaAs-13 aygıtının 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonları için elde edilen normalize EL grafiği

4.4.2. Özel VEYA (XOR) mantık kapısı ölçümleri

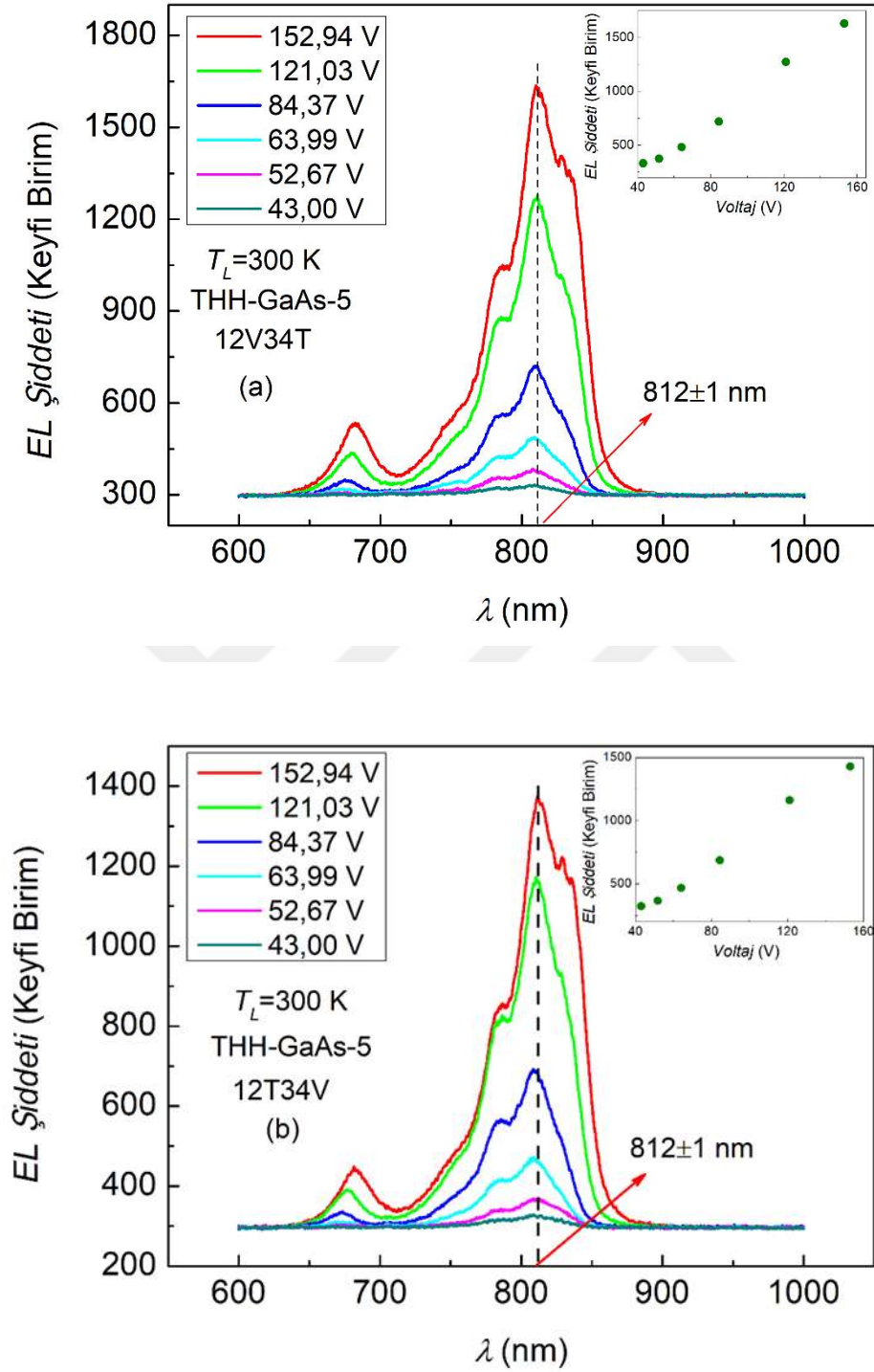
4.4.2.1. THH-GaAs-5 aygıtı

XOR mantık kapısı ölçümleri için, THH-GaAs-5 kodlu aygıtın Şekil 4.9'daki gibi elektriksel bağlantıları yapıldı. Burada, 12V34T ve 12T34V bağlantı durumlarında aygıtta 20 kHz frekansa ve 200 ns atma genişliğine sahip olan atmalı gerilimler uygulanarak aygıt üzerine düşen gerilime bağlı akım ölçümleri elde edildi. Ölçümler oda sıcaklığında (300 K) gerçekleştirildi. Şekil 4.18'de THH-GaAs-5 kodlu aygıtın gerilime bağlı akım değişimi verildi. Her iki kontak konfigürasyonunda da aygıtın uygulanan gerilim ile akım davranışı benzer doğrusal artışa sahiptir. Yaklaşık 120 V aygıt geriliminden sonra, doğrusal artıştaki küçük sapmalar aygıtın yüksek elektrik alandaki taşıyıcı ısınmasının bir göstergesi olarak düşünülebilir [122].



Şekil 4.18. 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında THH-GaAs-5 aygıtının voltaaja bağlı akım değişimi

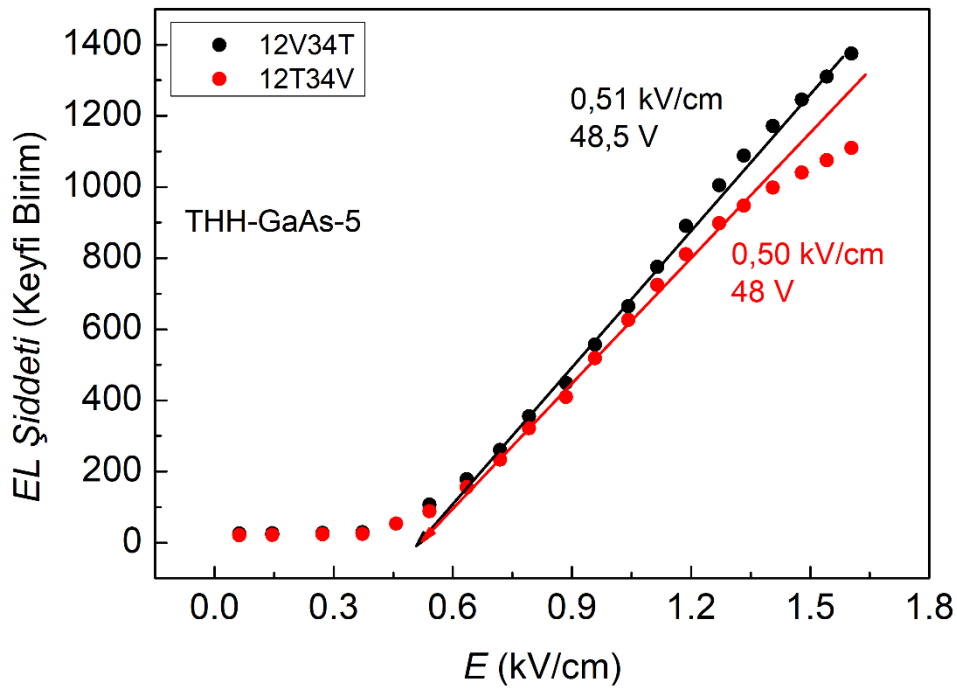
THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonları için oda sıcaklığında 20 kHz ve 200 ns atma genişliğine sahip farklı atmalı gerilim değerlerinde dalga boyuna bağlı EL spektrumu elde edildi. Şekil 4.19 (a)'da 12V34T ve (b)'de 12T34V kontak konfigürasyonu için farklı gerilim değerleri altında elde edilen 600-1000 nm dalga boyu aralığında EL spektrumları verildi. Her iki kontak konfigürasyonunda da aygıt birbiriyle benzer ışıma karakteristiğine ve merkez noktası yaklaşık 812 ± 1 nm dalga boyunda olan şiddetli emisyon pikine sahiptir. Aygıt üzerine uygulanan atmalı gerilim değerleri arttıkça, aygıtın her iki kontak konfigürasyonunda elde edilen EL şiddeti doğrusala yakın bir şekilde artmıştır. Ayrıca, uygulanan gerilimin artmasıyla EL spektrumunda aygıtın ışıma dalgaboyunda kayma gözlenmedi. Bu durum, aygıtın her iki kontak konfigürasyonunda da kararlı ve benzer davranışta ışıma yaptığını göstermektedir.



Şekil 4.19. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) 12V34T ve (b) 12T34V kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu

Şekil 4.20’de THH-GaAs-5 aygıtının 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonları için uygulanan farklı gerilim değerlerinde elde edilen EL şiddeti değişim grafiği verildi. Her iki kontak bağlantısı içinde yaklaşık benzer EL şiddet

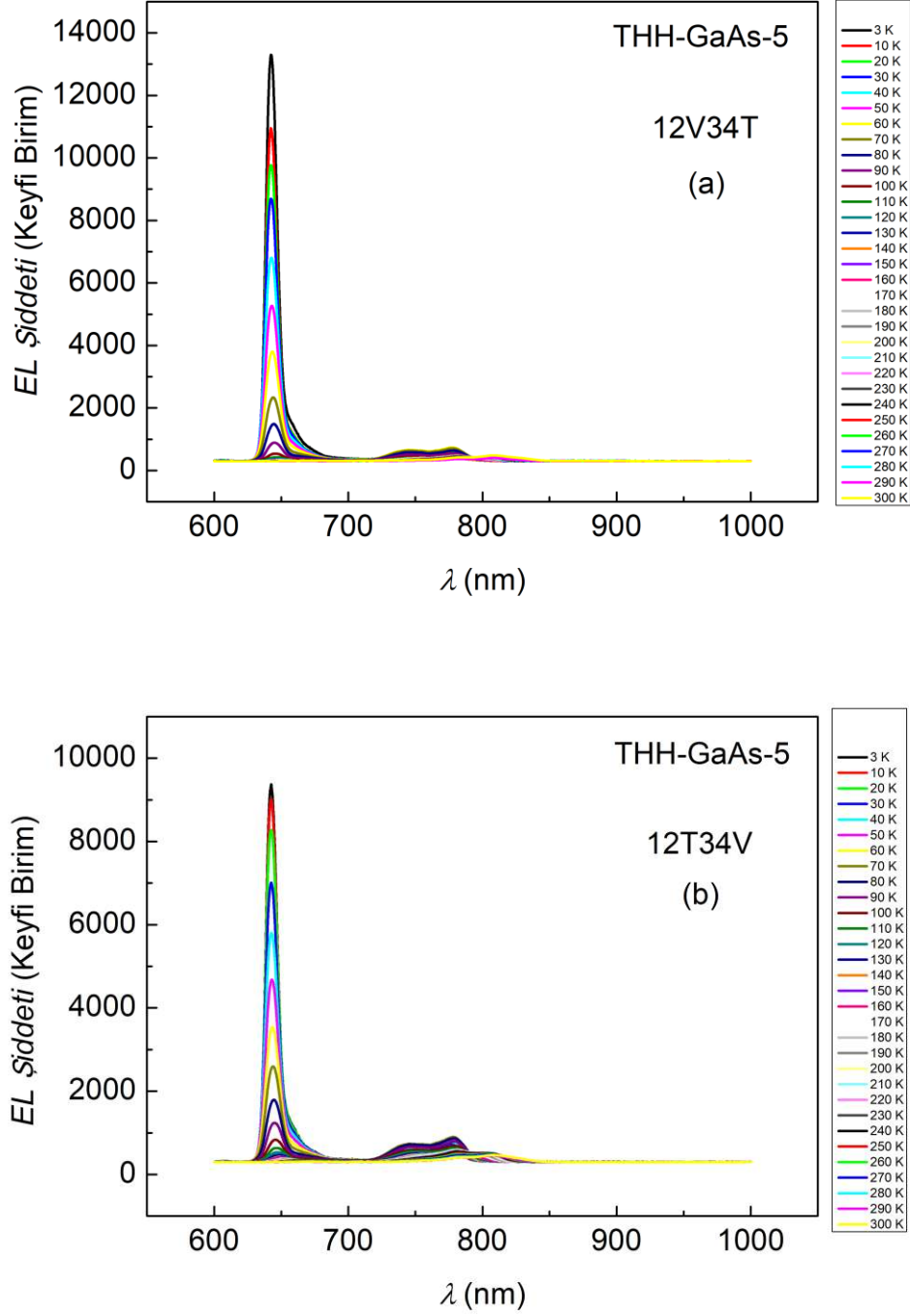
değişimi elde edildi. Şekil 4.20'den THH-GaAs-5 aygıtı 12V34T kontak konfigürasyonu için 0,51 kV/cm (aygıtı uygulanan 48,5 V) ve 12T34V kontak konfigürasyonu için ise 0,50 kV/cm (aygıtı uygulanan 48 V) değerlerinde EL emisyonu başladığı görülmektedir. $l_1 = 0$, $l_2 = 0,2$ mm, $l_3 = 1,16$ mm ve $l_4 = 1,26$ mm sırasıyla THH aygıtının 1 ,2, 3 ve 4 numaralı kontaktların konumlarıdır. Bu değerler yardımıyla, $X = [l_4 - (l_3 - l_2)]/2l_4$ eşitliği kullanılarak boyutsuz THH parametresi, $X = 0,119$ olarak bulundu. THH-GaAs-5 aygıtının klasik LED yapısının 1V2T kontak konfigürasyonu için 5,12 V ve 3T4V kontak konfigürasyonu için ise 4,92 V değerinde ışımaya başladığı hesaba katılırsa, Eş. 2.10'dan THH çalışma gerilimi $43,02 \pm 1$ V ve $41,34 \pm 1$ V olarak bulunur. Dolayısıyla, hesaplanan bu çalışma gerilim değerine yakın gerilimlerde THH-GaAs-5 aygıtı ışıma yapmaya başladığı söylenebilir.



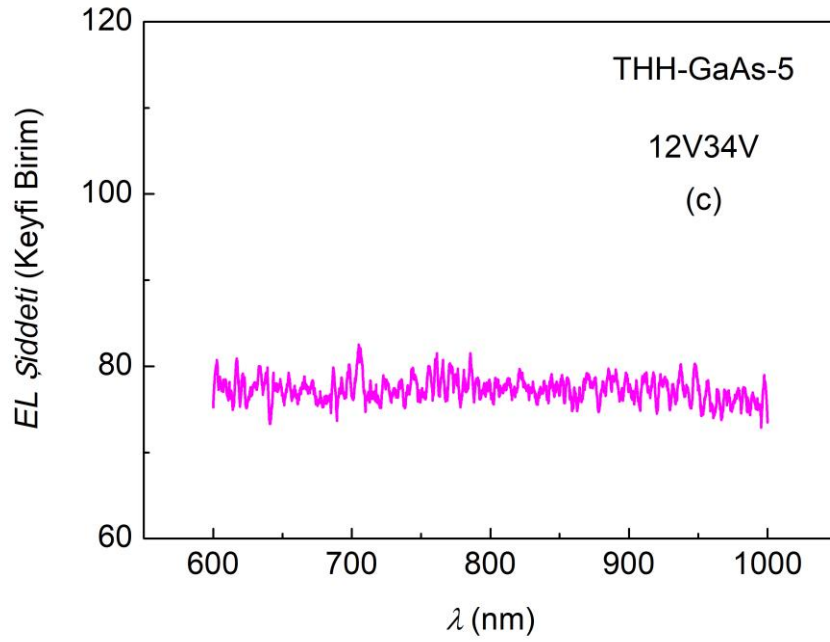
Şekil 4.20. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonunda uygulanan elektrik alana bağlı EL şiddeti grafiği

THH-GaAs-5 kodlu aygıt için sırasıyla 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında 200 ns atma genişliği ve 20 kHz frekans değerine sahip 75 V atmalı gerilim değeri uygulanarak 3-300 K sıcaklık aralığında ve 12V34V kontak konfigürasyonu için ise 3 K sıcaklığında dalga boyuna bağlı EL şiddeti elde edildi. Şekil 4.21 (a)'da 12V34T ve (b)'de 12T34V kontak konfigürasyonları için sıcaklığa bağlı

(c)'de 12V34V kontak konfigürasyonu için ise 3 K sıcaklığında elde edilen dalga boyuna bağlı EL grafiği verildi. Elde edilen EL spektrumlarında aygıtın 12V34T ve 12T34V olmak üzere her iki kontak konfigürasyonunda da benzer karakteristikte ışıma yaptığı gözlenirken, 12V34V kontak konfigürasyonunda ışıma yapmadığı gözlemlendi.

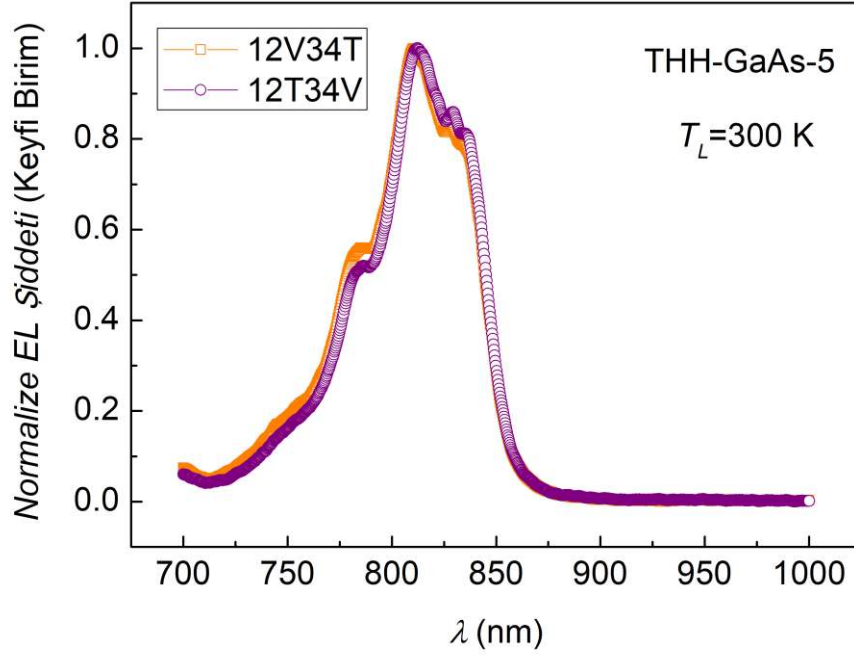


Şekil 4.21. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın sıcaklığa bağlı (a) 12T34V (b) 12V34T ve (c) 3 K sıcaklığında 12V34V kontak konfigürasyonunda elde edilen elektrolüminesans spektrumu



Şekil. 4.21. (devamı)

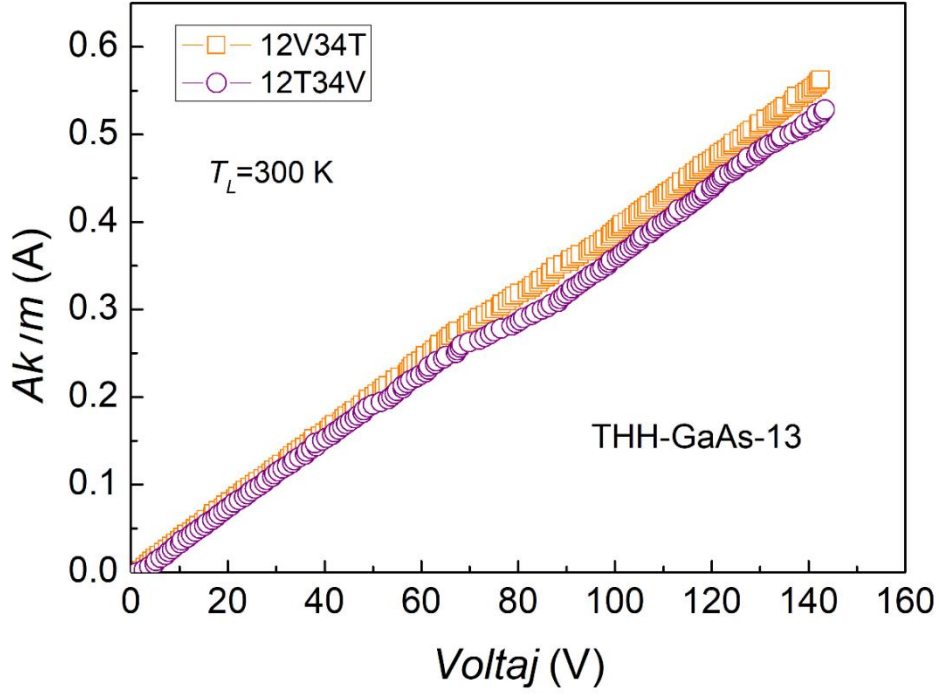
Şekil 4.22’de kontak konfigürasyonları 12T34V ve 12V34T ile elde edilen EL spektrumlarını karşılaştırmak için, 300 K sıcaklığında THH-GaAs-5 kodlu aygıt için 200 V atmalı gerilim değerinde elde edilen EL spektrumları normalize (EL pik değerlerinin tüm ölçümler için 1 değerini alıp diğer değerlerinin buna göre oranlanması) edilip üst üste çizdirildiğinde EL emisyon piklerinin birbiri ile örtüştüğü ve iyi derecede uyumlu olduğu gözlemlendi. Her iki konfigürasyonda da aygıt aynı dalga boyunda benzer emisyon spektrumuna sahiptir. Bu durum THH-GaAs-5 aygıt yapısının polariteden bağımsız (A veya B kontaklarının hangisinin toprak veya besleme ucu olmasının fark etmediği) olarak çalıştığını gösterir. Ayrıca aygıt her iki ucuna aynı anda gerilim uygulandığında emisyon vermemektedir. Aygıtın, her iki kontak konfigürasyonunda gerilime bağlı akım ve gerilime bağlı EL davranışları da benzerdir. Gerçekleştirilen bu ölçüm sonuçlarının her iki kontak konfigürasyonu için aynı olması, THH-GaAs-5 kodlu aygıtın girişi gerilim çıkışı ışın olan XOR mantık kapısı fonksiyonuna uygun olarak çalıştığı anlamına gelmektedir. Elektriksel kontaklardan herhangi birine atmalı gerilim uygulanması (“1 XOR 0” veya “0 XOR 1”) durumunda aygıt ışıma yaparken, her iki ucada atmalı gerilim uygulandığı (“1 XOR 1”) durumunda ise aygıt ışıma yapmamaktadır. XOR mantık kapısının çalışma mantığı Tablo 2.2’de verildi.



Şekil 4.22. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 12T34V ve 12V34T kontak konfigürasyonunda normalize edilmiş elektrolüminesans spektrumunun karşılaştırılması

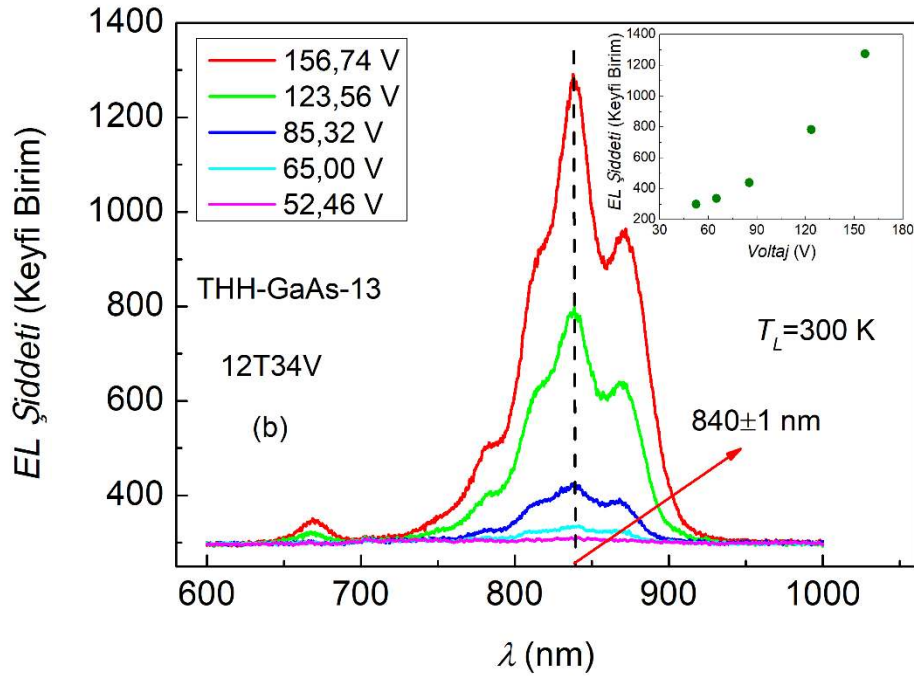
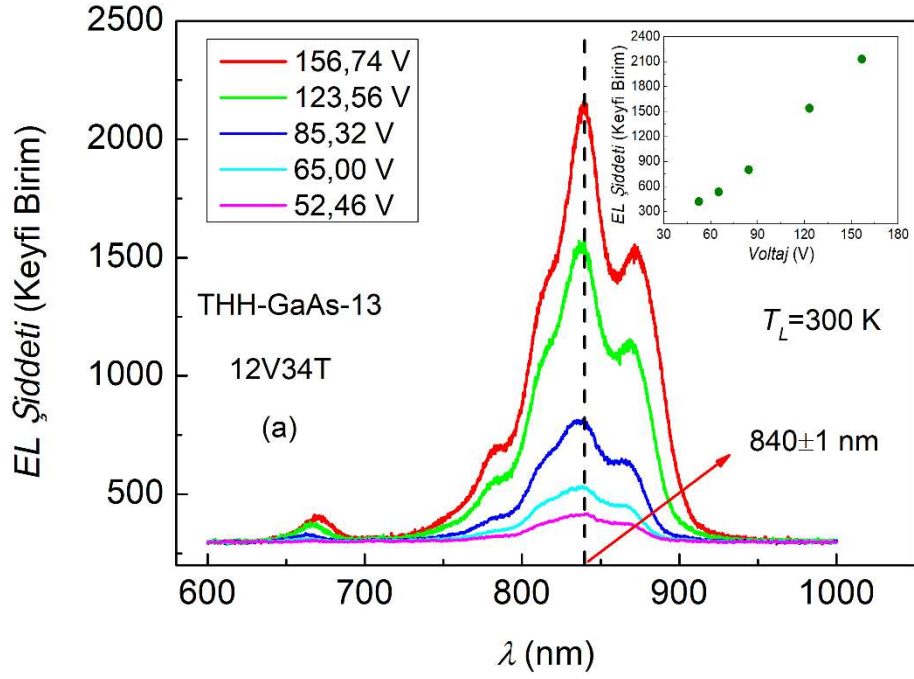
4.4.2.2. THH-GaAs-13 aygıtı

THH-GaAs-13 kodlu aygıtın XOR mantık kapısı ölçümleri için Şekil 4.9'daki gibi elektriksel bağlantıları yapıldı. Burada, 12V34T ve 12T34V bağlantı durumlarında aygıtta 20 kHz frekansa ve 200 ns atma genişliğine sahip olan atmalı gerilimler uygulanarak uygulanan elektrik alana bağlı akım ölçümleri elde edildi. Ölçümler oda sıcaklığında (300 K) gerçekleştirildi. Her iki kontak konfigürasyonu içinde artan gerilim değerlerine karşı elde edilen akım doğrusal ve benzer karakteristikte artışa sahiptir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında THH-GaAs-13 aygıtının voltaja bağlı akım değişimi

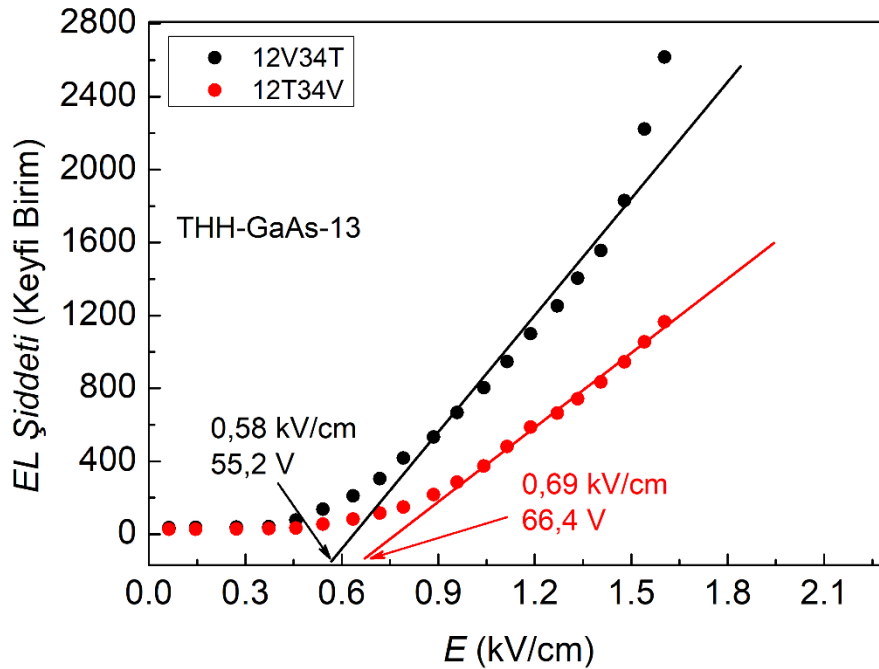
THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonları için oda sıcaklığında 20 kHz ve 200 ns atma genişliğine sahip farklı atmalı gerilim değerlerinde dalga boyuna bağlı EL spektrumu elde edildi. Şekil 4.24 (a)'da 12V34T ve (b) 12T34V kontak konfigürasyonu için elde edilen EL spektrumları verildi. Her iki kontak konfigürasyonundada, aygıt merkez noktası yaklaşık 840 ± 1 nm dalga boyunda olan şiddetli bir pik değerine ve benzer ışıma davranışına sahiptir. Aygıt üzerine uygulanan atmalı gerilim değerleri arttıkça, aygıtın her iki kontak konfigürasyonu için elde edilen EL şiddeti doğrusala yakın bir şekilde artma gösterdi. Ayrıca, uygulanan gerilimin artmasıyla EL spektrumunda aygıtın ışıma dalgaboyunda kayma gözlenmedi. Bu durum, aygıtın her iki kontak konfigürasyonunda da kararlı ve benzer davranışta ışıma yaptığını göstermektedir.



Şekil 4.24. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) 12V34T ve (b) 12T34V kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu

Şekil 4.25’de THH-GaAs-13 aygıtının 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonları için uygulanan farklı gerilim değerlerinde elde edilen EL şiddeti değişim grafiği verildi. Şekil 4.25’den görüldüğü gibi iki kontak bağlantısı için EL

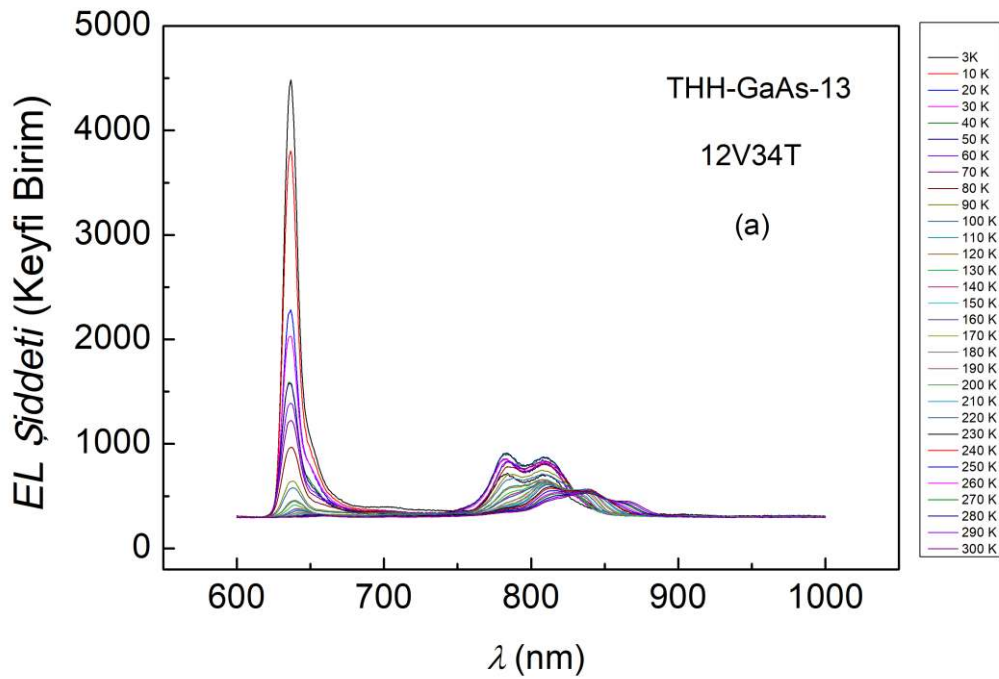
şiddetinin değişimi simetrik değildir. Bu durum kötü ohmik kontak davranışından kaynaklanabilir [5]. Ayrıca, aygıtın yüksek elektrik alan değerlerinde eklem bozulmaya başlamasından kaynaklanabilir [89]. Şekil 4.25’den THH-GaAs-13 aygıtı 12V34T kontak konfigürasyonu için 0,58 kV/cm (aygıtta uygulanan 55,2 V) ve 12T34V kontak konfigürasyonu için ise 0,69 kV/cm (aygıtta uygulanan 66,4 V) değerlerinde EL emisyonu başladığı görülmektedir. $l_1 = 0$, $l_2 = 0,2$ mm, $l_3 = 1,16$ mm ve $l_4 = 1,26$ mm sırasıyla THH aygıtının 1, 2, 3 ve 4 numaralı kontakların konumlarıdır. Bu değerler yardımıyla, $X = [l_4 - (l_3 - l_2)]/2l_4$ eşitliği kullanılarak boyutsuz THH parametresi, $X = 0,119$ olarak bulundu. THH-GaAs-13 aygıtının klasik LED yapısının 1V2T kontak konfigürasyonu için 4,56 V ve 3T4V kontak konfigürasyonu için ise 5,06 V değerinde ışımaya başladığı hesaba katılırsa, Eş. 2.10’dan THH çalışma gerilimi $38,32 \pm 1$ V ve $42,52 \pm 1$ V olarak bulunur. Dolayısıyla, THH-GaAs-13 aygıtının yarı-düz bant modelinden hesaplanan elektrik alan değerlerinden daha yüksek elektrik alan değerinde emisyon başlamanın sebebi, taşıyıcı difüzyon sürecinin nispeten yavaş olması ve dedektörün çok küçük ışık sinyalleri algılamadaki sınırlı yeteneği ile açıklanabilir [89].



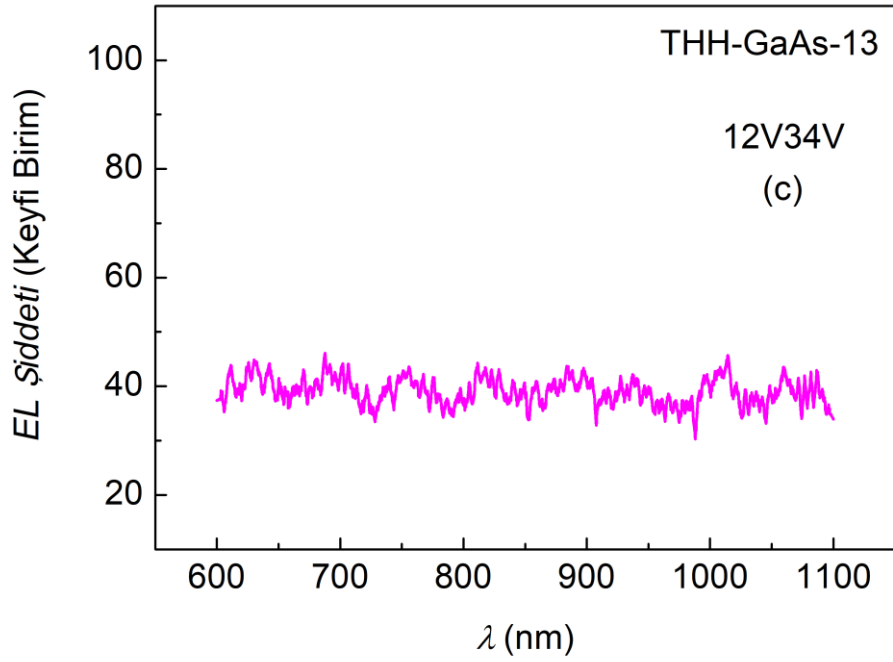
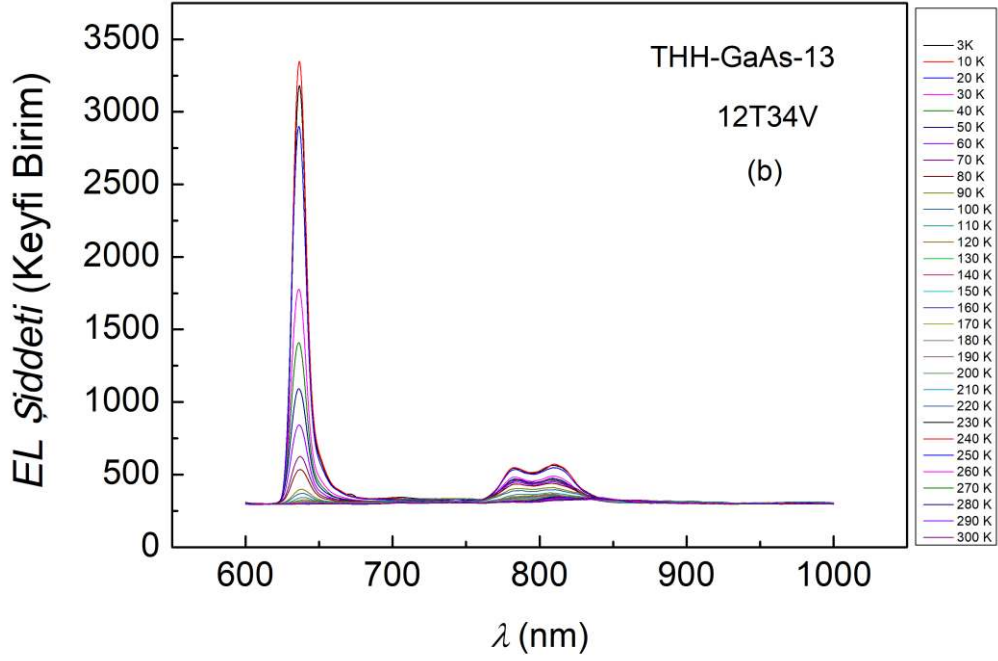
Şekil 4.25. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonunda uygulanan elektrik alana bağlı EL şiddeti grafiği

THH-GaAs-13 kodlu aygıt için sırasıyla 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonlarında 200 ns atma genişliği ve 20 kHz frekans değerine sahip 75 V atmalı

gerilim değeri uygulanarak 3-300 K sıcaklık aralığında ve 12V34V konfigürasyonu için ise 3 K sıcaklığında dalga boyuna bağlı EL şiddeti elde edildi. Şekil 4.26 (a)'da 12V34T ve (b)'de 12T34V sıcaklığa bağlı ve (c)'de 12V34V için 3 K sıcaklığı için iki kontak konfigürasyonundada 600-1000 nm dalga boyu aralığında elde edilen EL grafikleri verildi. EL spektrumları incelendiğinde, aygıtın 12V34T ve 12T34V olmak üzere her iki kontak konfigürasyonunda da benzer karakteristikte ışıma yaptığı gözlenirken, 12V34V kontak konfigürasyonunda ışıma yapmadığı gözlemlendi.



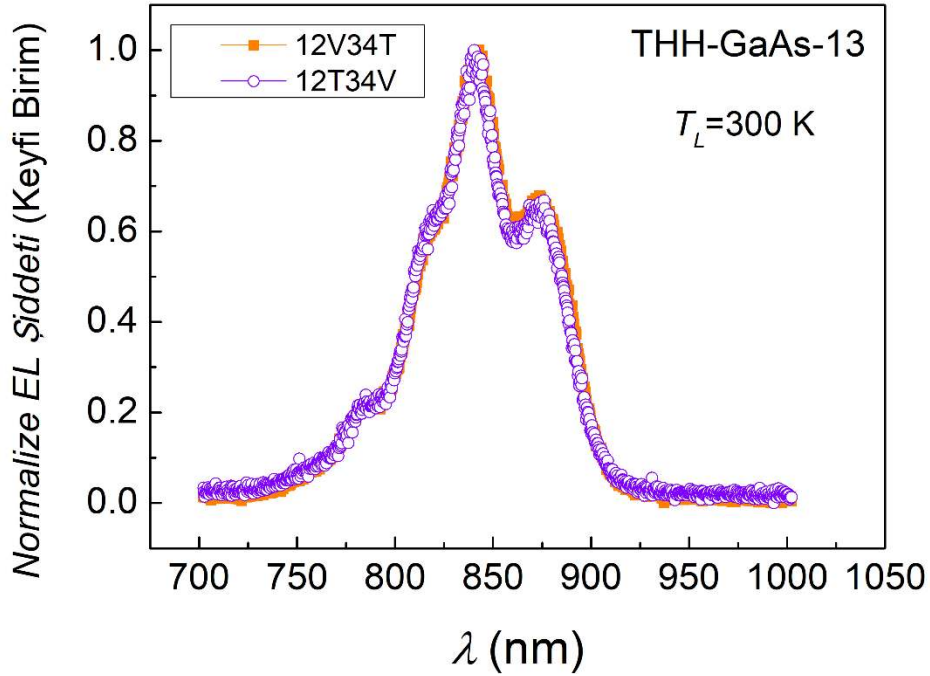
Şekil 4.26. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın sıcaklığa bağlı (a) 12T34V (b) 12V34T ve (c) 3 K sıcaklığında 12V34V kontak konfigürasyonunda elde edilen elektrolüminesans spektrumu



Şekil 4.26. (devamı)

Şekil 4.27’de kontak konfigürasyonları 12T34V ve 12V34T ile elde edilen EL spektrumlarını karşılaştırmak için, 300 K sıcaklığında THH-GaAs-13 kodlu aygıt için 200 V atmalı gerilim değerinde elde edilen EL spektrumları normalize edilip üst üste çizdirildiğinde EL emisyon piklerinin birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlendi.

THH-GaAs-13 aygıtının her iki kontak konfigürasyonu için, elde edilen gerilime bağlı akım değişimi, uygulanan farklı gerilim değerleri için dalga boyuna bağlı EL ve sıcaklığa bağlı EL davranışları aynıdır. Aygıttan aynı elektrik alan değerlerinde aynı dalga boyunda emisyon elde edilmektedir. Bu sonuçlar, THH-GaAs-13 aygıtının polariteden bağımsız olarak çalışabildiğini göstermektedir. Elektriksel kontaklardan herhangi birine atmalı gerilim uygulanması durumunda (“1 XOR 0” veya “0 XOR 1”) aygıt ışıma yaparken, her iki uca birden atmalı gerilim uygulandığı durumda ise (“1 XOR 1”) aygıt ışıma yapmamaktadır. Bu durum, THH-GaAs-13 kodlu aygıtın XOR mantık kapısının ışık ile çalışması olarak kullanılabileceğinin göstergesidir.



Şekil 4.27. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın 12T34V ve 12V34T kontak konfigürasyonunda normalize edilmiş elektrolüminesans spektrumunun karşılaştırılması

Sonuç olarak, XOR mantık kapısı girişlerden herhangi birine gerilim uygulandığında çıkış veren, girişlerin her ikisine birden gerilim uygulandığında çıkış vermeyen çalışma mantığına sahiptir. Tablo 2.2’de XOR mantık kapısının doğruluk çizelgesi verildi, burada “1” durumu gerilimin uygulandığı, “0” durumu ise topraklandığı durumu göstermektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları ile Tablo 2.2 karşılaştırıldığında THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtları XOR mantık kapısı prensibine göre ışın çıkışı vermektedir. Bu durum, THH aygıt yapısı kullanılarak XOR mantık kapısının ışık ile çalışması olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Aygıttan ışın çıkışının olduğu durum

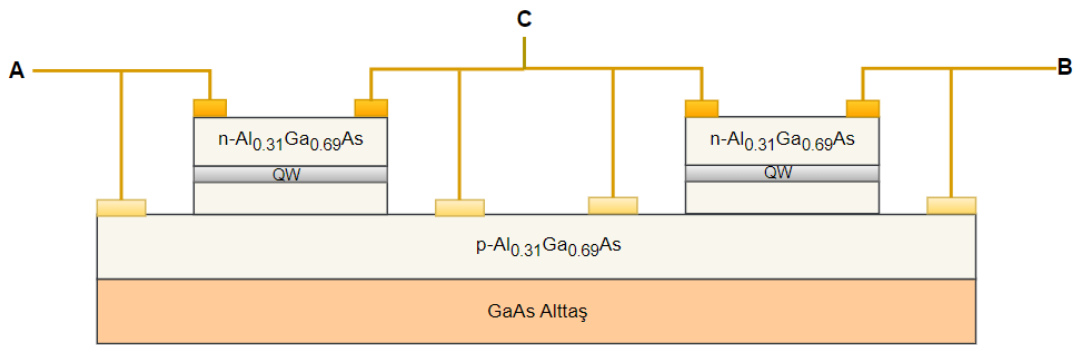
“1” mantık durumunu ve ışın çıkışının olmadığı durum “0” mantık durumunu belirtmektedir.

4.4.3. DEĞİL (NOT) mantık kapısı ölçümleri

THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtların XOR mantık kapısı olarak çalıştığı üst başlıkta detaylı gösterildi. Aygıtların girişlerinden birine her durumda gerilim uygulanırken, diğer ucunun topraklanması durumunda emisyon çıkışı (1 durumu) elde edilir, ancak bu uca gerilim uygulandığında ise emisyon çıkışı elde edilememektedir (0 durumu). Bu durum, ayrıca THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtlarının NOT mantık kapısının ışın ile çalışması olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Tablo 2.2’de NOT mantık kapısının doğruluk çizelgesi verildi.

4.4.4. VEYA (OR) mantık kapısı ölçümleri

THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtların VEYA (OR) ve VE DEĞİL (NAND) mantık kapısı ölçümleri için THH fabrikasyon aşaması sırasında aynı *mesa* üzerinde yan yana konumlanan iki adet THH aygıtı kullanıldı. Üretilen aygıtların Şekil 4.28’de şematik olarak gösterilen kontak konfigürasyonlarında elektriksel bağlantıları yapılarak ölçümleri gerçekleştirildi. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi aygıt toplamda A, B ve C olmak üzere üç adet kontak bağlantısına sahiptir. Burada, C ucu iki aygıtın uçlarının ortak kullanıldığı kontağı temsil etmektedir. OR mantık kapısı ölçümleri için ortak C kontak ucuna toprak (0) bağlantısı yapılırken, NAND mantık kapısı ölçümleri için ise ortan C kontak ucuna atmalı gerilim (1) bağlantısı yapıldı.

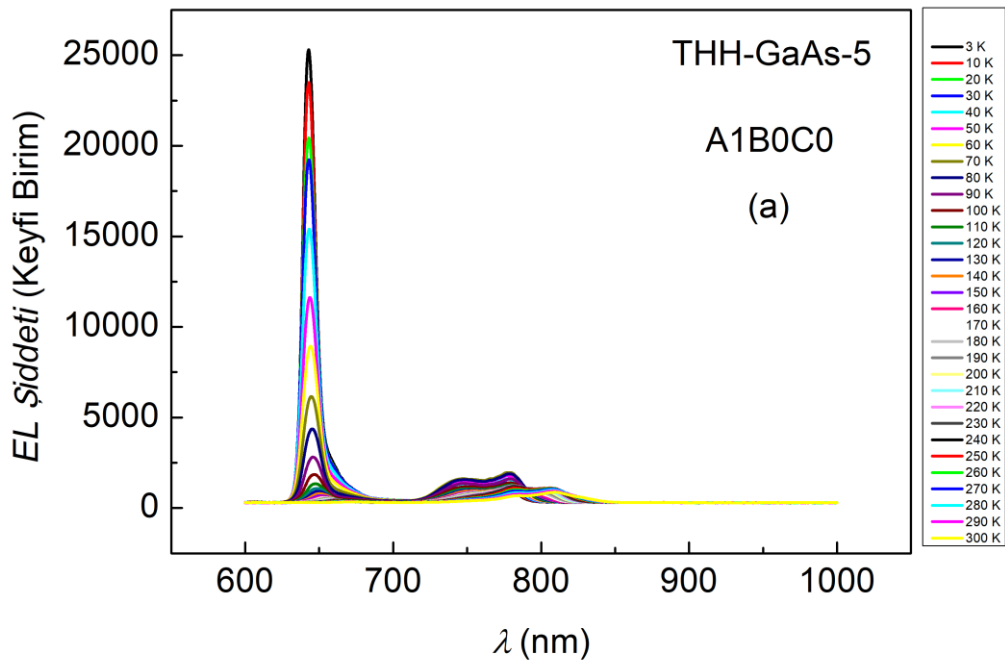


Şekil 4.28. THH yapıda OR ve NAND mantık kapıları için elektriksel bağlantıların şematik gösterimi

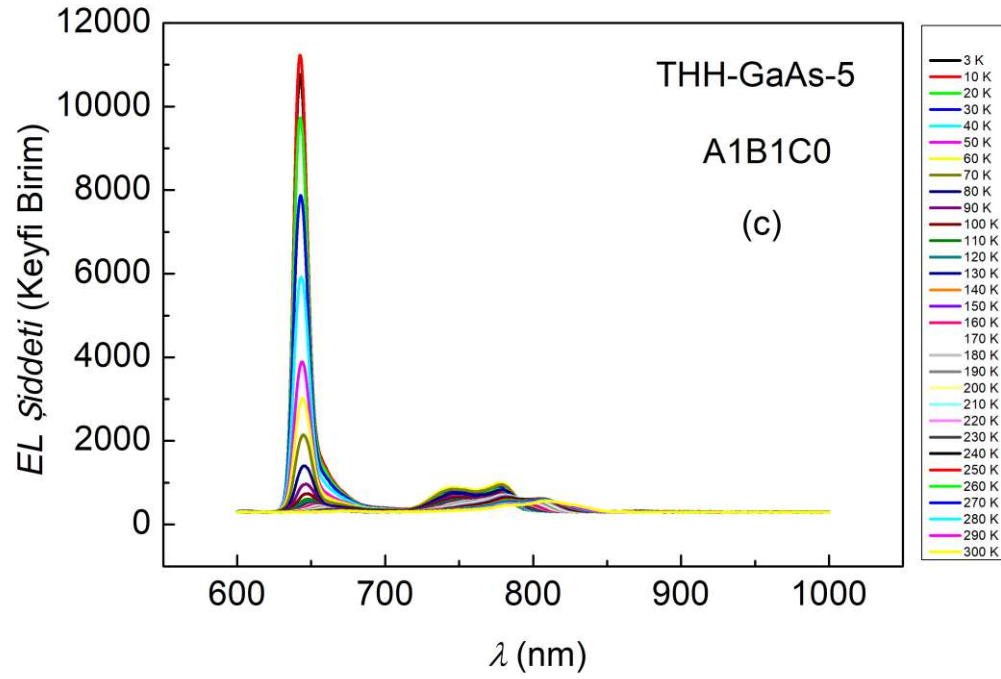
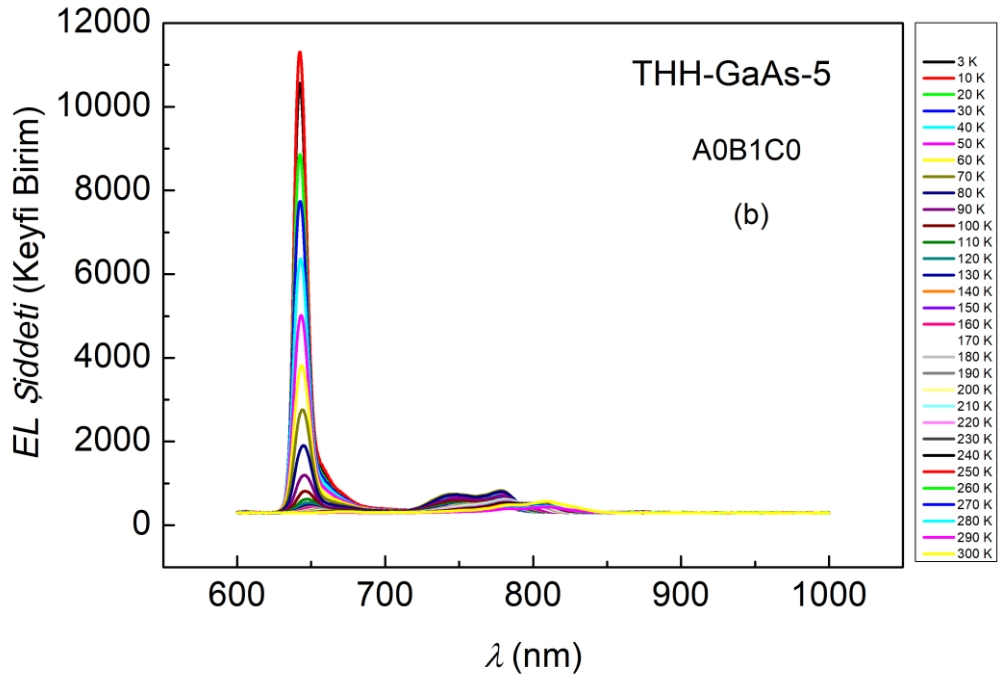
Her aygıt için elde edilen ölçüm sonuçları alt başlıklar şeklinde ayrıca verildi. Burada, gerilimin uygulanması durumu “1”, uygulanmadığı durum “0” ile temsil edilmektedir.

4.4.4.1. THH-GaAs-5 aygıtı

THH-GaAs-5 kodlu aygıtın A1B0C0, A0B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonlarında 200 ns atma genişliğine ve 20 kHz frekansa sahip olan 75 V gerilim değeri uygulanarak 3-300 K sıcaklık aralığında 600-1000 nm dalga boyun aralığı için EL şiddeti elde edildi. Şekil 4.29 (a)'da A1B0C0, (b)'de A0B1C0 ve (c)'de A1B1C0 kontak konfigürasyonları için elde edilen sıcaklığa bağlı EL grafikleri verildi. Her üç konfigürasyon içinde THH-GaAs-5 aygıtının EL spektrumu benzerdir ve aynı dalga boyunda aygıt emisiyona sahiptir.



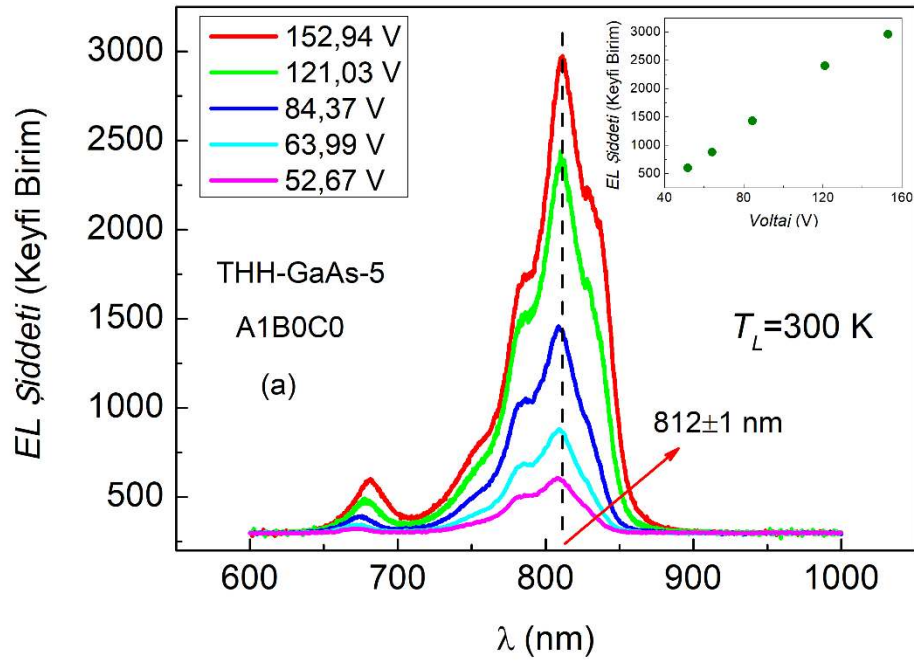
Şekil 4.29. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumu



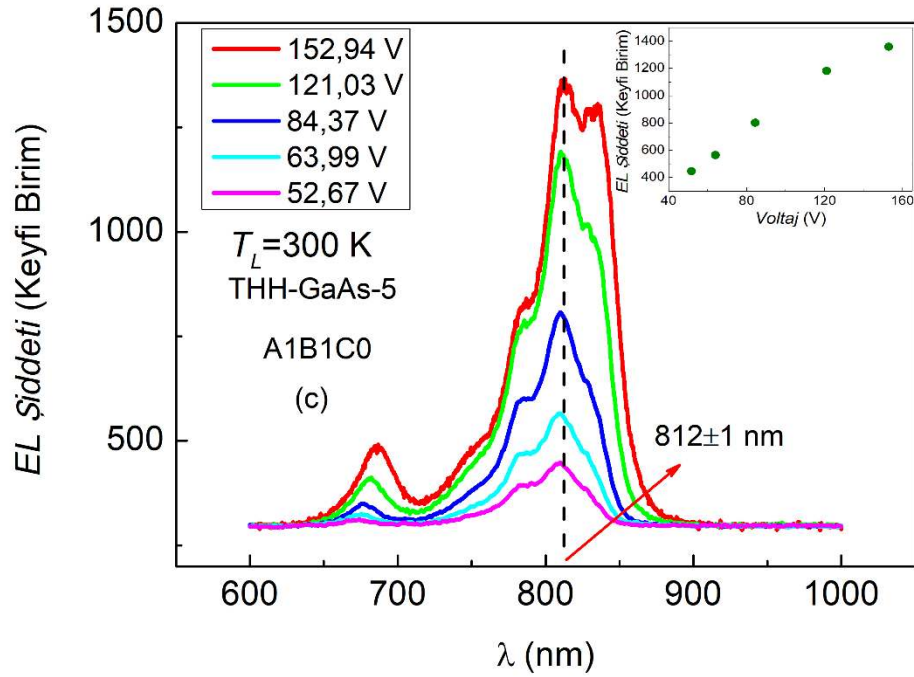
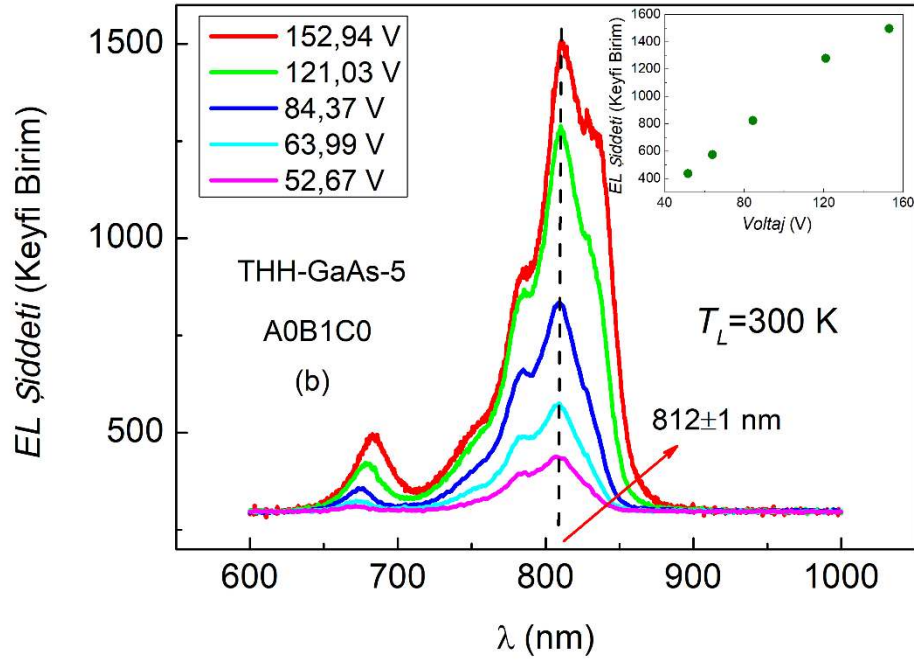
Şekil 4.29. (devamı)

THH-GaAs-5 kodlu aygıtın A1B0C0, A0B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonları için oda sıcaklığında 200 ns atma genişliğine, 20 kHz frekansa sahip olan farklı atmalı gerilim değerlerinde dalga boyuna bağlı (600-1000 nm) EL spektrumu

elde edildi. Şekil 4.30 (a)'da A1B0C0 (b)'de A0B1C0 ve (c)'de A1B1C0 kontak konfigürasyonu için elde edilen EL spektrumları verildi. Şekillerden görüldüğü gibi, her üç kontak konfigürasyonunda da aygıt yaklaşık 812 ± 1 nm dalga boyunda benzer ışıma davranışı göstermektedir. Aygıtta uygulanan atmalı gerilim değerlerinin artmasıyla EL şiddeti doğrusal olarak artmıştır ve emisyon dalga boyunda kayma gözlenmeyerek kararlı ışıma elde edildi.



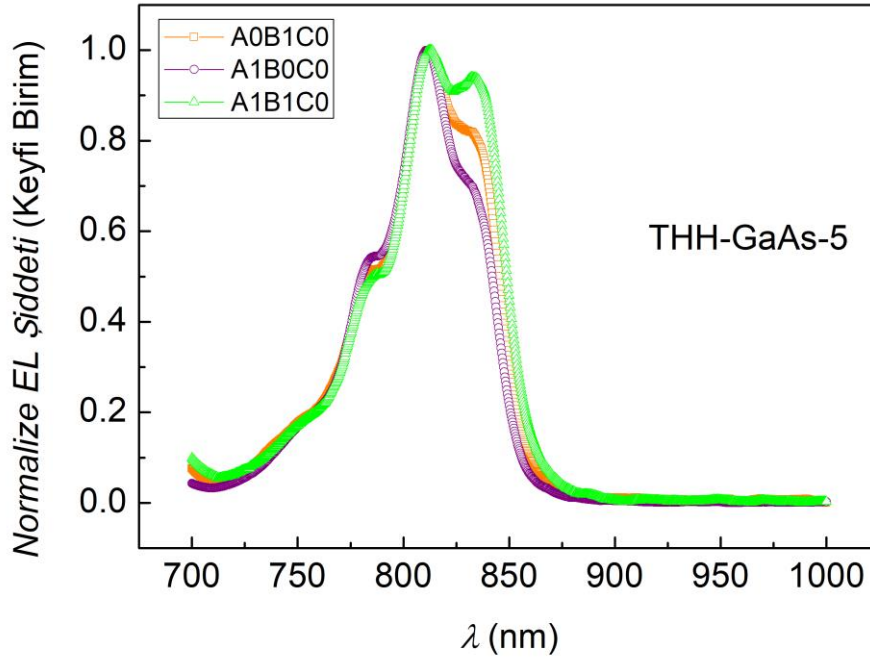
Şekil 4.30. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu



Şekil 4.30. (devamı)

Şekil 4.31’de A0B1C0, A1B0C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonları ile elde edilen EL spektrumlarını karşılaştırmak için, 300 K sıcaklığında 20 kHz frekans ve 200 ns atma genişliğine sahip olan 200 V atmalı gerilim değerinde elde edilen EL spektrumları normalize edilip üst üste çizdirildiğinde EL emisyon piklerinin birbirleri ile uyumluluğu

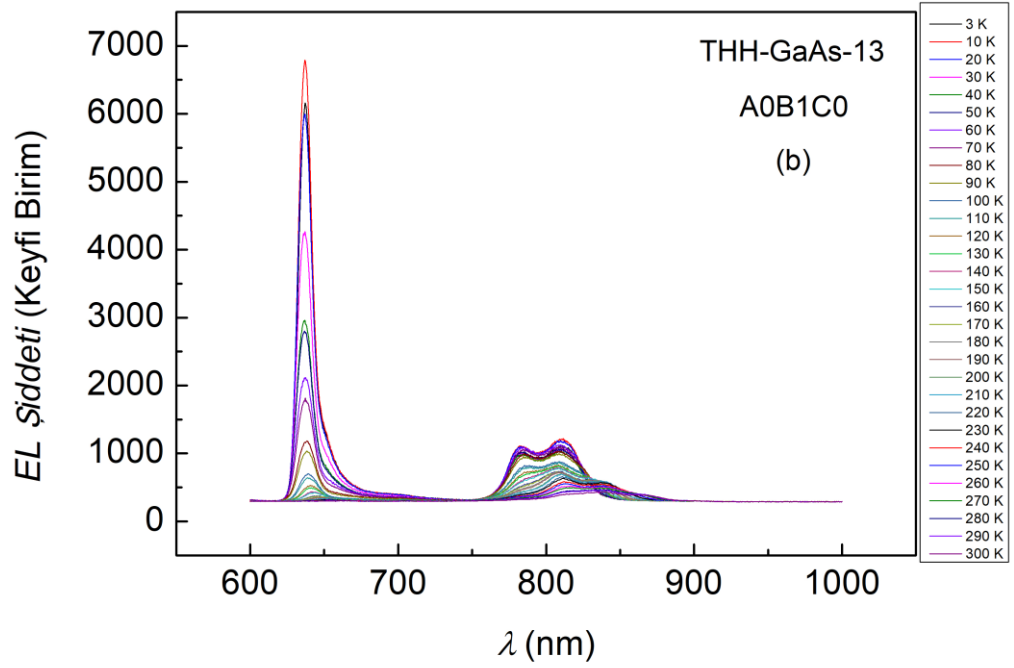
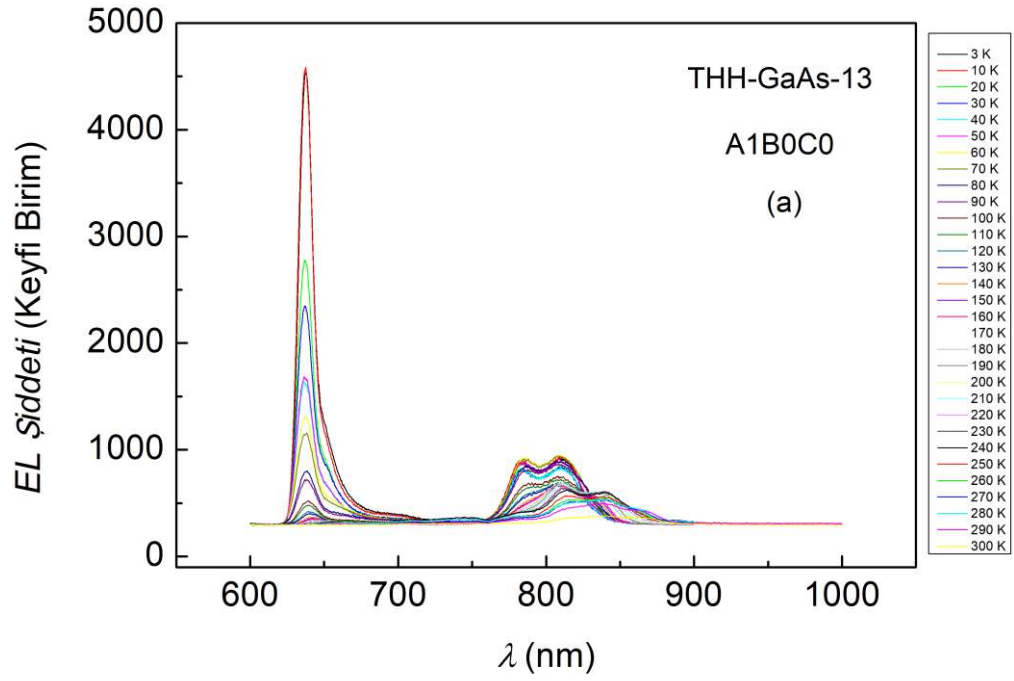
olduğu gözlemlendi. Her üç kontak konfigürasyonunda da aygıt aynı dalga boyunda benzer emisyon davranışı göstermektedir. Aygıtın ortak kontağı olan C ucu her durumda “0” iken, A ucu “0” ve B ucu “1” durumu (“0” OR “1”), A ucu “1” ve B ucu “0” durumu (“1” OR “0”), ve hem A hem de B ucu “1” iken (“1” OR “1”) THH-GaAs-5 aygıtı aynı dalga boyunda ışımaya yani mantık “1” çıktısına sahiptir. Bu durum, aygıtın bu kontak konfigürasyonunda VEYA (OR) mantık kapısının ışık ile çalışması olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Tablo 2.2’de OR mantık kapısının çalışma prensibi verildi.



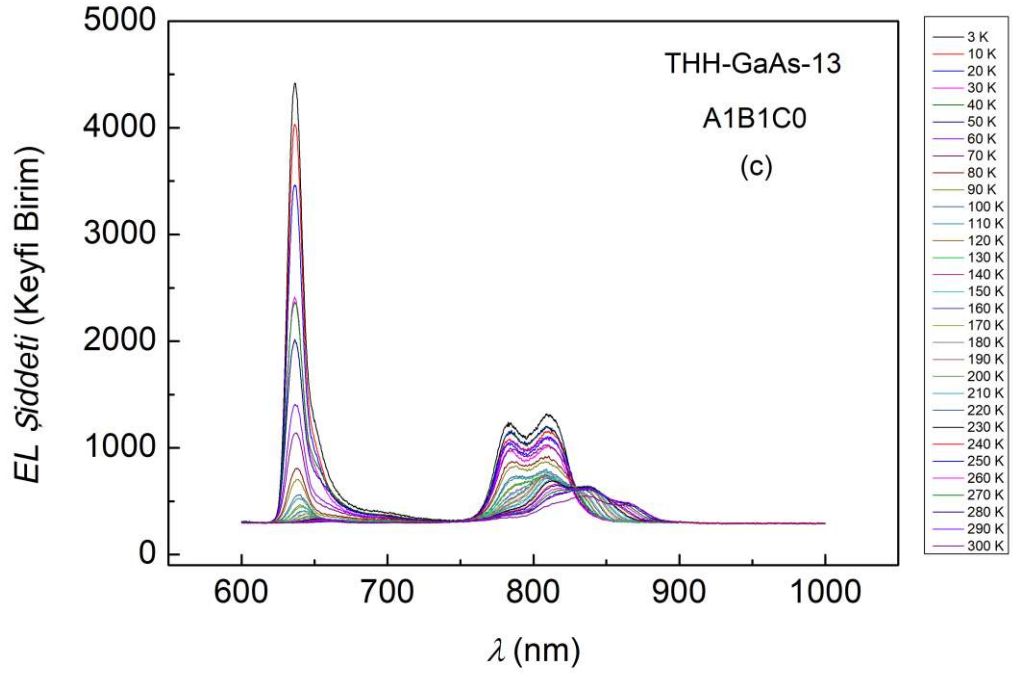
Şekil 4.31. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın 200 V atma voltajı altında A0B1C0, A1B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonlarının için elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu

4.4.4.2. THH-GaAs-13 aygıtı

THH-GaAs-13 kodlu aygıtın A1B0C0, A0B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonlarında 200 ns atma genişliğine ve 20 kHz frekansa sahip olan 75 V gerilim değeri uygulanarak 3-300 K sıcaklık aralığında 600-1000 nm dalga boyu aralığında EL şiddeti elde edildi. Şekil 4.32 (a)’da A1B0C0, (b)’de A0B1C0 ve (c)’de A1B1C0 kontak konfigürasyonları için elde edilen sıcaklığa bağlı EL grafikleri verildi.

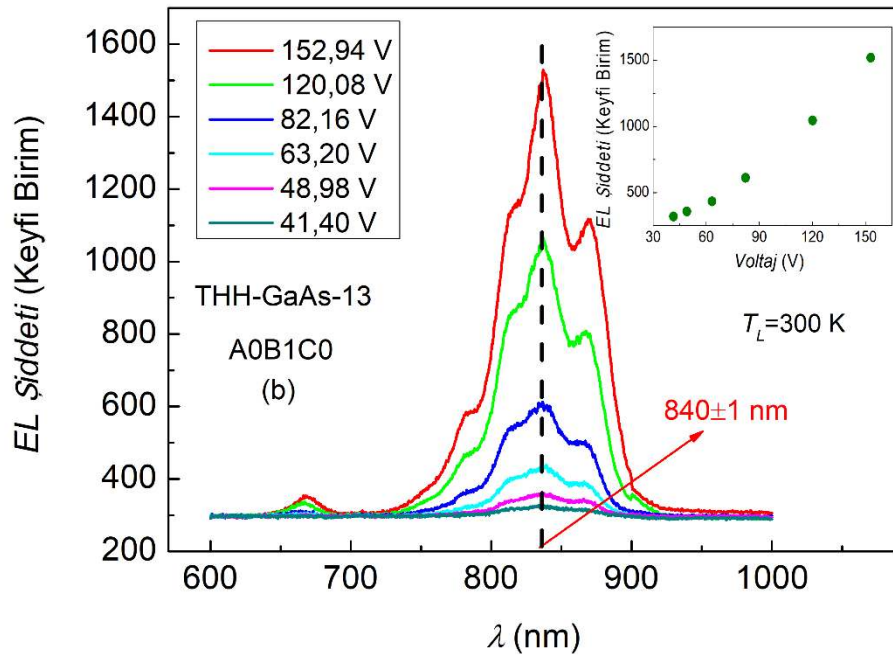
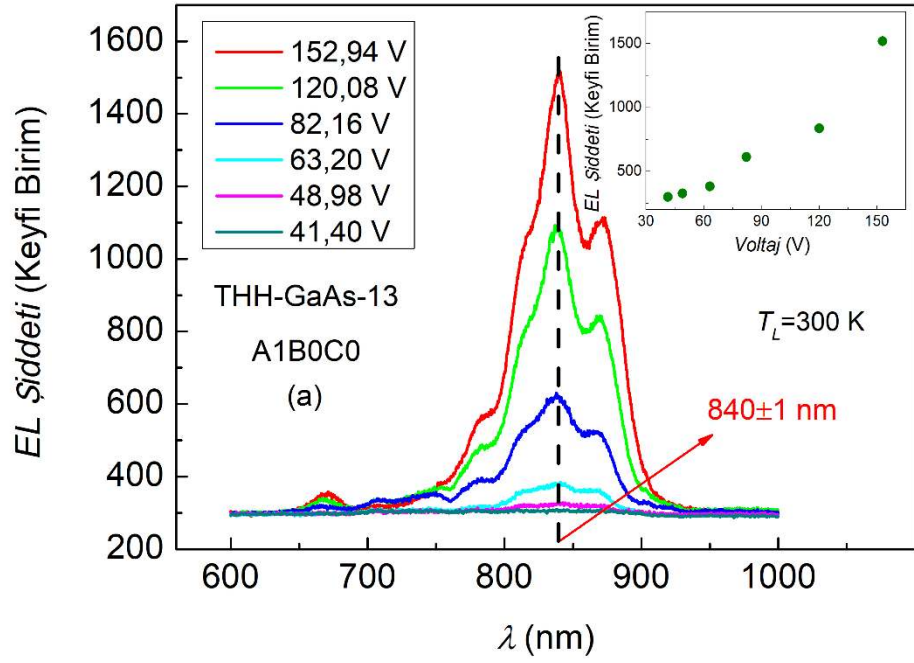


Şekil 4.32. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumu

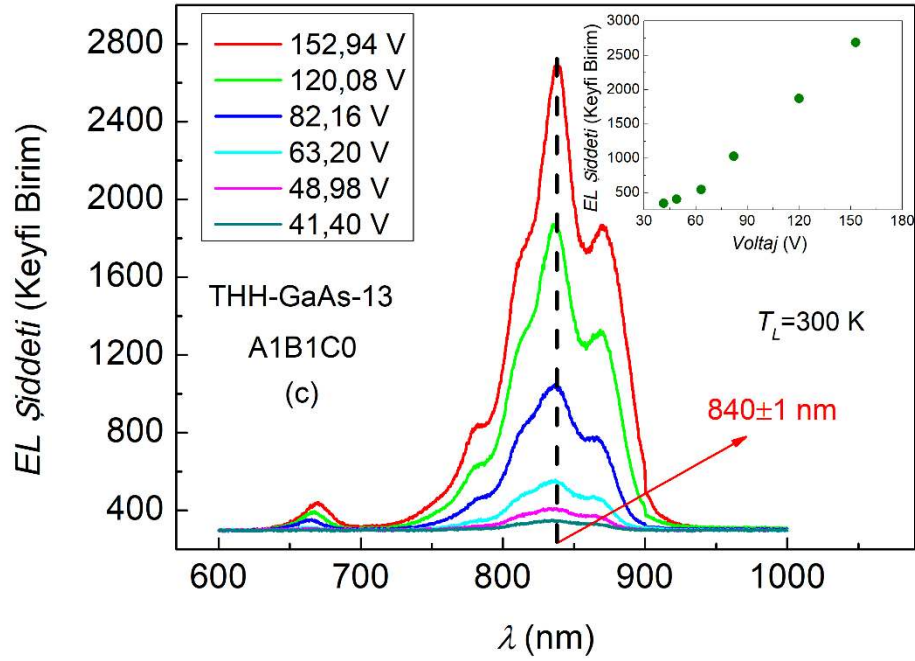


Şekil 4.32. (devamı)

THH-GaAs-13 kodlu aygıtın A1B0C0, A0B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonları için oda sıcaklığında 200 ns atma genişliği ve 20 kHz frekansa sahip farklı atmalı gerilim değerlerinde dalga boyuna bağlı EL spektrumu elde edildi. Şekil 4.33 (a)'da A1B0C0 (b)'de A0B1C0 ve (c)'de A1B1C0 kontak konfigürasyonu için elde edilen EL spektrumları verildi. Şekillerden görüldüğü gibi, her üç kontak konfigürasyonunda da aygıt yaklaşık 840 ± 1 nm dalga boyunda benzer ışıma davranışı göstermektedir. Aygıtı uygulanan gerilim değeri arttıkça EL şiddeti doğrusal olarak artmaktadır ve emisyon dalga boyunda kayma gözlenmedi.

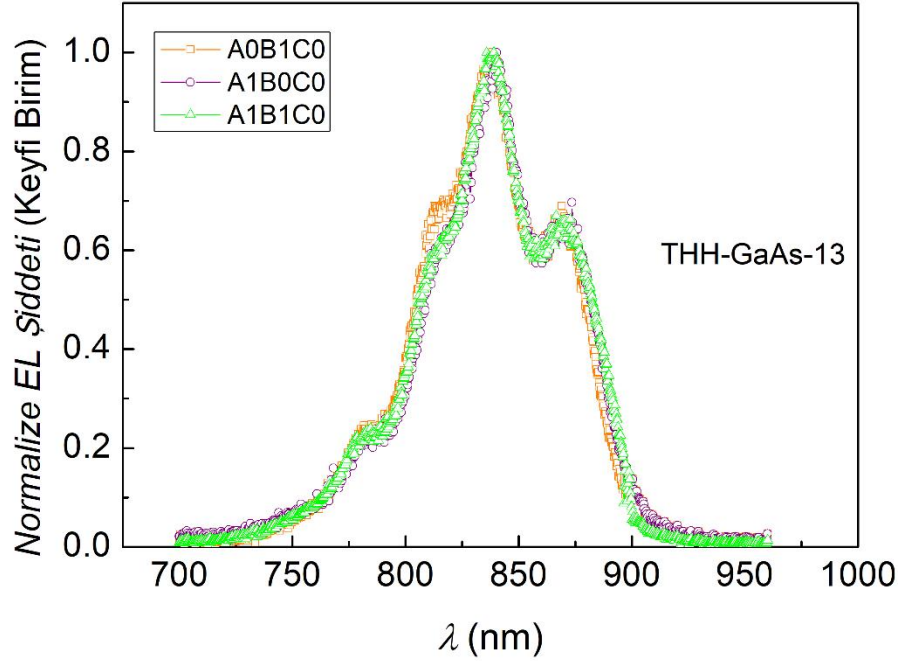


Şekil 4.33. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A1B0C0 (b) A0B1C0 ve (c) A1B1C0 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu



Şekil 4.33. (devamı)

Şekil 4.34’de A0B1C0, A1B0C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonları ile elde edilen EL spektrumlarını karşılaştırmak için, 300 K sıcaklığında 20 kHz frekans ve 200 ns atma genişliğine sahip 200 V atmalı gerilim değeri uygulanarak elde edilen EL spektrumları normalize edilip üst üste çizdirildiğinde EL emisyon piklerinin birbirleri ile uyumlu olup örtüştüğü gözlemlendi. Her üç kontak konfigürasyonda da örnek aynı dalga boyunda benzer emisyon davranışı göstermektedir. Bu kontak konfigürasyonunda elde edilen spektrumlar incelendiğinde THH-GaAs-13 aygıtının da THH-GaAs-5 aygıtı ile benzer şekilde VEYA (OR) mantık kapısının ışık ile çalışması olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.34. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın sabit atma voltajı altında A0B1C0, A1B1C0 ve A1B1C0 kontak konfigürasyonlarında elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu

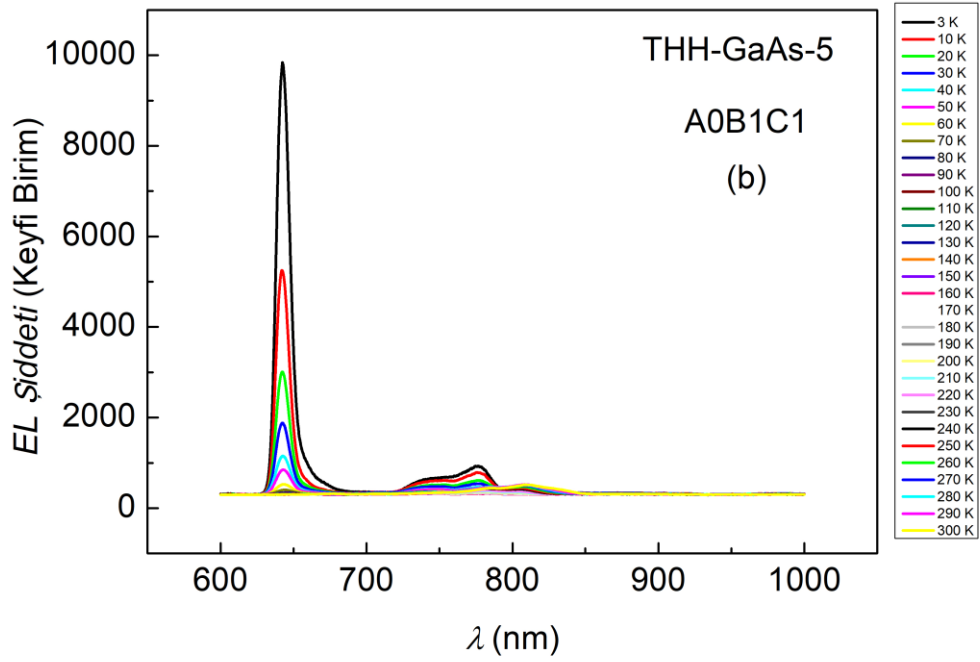
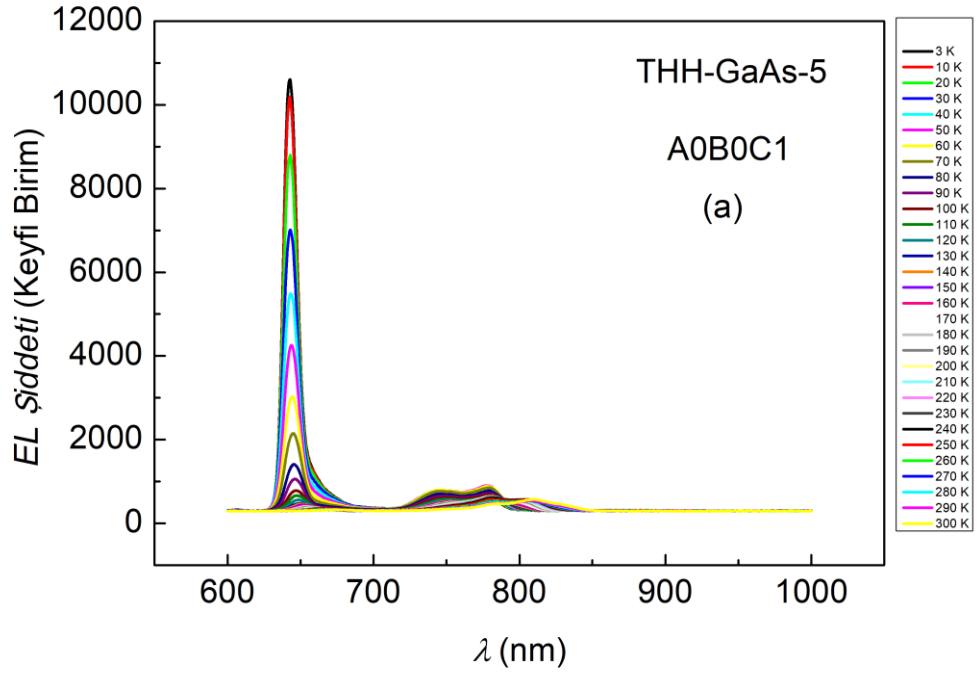
4.4.5. VE DEĞİL (NAND) mantık kapısı ölçümleri

VE DEĞİL (NAND) mantık kapısı ölçümleri için Şekil 4.28’de şematik olarak gösterilen kontak konfigürasyonlarında elektriksel bağlantıları yapılarak aygıt ölçümleri gerçekleştirildi. Şekil 4.28’de iki aygıtın ortak kontağı olan C kontağı NAND kapısı ölçümleri için gerilim uygulanan yani mantık durumu “1” olan kontaklıdır.

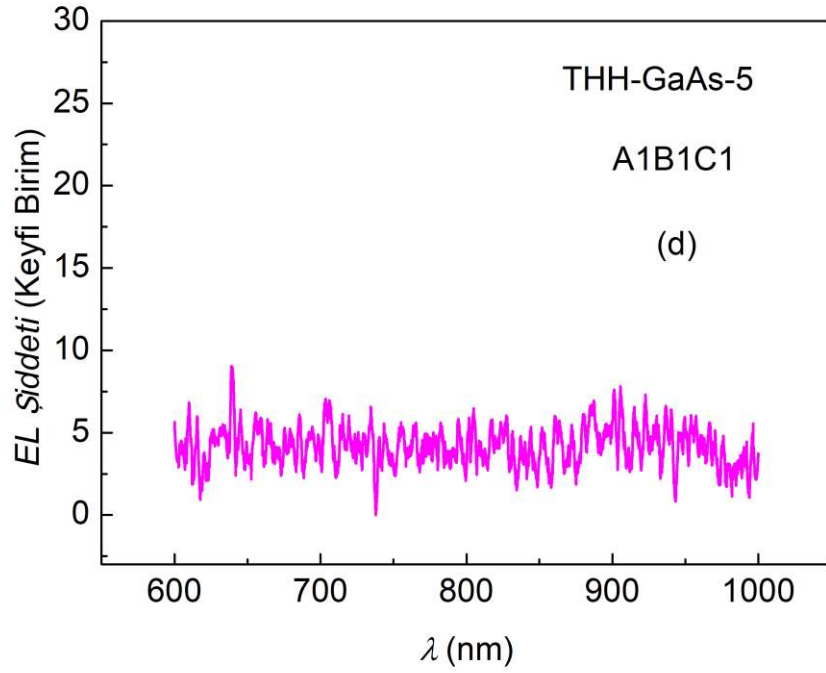
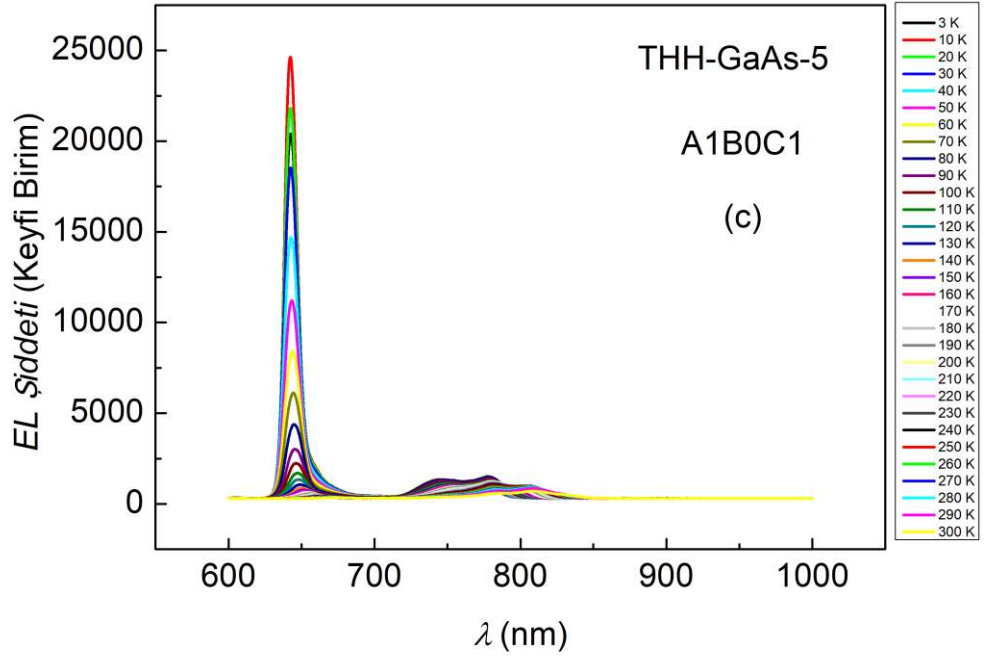
Her aygıt için elde edilen NAND kapısı ölçüm sonuçları ayrı başlıklar altında verildi.

4.4.5.1. THH-GaAs-5 aygıtı

THH-GaAs-5 kodlu aygıtın A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonlarında 200 ns atma genişliği, 20 kHz frekansa sahip 75 V gerilim değeri uygulanarak 3-300 K sıcaklık aralığında dalga boyuna bağlı EL şiddeti grafiği elde edildi. Şekil 4.35 (a)’da A0B0C1, (b)’de A0B1C1 ve (c)’de A1B0C1 için sıcaklığa bağlı ve (d)’de A1B1C1 kontak konfigürasyonları için 3 K sıcaklığında EL grafikleri verildi. A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonunda aygıt benzer ışıma davranışı gösterirken, A1B1C1 kontak konfigürasyonunda ışıma elde edilmedi.



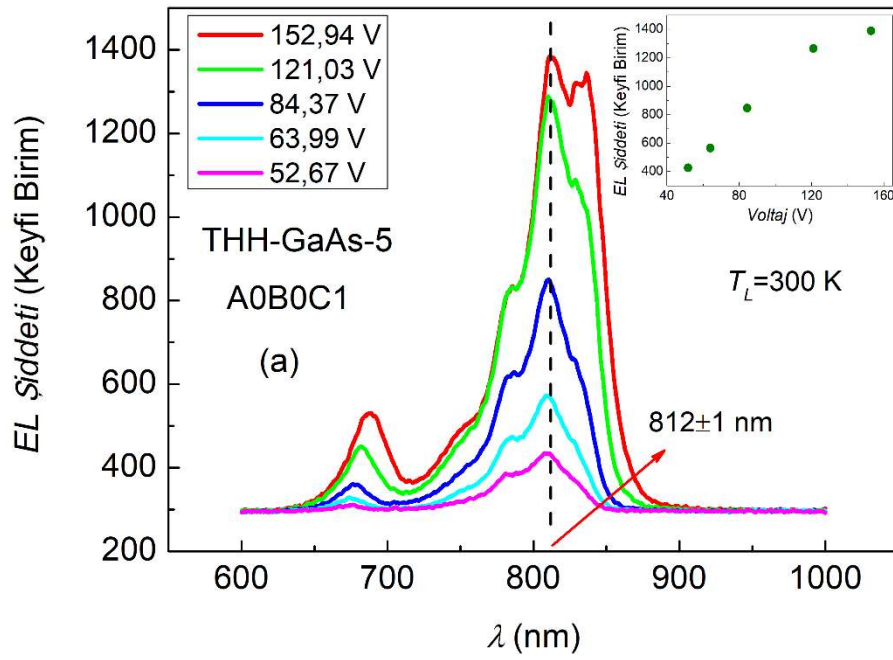
Şekil 4.35. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A0B0C1, (b) A0B1C1, (c) A1B0C1 için sıcaklığa bağlı ve (d) A1B1C1 kontak konfigürasyonu için 3 K sıcaklığında elektrolüminesans spektrumu



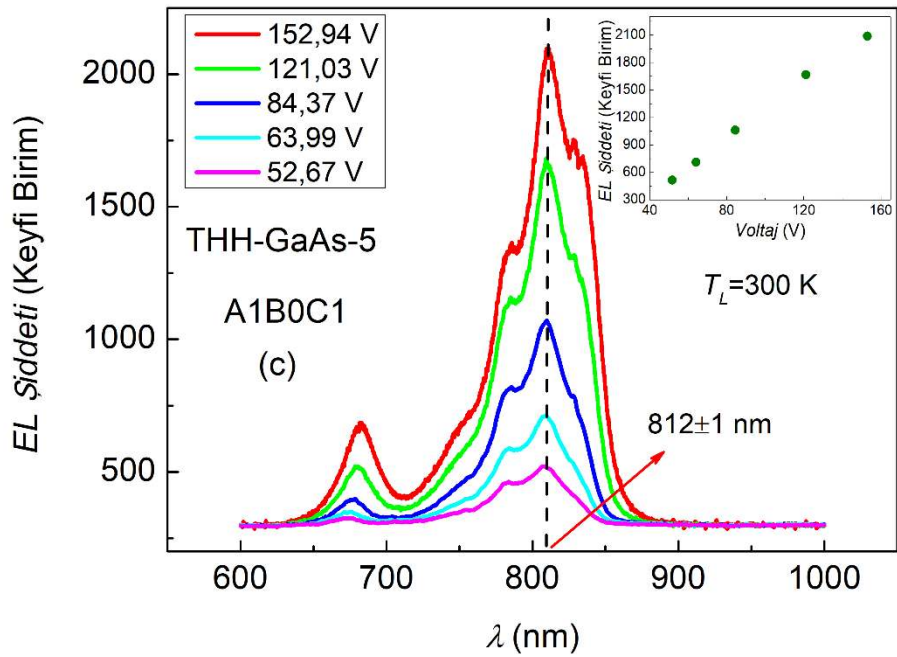
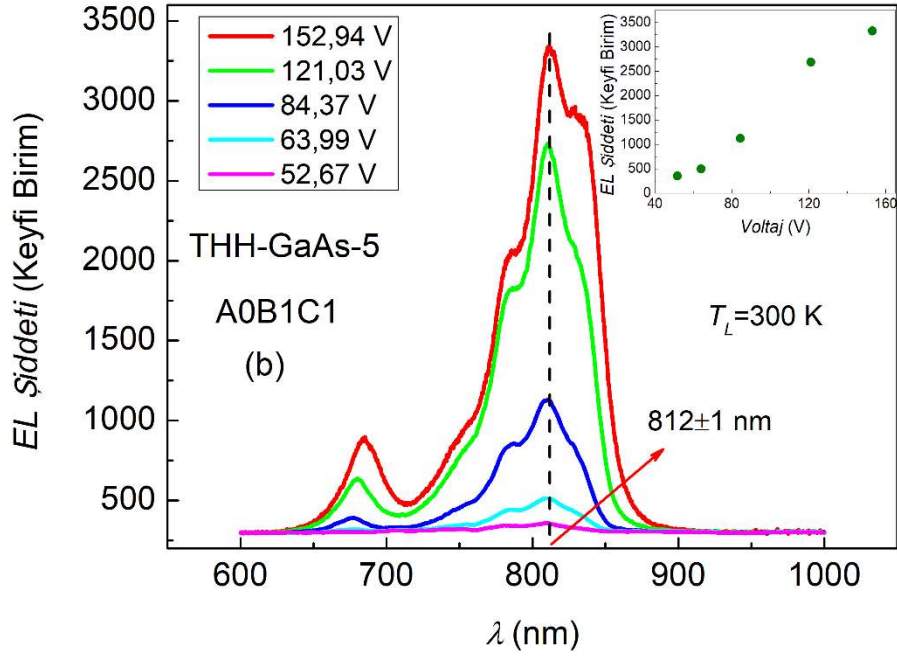
Şekil 4.35. (devamı)

THH-GaAs-5 kodlu aygıtın A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonları için 300 K sıcaklığında 20 kHz frekans ve 200 ns atma genişliğine sahip farklı atmalı gerilim değerlerinde 600-1000 nm dalga boyu aralığı için EL

spektrumu elde edildi. Şekil 4.36 (a) A0B0C1, (b) A0B1C1 ve (c) A1B0C1 kontak konfigürasyonu için elde edilen EL spektrumları verildi. Aygıt, her üç kontak konfigürasyonunda da merkez noktası 812 ± 1 nm dalga boyunda olan benzer ışıma davranışına sahiptir. Uygulanan gerilim değerlerinin artmasıyla aygıttan elde edilen EL şiddeti doğrusala yakın olarak artma eğilimindedir ve emisyon dalga boyunda kayma gözlenmedi.



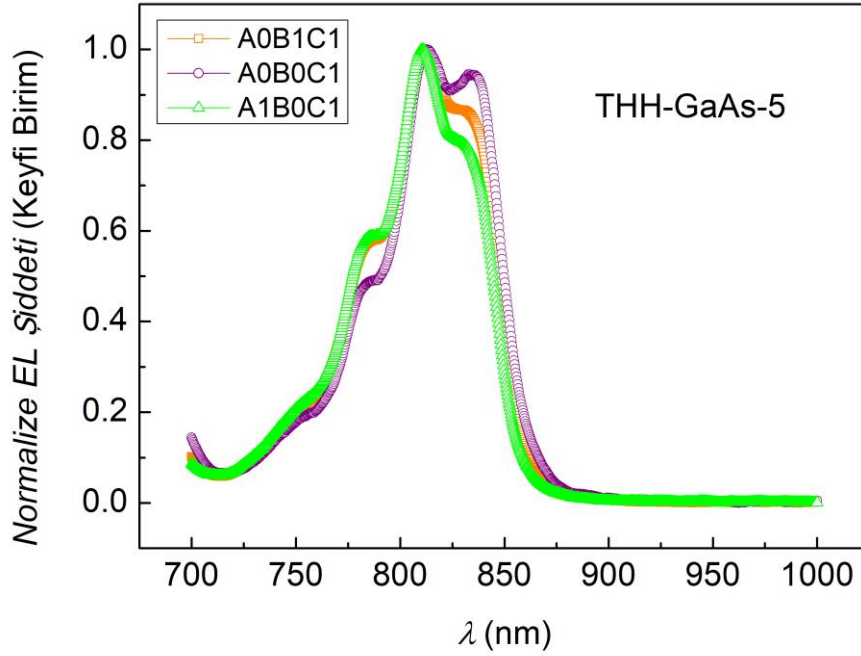
Şekil 4.36. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın (a) A0B0C1 (b) A0B1C1 ve (c) A1B0C1 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu



Şekil 4.36. (devamı)

Şekil 4.37’de THH-GaAs-5 aygıtı için A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonları için elde edilen EL spektrumlarını karşılaştırmak için 300 K sıcaklığında 20 kHz frekans, 200 ns atma genişliğine sahip 200 V atmalı gerilim

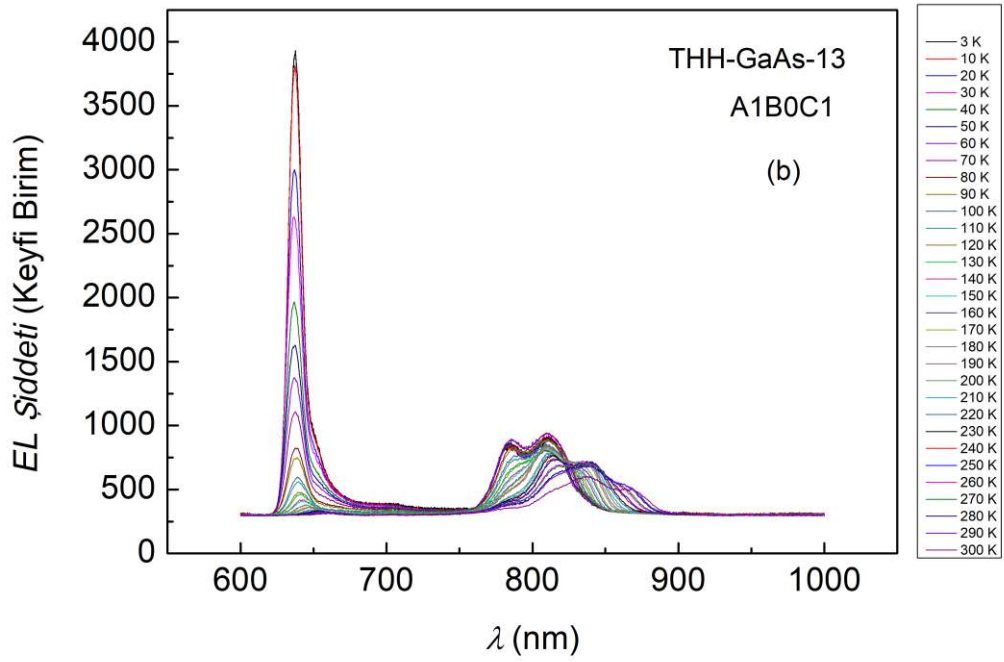
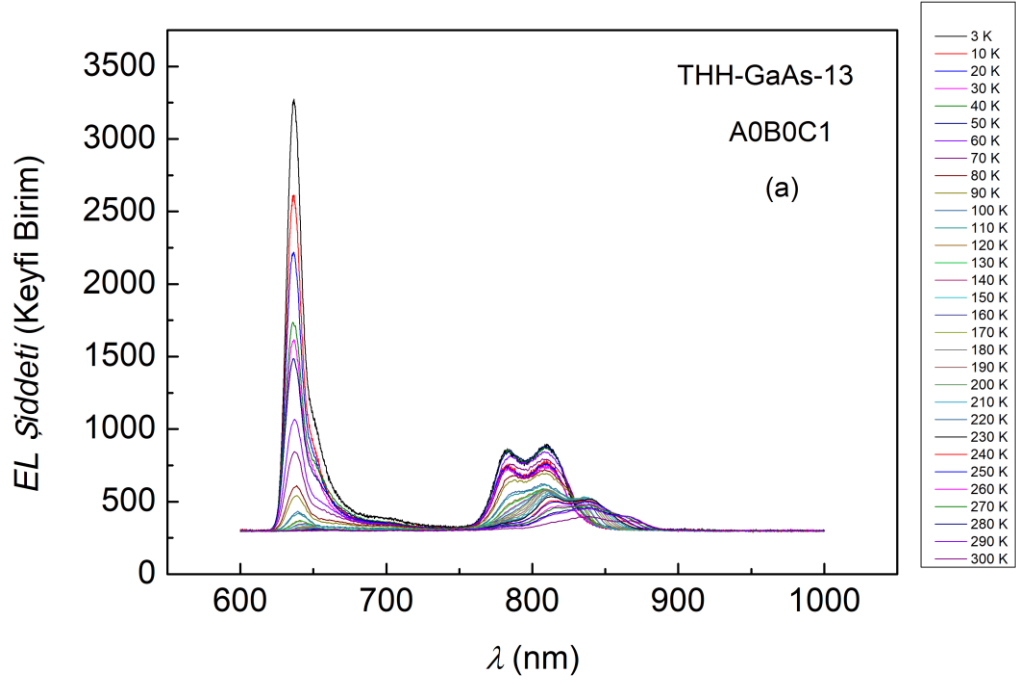
değerinde elde edilen EL spektrumları normalize edilip üst üste çizdirildiğinde EL emisyon piklerinin birbirleri ile uyumluluğu olduğu gözlemlendi. Her üç kontak konfigürasyonunda da örnek 812 ± 1 nm dalga boyunda benzer emisyon davranışı gösterdi. Aygıtın ortak kontağı olan C ucu her durumda “1” iken, A ucu “0” ve B ucu “1” durumu (“0” NAND “1”), A ucu “1” ve B ucu “0” durumu (“1” NAND “0”), ve hem A hem de B ucu “0” iken (“0” NAND “0”) THH-GaAs-5 aygıtı aynı dalga boyunda ışımaya yani mantık “1” çıktısına sahiptir. Bu durum, aygıtın bu kontak konfigürasyonunda NAND mantık kapısının ışık ile çalışması olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Tablo 2.2’de NAND mantık kapısının çalışma prensibi verildi.



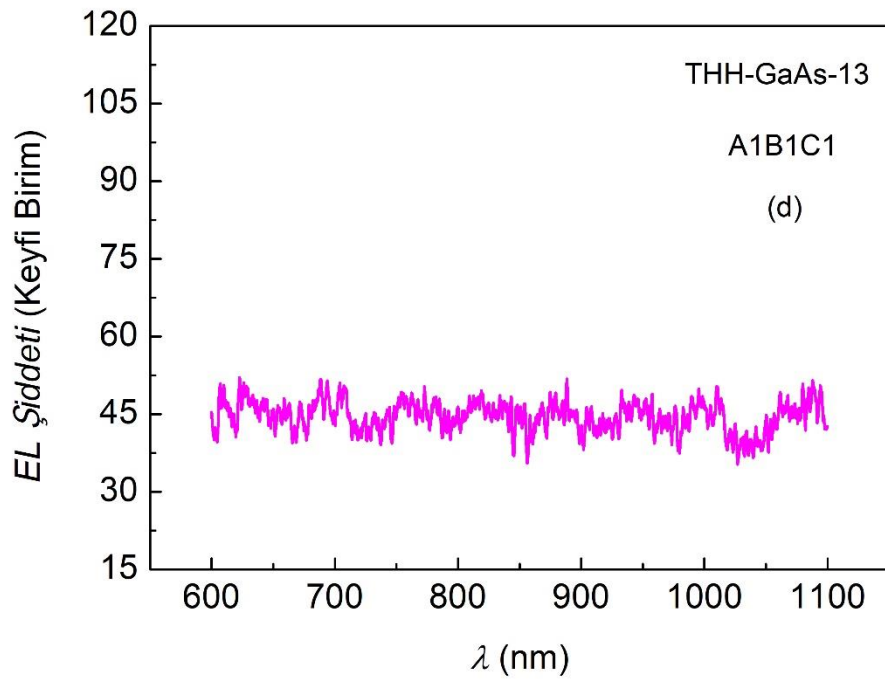
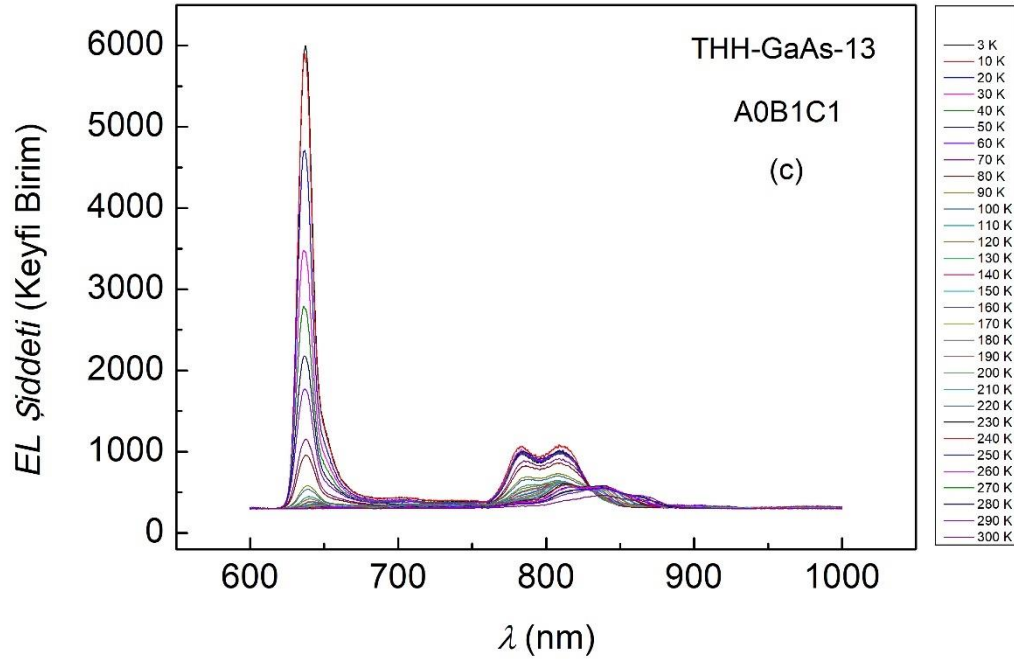
Şekil 4.37. THH-GaAs-5 kodlu aygıtın sabit atma voltajı altında A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonlarında elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu

4.4.5.2. THH-GaAs-13 aygıtı

THH-GaAs-13 kodlu aygıtın A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonlarında 20 kHz frekans ve 200 ns atma genişliğine sahip 75 V gerilim değeri uygulanarak 3-300 K sıcaklık aralığında dalga boyuna bağlı EL şiddeti grafiği elde edildi. Şekil 4.38 (a)’da A0B0C1, (b)’de A0B1C1 ve (c)’de A1B0C1 kontak konfigürasyonu için sıcaklığa bağlı ve (d)’de A1B1C1 kontak konfigürasyonları için 3 K sıcaklığında elde edilen 600-1000 nm dalga boyu aralığında EL grafikleri verildi.



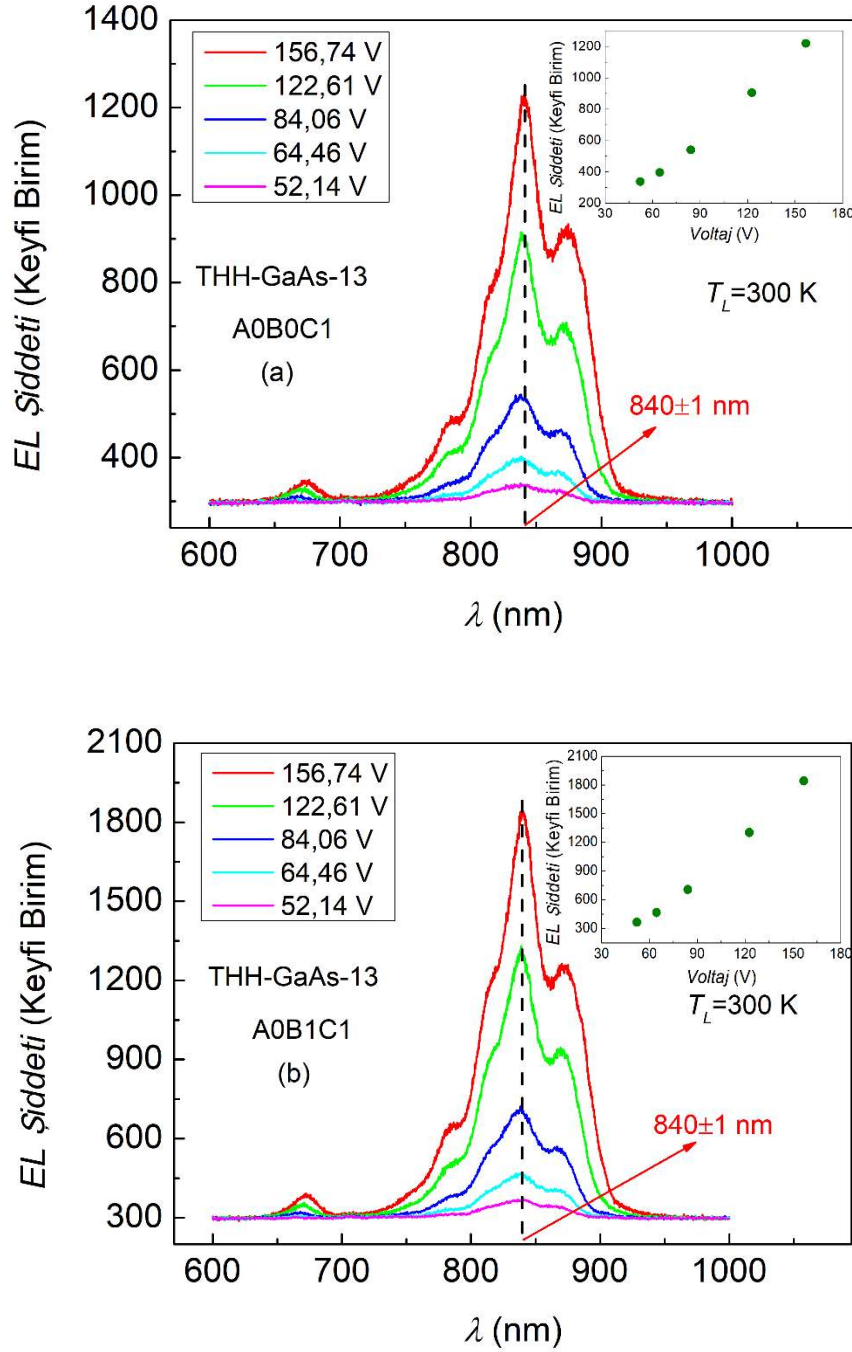
Şekil 4.38. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A0B0C1 (b) A0B1C1 (c) A1B0C1 ve (d) A1B1C1 kontak konfigürasyonunda elde edilen sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumu



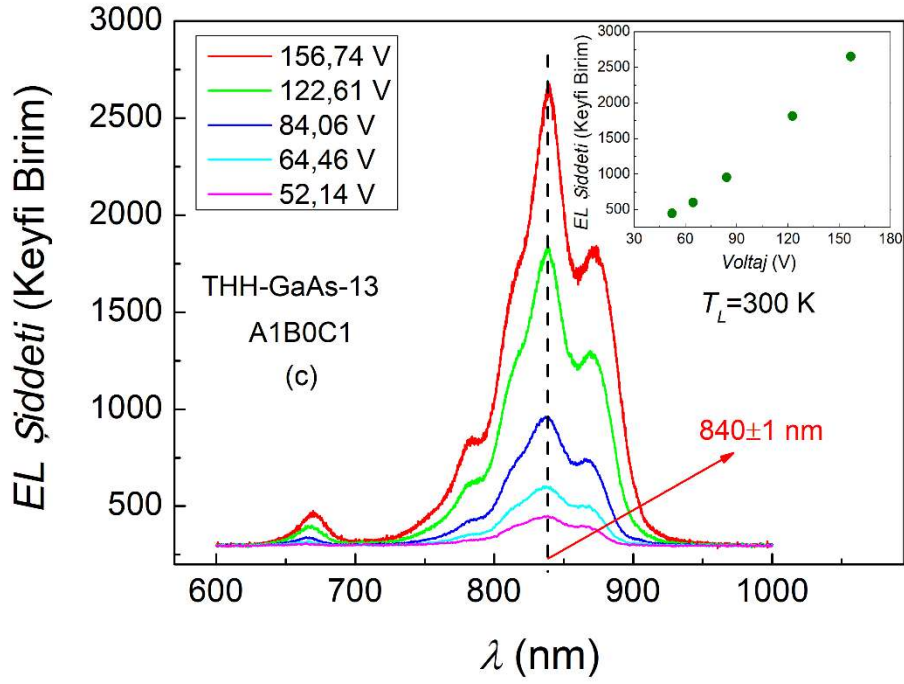
Şekil 4.38. (devamı)

THH-GaAs-13 kodlu aygıtın A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonları için 300 K sıcaklığında 20 kHz ve 200 ns atma genişliğine sahip farklı atmalı gerilim değerlerinde dalga boyuna bağlı EL spektrumu elde edildi. Şekil 4.39.

(a)'da A0B0C1 (b)'de A0B1C1 ve (c)'de A1B0C1 kontak konfigürasyonu için elde edilen EL spektrumları verildi. Her üç kontak konfigürasyonunda da aygıttan merkez noktası 840 ± 1 nm dalga boyunda olan emisyon davranışı elde edildi. Aygıtta uygulanan gerilim değerinin artmasıyla EL şiddeti doğrusal bir şekilde artarken dalga boyunda kayma gözlenmedi.

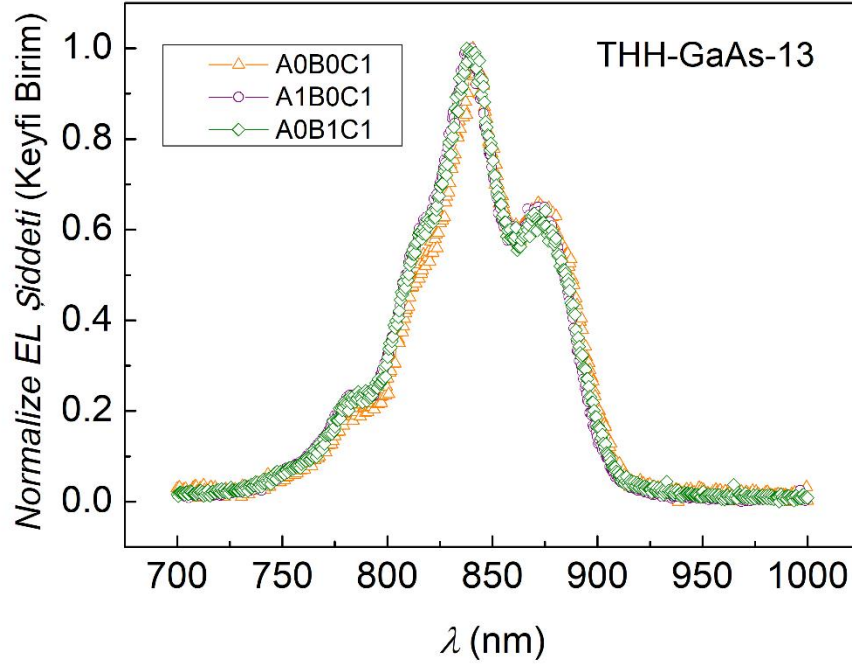


Şekil 4.39. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın (a) A0B0C1 (b) A0B1C1 ve (c) A1B0C1 kontak konfigürasyonunda elde edilen farklı voltaj değerleri için elektrolüminesans spektrumu



Şekil 4.39. (devamı)

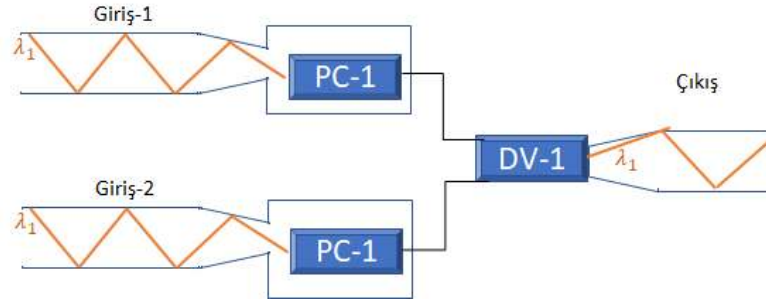
Şekil 4.40’da THH-GaAs-13 aygıtı için A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonları ile elde edilen EL spektrumlarını karşılaştırmak için, 300 K sıcaklığında 20 kHz, 200 ns atma genişliğine sahip olan 200 V atmalı gerilim değerinde elde edilen EL spektrumları normalize edilip üst üste çizdirildiğinde EL emisyon piklerinin birbirleri ile oldukça uyumlu ve örtüştüğü gözlemlendi. Her üç kontak konfigürasyonda da örnek aynı dalga boyunda benzer emisyon davranışına sahiptir. THH-GaAs-13 aygıtı da THH-GaAs-5 aygıtında olduğu gibi bu konfigürasyon şeklinde NAND mantık kapısının ışık ile çalışması olarak kullanılabilir.



Şekil 4.40. THH-GaAs-13 kodlu aygıtın sabit atma voltajı altında A0B0C1, A0B1C1 ve A1B0C1 kontak konfigürasyonlarında elde edilen normalize elektrolüminesans spektrumu

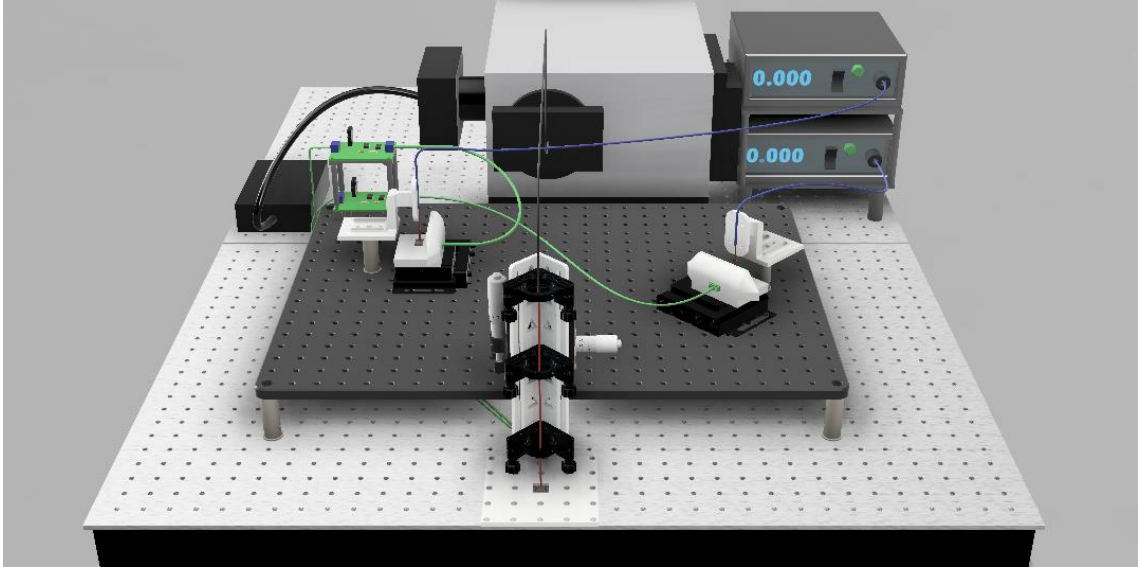
4.5. Girişi Işın Çıkışı Işın Olan Mantık Kapısının Elde Edilmesi

Tez kapsamında, THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtlar kullanılarak girişine uygulanan gerilim ile birlikte XOR, NOT, OR ve NAND mantık kapılarının çalışma prensibine uygun olarak ışına yaptığı üst başlıklarda gösterildi. THH ve halka kontak geometrisinde fabrikasyonu tamamlanan aygıtlar birlikte kullanılarak girişi ve çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının çalışma prensibi Şekil 4.41’de verildi. Burada, PC ile gösterilen fotoiletken olarak çalışan halka kontak fabrikasyonu yapılan aygıtı ve DV-1 ise THH geometrisinde fabrikasyonu yapılan optik mantık kapısı olarak çalışabilen THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtlarını temsil etmektedir. Fiber optik kablodan gelen λ_1 dalga boylu ışının algılanması için iki adet fotoiletken aygıt (PC) kullanıldı. PC aygıtın üzerine ışın düşmesi sonucu üretilen fotoakım transistor ve atma kaynağının eş zamanlı tetiklenmesini sağlayarak THH aygıt yapısının çalışmasında kullanıldı. Tasarlanan bu sistemde THH aygıtlarından elde edilecek olan ışık çıkışı, fiber optik kablodan PC aygıtların üzerine ışın düşürülmesi “1” (ışık var) ve ışık düşürülmemesi “0” (ışık yok) durumuna ve THH aygıtın hangi mantık fonksiyonuna göre çalıştığına bağlı olmaktadır.

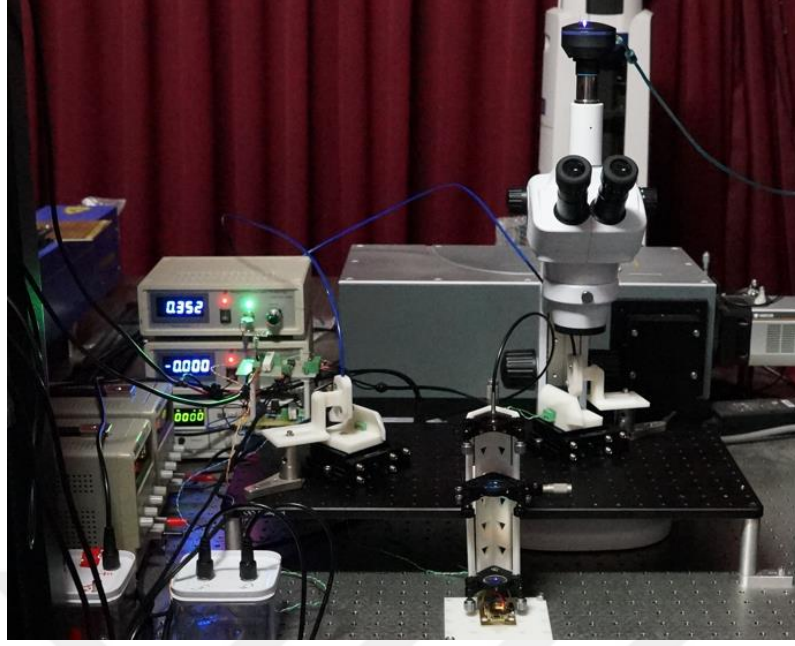


Şekil 4.41. Giriş ve çıkışı ışın olması tasarlanan mantık kapılarının çalışma prensibi

Fiber optik kablodan gelen ışının “1” ve “0” olması durumuna göre girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının elde edilmesi için kurulan deney düzeneğinin üç boyutlu tasarımı Şekil 4.42’de ve görünümü Görsel 4.1’de verildi. Deney düzeneği; iki adet lazer diyot, iki adet altı eksenli konumlandırıcı, bir adet üç eksenli konumlandırıcı, bir adet stereo mikroskop, bir adet optik çalışma masası, fiber optik kablolar ve fiber optik kablo tutucularından oluşmaktadır. Ayrıca elde edilen sinyallerin takip edilebilmesi için bir adet dört kanallı dijital osiloskop ve THH aygıtın tetiklenmesi için yüksek hızlı sinyal üretici kullanıldı.

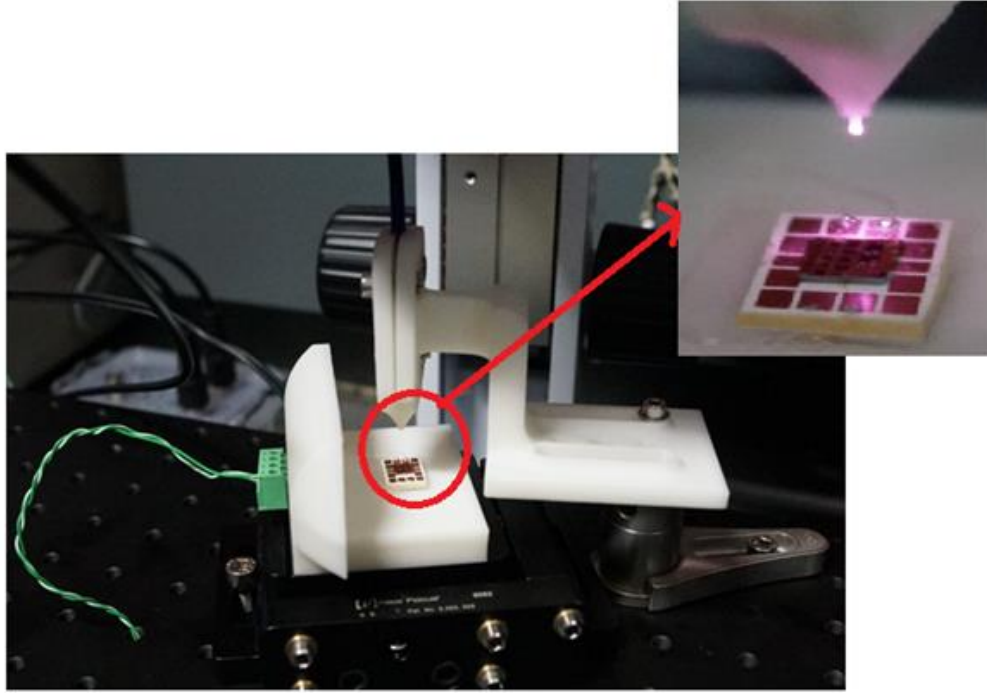


Şekil 4.42. Girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının elde edilmesi için kurulan deney üç boyutlu tasarımı



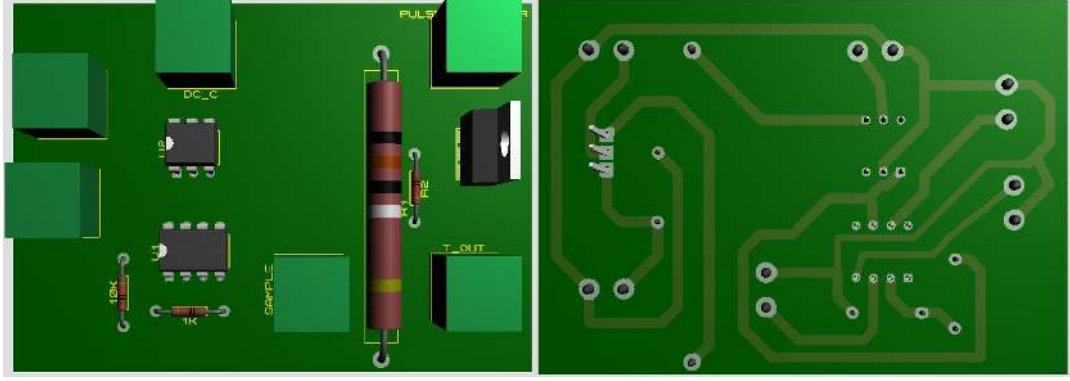
Görsel 4.1. *Giriş ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının elde edilmesi için kurulan deney düzeneği*

Işın kaynağı olarak, fiber optik kablo bağlantısı olan 850 nm dalga boyunda ışın çıkışı sağlayan iki adet lazer diyot kullanıldı. Fiber optik kablo ucunun sabit tutulması için tasarımları yapılarak üç boyutlu yazıcı ile iki adet fiber optik tutucu üretildi. Düşen ışının PC aygıtlar üzerine odaklama ayarlarının hassas bir şekilde yapılabilmesi için çok eksenli optik konumlandırıcılar üzerine aygıtlar yerleştirildi ve lazer diyottan çıkan ışın bilgisayar takipli mikroskop yardımı ile PC aygıtlar üzerine odaklandı. Görsel 4.2’de altı eksenli konumlandırıcı üzerine yerleştirilen PC aygıt ile fiber optik kablo tutucunun görseli verildi.



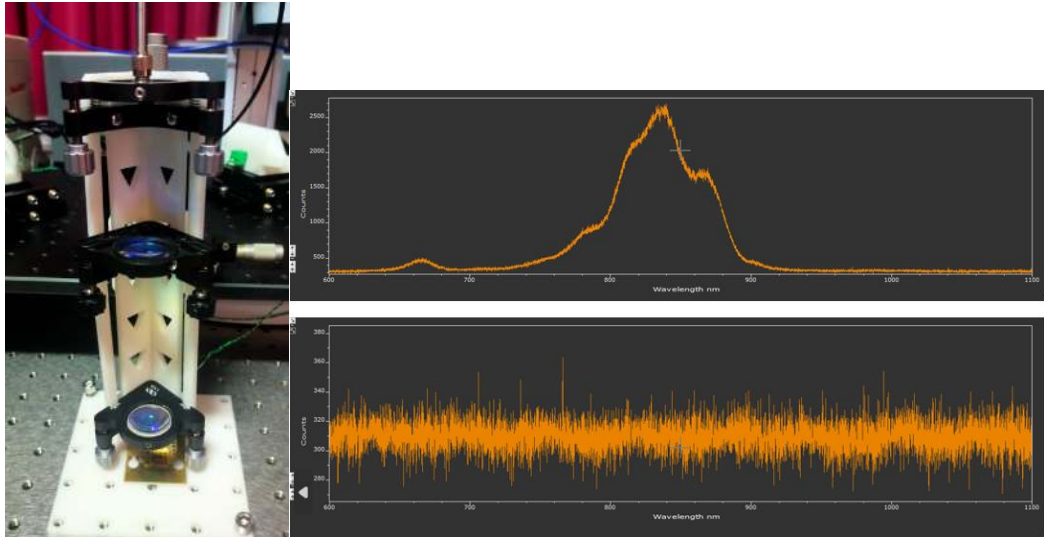
Görsel 4.2. Fiber optik uç tutucu ve altı eksenli konumlandırıcı üzerine yerleştirilen PC aygıtın görünümü

Fiber optik kablo ile PC aygıt üzerine lazer diyottan 850 nm dalga boyunda ışın düşürüldüğünde oda sıcaklığında aygıttan yaklaşık 250-300 μA değerinde fotoakımlar elde edildi. Fotoakım değerlerinin yükseltilmesi ve atma kaynağının tetiklenerek mantık kapısı olarak çalışan THH aygıtın giriş beslemesini sağlaması için gerekli elektronik kart tasarlanıp üretildi. Şekil 4.43’de tasarımı yapılan elektronik kartın görseli verildi. PC aygıttan gelen fotoakımlar işlemsel yükselteç (*Op-Amp*) ile yükseltilerek optokuplörün girişine bağlandı. Optokuplör sayesinde elektriksel ve optiksel sinyaller birbirinden yalıtıldı. Optokuplörün çıkışı yüksek güçlü transistörün *base* terminaline bağlanıp, *kollektör* terminaline atma kaynağı bağlandı. Böylece *emiter* ucundan elde edilen atma gerilimleri mantık kapısı olarak çalışan THH aygıtının girişlerine bağlandı. Lazer diyottan ışın çıkışı olduğunda (mantık durumu “1”), PC aygıt fotoakım üretir ve transistörün *base* terminalini açarak atma gerilimlerini geçirip mantık kapısı olarak çalışan THH aygıtına besleme gerilimini sağlar, bu durum “1” mantık durumuna karşılık gelmektedir. Lazer diyottan ışın çıkışı olmadığı durumda (mantık durumu “0”), PC aygıtın üzerine ışın düşmez ve aygıt bir fotoakım üretmez. Bu durumda transistörün *base* terminali iletime geçemez ve *kollektör* ucundan atma gerilimi geçmez. Böylece, mantık kapısı olarak çalışan THH aygıtına bir besleme gerilimi uygulanmamış olur. Bu durum “0” mantık durumuna karşılık gelmektedir.



Şekil 4.43. PC aygıttan üretilen fotoakım değerlerinin yükseltilmesi için tasarlanan elektronik kartın üç boyutlu görünümü

Girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının test edilmesi için XOR, NOT, OR ve NAND mantık kapılarının farklı mantık giriş durumları için (“00”, “01”, “10” ve “11”) her iki lazer diyot veya tek lazer diyottan ışın çıkışı sağlandı. Mantık kapısı olarak çalışan THH aygıt girişlerine uygulanan mantık durumlarına göre aygıttan ışın çıkışı elde edildi. Aygıttan çıkan ışınların odaklanıp fiber optik kablo ile yönlendirilip dedektör tarafından algılanması için ince kenarlı mercekler kullanıldı. Görsel 4.3. (a)’da mantık kapısı olarak çalışan aygıt ve aygıttan yayılan ışının toplanması için mercekler kullanılarak oluşturulan deney düzeneği ve (b)’de aygıttan ışın çıktığında (mantık durumu “1”) ve ışın çıkmadığı (mantık durumu “0”) durumda dedektör tarafından algılanıp elde edilen spektrum görüntüsü verildi.



Görsel 4.3. THH aygıttan yayılan ışının (a) toplandığı deney düzeneği ve (b) elde edilen spektrumun görünümü

Sonuç olarak, detayları anlatılan deney düzeneği kullanarak lazer diyot kaynaklardan çıkan ve fiber optik kablolar ile PC aygıt ve mantık kapısı olarak alışan THH aygıtların ardışıl olarak kullanılması ile aygıttan çıkan ışın fiber optik kablo ile yönlendirilerek ışın çıkışı dedekte edildi. Böylece girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının çalıştığı gösterildi.



5. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, aynı katman yapısına sahip olan ancak kuantum kuyu genişliği farklı olan GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ örnekler kullanılarak, sıcak elektron etkisi ile ışıma yapan THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtların tasarımı, fabrikasyonu, yapısal, elektriksel ve optiksel karakterizasyonları yapılarak XOR, NOT, OR ve NAND optik mantık kapıları olarak çalışma performansları incelendi.

Aygıtların, HR-XRD yöntemiyle yapısal karakterizasyonu gerçekleştirilerek tabaka kalınlıkları, alaşım konsantrasyonu ve kristal kalitesi belirlendi. HR-XRD sonuçlarına göre, aygıt tasarımında hedeflenen tabaka kalınlıkları ve AlGaAs katmanı için Al konsantrasyonu $\sim\%33$ değeri ile hedeflenen değer olan $\%31$ değerine yakın olarak bulundu. Elde edilen HR-XRD piklerinin FWHM değerleri, GaAs alttaş için 9 arcsec iken AlGaAs katmanı için 17 arcsec olarak bulunması ve kırınım saçaklarının gözlenmesi homojen, yüksek kristal kalitesine sahip yapılar olduğunu göstermektedir.

Sıcaklığa bağlı PL ölçümleri ile yapının bant profili incelendi. Oda sıcaklığında, GaAs-5 kodlu örneğin, PL spektrumunda GaAs kuyu piki incelendiğinde, 789 ve 812 nm dalga boylarında sırası ile hafif boşluk (e1-lh1) ve ağır boşluk (e1-hh1) geçişlerine karşılık gelen pikler elde edildi [119]. GaAs-13 kodlu örneğin fotoluminesans spektrumunda ise, GaAs kuyu piki incelendiğinde, 834 ve 862 nm dalga boylarında sırası ile hafif boşluk (e1-lh1) ve ağır boşluk (e1-hh1) geçişlerine karşılık gelen pikler elde edildi [119]. İki örnek içinde benzer PL davranışı elde edilmesine rağmen kuantum kuyu genişliğindeki farklılıktan dolayı aygıtların ışıma dalga boyları farklılık göstermektedir. THH geometrisinde fabrikasyonu tamamlanan THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtların *EL* ölçümleri gerçekleştirilerek optik mantık kapısı olarak çalışma prensibi incelendi. Aygıtların ilk önce *n*-tipi ve *p*-tipi kontak kalitesi akım-voltaj ölçümleriyle incelendi. *n*-tipi kontakların ohmik davranış sergilerken *p*-tipi kontaklarda ohmik davranıştan belirli bölgede sapma gözlemlendi. Bu durum *p*-tipi kontak bölgesindeki kontak kusurlarından meydana gelmektedir.

THH aygıtların yapısında bulunan iki klasik LED'in karakteristiği *EL* ölçümleriyle elde edildi. THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtlarının yapısında 1V2T ve 3T4V kontak konfigürasyonu için elde edilen EL spektrumları kendi içinde karşılaştırıldığında dalga boyu ve spektrum karakteristiği benzerdir. THH-GaAs-5 aygıtının 1V2T kontak konfigürasyonu için klasik LED 5,12 V ileri besleme geriliminde ışıma yapmaya başlarken, 3T4V kontak konfigürasyonu için ise 4,92 V ileri besleme geriliminde ışıma

başladığı gözlemlendi. THH-GaAs-5 aygıtının klasik LED olarak oda sıcaklığında, merkez noktası 808 ± 1 nm dalga boyunda olan ışıma spektrumuna sahiptir. THH-GaAs-13 kodlu aygıt ise, 1V2T kontak konfigürasyonu için klasik LED 4,56 V ileri besleme geriliminde ışıma yapmaya başlarken, 3T4V kontak konfigürasyonu için ise 5,06 V ileri besleme geriliminde ışıma yapmaya başladığı gözlemlendi. THH-GaAs-13 kodlu aygıt merkez noktası 832 ± 1 nm olan dalga boyunda ışıma yaptığı gözlemlendi.

THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtlarının emisyonu başlama elektrik alan değerleri polariteden bağımsız olarak elde edildi. THH-GaAs-5 aygıtı için, 12V34T kontak konfigürasyonunda 0,55 kV/cm (uygulanan gerilim 53,11 V) ve 12T34V kontak konfigürasyonu için 0,56 kV/cm (uygulanan gerilim 53,62 V) deneysel eşik elektrik alan değerleri elde edildi. Bu değerlerin teorik hesaplanan voltaj değerlerine ($43,02 \pm 1$ V ve $41,34 \pm 1$ V) yakın olduğu söylenebilir. THH-GaAs-13 aygıtı için, 12V34T kontak konfigürasyonunda 0,63 kV/cm (uygulanan gerilim 60,95 V) ve 12T34V kontak konfigürasyonu için 0,78 kV/cm (uygulanan gerilim 74,7 V) deneysel eşik elektrik alan değerleri elde edildi. THH-GaAs-13 aygıtının iki polarite için elde edilen emisyon davranışında ufak sapma gözlemlendi. Bunun nedeni kötü ohmik kontak varlığından kaynaklanabilir.

XOR, NOT, OR ve NAND optik mantık kapıları ölçümleri için THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtların her mantık kapısı için uygun olan elektriksel bağlantıları gerçekleştirilerek atmalı EL ölçümler gerçekleştirildi. Aygıtta atmalı gerilimin uygulanması “1” mantık durumuna, topraklanması ise “0” durumuna karşılık gelmektedir. Aygıttan ışıma elde edilmesi “1” mantık durumu, ışıma elde edilmemesi ise “0” mantık durumu olarak belirtildi.

XOR mantık kapısı ölçümlerinde aygıtın 12V34T ve 12T34V kontak konfigürasyonunda elde edilen spektrumları değerlendirildiğinde her iki kodlu aygıtta polariteden bağımsız kendi içinde aynı dalga boyunda benzer EL spektrumuna sahip olarak ışıma yapabilmektedir. Her iki uca aynı anda gerilim uygulandığında ise ışıma gözlemlenmedi. Bu durum tez kapsamında incelenen THH aygıtların XOR optik mantık kapısı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

OR ve NAND kapısı ölçümlerinde, THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu örnekler A, B ve C elektriksel kontaklarına sahiptir. OR mantık kapısı ölçümünde C ortak ucu toprak (“0” mantık durumu) ucudur. THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 aygıtları A1B0C0, A0B1C0 ve A1B1C0 kontak bağlantılarında atmalı EL ölçüm sonuçlarına göre, aygıtlar

sırasıyla 812 ± 1 nm ve 840 ± 1 nm dalga boyunda kendi içinde benzer ışıma davranışlarına sahiptir ve uygulanan atmalı gerilim değerinin artması ışıma dalga boyunu değiştirmedikten kararlı bir ışıma yaptığı söylenebilir. NAND optik mantık kapısı ölçümlerinde ise C ortak ucu atmalı gerilimin uygulandığı (“1” mantık durumu) uçtur. THH-GaAs-5 ve THH-GaAs-13 kodlu aygıtları A0B0C1, A1B0C1 ve A0B1C1 kontak bağlantılarında kendi içinde benzer ışıma davranışı verirken, A1B1C1 durumunda ışıma vermemektedir. Bu durum THH aygıtların NAND optik mantık kapısı prensibine göre çalıştığını göstermektedir.

THH-GaAs-5 ve THH-GaAs -13 aygıtları, yerel optik iletişim ağlarında kullanılan dalga boylarında yüzey ışıması yapan aygıtlardır. THH aygıtları, fiber optik kabloya kayıpsız ve kolay bir şekilde bağlantısı yapılarak optik bilginin iletişimi ve işlenmesinde kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, tez kapsamında girişi ışın çıkışı ışın olan optik mantık kapılarının test edilmesi için fotoiletken olarak iki adet halka kontaklı aygıt ile THH aygıtı içeren deney düzeneği kullanıldı. Fiber optik kablodan gelen ışının “1” ve “0” olması durumuna bağlı olarak, XOR, OR ve NAND mantık kapısı çalışma prensibine göre THH aygıttan ışıma elde edildi.

Tez kapsamında elde edilen bilgiler ışığında, THH aygıtlarının oda sıcaklığında optik mantık kapısı olarak işlev görme özellikleri bu aygıtların fotonik kristallere alternatif bir aygıt yapısı olduğunu göstermektedir. THH aygıtların çok daha iyi performanslarda çalışabilmesi için bazı açılardan geliştirilebilir. Bunlardan biri, aygıtın boyutsuz THH parametresi göz önünden bulundurularak eşik gerilim değerini daha da düşürmek için daha küçük boyutlarda aygıt üretilebilir. n-tipi ve p-tipi kontak fabrikasyonu daha da iyileştirilerek kontak dirençleri düşürülebilir. Farklı yarıiletken malzemeler kullanılarak farklı dalga boyunda ışıma elde edilebilir. Işıma şiddetinin arttırmak için tek kuantum kuyu yerine çoklu kuantum kuyulu ve farklı kuantum kuyu genişliğine sahip THH yapılar büyütülebilir. Ayrıca, bu THH aygıt yapılarının üst ve altına AlAs ve GaAlAs tabakalarından oluşan DBR tabakaları büyütülerek, aygıttan çıkan ışının daha dar bir aralıkta ve daha güçlü bir şekilde olması sağlanabilir. Ayrıca, fotoiletken aygıttan elde edilen fotoakım değerlerinin artırılması için tekli kuantum kuyu yerine çoklu kuantum kuyulu yapılar üretilebilir. Girişi ışın çıkışı ışın olan aygıtların aynı *mesa* üzerinde yer alacak şekilde tasarım geliştirilerek daha kompakt ve küçük bir aygıt elde edilmesi de olasıdır.

KAYNAKÇA

- [1] Biswas U., Nayak C. and Rakshit J.K., (2022). Fabrication techniques and applications of two-dimensional photonic crystal: history and the present status, *Opt. Eng.* 62.
- [2] Balkan, N., Teke, A., Gupta, R., Straw, A., Wolter, J.H. and Vleuten, W. van der, (1995). Tunable wavelength hot electron light emitter, *Appl. Phys. Lett.* 67, 935–937.
- [3] Straw, A., Balkan, N., O'Brien, A., Cunha, A. da, Gupta, R. and Arikan M.Ç., (1995). Hot electron light-emitting and lasing semiconductor heterostructures--type 1, *Superlattices Microstruct.* 18, 33–43.
- [4] Mutlu, S., Erol, A., Arslan E., Ozbay, E., Lisesivdin, S.B. and Tiras, E. (2021). A novel hot carrier-induced blue light-emitting device, *J. Alloys Compd.* 881 160511.
- [5] Wah, J.Y., Yenidunya, R., Dyson, A., Boland-Thoms, A., Balkan, N. and Adams, M.J. (2001) Light emission and absorption processes in a bidirectional wavelength converter/emitter, in: Arakawa, Y., Blood, P. and Osinski, M. (Eds.), San Jose, CA, p. 733.
- [6] 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, *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures.* 17, 610–612.
- [7] Liang, D., Kang, Y., Huo, Y., Chen, Y., Cui, Y., and Harris J.S., (2013). High-Efficiency Nanostructured Window GaAs Solar Cells, *Nano Lett.* 13, 4850–4856.
- [8] Saxena, D., Mokkapati, S., Parkinson, P., Jiang, N., Gao, Q., Tan, H.H. and Jagadish, C. (2013). Optically pumped room-temperature GaAs nanowire lasers, *Nat. Photonics.* 7, 963–968.
- [9] Pucel, R.A., Haus, H.A. and Statz, H., (1975): Signal and Noise Properties of Gallium Arsenide Microwave Field-Effect Transistors, in: Adv. Electron. Electron Phys., Elsevier, pp. 195–265.
- [10] Ewen, J.F., Jackson, K.P., Bates, R.J.S. and Flint, E.B. (1991). GaAs fiber-optic modules for optical data processing networks, *J. Light. Technol.* 9, 1755–1763.
- [11] Liu, A., Wolf, P., Lott, J.A. and Bimberg, D. (2019). Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing, *Photonics Res.* 7, 121.
- [12] Goldschmidt, V.M. (1929). Crystal structure and chemical constitution, *Trans. Faraday Soc.* 25, 253.
- [13] Van Tuyl, R.L., (2010). The Early Days of GaAs ICs, in: *2010 IEEE Compd. Semicond. Integr. Circuit Symp. CSICS, IEEE*, Monterey, CA, USA, pp. 1–4.
- [14] Baca A. and Ashby, C. (2005). Fabrication of GaAs Devices, *Institution of Engineering and Technology*.
- [15] Dixon, R.W. (1980). Current Directions in GaAs Laser Device Development, *Bell Syst. Tech. J.* 59, 669–722.

- [16] Williams, R.E. (1990). Modern GaAs processing methods, Artech House, Boston.
- [17] Du, Y.A., Sakong, S. and Kratzer, P. (2013). As vacancies, Ga antisites, and Au impurities in zinc blende and wurtzite GaAs nanowire segments from first principles, *Phys. Rev. B.* 87, 075308.
- [18] Nayak, J., Sahu, S.N. and Nozaki, S. (2006). GaAs nanocrystals: Structure and vibrational properties, *Appl. Surf. Sci.* 252, 2867–2874.
- [19] Buschow, K.H.J. (2001). ed., Encyclopedia of materials: science and technology, Elsevier, Amsterdam; New York.
- [20] E. Grilli, Guzzi, M., Zamboni, R. and Pavesi, L. (1992). High-precision determination of the temperature dependence of the fundamental energy gap in gallium arsenide, *Phys. Rev. B.* 45, 1638–1644.
- [21] Adachi, S. (1994). GaAs and Related Materials: Bulk Semiconducting and Superlattice Properties, *WORLD SCIENTIFIC*.
- [22] Brozel, M. (1993). Properties of aluminum gallium arsenide, *III-Vs Rev.* 6, 52.
- [23] Sze, S.M. (1985). Semiconductor devices, physics and technology, Wiley, New York.
- [24] Taur, Y. (1999). The incredible shrinking transistor, *IEEE Spectr.* 36, 25–29.
- [25] Märtin, C. (2014). Multicore Processors: Challenges, Opportunities, Emerging Trends.
- [26] Saligram, R., Prasad, D., Pietromonaco, D., Raychowdhury, A. and Cline, B. (2021). A 64-Bit Arm CPU at Cryogenic temperatures: Design Technology Co-Optimization for Power and Performance, in: *IEEE Cust. Integr. Circuits Conf. CICC, IEEE*, Austin, TX, USA, 2021: pp. 1–2.
- [27] Shukla, S.K., Murthy, C. and Chande, P.K. (2015). A Survey of Approaches used in Parallel Architectures and Multi-core Processors, For Performance Improvement, in: Selvaraj, H., Zydek, D. and Chmaj G. (Eds.), (2015). *Prog. Syst. Eng.*, Springer International Publishing, Cham, pp. 537–545.
- [28] Jiao, S. Liu, J., Zhang, L., Yu, F. Zuo, G., Zhang, J., Zhao, F., Lin, W. and Shao, L. (2022). All-optical logic gate computing for high-speed parallel information processing, *Opto-Electron. Sci.* 1, 220010–220010.
- [29] Saharia, A., Mudgal, N., Agarwal, Sahu, A. S., Jain, S., Ghunawat, A.K. and G. Singh, (2020). A Comparative Study of Various All-Optical Logic Gates, in: Janyani, V., Singh. G., Tiwari, M. and d'Alessandro A. (Eds.), *Opt. Wirel. Technol.*, Springer Singapore, Singapore, pp. 429–437.
- [30] Anagha, E.G. and Jeyachitra, R.K. (2022). Review on all-optical logic gates: design techniques and classifications – heading toward high-speed optical integrated circuits, *Opt. Eng.* 61, 060902.
- [31] Ma, S., Chen, Z., Sun, H. and Dutta, N.K. (2010). High speed all optical logic gates based on quantum dot semiconductor optical amplifiers, *Opt. Express.* 18 6417.

- [32] Hun, J., Il, Y., Tae, Y., Min, Y., Ho, S. and Ha, D. All-Optical Logic Gates Using Semiconductor Optical-Amplifier-Based Devices and Their Applications, (2004).
- [33] Singh, P. Tripathi, D.Kr., Jaiswal, S. And Dixit, H.K. (2014). All-Optical Logic Gates: Designs, Classification, and Comparison, *Adv. Opt. Technol.* 1–13275083.
- [34] Tanida, J. and Ichioka, Y. (1985). Optical-logic-array processor using shadowgrams II Optical parallel digital image processing, *J. Opt. Soc. Am. A.* 2, 1237.
- [35] Tanida, J. and Ichioka, Y. (1983) Optical logic array processor using shadowgrams, *J. Opt. Soc. Am.* 73, 800.
- [36] Yatagai, T. (1986). Optical space-variant logic-gate array based on spatial encoding technique, *Opt. Lett.* 11, 260.
- [37] Qiu, J., Sun, K., Rochette, M. and Chen, L.R. (2010). Reconfigurable All-Optical Multilogic Gate (xor, and, and or) Based on Cross-Phase Modulation in a Highly Nonlinear Fiber, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 22, 1199–1201.
- [38] Sahafi, M., Rostami, A. and Sahafi, A. (2012). All-optical high speed logic gates using SOA, *Opt. Commun.* 285, 2289–2292.
- [39] Lattes, A., Haus, H., Leonberger, F. and Ippen, E. (1983). An ultrafast all-optical gate, *IEEE J. Quantum Electron.* 19, 1718–1723.
- [40] Jenkins, B.K., Sawchuk, A.A., Strand, T.C., Forchheimer, R. and Soffer, B.H. (1984) Sequential optical logic implementation, *Appl. Opt.* 23, 3455.
- [41] Jot Singh, J., Dhawan, D. and Gupta, N. (2020). All-optical photonic crystal logic gates for optical computing: an extensive review, *Opt. Eng.* 59, 110901.
- [42] Alipour-Banaei, H., Serajmohammadi, S. and Mehdizadeh, F. (2014) All optical NOR and NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonators, *Optik.* 125, 5701–5704.
- [43] Armstrong, E. and O'Dwyer, C. (2015). Artificial opal photonic crystals and inverse opal structures – fundamentals and applications from optics to energy storage, *J. Mater. Chem. C.* 3, 6109–6143.
- [44] Ghiradella, H. (1991) Light and color on the wing: structural colors in butterflies and moths, *Appl. Opt.* 30, 3492.
- [45] Vukusic, P. and Sambles, J.R. (2003). Photonic structures in biology, *Nature* 424,852-855.
- [46] Lv, X., Zhong, B., Huang, Y., Xing, Z., Wang, H., Guo, W., Chang, X. and Zhang, Z. (2023). Research Progress in Preparation and Application of Photonic Crystals, *Chin. J. Mech. Eng.* 36, 39.
- [47] John, S. (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486–2489.
- [48] Yablonovitch, E. (1987). Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059–2062.

- [49] Ghadrddan, M. and Mansouri-Birjandi, M.A. (2013). All-Optical NOT Logic Gate Based on Photonic Crystals, *Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE*. 3, 478–482.
- [50] Salmanpour, A., Mohammadnejad, S. and Bahrami, A. (2015). Photonic crystal logic gates: an overview, *Opt. Quantum Electron.* 47, 2249–2275.
- [51] Fu, Y. Hu, X. and Gong, Q. (2013). Silicon photonic crystal all-optical logic gates, *Phys. Lett. A*. 377, 329–333.
- [52] Liu, Y., Qin, F., Meng, Z.-M., Zhou, F., Mao, Q.-H. and Li, Z.-Y. (2011). All-optical logic gates based on two-dimensional low-refractive-index nonlinear photonic crystal slabs, *Opt. Express*. 19, 1945.
- [53] Gamare, K. and Jain, R.B. (2019). Performance analysis of 2D photonic crystal with line defect, in: Coimbatore, India, p. 020011.
- [54] Ge, D.H., Zhang, J.H. Zhang, L.Q., Lu, L. and Huang, X.K. (2017). Effect of Point and Linear Defects on Band-gap Properties in Triangular-Honeycomb Structure Photonic Crystals, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 170, 012005.
- [55] Rani, P., Fatima, S., Kalra, Y. and Sinha, R.K. (2017). Realization of all optical logic gates using universal NAND gates on photonic crystal platform, *Superlattices Microstruct.* 109, 619–625.
- [56] Younis, R.M., Areed, N.F.F. and Obayya, S.S.A. (2014). Fully Integrated AND and OR Optical Logic Gates, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 26, 1900–1903.
- [57] Schubert, E.F. (2003) Light-emitting diodes, Cambridge University Press, Cambridge, Uk; New York.
- [58] Nakamura, S. (2015). Background story of the invention of efficient blue InGaN light emitting diodes (*Nobel Lecture*), *Ann. Phys.* 527, 335–349.
- [59] Singh, S.C. (2009). “Basics Of Light Emitting Diodes, Characterizations And Applications.” Handbook of light emitting and Schottky diode research.
- [60] Li, J., Wang, J., Yi, X., Liu, Z. Wei, T., Yan, J. and Xue, B. (2020). III-Nitrides Light Emitting Diodes: Technology and Applications, Springer Singapore, Singapore.
- [61] Held, G. (2009). Introduction to light emitting diode technology and applications, CRC press, Boca Raton.
- [62] Neamen, D.A. (2012). Semiconductor physics and devices: basic principles, 4th ed, McGraw-Hill, New York, NY.
- [63] Kasap, S.O. and Sinha, R.K. (2013). Optoelectronics and photonics: principles and practices, 2. ed, international ed, Pearson, Boston Munich.
- [64] Erol, A. and Balkan, N. (2015). Yariletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları, 2. bs, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [65] Ridley, B.K. (1991). Hot electrons in low-dimensional structures, *Rep. Prog. Phys.* 54, 169–256.

- [66] Reggiani, L. (2005). Hot-Electron Transport in Semiconductors, Springer-Verlag Springer e-books, Berlin, Heidelberg.
- [67] Teke, A., Gupta, R., Balkan, N., Vleuten, W.V.D. and Wolter, J.H. (1997). A tunable hot-electron light emitter, *Semicond. Sci. Technol.* 12, 314–320.
- [68] Gupta, R., Balkan, N., Teke, A., Straw, A. and Da Cunha, A. (1995). Hot electron light-emitting semiconductor heterostructure device--type 2, *Superlattices Microstruct.* 18, 45–51.
- [69] O'Brien, A. N. Balkan, and Roberts, J. (1997). Ultra bright surface emission from a distributed Bragg reflector hot electron light emitter, *Appl. Phys. Lett.* 70, 366–368.
- [70] O'brien, A., Balkan, N., Boland-Thoms, A., Adams, M., Bek, A., Serpengüzel, A., Aydinli, A. and, Roberts, J. (1999) Super-radiant surface emission from a quasi-cavity hot electron light emitter, *Opt. Quantum Electron.* 31, 183–190.
- [71] Balkan, N. (1999). Non-linear carrier dynamics in hot electron vertical cavity surface emitting laser, *Phys. B Condens. Matter.* 272, 480–483.
- [72] Balkan, N., Serpengüzel, A. O'Brien-Davies. A., Sökmen, I., C. Hepburn, R. Potter, Adams, M.J. and Roberts, J.S. (2000). VCSEL structure hot electron light emitter, *Mater. Sci. Eng. B.* 74, 96–100.
- [73] Balkan, N., O'Brien-Davies, A., Thoms, A.B., Potter, R.J., Poolton, N., Adams, M.J., Masum. J., Bek, A., Serpenguzel, A., Aydinli, A. and Roberts, J.S. (1998). Operation of a novel hot-electron vertical-cavity surface-emitting laser, in: Osinski, M., Blood, P. and Ishibashi, A. (Eds.), San Jose, CA, p. 162.
- [74] Chaqmaqchee, F.A. (2020). Long-wavelength GaInNAs/GaAs Vertical-cavity Surface-emitting Laser for Communication Applications, *ARO- Sci. J. KOYA Univ.* 8, 107–111.
- [75] Chaqmaqchee, F.A.I., Mazzucato, S., Oduncuoglu, M., Balkan, N., Sun, Y., Gunes, M., Hugues, M. and Hopkinson, M. (2011). GaInNAs-based Hellish-vertical cavity semiconductor optical amplifier for 1.3 μm operation, *Nanoscale Res. Lett.* 6, 104.
- [76] Wah, J.Y, (2003). Top Hat Hellish Hot Electron Light Emitting and Lasing in Heterostructures, Essex University.
- [77] Wah, J.Y., Yenidunya, R., Dyson, A., Boland-Thoms, A., Balkan, N. and Adams, M.J. (2001). Light emission and absorption processes in a bidirectional wavelength converter/emitter, in: Arakawa, Y., Blood, P. and Osinski, M. (Eds.), San Jose, CA, p. 733.
- [78] 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 Microstruct.* 33, 235–245.
- [79] Mutlu, S. (2020). Geniş Yasak Enerji Aralıklı Sıcak Elektron Lazer ve Işın Yayıncı Yariletken Hetero-Yapılar, Doktora Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi.

- [80] Gupta, R. Balkan, N., Teke, A., Straw, A. and da Cunha, A. (1995). Hot electron light-emitting semiconductor heterostructure device-type 2, *Superlattices Microstruct.* 18, 45–51.
- [81] Balkan, N., da Cunha, A., O'Brien, A., Teke, A. Gupta, R., Straw, A. and Arikan, M.Ç. (1996). Hot Electron Light Emitting Semiconductor Heterojunction Devices (Hellish) — Type — 1 and Type — 2, in: Hess, K., Leburton, J.-P. and Ravaoli U. (Eds.), *Hot Carr. Semicond.*, Springer US, Boston, MA, pp. 603–607.
- [82] Balkan, N., Teke, A. and Gupta, R. (1999). Tunable wavelength light emission from longitudinally biased p-GaAs/n-Ga_{1-x}Al_xAs junction containing GaAs quantum wells: non-linear dynamics, *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures.* 4, 300–315.
- [83] Abubaker, S.A. (2021). A Comparison of Top Distributed Bragg Reflector for 1300 nm Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers Based on III–V Compound, *ARO- Sci. J. KOYA Univ.* 9, 26–29.
- [84] Roberts, J., Serpengüzel, A., Arikan, M.Ç., Balkan, N. and Erol, A. (2003). Temperature dependence of the threshold electric field in a hot electron VCSEL, *IEE Proc. - Optoelectron.* 150, 535–540.
- [85] Chaqmaqchee, F.A.I. and Balkan, N. (2012). Gain studies of 1.3- μ m dilute nitride HELLISH-VCSEA for optical communications, *Nanoscale Res. Lett.* 7, 526.
- [86] Passaro, V.M.N., Magno, F. and De Leonardis, F. (2005). Optimization of Bragg reflectors in AlGaAs/GaAs VCSELs, *Laser Phys. Lett.* 2, 239–246.
- [87] Chang, K. Y. (1999). Oxide confined GaAs/AlGaAs vertical cavity surface emitting lasers, PhD thesis, University of Sheffield.
- [88] Erol, A. (2002). Yüzey Işıması Yapan Düşük Boyutlu Yapılarda Bragg Yansıma Olaylarının İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [89] Wah, J.Y. and Balkan, N. (2004). Low field operation of hot electron light emitting devices: quasi-flat-band model, *IEE Proc. - Optoelectron.* 151, 482–485.
- [90] 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 μ m operation, *Nanoscale Res. Lett.* 7, 525.
- [91] Demirer, R.M., Balkan, N., Yenidünya, R., Boland-Thoms, A. and Wah, J.-Y. (2002). Discussions on suitable modulation schemes for a bi-directional hot electron light emitter and absorber, *IEE Proc. - Optoelectron.* 149, 197–200.
- [92] Lee, J.J.D., West, K.W. Baldwin, K.W. and Pfeiffer, L.N. (2012). Smoothness and cleanliness of the GaAs (100) surface after thermal desorption of the native oxide for the synthesis of high mobility structures using molecular beam epitaxy, *J. Cryst. Growth.* 356, 46–52.
- [93] Bastiman, F., Lin, J.C. Cullis, A.G., Hogg, R. and Skolnick, M. (2010). Ga assisted oxide desorption on GaAs (001) studied by scanning tunnelling microscopy, *J. Cryst. Growth.* 312, 1687–1692.

- [94] Allwood, D.A., Carline, R.T., Mason, N.J., Pickering, C., Tanner, B.K. and Walker, P.J. (2000). Characterization of oxide layers on GaAs substrates, *Thin Solid Films*. 1-2, 33-39.
- [95] Mochizuki, T., Tokumitsu, Y., Fujii, K. and Cavallotti, C. (2005). Influence of in situ HCl gas cleaning on n/p-type GaAs and AlGaAs regrown interfaces in MOCVD, *J. Cryst. Growth*. 273, 464–473.
- [96] Franssila, S. (2010). Introduction to microfabrication, 2nd ed, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex [England].
- [97] Howes M. J. and Morgan D. V. (1985). Gallium Arsenide: Materials, Devices and Circuits, 1st ed, John Wiley&Sons, Chichester, West Sussex [England].
- [98] Lin, H.-C., Senanayake, S., Cheng, Keh-Yung., Hong, M., Kwo, J.R., Yang, B. and Mannaerts, J.P. (2003) Optimization of AuGe-Ni-Au ohmic contacts for GaAs MOSFETs, *IEEE Trans. Electron Devices*. 50, 880–885.
- [99] Lee, H.J., Tse, M.S., Radhakrishnan, K., Prasad, K., Weng, J., Yoon, S.F., Zhou, X. and Tan, H.S. (1995). Characterization of Ni/Ge/Au/Ni/Au contact metallization on AlGaAs/InGaAs heterostructures for pseudomorphic heterojunction field effect transistor application, *Mater. Sci. Eng. B*. 35, 234-238.
- [100] Koop, E.J., Iqbal, M.J., Limbach, F., Boute, M., van Wees, B.J., Reuter, D., Wieck, A.D., Kooi, B.J. and van der Wal, C.H. (2013). The annealing mechanism of AuGe/Ni/Au ohmic contacts to a two-dimensional electron gas in GaAs/AlGaAs heterostructures, *Semicond. Sci. Technol.* 28, 025006.
- [101] Baca, A.G., Ren, F., Zolper, J.C., Briggs, R.D. and Pearton, S.J. (1997). A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors, *Thin Solid Films* 308–309 599–606.
- [102] Piotrowska, A., Guivarc'h, A. and Pelous, G. (1983). Ohmic Contacts To III-V Compound Semiconductors: A Review Of Fabrication Techniques, *Solid-State Electronics*. 26, 179-197.
- [103] Villa, J., Ramiro, I., Ripalda, J.M., Antolín, E., García, I. and Martí, A. (2017). A substrate removal processing method for III–V solar cells compatible with low-temperature characterization, *Mater. Sci. Semicond. Process*. 63, 58–63.
- [104] Pantelica, D., Drafta, G., Borcan, C., Diaconescu, D., Buda, M., Ghita, R. (1996). RBS analysis of Au/Cr contact on GaAs, in: *1996 Int. Semicond. Conf. 19th Ed. CAS96 Proc., IEEE, Sinaia, Romania*. 405–408.
- [105] Aleksandrov, S. E., Volkov, V. V., Ivanova, V. P., Kuz'michev, Yu. S., Solov'ev, Yu. V. (2005). Non-Alloy Cr/Au Ohmic Contacts in the Technology of Planar Beam-Lead GaAs p–i–n Diodes, *Tech. Phys. Lett.* 31, 581.
- [106] Cullity, B.D. and Stock, S.R. (2014). Elements of X-ray diffraction, 3. ed., new internat. Ed., Pearson Education, Harlow.
- [107] Bauer, G. and Richter W., eds., (1996). Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- [108] Ewald, P.P. (1962). The Principles of X-ray Diffraction, in: Ewald, P.P. (Ed.), Fifty Years X-Ray Diffr., Springer US, Boston, MA. pp. 82–101.
- [109] Ito, Y., Motono, H., Omote, K., Ogata, K., Yoshihara, S. and Matsushima, N. (2018). A novel high-resolution XRD apparatus for patterned epitaxial films in a 50pm pad area with a convergent micro X-ray beam, in: *2018 29th Annu. SEMI Adv. Semicond. Manuf. Conf. ASMC, IEEE, Saratoga Springs, NY, USA*, pp. 89–93.
- [110] Capelletti, R. (2005). Luminescence, in: *Encycl. Condens. Matter Phys.*, Elsevier, pp. 178–189.
- [111] Huang, H.-T., Cao, W., Lin, H.-H. and Chin, Y.-C., (2019). GaAs₁-Sb /GaAs single quantum well for long wavelength photonic devices, *Solid State Electron. Lett.* 1, 98–104.
- [112] Romero, N.A. (1998). Johnson Noise, 2-7.
- [113] S. Mutlu, (2013). Elektronik Transport Mekanizmalarının Pulsu Ölçüm Teknikleri ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [114] Patanè, A. and Balkan, N. eds. (2012). Semiconductor research: experimental techniques, Springer, Heidelberg, Germany; New York.
- [115] Wiedmann, N., Schmitz, J., Boucke, K., Herres, N., Wagner, J., Mikulla, M., Poprawe, R. and Weimann, G. (2002). Band-edge aligned quaternary carrier barriers in InGaAs-AlGaAs high-power diode lasers for improved high-temperature operation, *IEEE J. Quantum Electron.* 38, 67–72.
- [116] Polupan, G., Torchynska, T., Macotela, L.G. V., Tamayo, R. C. and Echavarría, A. E. (2020). Emission and HR-XRD varying in GaAs/AlGaInAs heterostructures with InAs quantum dots at annealing, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 31, 2643–2649.
- [117] Tamayo, R.C., Torchynska, T.V., Polupan, G. and Stintz, A. (2023). Comparison of parameter variation of InAs quantum dots embedded in GaAs/Al_{0.30}Ga_{0.70}As structures with different capping/buffer quantum wells at annealing, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 34, 1129.
- [118] Tamayo, R. C., Polupan, G., Torchynska, T.V. Macotela, L.G.V., Stintz, A. and Echavarría, A. E. (2019). AlGaInAs capping layer impact on emission and structure of AlGaAs/GaAs quantum wells with InAs quantum dots, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 90, 212–218.
- [119] Maharjan, N. Chaldyshev, V. and Nakarmi, M.L. (2019). Resonant optical studies of GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well based Bragg Structures at excited states, *MRS Adv.* 4, 651–659.
- [120] Varshni, Y.P. (1967). Temperature Dependence of The Energy Gap In Semiconductors, *Physica.* 34, 149–154.
- [121] Allali, M., Sorensen, El C.B., Veje, E. and Tidemand-Petersson, P. (1993). Experimental determination of the GaAs and Ga 1 – x Al x As band-gap energy

dependence on temperature and aluminum mole fraction in the direct band-gap region, *Phys. Rev. B.* 48, 4398–4404.

- [122] Sceats, R. and Balkan, N. (2003). Hot electron light emission at $1.3\mu\text{m}$ from a GaInAsP/InP structure with distributed Bragg reflectors, *Phys. Status Solidi A.* 198, 495–502.



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-9337-7856

Ad Soyad : Feyza SÖNMEZ

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2009, Eskişehir Atatürk Lisesi
- 2014, Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü
- 2019, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- 2018, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilimdalı

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- Sönmez, F., Arslan, E., Ardali, Ş., Tıraş, E. and Özbay, E. (2021). Determination of scattering mechanisms in AlInGa_N/Ga_N heterostructures grown on sapphire substrate, *Journal of Alloy and Compounds*, 864, 158895.
- Sönmez, F., Ardali, Ş., Lişesivdin, S. B., Malin, T., Mansurov, V., Zhuravlev K. and E. Tıraş, (2021). The effect of barrier layers on 2D electron effective mass in Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN heterostructures, *Journal of Physics condensed matter*, 33, 8.
- Sönmez, F., Ardali, Ş., Lişesivdin, S. B., Malin, T., Mansurov, V., Zhuravlev K. and E. Tıraş, (2021). The effect of passivation layer, doping and spacer layer on electron-longitudinal optical phonon momentum relaxation time in Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN heterostructures, *Materials Science In Semiconductor Processing*, 122, 1369-8001.
- Sonmez, F., Ardali, S., Arpaway B. and Tiras, E. (2022). The investigation of photoluminescence properties in In_xGa_{1-x}N/GaN multiple quantum wells structures with varying well number, *Physica B-Condensed Matter*, 630, 0921-4526.

- Ardalı, Ş., Sönmez, F., Lişesivdin, S. B., Malin, T., Mansurov, V., Zhuravlev K. and E. Tıraş, (2024). The comprehensive investigation of barrier layers on power loss mechanisms in AlGaIn/GaN HEMT structures. *Materials Science and Engineering: B Volume* 300, 117075.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler:

- Tıraş, E., Sönmez, F., Mutlu, S., Ardalı, Ş., Lişesivdin S. B., Erol A., (29.11.2016-04.12.2016). InGaIn-based hot electron light emitting and lasing in semiconductor heterostructure (HELLISH) LED's. *EMN Meeting on Quantum Matter 2016*.
- Tıraş, T., Fırat, H. A., Sönmez, F., Ardalı, Ş., Lişesivdin S. B., Malin, T., Mansurov, V. G., Zhuravlev, K. S., Tıraş, E., (06.10.2016- 10.10.2016) Temperature Dependent Raman Measurements in Undoped and Doped AlGaIn/AlN/GaN Heterostructures with an in situ Si₃N₄ Passivation Layer, *Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe & 13th EXMATEC - Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies*.

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler:

Ulusal ve Uluslararası Projeler

- E. Tıraş (Yürütücü), Ş. Ardalı, T. Tıraş, F. Sönmez, H. A. Fırat, Farklı alttaş üzerine büyütülen grafen yapılarında manyetotransport ölçümleri, Anadolu Üniversitesi BAP Yayın ve Araştırma Teşvik Projesi, 1605F365 Haziran 2015-2016.
- Ş. Ardalı (Yürütücü), F. Sönmez, E. Tıraş, AlGaIn/GaN HEMT'lerde atomik katman biriktirme yöntemi ile büyütülmüş AlN ince pasivasyon tabakasının etkin kütle üzerine etkisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, BAP, 22ADP345 Aralık 2023
- Ş. Ardalı (Yürütücü), F. Sönmez, T. Tıraş, E. Tıraş, Anne Sütünün Saklama Koşullarının LIBS Yöntemiyle İncelenmesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, BAP, 23ADP048, Devam ediyor.
- Ş. Ardalı (Yürütücü), F. Sönmez, E. Tıraş, AlGaIn/GaN HEMTs yapılarında yüzey pasivasyonun akustik fonon bölgesindeki enerji durulma süreçlerine etkisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, BAP, 21GAP061, 01.05.2022.
- E. Tıraş (Yürütücü), Ş. Ardalı, S. Mutlu, B. Arpapay, U. Serincan, S. Mutlu, A. Erol, TÜBİTAK 121F181, "Sıcak Elektron Tabanlı Optik Mantık Kapıları", (Bursiyer), 15.09.2021- 15.09.2023
- Ş. Ardalı (Yürütücü), E. Tıraş, U. Serincan, B. Arpapay, M. Kulakcı, TÜBİTAK 121E237 "Da-Phemt Milimetre Dalgaboylu Güç Yükselteçlerin Karakterizasyonu", (Bursiyer), 01.09.2021- 01.03.2024.

Burslar:

- TÜBİTAK, Etkinlik Destekleri ve Eğitim Bursları Müdürlüğü, 2250-Lisansüstü Bursları Performans Programı, 2022- 1., 2., 3.
- TÜBİTAK, Etkinlik Destekleri ve Eğitim Bursları Müdürlüğü, 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı, Mikro/Nano/Opto-elektromekanik Sistemler, 2021- 1, 01.03.2021- 28.02.2024.
- YÖK 100/2000 Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı, Sensör Teknolojileri, (2018-2022)

Ödülleri:

- 2014, İkincilik, Bölüm İkinciliği, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi
- 2014, Üçüncülük, Fakülte Üçüncülüğü, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi