

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

**InGaN/GaN ÇOKLU KUANTUM KUYULU IŞIK SAÇAN  
DİYOTLAR**

**DOKTORA TEZİ**

**SALİH TOLGA BAYRAK**

**Balıkesir, Mart-2011**

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

InGaN/GaN ÇOKLU KUANTUM KUYULU IŞIK SAÇAN  
DİYOTLAR

DOKTORA TEZİ

SALİH TOLGA BAYRAK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali TEKE

Sınav Tarihi : 17.03.2011 Saat: 10:30

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali TEKE (Danışman)

Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR

Prof. Dr. Sedat AĞAN

Doç. Dr. Sibel GÖKDEN

Yrd. Doç. Dr. Ercan UÇGUN

Enstitü Yönetim Kurulunun .....tarih..... sayılı oturumunun .....  
nolu kararı ile .....Mezun olmuştur.

Balıkesir, Mart-2011

## ÖZET

### **InGaN/GaN ÇOKLU KUANTUM KUYULU IŞIK SAÇAN DİYOTLAR**

**Salih Tolga BAYRAK**

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı**

**(Doktora Tezi/Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali TEKE)**

**Balıkesir, 2011**

Bu çalışmada, fotoluminesans, elektrolüminesans, akım-voltaj ve x-ışını kırınımı teknikleri kullanılarak (0001)-doğrutuda safir alt tabaka üzerine MOCVD tekniği ile büyütülen görünür/mor ötesi bölgelerde ışık yayan InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulu diyotlar incelenmiştir. İncelenen numunelerin aktif bölgelerinin büyütme sıcaklıkları 650-735 °C aralığında olan altı adet numune tasarlandı. Diğer büyütme şartları mümkün olduğu kadar sabit tutulmaya çalışıldı. Daha sonra bu numunelerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans ölçümleri alındı. Numunelerin fotoluminesans spektrumlarında gözlenen InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin, şiddetinin ve çizgi genişliklerinin örgü sıcaklığına bağlı değişimleri temel modellerle desteklenerek incelendi. Dolayısıyla, InGaN/GaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığının ve dolayısıyla indiyum alaşım oranının bu parametreler üzerindeki etkisi araştırılmış oldu. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildi. Çalışmanın ikinci kısmında fabrikasyonu yapılan iki LED örneğimizin oda sıcaklığında sürekli modda sürücü akımına bağlı elektrolüminesans spektrumları ile birlikte bunlardan birinden tel bağlantıları alınarak örgü sıcaklığına bağlı akım-voltaj ve elektrolüminesans özellikleri detaylı olarak incelendi.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: GaN, InGaN, fotoluminesans, elektrolüminesans, LED

## **ABSTRACT**

### **InGaN/GaN ÇOKLU KUANTUM KUYULU IŞIK SAÇAN DİYOTLAR**

**Salih Tolga BAYRAK**

**Balıkesir University, Institute of Science, Department of Physics**

**(Phd. Thesis/Supervisor: Prof. Dr. Ali TEKE)**

**Balıkesir, 2011**

In this work, InGaN/GaN Multi Quantum Well based blue/UV LEDs have been investigated. The samples were grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) on sapphire substrate and then characterized by High Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD), Photoluminescence (PL) and Electroluminescence (EL) and current vs voltage (I-V) methods. For this investigation six samples whose growth temperature range of active region is varied between 650-735 °C were designed. Other growth parameters were almost kept constant. To investigate the emission mechanisms of InGaN/GaN MQW structures, the temperature dependence of PL measurements was carried out between 10 and 300K. The temperature dependence of PL peak energy, peak intensity and FWHM were analysed. Since the growth temperature affects In content of active layer this study provide us to investigate these parameters as a function of growth temperature hence the In content. Second part of this work, electroluminescence measurements on two samples carried out continuous mode operation. Electroluminescence properties of the wire-bonded sample were investigated in detail at the temperature range of 20-300K.

**KEYWORDS: GaN, InGaN, photoluminescence, electroluminescence, LED**

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
SEMBOL LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. NİTRİTLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ	27
2.1. Kristal yapısı	27
2.2. Diğer Fiziksel Özellikler	29
2.2.1. Mekanik Özellikler	29
2.2.2. Elektriksel Özellikler	31
2.2.3. Termal Özellikler	31
2.2.4. Polarizasyon	32
2.3. Noktasal ve Çizgisel Kusurlar	37
2.4. Optiksel Özellikler	40
3. DENEYSEL YÖNTEMLER	48
3.1. MOCVD (Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirmesi)	48
3.2. Fotoluminesans	50
3.3. Elektrolüminesans	52
4. DENEYSEL SONUÇLAR	54
4.1. Numunelerin Yapısı	54
4.2. Mikrofabrikasyon	57
4.3. X-ışını kırınımı	58
4.4. Fotoluminesans Ölçümleri	59
4.4.1. Numune B-292	60
4.4.2. Numune B-377	66
4.4.3. Numune B-437	71

<b>4.4.4. Numune B-493</b>	<b>76</b>
<b>4.4.5. Numune V008</b>	<b>81</b>
<b>4.4.6. Numune V009</b>	<b>87</b>
<b>4.4.7 Fotoluminesans sonuçlarının büyütme sıcaklığına bağlı analizi</b>	<b>92</b>
<b>4.5. Elektrolüminesan Ölçümleri</b>	<b>98</b>
<b>4.5.1. Numune B-493</b>	<b>98</b>
<b>4.5.1. Numune B-292</b>	<b>108</b>
<b>4.6. Sonuç ve Tartışma</b>	<b>111</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>113</b>

## SEMBOL LİSTESİ

<u>Simge</u>	<u>Adı</u>	<u>Tanımı/Değeri</u>	<u>Birimi</u>
$\epsilon$	Dielektrik sabiti		$\text{Fm}^{-1}$
$\tau$	Yarı-ömür zamanı		s
e	Elektron yükü	$1.6 \times 10^{-19}$	C
$k_B$	Boltzmann sabiti	$1.38 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
$E_g$	Bant enerji aralığı		meV
k	Elektron dalga vektörü		$\text{m}^{-1}$
$P_{PE}$	Piezoelektrik polarizasyon		$\text{C m}^{-2}$
$P_{DP}$	Doğal polarizasyon		$\text{C m}^{-2}$
$\hbar$	İndirgenmiş Planck sabiti	$1.054 \times 10^{-34}$	J s

## ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.1. (a) Dünyadaki en büyük LED ekranlardan biri (b) Yeni trafik lambaları (c) blue-ray diskler (d) GaN temelli UV dedektörler .....3
- Şekil 1.2. Yıllara göre kullanılan aydınlatma teknolojilerinin aydınlatma etkinlikleri ve beyaz ışık güç çevrimleri ile ilgili gelişimleri ..... 5
- Şekil 1.3. RGB yöntemi ile beyaz ışık yayan LED'in spektrumu CEI'si ve 5mm Boyutlarında bir RGB LED'in ışınması..... 8
- Şekil 1.4. Beyaz LED üretmek için tercih edilen fosfor temelli alternatif yöntemler (a) yeşil  $\mathbf{R}\mathbf{G}_\mathbf{B}\mathbf{B}$  (b) yeşil + kırmızı  $\mathbf{R}_\mathbf{B}\mathbf{G}_\mathbf{B}\mathbf{B}$  ve (c) sarı  $(\mathbf{Y}-\mathbf{G})_\mathbf{B}\mathbf{B}$  fosforla. . 9
- Şekil 1.5 Farklı sıcaklıklarda büyütülen InGaN'in FL spektrumları ..... 14
- Şekil 1.6 Yapısında zorlama bulunan  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$  kuantum kuyusuna ait oda sıcaklığındaki pik enerjilerinin kuyu genişliğine bağlılığı..... 16
- Şekil 1.7. Yapısında zorlama bulunan farklı kuyu genişliklerine sahip InGaN/GaN kuantum kuyusuna ait geçiş enerjilerinin bileşim oranına bağlılığı..... 18
- Şekil 1.8. Farklı sıcaklıklarda büyütülmüş InGaN için X-ışını kırınımı (XRD). .... 20
- Şekil 1.9. (a)  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$  ince filmin SEM görüntüsü. (b) (a)'nın aynı bölgesinde çekilen katot-lüminesans görüntüleri. .... 21
- Şekil 1.10. InGaN kuantum kuyulardaki potansiyel dalgalanmalar, Stokes kayması ve konulmanım kuyruk durumları..... 22
- Şekil 1.11. Tek kuantum kuyusu içeren amber LED için sıcaklığa bağlı FL şiddeti ..... 23
- Şekil 1.12. InGaN kuantum kuyulu yapıların FL yarı-ömür zamanları için literatür derlemesi. .... 25
- Şekil 2.1. (a) Wurtzite, (b) zincblende ve (c) NaCl (kaya tuzu) yapıların şematik gösterimi. .... 28
- Şekil 2.2. Wurtzite metal nitrit yapısının şematik gösterimi ( $a, c$  ve  $u$  örgü parametreleri,  $b (= uc)$  en yakın komşu uzaklığı,  $b_1, b_2, b_3$  üç tip ikinci yakın komşu uzaklığı,  $\alpha$  ve  $\beta$  atomlar arası açığı ifade etmektedir). .... 28



Şekil 2.3. Düzlem içinde homojen polarizasyona sahip Ga- ve N-polar tetrahedron GaN'ın top ve çubuk gösterimi. ....	33
Şekil 2.4. Ga-polar bir psödomorfik InGaN/GaN kuantum kuyusunda piezoelektrik ve kendiliğinden polarizasyonun yönleri indüklediği ara bağlı yükler iç alan şematik diyagram, (b) Polarizasyonun indüklediği elektrik alandan $E_p$ alanında etkisini gösteren InGaN/GaN kuantum kuyusunun uzaysal enerji profilinin şematik gösterimi. ....	35
Şekil 2.5. Kristal içerisindeki derin ve sığ kusurların şematik gösterimi. ....	37
Şekil 2.6. Noktasal kusurların şematik gösterimi .....	38
Şekil 2.7. Kenar dislokasyonu, ve vida dislokasyonunun şematik gösterimi. ....	39
Şekil 2.8. a) GaN'ın içsel ve dışsal optiksel geçişlerinin şematik gösterimi b) GaN'ın katkılanmasında kullanılan belirli safsızlıklara ve istem dışı oluşan kusurlara ait ışımsal geçişlerin enerji dağılımları. ....	41
Şekil 2.9. GaN'a ait düşük sıcaklık FL spektrumunda serbest ve bağlı eksitonlar şematik olarak gösterilmektedir .....	45
Şekil 2.10. HVPE tekniği ile büyütülmüş GaN tabakaya ait Fotoluminesans Spektrumunda bağlı eksiton geçişlerinin gösterimi. ....	46
Şekil 3.1. MOCVD büyütmenin şematik gösterimi .....	48
Şekil 3.2. Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde kurulan AIX 200/4 RF-S MOCVD sistemi. ....	49
Şekil 3.3. NANOTAM'da kurulan MOCVD sistemi reaktörünün fotoğrafı. ....	50
Şekil 3.4. FL deney düzeneği. ....	52
Şekil 3.5. EL deney düzeneği. ....	53
Şekil 3.6. Tipik bir kuantum kuyulu LED nin yapısı ve ileri besleme durumundaki emisyon mekanizması ile birlikte potansiyel profilinin karton gösterimi. ....	53
Şekil 4.1. InGaN/GaN ve yapıların şematik gösterimi (a) B-292, (b) B-377, (c) B-437, (d) B-493, (e) V008, (f) V009. ....	55-56
Şekil 4.2. Bilkent NANOTAM'da üretilen LED yapısı. ....	58
Şekil 4.3. Numunelerin XRD ölçümleri. ....	59
Şekil 4.4.a) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-292 numunesi) ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi. ....	61

Şekil 4.4.b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen (B-292 numunesi) yayınının açık gösterim. ....	62
Şekil 4.4.c) 10 K için InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-292) numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası. ....	63
Şekil 4.5 InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-292 numunesi) ait pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit. ....	64
Şekil 4.6. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-292 numunesi) ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılmış fit. ....	66
Şekil 4.7. a) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-377 numunesi) ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi. ....	67
Şekil 4.7. b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen (B-377 numunesi) yayınının açık gösterimi ....	68
Şekil 4.7. c) 10 K için InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-377) numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası ....	69
Şekil 4.8. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-377 numunesi) ait pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit . ....	70
Şekil 4.9. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-377 numunesi) ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılmış fit. ....	71
Şekil 4.10. a) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-437 numunesi) ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi. ....	72
Şekil 4.10. b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen (B-437 numunesi) yayınının açık gösterimi. ....	73
Şekil 4.10. c) 10 K için InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-437) numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası ....	74
Şekil 4.11. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-437 numunesi) ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit. ....	75
Şekil 4.12. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-437 numunesi) ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılmış fit. ....	76
Şekil 4.13. a) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-493 numunesi) ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi. ....	77
Şekil 4.13. b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen (B-493 numunesi) yayınının açık gösterimi. ....	78

Şekil 4.13. c) 10 K için InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-493) numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası .....	79
Şekil 4.14. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-493 numunesi) ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit. ....	80
Şekil 4.15. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (B-493 numunesi) ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılmış fit.....	81
Şekil 4.16. a) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V008 numunesi) ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	82
Şekil 4.16. b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen (V008) numunesi) yayınının açık gösterimi.....	83
Şekil 4.16. c) 10 K için InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V008) numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası .....	84
Şekil 4.17. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V008 numunesi) ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit. ....	85
Şekil 4.18. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V008 numunesi) ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılmış fit.....	86
Şekil 4.19. a) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V009 numunesi) ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	87
Şekil 4.19. b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen (V009) numunesi) yayınının açık gösterimi.....	88
Şekil 4.19. c) 10 K için InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V009) numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası .....	89
Şekil 4.20. c) InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V009 numunesi) ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit. ....	90
Şekil 4.21. InGaN/GaN kuantum kuyusuna (V009 numunesi) ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılmış fit.....	91
Şekil 4.22. Numunelere ait düşük sıcaklıktaki pik enerjilerinin büyüme sıcaklığına bağlı davranışı.....	93
Şekil 4.23. Numunelere ait düşük sıcaklıktaki FL sinyallerinin çizgi genişliğinin büyüme sıcaklığına bağlı davranışı.....	94
Şekil 4.24. E(0) enerjisinin büyütme sıcaklığına bağlı değişimi.....	96
Şekil 4.25. $\alpha'$ nın büyütme sıcaklığına bağlı değişimi.....	97

Şekil 4.26. $\sigma$ 'nın büyüme sıcaklığına bağlı değişimi.....	98
Şekil 4.27. B-493 Numunesine ait ışıma... ..	99
Şekil 4.28. B-493 numunesine ait 20 K'deki EL şiddetinin akıma bağlı değişimi... ..	100
Şekil 4.29. B-493 numunesine ait 20 K'deki pik enerjisi ve EL şiddetinin akıma bağlı değişimi.....	101
Şekil 4.30. B-493 numunesine ait 300 K'deki EL şiddetinin akıma bağlı değişimi .....	102
Şekil 4.31. B-493 numunesine ait 300 K'deki pik enerjisi ve EL şiddetinin akıma bağlı değişimi.....	103
Şekil 4.32. B-493 numunesine ait 20 mA'da sıcaklığa bağlı EL spektrumu.....	104
Şekil 4.33. B-493 numunesine ait pik enerjisi ve EL şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi .....	105
Şekil 4.34. B-493 numunesine ait sıcaklığa bağlı I-V grafikleri .....	107
Şekil 4.35. B-292 numunesine ait ışıma... ..	108
Şekil 4.36. B-292 numunesine ait 300 K'deki EL şiddetinin akıma bağlı değişimi... ..	109
Şekil 4.37. B-292 numunesi için 300 K' deki pik enerjisi ve EL şiddetinin akıma bağlı değişimi.....	110

## Çizelge LİSTESİ

Çizelge 1.1 Farklı dalgalıboylarında ticari olarak üretilen ve/veya geliştirilmekte olan nitrit temelli LED'lerin genel performansları . .....	11
Çizelge 2.1 AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler. ....	30
Çizelge 2.2. Wurtzite yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler. ..	36
Çizelge 4.1. Numunelerin bazı parametreleri .....	92
Çizelge 4.2 Fit yapmak için kullanılan parametreler .....	95

## ÖN SÖZ

Doktora çalışmamın her aşamasında engin bilgilerini benimle paylaşan, her soru ve sorunumu büyük bir sabırla dinleyip çözümler üreten, akademik deneyimleriyle yoluma ışık tutan değerli danışmanım Prof. Dr. Ali TEKE'ye ,

Bilkent Üniversitesi NANOTAM Laboratuvarlarında büyütülen örneklerle ait "Fotoluminesans, Elektrolüminesans ve I-V ölçümleri" sırasında gerekli koşullara ulaşmamı sağladıklarından dolayı Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY ve değerli ekibine,

Çalışmamdaki numunelerin "X-kırınımı tekniği" ile yapısal analizlerinin belirlenmesine olanak sağladığı için Gazi Üniversitesi öğretim üyelerinden Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK ve değerli ekibine,

Uzun ve yoğun çalışma sürecimin her aşamasında bulunup desteğini hiç esirgemeyen Remziye Tülek'e,

Tüm yardımlarından dolayı Aykut Ilgaz'a,

Varlığıyla mutlu ve huzurlu olmamı sağlayan her şeye herkese,

Anneme ve Babama,

Hayatın aslında sandığım kadar zor olmadığını, emek ve sabırla her şeyin üstesinden gelebileceğimi anlamamı sağladıkları için çok teşekkür ederim.

## 1. GİRİŞ

AlN, GaN ve InN gibi yarıiletken nitritler sahip oldukları fiziksel özelliklerden dolayı optoelektronik ve elektronik teknolojisinde birçok potansiyel kullanım alanları bulmaktadır. Her üç yarıiletkende termodinamik dengede wurtzite yapıda kristallenir. AlGaN, InGaN, InAlN ve AlGaInN gibi üçlü ve dördü bileşikler de bulunan bu yarıiletken nitritlerin enerji bant aralıkları 0.7 eV'den (InN) 3.4 (GaN) ve 6.2 eV'ye (AlN) kadar elektromagnetik spektrumun yakın kızılötesi bölgesinden morötesi bölgeye kadar olan çok geniş bir enerji aralığını tarar [1]. Bu özellik nitrit tabanlı yarıiletkenleri, ışık yayan diyod (LED), lazer diyod ve morötesi (UV) fotodetektörler gibi optoelektronik aygıtların üretilmesinde ve geliştirilmesinde çok önemli bir yere koymaktadır.

Yüksek parlaklığa sahip nitrit temelli mavi ve yeşil LED'ler, reklam panolarında, trafik lamba ve işaretlerinde, dekoratif aydınlatma sistemlerinde (örneğin Boğaziçi köprüsünün dekoratif ışıklandırmasında LED teknolojisi kullanılmıştır) stadyumlarda, alışveriş merkezlerinde ve büyük caddelerdeki düz ekran televizyonlarda kullanılmaktadır. Morötesi (UV) bölgede ışınım yapan yüksek performanslı LED'ler ise nehir sularının ve endüstriyel su atıklarının temizlenmesi ve arıtılması gibi çevrenin korunması ile ilgili alanlarda da kullanılabilir. Görünür ve morötesi bölgede yayınım yapan LED'lerin kullanım alanlarını ziraatta görülen hastalıkların teşhis ve tedavisinde, fotosentezin hızlandırılması gibi tarımsal amaçlı uygulamalardan spektroskopik ölçüm sistemlerine kadar genişletmek mümkündür. Örneğin, mavi ve morötesi LED'ler yüksek çıkış güçleri, düşük gürültüleri, nanosaniye altındaki sinyal pulsları ve yüksek frekans modülasyonları gibi çok önemli özelliklere sahip olmalarından dolayı zaman-çözümlü floresans ölçüm sistemlerde pahalı olan katı ve gaz lazerlerin veya lambaların yerini alabilirler.

Yüksek yoğunluktaki optiksel okuma ve yazma teknolojisinde yarıiletken lazerler önemli bir yere sahiptirler. Çünkü çok fazla sayıdaki dijital verilerin depolanabilme kapasitesi, kullanılan CD'nin kapasitesine bağlıdır. Bu kapasitenin miktarını belirleyen en önemli faktör kullanılan lazerin dalgaboyudur. Küçük dalgaboylarında yansımalar ve kırılmalar azalır ve optiksel depolama yoğunluğu dalgaboyunun tersinin karesi ile orantılı olarak artar. Mavi ve mor ötesi dalgaboylarında yayılım yapan nitrit malzemelerden üretilen lazerler ilk olarak Sony ve daha sonra Apple, HP, Philips gibi birçok firmanın geliştirdikleri Blue-Ray Disk olarak adlandırılan yeni nesil kayıt ve depolama teknolojilerinde kullanılmaya başlanmıştır [2]. Blu-ray Disc birliği (Blu-ray Disc Association - BDA) adı altında geliştirdikleri yeni format özellikle yeni nesil yüksek çözünürlüklü (HD) videoların tek bir diskte saklanabilmesinde yardımcı olurken aynı zamanda çok büyük miktarda veri depolama imkanı sağlamaktadır. Tek tabakalı bir Blu-ray disk 25 GB'lık kapasitesi ile iki saatten fazla HDTV kalitesinde görüntü veya onüç saat civarında standart çözünürlüklü görüntü saklayabiliyor. Blu-ray ileride kolayca genişletilebilir diye ayrıca çoklu-katman desteği de barındırıyor, herbir katmanda 25 GB veri ile ileride veri kapasitesi 100-200 GB seviyelerinde olabilmesi planlanmaktadır.

Jet teknolojisinde, otomobillerde ve kalorifer kazanlarında yakıtın daha verimli kullanılması ve temiz bir çevre için bu cihazların neden oldukları atıkların daha iyi kontrol edilmesini nitrit tabanlı yarıiletken malzemelerden üretilecek olan UV sensörler vasıtasıyla sağlamak mümkündür. Atmosferin 15-20 km'lik yükselti bölgesindeki ozon tabakası güneşten gelen ışınların morötesi bölgesini (280 nm'den küçük) büyük oranda soğurmasından dolayı yeryüzündeki UV ışınal gürültü düzeyi son derece düşüktür. Dolayısıyla 250-280 nm dalgaboyu aralığında üretilecek olan UV sensorlerin (solar-kor dedektörler) optiksel algılama özelliği oldukça yüksek olacaktır [3]. Bu nedenle bu dedektörlerin, düşman uçaklarının ve karadan-havaya, havadan-havaya balistik füzelerin fark edilmesinde ve tehdit altındaki uçağın ya da aracın çok erkenden uyarılmasını sağlayarak tehditin önlenmesindeki önemi artmış olacaktır. Bunun yanısıra, görünür-kor ve solar-kor foto-dedektörler, UV astronomi çalışmalarında, uzaydan-uzaya güvenli iletişimde ve biyolojik etkilerin incelenmesinde de kullanım alanına sahiptirler.



III-V nitrit yarıiletkenler büyük bant aralığına, yüksek dielektrik kırılma alanına ve oldukça iyi bir termal iletkenliğe sahiptirler. Bu özellikler bu malzemelerden üretilen elektronik devrelerin yüksek güçte ve yüksek sıcaklıklarda çalışmalarına olanak sağlar. GaN temelli modülasyon katkılı alan etkili transistörler (MODFET) yapılar, yüksek güçte ve sıcaklıkta çalışan yükselticilerde, radarlarda, füzelerde ve uydularda uygulama alanına sahiptirler [4]. Nitrit temelli optoelektronik aygıtların uygulama alanlarından bazıları Şekil 1.1’de gösterilmektedir

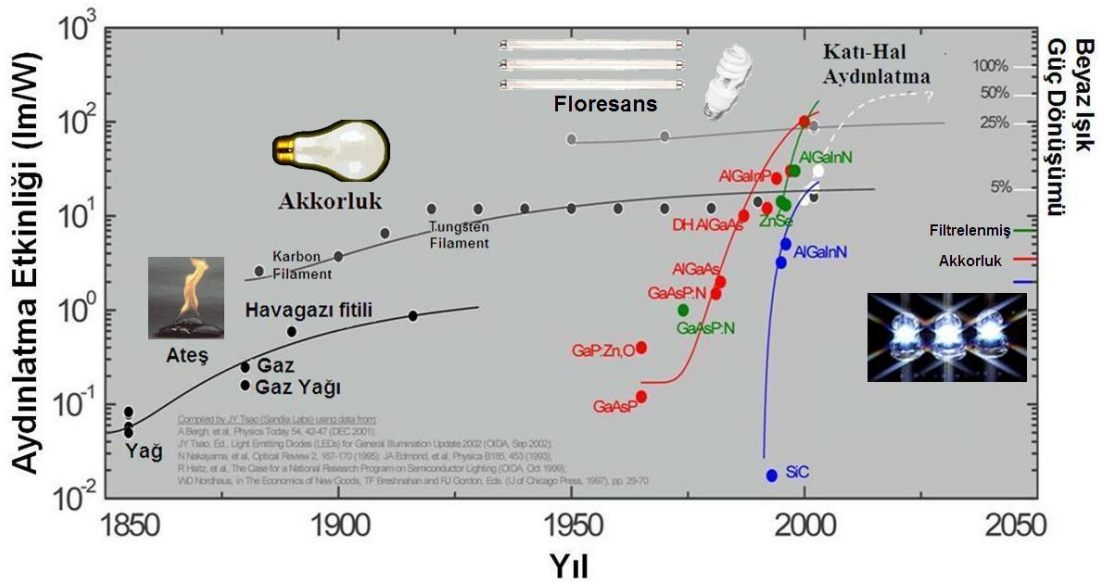


Şekil 1.1 (a) Dünyadaki en büyük LED ekranlardan biri gösterilmektedir. Arkansas’daki Donald W. Reynolds Razorback Stadyumundaki bu ekran için 2.5 milyon LED kullanılmıştır. (b) çok uzun mesafeden bile fark edilebilecek parlaklıkta olan LED’lerin kullanıldığı trafik lambaları, (c) Mitsubishi ve Sony tarafından üretilen 25 ve 50 GB kapasiteli tekrar yazılabilir blue-ray diskler, (d) Genicom Co., Ltd tarafından üretilen GaN temelli UV dedektörler.

Belki de nitritlerden üretilecek olan LED'lerin toplumsal etkisi bunların ev, işyeri ve sokak aydınlatmalarında beyaz ışık kaynağı olarak günümüzde kullanılan mevcut aydınlatma sistemlerinin yerine geçtiğinde çok daha büyük olacaktır. LED'lerin bu potansiyel kullanım alanının önemini vurgulamak için burada bazı karşılaştırmalı örnekler vereceğim. Dünyada kullanılan mevcut enerji kaynakları ve yıllık tüketimi göz önüne alındığında aynı işi daha uzun süreli ve daha az enerji tüketerek gerçekleştirecek olan yeni elektronik ve optik sistemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Enerji tasarrufu yapmak için gereken önlemler arasında önceliği 100 W' lik akkor ışık kaynaklarının alacağını ilk bakışta fark etmemiz mümkün olmayabilir. Fakat evlerde kullanılan diğer elektrikli cihazlar ile karşılaştırmalı olarak basit bir enerji tüketim hesabı yapıldığında aydınlatma için harcanan enerjinin en fazla olduğu görülür [5]. Aydınlatma, elektrik enerjisinin sadece büyük miktarda değil aynı zamanda oldukça verimsiz tüketildiği bir alandır. Akkor lambalar elektrik enerjisinin sadece %5'ini görünür ışığa dönüştürürler. Enerji tasarrufu yapan sıkıştırılmış floresan lambalar için bu oran % 20'dir. Evlerde kullandığımız diğer cihazlar elektrik enerjisini daha verimli kullanırlar (Fırın, tost makinesi vb... gibi cihazlar elektrik enerjisini % 70 oranında ısıya dönüştürürler). Enerjinin hem fazla hem de verimsiz bir şekilde kullanılması enerji tasarrufu konusunda önceliğin aydınlatmaya verilmesi gerektiğini göstermektedir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde 2001 yılındaki yıllık enerji tüketimi 9200 terawatt-saattir (TWs). Bu enerjinin %38'i elektrik enerjisinde ve bu değer de %22'si yani 765 TWs' si aydınlatmada kullanılıyor. Sonuç olarak aydınlatmada kullanılan enerji Birleşik devletlerdeki toplam enerji tüketiminin %8' inin üzerinde bir değere karşılık gelir. 2001 yılında elektrik enerjisinin ortalama maliyeti 0.068 dolar/ kWs, tüketicilerin ödediği miktar ise 53 milyar dolardır [6]. Ortalama maliyet değeri 2006 yılında 0.099 dolar/kWs'ye kadar çıkmıştır. Birleşik krallıkta ise maliyet 0.2 dolar/kWs' dir. 2005 yılında yapılan araştırmada Dünya genelinde şebeke ile yapılan aydınlatmada enerji tüketimi 2650 TWs'dir ki bu değer küresel elektrik enerjisi tüketiminin %19'una karşılık gelir. Aydınlatma için kullanılan elektrik enerjisine tüketicilerin ödediği miktar ise 234 milyar dolardır. Aydınlatmanın çok fazla bilinmeyen bir diğer etkisi de sera gazı salınımıdır. Dünya genelinde yapılan aydınlatmaya gereken enerji sağlanırken yılda 1900 megaton CO<sub>2</sub>

salınımı olmaktadır. Bu değer, dünya üzerindeki araçlardan kaynaklanan salınımın %70'ine, uçaklardan gözlenen salınımın ise üç katına denk gelmektedir [7]. Dünya nüfusunun gittikçe arttığı dikkate alındığında verimli aydınlatmanın artırılması konusunda yeterince hızlı davranmazsak karbondioksit salınım oranı oldukça üst düzeylere ulaşacaktır. Aydınlatmanın önemi hakkında bilgi verdikten sonra şimdi de bu iş için kullanılabilecek seçeneklerden bahsedelim. Şekil 1.2, yıllara göre kullanılan aydınlatma teknolojilerinin aydınlatma etkinlikleri ve beyaz ışık güç dönüşümleri ile ilgili gelişimleri göstermektedir.



Şekil 1.2 Çeşitli aydınlatma teknolojilerinin parlaklık verimlerinin 200 yıllık gelişim süreçleri [8].

i) *Akkor Işık Lambaları (Ampul Lambalar)*; Şekilde görüldüğü gibi bu tip lambaların kullanılmaları 1880'lerden itibaren başlamaktadır. Günümüzde kullanılan lambalarda havası alınmış ampül şeklindeki camın içinde tungsten teli bulunmaktadır. Telin sıcaklığı elektrik enerjisi ile 3500 K' ye kadar çıkar ve beyaz ışık yayar. Doğal olarak beyaz ışığın yanında çok güçlü bir şekilde ısı da yayılır. Elektrik enerjisinin sadece %5'ini görünür ışığa geri kalan kısmını ise ısıya çevirdiği için bu tip lambalar ışık üretiminde %95 verimsizdir. Akkor ışık yayan lambaların ömürleri 1000 saat kadardır.

ii) *Floraslan Tüpler*; Aydınlatma amaçlı beyaz ışık kaynağı olarak kullanılan floresan tüplerin geçmişi çok eskilere gitmemektedir. İlk floresan tüp 1937 yılında General Electric tarafından üretilmiştir. Bu tüpler, genellikle Argon'un kullanıldığı asal gazla doldurulmuş ve 3-15 mg aralığında küçük miktarda civa içeren bir tüpten oluşur. Tüpün iki ucundaki elektrotlar arasından geçen elektrik akımı civa buharındaki elektronları uyararak UV ışık oluşturulur. Cam tüpün iç yüzeyini kaplayan fosfor atomları UV ışık tarafından uyarılır ve bu atomlar görünür ışık yayar. 7500 ile 30000 saat arasında değişen ömre sahip floresan lambalar hem bu özellikleri hem de % 25 verimliliğe sahip olduğu için akkor lambalara kıyasla daha avantajlıdır. Bugün işyeri, ofis ve kamu binalarında aydınlatma için floresan tüpler tercih edilmektedir.

iii) *Sıkıştırılmış Floresan Lambalar*; İlk olarak 1980'lerin başlarında ticari olarak üretilmiştir. Genellikle düz veya halka şeklindeki iki, dört veya altı küçük floresan tüpten oluşur. Eğer lamba uzun süre açık bırakılırsa 6000 ile 15000 saat arasında değişen bir ömre sahiptir. Kısa zaman aralıklarında açılıp kapatılırsa ömrü önemli ölçüde azalır. Floresan tüplerde olduğu gibi bu lamlaların da verimliliği sadece % 25'dir. Floresan lambalarının çevreye zarar verici olumsuz etkileri vardır. Bu tip ışık kaynaklarının her biri 5 mg civa içerir. Ayrıca, civanın insan sağlığına vereceği son derece olumsuz ve hatta ölümcül etkilerinin bilinmesine rağmen dünyada kullanım dışı kalan floresan lambaların nasıl yok edileceğine dair bir düzenleme bulunmamaktadır. Bu nedenle insanlar bu tip lambalar bozulduğunda normal çöp kutularına atmaktadırlar. Çöplerin çöp kamyonu vasıtasıyla toplanıp sıkıştırılması bu tip lambaların kırılmasına neden olur. Dolayısıyla civa dışarıya yayılır ve çöpteki atıklara bulaşır. Çöplerin depolama alanlarında biriktirilmesiyle su kaynaklarına dolayısıyla da bu alanlar üzerinde yetişmiş bitkilere, çöp fırınlarında yakılmasıyla da atmosfere civa karışmış olur. Birçok ülkedeki civa seviyesi oldukça yüksektir. Birleşik devletlerdeki hastalık ve korunma merkezi tarafından yapılan ve 2003 yılında yayınlanan araştırma sonuçlarına göre doğum yapma dönemindeki 12 kadından birinin kanındaki civa seviyesi olması gereken değerinden yüksek çıkmıştır [9]. Bu sonuçlar, civayla dolaylı veya dolaysız teması en aza indirmenin çok önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle civa ya da diğer zehirli

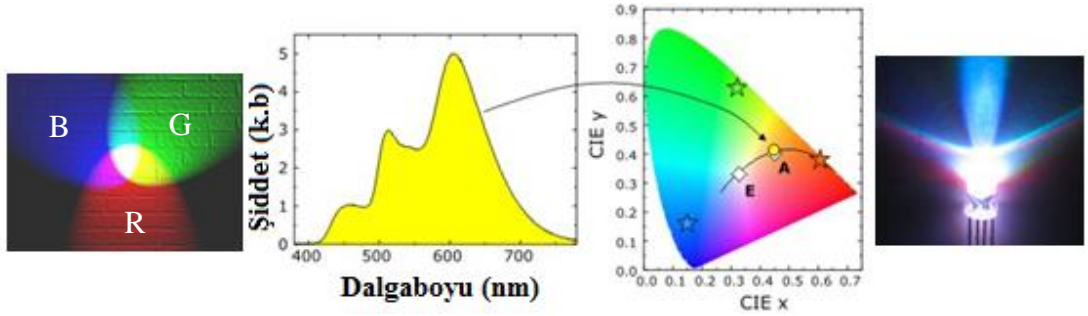
malzemeleri içermeyen düşük enerjili aydınlatma sistemlerinin tercih edilmesi son derece önemlidir.

*iv) Organik Işık Yayan Diyotlar;* Işık yayan organik malzemeler ilk olarak Pope, Kallman ve Magnante tarafından 1963 yılında geliştirilmiştir [10]. Kısaca OLED olarak adlandırılan bu ışık yayan kaynaklar son yıllarda televizyon, bilgisayar ve cep telefonları gibi taşınabilir sistemlerin ekranlarında yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. OLED'lerin genel amaçlı aydınlatma sistemlerinde de kullanılma potansiyeli bulunmaktadır. Bu ince filmler Polimerik veya moleküler tabanlıdır. Bu teknolojinin en önemli avantajları arasında filmin hazırlanma sürecinin kolay olması, düşük maliyet ve cihaz özelliklerinin geliştirilmesi için organik ince filmlerin yapılarının kimyasal olarak gerekli düzenlemelerle ayarlanabilir olması gösterilebilir [11]. Tüm bu avantajlarına rağmen yüksek parlaklık, verimlilik ve uzun yaşam süresi bakımından inorganik tabanlı aydınlatma teknolojilerinin çok gerisindedir.

*v) İnorganik Işık Yayan Diyotlar;* İnorganik malzemelerin kırmızı ışık yaydığı ilk olarak Holonyak ve Bevacqua tarafından 1962 yılında gösterilmiştir [12]. Birkaç örnekle aktif tabakada kullanılan yarıiletken malzemeler ve hangi bölgede ışınım yaptıklarını belirtmek gerekirse; **GaAs**' in band aralığı 1.43 eV olduğundan yakın kızılötesi bölgede, **GaP**' in band aralığı 2.26 eV olduğundan kırmızı ve yeşil renkte, **GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>** ise n tipi katkılama ile kırmızı, turuncu ve sarı renkte, **InP** temelli üçlü ve dörtlü alaşımlar kullanılarak yakın kızılötesi bölgenin daha yüksek dalgaboylu bölgelerinde ışınım elde edilebilir. Son dönemlerde **In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N**, **GaN** gibi malzemeler kullanılarak mor ötesi, mor, mavi, yeşil ve kehribar renkte ışınım yapan diyotlar üretilmektedir. Özellikle yüksek parlaklık ve verimlilikteki yeşil, mavi ve kırmızı ve sarı renkte ışık yayan diyotların geliştirilmesi yeni nesil aydınlatma teknolojisi için çok önemlidir.

LED'lerin beyaz ışık kaynağı olarak kullanılmasını sağlayan temelde iki yöntem vardır. Bunlardan ilki Şekil 1.3'de görüldüğü gibi kısaca **RGB** olarak adlandırılan ve kırmızı, yeşil ve mavi ışık yayan çoklu LED çipleri kullanılarak açık

beyaz ışık spektrumlarının elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin avantajı, LED'in şiddetini birbirinden bağımsız olarak ayarlamak suretiyle elde edilen beyaz ışık spektrumunun değiştirilebilmesidir. Fakat bu yöntemde bazı temel problemler ile karşılaşılır. İlk problem Yeşil LED'in mavi ve kırmızı LED'e kıyasla verimliliğinin düşük olmasından dolayı toplam verimliliğin sınırlı kalmasıdır [13-15].

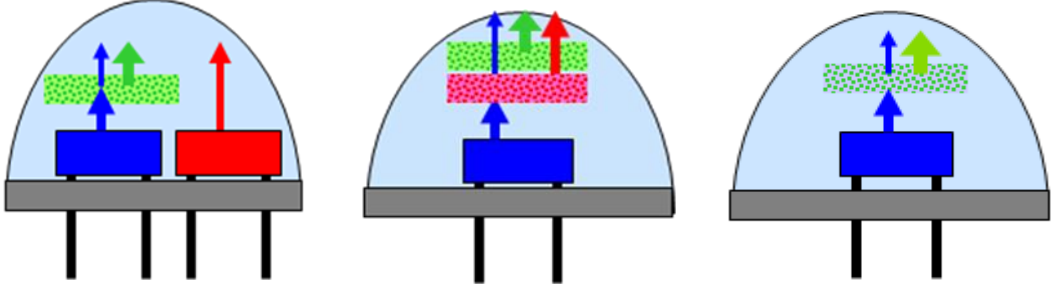


Şekil 1.3. RGB yöntemi ile beyaz ışık yayan LED'in spektrumu CEI'si ve 5mm boyutlarında bir RGB LED'in ışınması

InGaN temelli özellikle yeşil LED'in verimi ve kalitesi düşük olduğundan bu LED'lerin renk oluşturma dizini (CRI) %75'in altındadır. Bu problemi aşmak için bu üç temel rengin yanına dördüncü bir renk olarak sarı ışık yayan bir LED'in eklenmesi ile üretilecek olan beyaz ışığın (RGBY) CRI değerinin teorik olarak %97'ye kadar yükseltilebileceği öngörülmektedir. Şu an için bu yöntemin en büyük dezavantaj yüksek üretim maliyetidir. Bundan dolayı birim ürünlerin üretim maliyetinin hala geleneksel ışık kaynaklarına göre daha yüksekte olması ticari başarıyı düşürmektedir. Bu LED'lerin verimlerinin ve kalitelerinin artırılması ve dolayısıyla maliyetlerinin düşürülmesi için temel bilim ve teknolojik alanlarda çalışmalar sürdürülmektedir.

LED'lerden beyaz ışık elde etmek için kullanılan diğer bir yöntem ise mavi ve morötesi yayılım yapan LED'lerin bir kısmını diğer renklere dönüştürmek için fosfor kullanılması prensibine dayanmaktadır. Şekil 1.4' te günümüzde beyaz LED üretmek için tercih edilen fosfor temelli alternatif yöntemleri gösterilmektedir.

Sırasıyla (a) yeşil  $\text{R}_B\text{G}_B\text{B}$  (b) yeşil + kırmızı  $\text{R}_B\text{G}_B\text{B}$  ve (c) sarı  $(\text{Y-G})_B\text{B}$  fosforlar mavi LED ile uyarılmaktadır.



Şekil 1.4 (a) mavi+kırmızı LED+yeşil fosfor (b) mavi LED+kırmızı+yeşil fosfor (c) mavi LED+sarı fosfor

Şekil 1.4 (a) da görüldüğü gibi  $\text{R}_B\text{G}_B\text{B}$  yönteminde iki LED kullanılmaktadır. Bu yöntemde, mavi ışığın bir kısmı yeşil renkli fosfor tarafından emilir ve tekrar yayımlanarak üç temel renk elde edilerek aygıttan beyaza ışık yayılır.  $\text{R}_B\text{G}_B\text{B}$  yönteminde ise kırmızı ve yeşil fosforlar tek bir mavi LED ile uyarılmak suretiyle beyaz ışık elde edilmektedir. Şekil 1.4 (c) de ise InGaN/GaN tabanlı mavi LED çipi sarı ışık yayan ince bir fosfor tabakası ile kaplanarak mavi ve sarı ışığın birleşmesi sağlanıp beyaz ışık elde edilir. Bugün genel kullanım için ticari olarak satılan beyaz LED'lerin çoğu bu yöntemle üretilmiştir. Bu yöntemin en büyük avantajı, düşük üretim maliyeti ve %80 den büyük CRI değeridir. Dezavantajı ise ışık karakterinin dinamik değişiminin kolay olması ve fosfor dönüşümünde aygıtın etkinliğinin azalmasıdır.

Yukarıda da belirtildiği gibi mavi LED'in sarı fosfor ile kaplanmasıyla oldukça parlak beyaz ışık elde edilebilmektedir. Birçok uygulama için bu ışık çok kullanışlı olmasına rağmen (otomobil, yat, otobüs ve cep telefonlarındaki aydınlatma sistemlerinde, göstergelerde...) evlerin aydınlatılması için kullanılmak istendiğinde ışık kalitesinin yeterli olmadığı görülür. Çünkü bu amaç doğrultusunda kullanılacak beyaz ışığın oluşumunda biraz kırmızı ışık da içeren ılık beyaz ışık olması istenir. Bu tip beyaz LED'ler (mavi LED+sarı ve kırmızı fosfor) ticari

olarak üretilmektedir. Fakat yapısında bulunan kırmızı fosforun mavi LED kullanılarak uyarılması ile elde edilen beyaz ışık verimi, uyarmanın yakın mor ötesi ışık ile sağlanmasıyla elde edilen beyaz ışık veriminden düşüktür. Dolayısıyla daha yüksek kalitede beyaz ışık üretmek için UV LED+kırmızı+yeşil ve mavi fosfor karışımı kullanılabilir. UV ışığın tabakalar içinden geçmesini önlemek için kalın fosfor tabakalar tercih edildiğinde UV ışık kullanmanın hiçbir zararı olmayacaktır.

Sonuç olarak toplumsal ve ticari değeri büyük olan bu uygulamaların yaygınlaştırılabilmesi için kullanılan materyalin temel özelliklerinin belirlenmesi, üretim ve fabrikasyon süreçlerinin optimizasyonu ile birlikte aygıtların tasarım ve çalışma mekanizmalarının anlaşılması son derece önemli olmaktadır. Bundan dolayı LED'lerin materyal aşamasından aygıt ve sistem aşamasına kadar her basamağı yıllar içerisinde yoğun bir çalışma konusu olmuştur. Bu tezde incelediğimiz nitritler ile ilgili çalışmaların yoğun olarak 1990'larda başladığını görmekteyiz. Nitrit ailesinin en meşhuru olan GaN ile ilgili çalışmalar başladığında bu çalışmalarda en önemli amaç onun ve GaN tabanlı malzemelerin direkt geniş enerji bant aralıklarından faydalanılarak yüksek performanslı optoelektronik aygıtların üretilmesi olmuştur. İlk GaN tabanlı LED yaklaşık 35 yıl önce Pankove ve arkadaşları tarafından o zamanlarda henüz p tipi katkılanmış GaN'ın elde edilememiş olmasından dolayı Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapısı kullanılarak üretilmiştir [16]. 1990'larda yüksek kalitede GaN epitabakaların üretiminin ve p-tipi iletkenliğin elde edilmesi gibi birçok önemli gelişmeler, grup III-nitritler üzerine yapılan araştırmaların ivmelenmesine yol açmıştır. Sürdürülen bu yoğun çalışmaların sonucu olarak Amano ve arkadaşları ilk p-n eklemli LED üretimini gerçekleştirmişlerdir [17]. Daha sonraki yıllarda homoeklem yapıların içsel soğurma, tam iç yansıma ve enjekte edilen taşıyıcıların aktif bölgede hapsedilememesi gibi kayıplardan kaynaklanan düşük iç kuantum verimini ortadan kaldırmak için çift heteroeklemli yapılar nitrit tabanlı LED'lerin aktif bölgelerinde kullanılmaya başlanmıştır [18,19]. Daha sonra GaN'ın bant kenarı yayınımasının yanı sıra spektrumun diğer bölgelerinde de ışık yayan diyot tasarımları için  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  kuantum kuyulu yapılar LED'lerin aktif bölgelerinde kullanılmaya başlanmıştır [20-28]. Nichia Chemical, LumiLEDs ve Cree gibi LED teknolojisinde



önde gelen firmalar bu alandaki araştırmalarını yoğunlaştırarak nitrit tabanlı mor, mavi, yeşil ve yeşil/sarı LED'lerin ticari olarak üretimini yapmaktadırlar. Örneğin, yayımlanan ışığın dışarı çıkış verimini artırarak daha yüksek performanslı LED üretimi için LumiLEDs tarafından geliştirilen büyük alanlı flip-chip tasarımı ile üretilen yeşil ve mavi LED'lerin kaydedeğer bir güç düşüşü olmadan 1 A'e kadar sürülebildikleri gösterilmiştir [29]. Ayrıca flip-chip tasarımı ile üretilen LED'lerin akım yoğunluğu yaklaşık 30 A/cm<sup>2</sup> ye karşılık gelen 200 mA enjeksiyon akımı ve 2.95 V ileri besleme voltaj değerlerinde 27 lm/W gibi yüksek verimle çalışabildikleri gösterilmiştir. LED'lerin maliyetlerini düşürmek ve uygulama alanlarını yaygınlaştırabilmek için yüksek akım yoğunluklarında yüksek parlaklık akısına sahip büyük alanlı LED'lerin üretilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla yürütölen çalışmalar sonucunda 2007 itibariyle farklı dalgaboylarında ticari olarak üretilen ve/veya geliştirilmekte olan nitrit temelli LED'lerin genel performansları izelge 1.1'de gösterilmektedir [1].

Çizelge 1.1 Nitrit temelli LED'lerin genel performansları

Yüksek Güçte LED'ler	Dalgaboyu (nm)	ıkış Gücü (mW)	Akı/LED (lm)	Aydınlatma Etkinliği (lm/W)	Sürücü Akım (mA)	Sürücü Voltaj (V)	Numune Boyutu (mm <sup>2</sup> )	Yarı-Ömür (h)	şirket
Mor ötesi	365	250			500	3.8	1x1		Nichia
	385	310			500	3.7	1x1	100000	Nichia
Mavi	470		35	9.4	1000	3.72	1x1	50000	Lumileds
	460	385			700	4.5	0.9x0.9	50000	Cree
Yeşil	530		55	52.3	300	3.5	1x1		Nichia
	530*		100	26.9	1000	3.72	1x1	50000	Lumileds
Beyaz	Mavi+fosfor		170	69.4	700	3.5	0.9x0.9	50000	Lumileds

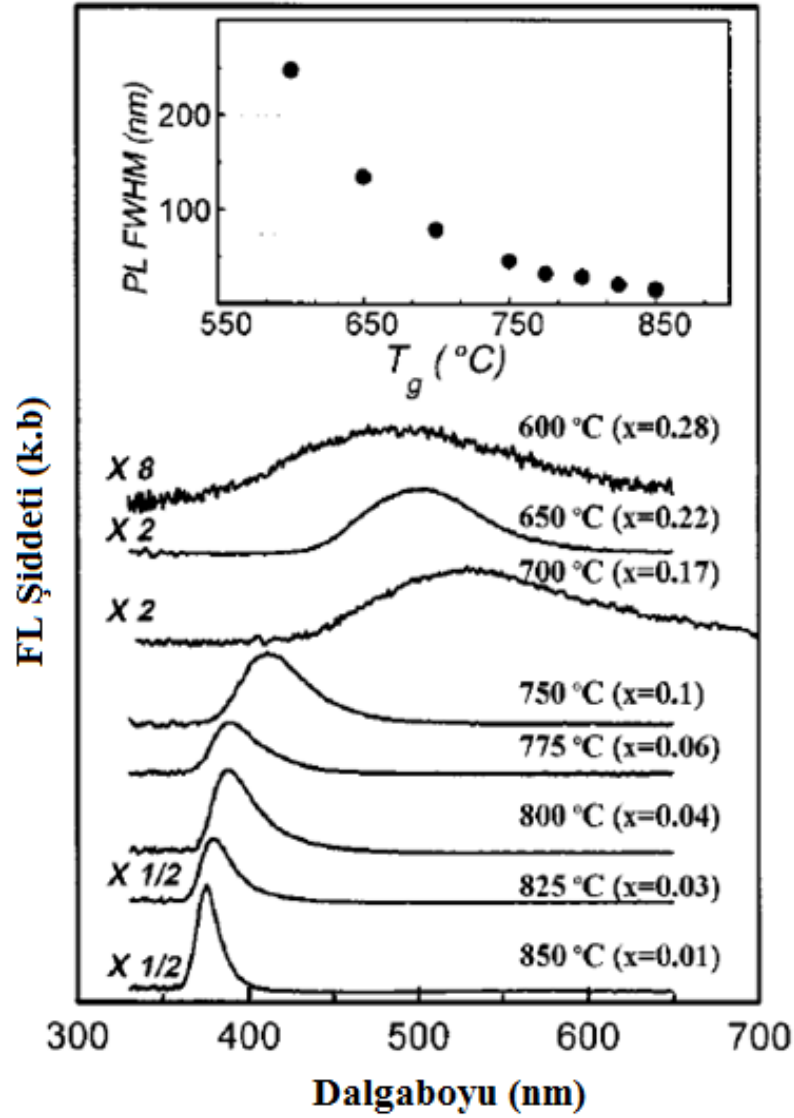
\* Ticari olarak mevcut

Aktif bölgelerinde In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N içeren optoelektronik aygıt teknolojisinde son dönemlerde önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen bu malzemenin temel fiziği ile ilgili belirsizlikler bulunmaktadır. InGaN'ın bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin (band aralığı, örgü parametreleri, elastik sabitler, etkin elektron kütleleri, v.b.) tam olarak belirlenememesi optiksel, elektriksel ve yapısal

parametrelerde belirsizliğe yol açmaktadır. InGaN alaşımlara ait bu parametrelerin büyüme şartlarından önemli ölçüde etkilendiği bilinmektedir [30-34]. Büyütme şartlarındaki küçük bir farklılık InGaN ince filmlerinin kalitesinin büyük değişkenlik göstermesine neden olabilir. Bundan dolayı büyüme kinetiklerinin anlaşılması, daha kaliteli InGaN filmlerin geliştirilmesi ve üretilmesi için en uygun büyüme parametrelerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. InGaN yapısının temel fiziksel parametrelerindeki belirsizliklere paralel olarak bu alaşımın aktif bölgede kullanıldığı LED, lazer gibi optoelektronik aygıtların ışınım mekanizmaları ile ilgili olarak da halen bir fikir birliğinin sağlandığı söylenemez. Önerilen mekanizmalar arasında en çok kabul görenleri piezoelektrik alandan kaynaklanan kuantum hapseli Stark etkisi (QCSE) [35], band aralığının uç kısımlarında yerleşmiş taşıyıcılar, indiyum bileşim oranında ve kuyu genişliğindeki dalgalanmalar, InGaN kuantum kuyulardaki olağan kusurlar ve/veya, indiyum faz ayrışımı [36,37] ile birlikte yüksek band aralıklı malzemenin bariyerleri tarafından çevrilmiş kuantum noktalar gibi davranan indiyum oranı yüksek nano ölçekli kümeler olmuştur [38]. Diğer taraftan, InGaN epitabaka ve InGaN/GaN kuantum kuyulu yapılarda büyük Stokes kayması çok sık gözlenir. InGaN alaşım sistemlerinde gözlenen Stokes kaymasının fiziksel nedeni olarak alaşım oranındaki dalgalanmalar gösterilmektedir [39,40].

InGaN' in ışınım mekanizmaları; indiyumun molar oranı, büyüme hızı, büyüme sıcaklıkları ve kuyu kalınlığı gibi birçok faktörden etkilenir. Yüksek sıcaklıklarda ( $T > 750$  °C) büyütülen numunelerde band aralığına yakın enerjide yayınım gözlenirken düşük sıcaklıklarda ( $T < 750$  °C) büyütülen numunelerde derin düzey veya safsızlık geçişlerinin baskın olduğu gözlenir [41]. Şekil 1.5' de farklı indiyum oranları için farklı sıcaklıklarda büyütülmüş InGaN numunelerin FL spektrumları gösterilmektedir. Bu spektrumlara göre, InGaN büyüme sıcaklığı azaldığında -bu alaşımdaki In oranının artması anlamına gelir- yayınım şiddetinin azaldığı ve pik çizgi genişliğinin (FWHM) ise arttığı görülmektedir [41-44]. Ayrıca, FL pik enerjiside beklenildiği gibi In oranı arttıkça kırmızıya kaymaktadır.

Genellikle, düşük sıcaklıklarda GaN büyütüldüğünde yüzeyde tutunan türler düşük yüzey mobilitesine sahiptir ki bu da yüzey yapısının çok iyi olmadığını gösterir [45]. InGaN tabakalar GaN tabakalara kıyasla daha düşük büyütme hızı ile büyürler. Düşük büyütme hızları ile kristaldeki yapısal kusurlar en alt seviyeye indirilebilir [45-47]. Lee ve grubu InGaN/GaN kuantum kuyulu yapılar için yaptıkları çalışmalarda büyütme hızı düşürüldüğünde tedirgin edici dislokasyon yoğunluğunun 100 kat azaldığını göstermişlerdir [46]. InGaN büyütme hızına ek olarak bariyer tabakanın büyütme hızı da InGaN kuyuların yapısal kalitesini belirlemede önemli rol oynar. GaN bariyer tabakanın büyütme hızı düşük tutulduğunda kuyuyu oluşturan tabakadaki indiyum bu tabakadan ayrılır dolayısıyla da bu tabakadaki ortalama indiyum oranı azalmış olur. Bu da bileşimsel homojenliğin azalmasına neden olur.

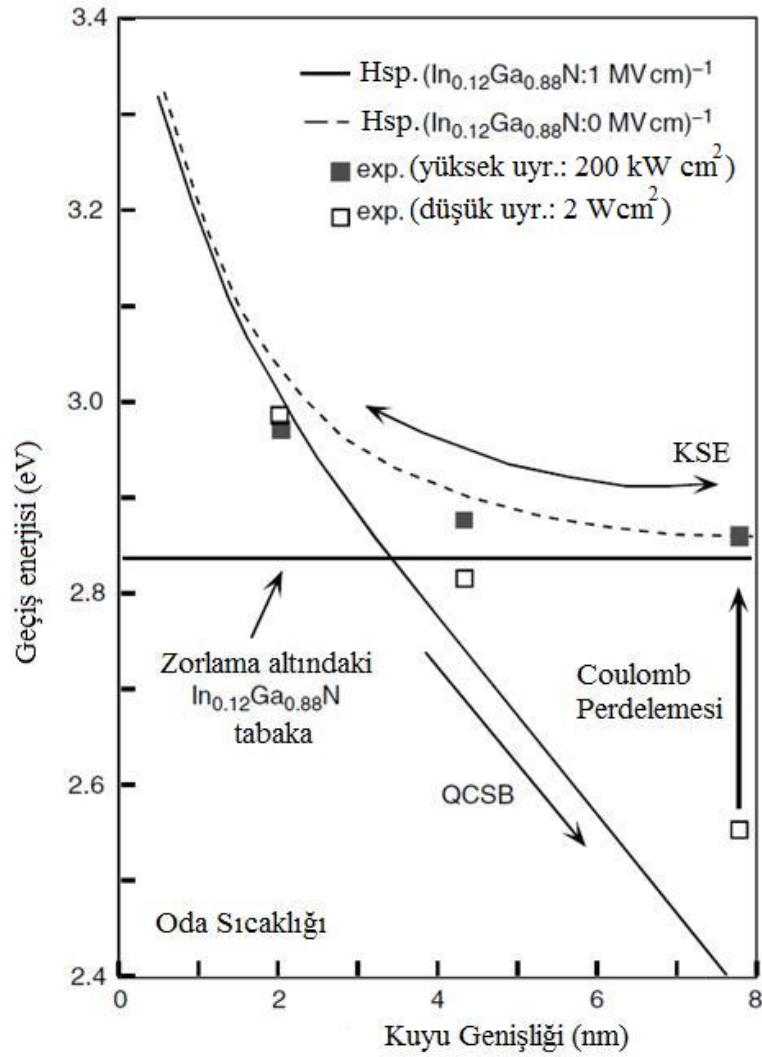


Şekil 1.5 Farklı sıcaklıklarda büyütülen InGaN'nin FL spektrumları, içteki şekil ise çizgi genişliğini göstermektedir [42].

Yüksek büyütme hızlarında indiyumun malzemeye katılması da yüksek olur [45,46,48-51]. Yüksek indiyum oranına sahip InGaN için yapılan düşük sıcaklık FL ölçümlerinde gözlenen yayılım piki derin seviyelerden kaynaklanan geniş bir piktir. Büyütme hızı artırılırsa yüksek indiyum oranına sahip InGaN malzemenin kalitesi düşer. Çünkü alaşımlarda bileşimsel dalgalanmalar oluşur ve indiyum atomlarının etkin yanal mobilitesi azalır [51]. Diğer taraftan büyütme hızı düşük olduğunda malzemenin kalitesinin bir göstergesi olan bileşimin homojenliği artar dolayısıyla da yüksek şiddette fotoluminesans piki gözlenir [46].

InGaN/GaN çoklu kuantum kuyuların yapısal özellikleri aynı zamanda GaN kuantum bariyerin kalınlığından önemli ölçüde etkilenir [52,53]. GaN' ın kalınlığı artırıldığında (5,6 dan 22,4 nm'ye) InGaN/GaN tabakalar arasındaki ara yüzeyde bulunan diklik alçalır. InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulardaki bozulmanın nedeni kuyu içinde biriken zorlamanın oluşturduğu kusurlardır. Buna karşın diğer çalışma grupları GaN bariyer kalınlığının 4-15 nm aralığında olan örneklerin incelemeleri sonucunda üretilen filmlerin yapısal ve optiksel kalitesinin bariyer kalınlığı attıkça iyileştiğini gözlemişlerdir [54].

Işınım dalga boyu, kuantum kuyuların kalınlığına da son derece bağlıdır. [48,49,54-59]. Şekil 1.6, yapısında zorlama bulunan  $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$  kuantum kuyusuna ait oda sıcaklığındaki pik enerjilerini kuyu genişliğinin fonksiyonu olarak göstermektedir. Aynı şekilde teorik olarak yapılan çalışmalarda bulunmaktadır. Şekilde içi dolu ve açık kutucuklar sırasıyla yüksek uyarım düşük uyarım şiddetine karşılık gelen geçiş enerjilerini göstermektedir.



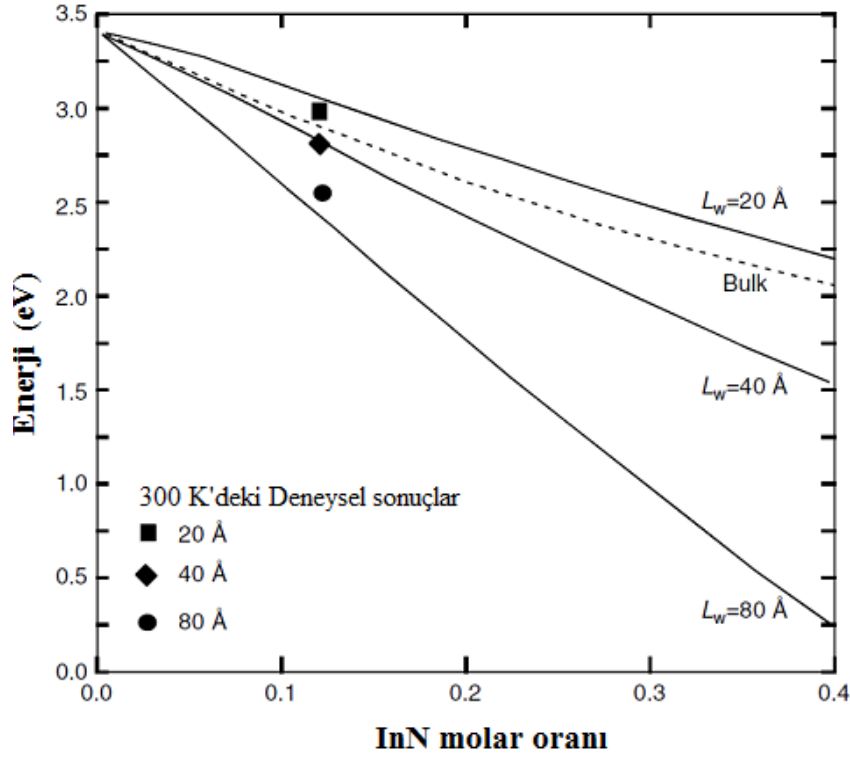
Şekil 1.6. Yapısında 10 periyotlu  $\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{N}/\text{Ga}_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{N}$  çoklu kuantum kuyusu bulunan numuneye ait yayınım enerjisinin kuyu genişliğinin fonksiyonu olarak gösterimi. Sürekli ve açık kareler  $300 \text{ K}$ ' de sırasıyla yüksek ( $200 \text{ kW cm}^{-2}$ ) ve düşük ( $2 \text{ W cm}^{-2}$ ) uyarım şiddet yoğunluklarında alınan ölçümleri göstermektedir. Sürekli ve kesikli çizgiler sırasıyla,  $1 \text{ MV cm}^{-1}$  değerindeki piezoelektrik elektrik alan altında ve herhangi bir elektrik alan olmadığında yapılan hesaplamaları göstermektedir. Aynı zamanda  $\text{Ga}_{0.88}\text{In}_{0.12}\text{N}$  hacimsel tabaka için ölçülen FL pik enerjisi de gösterilmektedir [60].

Kuantum kuyusundaki InN molar oranı 0.12 olduğunda  $\langle 0001 \rangle$  doğrultusundaki piezoelektrik alan değerinin  $1 \text{ MV cm}^{-1}$  değerine kadar çıkabileceği tahmin edilmektedir. Grafikteki sürekli çizgi, zorlamanın oluşturduğu elektrik alanı dikkate alarak yapılmış hesaplamaları göstermektedir. Aynı zamanda elektrik alanın ihmal edildiği geçiş enerjisi hesaplamaları da kıyaslama yapmak için kesikli çizgi ile

gösterilmiştir. Beklenildiği gibi kuyu kalınlığı artırıldığında pik enerjisinde kırmızıya kaymanın arttığı görülmektedir. Kalınlığın 3.5 nm'den küçük olduğu kuyularda kuantum boyut etkisinden kaynaklanan maviye kayma olduğu fark edilebilir. Düşük uyarım şiddetlerinde kuyu tabakasının geçiş enerjisi kalın bir InGaN tek tabakanın geçiş enerjisinden küçüktür. Uyarım şiddeti artırıldığında piezoelektrik etkiden kaynaklanan alanın etkisini bir şekilde dengeleyen Coulomb perdelemesinin bir sonucu olarak geçiş enerjisinde maviye kayma gözlenmektedir.

Şekil 1.7 yapısında zorlama bulunan farklı kuyu genişliklerine sahip InGaN/GaN kuantum kuyusuna ait geçiş enerjilerinin bileşim oranına bağlılığını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi kuantum kuyusundaki In oranı arttıkça beklenildiği geçiş enerjisi kırmızıya doğru kaymaktadır. Oldukça kalın kuyular içeren çoklu kuantum kuyulu yapıların etkin band aralığında QCSE'nin bir sonucu olarak büyük miktarda kırmızıya kayma gözlenmektedir. Hatta bu kuantum kuyulu yapıların aynı bileşim oranlarına sahip hacimsel InGaN yapılardan daha küçük geçiş enerjilerine sahip oldukları da görülmektedir.

InGaN/GaN çoklu kuantum kuyularda InGaN/GaN çiftlerinin sayısının malzemenin optiksel özellikleri üzerinde etkili olup olmadığı konusunda tam bir fikir birliğine varılamamıştır. Bazı gruplar, farklı sayıda kuantum kuyusu içeren numunelere ait FL şiddetinin ve bozunum zamanının sıcaklığa bağlı değişimini incelemişlerdir. Kuyu sayısı artırıldığında FL pikinin genişlediğini gözlemişlerdir [61]. Bunun sebebi olarak da farklı kuyularda ortalama indiyum oranlarının farklı olması gösterilmiştir. Aynı grup, sıcaklık arttığında lüminesans şiddetinin kuyu sayısının az olduğu yapılarda çok olanlara kıyasla daha fazla azaldığını belirtmiştir. Benzer davranış bozunum zamanı içinde gözlenmiştir. Bir diğer grup kuyu sayısı arttıkça FL şiddetinin azaldığını ve yayınım enerjisinde kırmızıya kayma gözlendiğini belirtmiştir [62]. Yüzeyler arasındaki yapının bozulması FL şiddetindeki azalmanın, kuantum kuyularında indiyum oranı yüksek tortuların oluşması ise FL pik enerjisinde görülen kırmızıya kaymanın sebebi olarak gösterilmiştir. Başka bir grup ise kuyu sayısının 6 ya kadar artırıldığı numunelerin yayınım şiddetinde artış, daha fazla sayıda kuyu içeren numunelerin yayınım şiddetinde ise azalma gözlendiğini belirtmişlerdir [63].

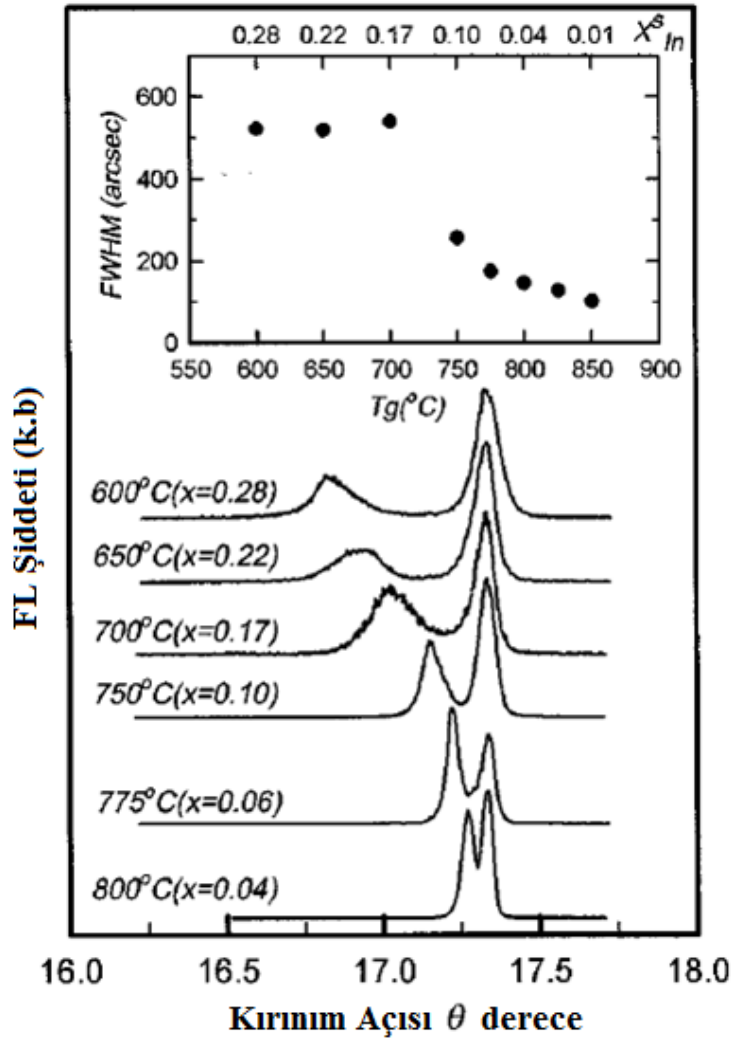


Şekil 1.7. Yapısında zorlama bulunan çoklu kuantum kuyusunun geçiş enerjisinin bileşim oranına bağlılığı kuyu genişliğinin fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Kıyaslama yapmak için InGaN' ın hacimsel yapısında gösterilmektedir [60]

InGaN/GaN çoklu kuantum kuyuların optiksel kalitesini belirlemede diğerlerine nispeten daha önemli rol oynayan bir başka parametre, genellikle GaN'ın tercih edildiği bariyer malzemesidir. Yapılan çalışmalara göre, bariyer malzemenin büyütme sıcaklığının artırılması (700-950 °C) kuyu genişliğini azaltabilir. Bu durumda fotoluminesans pik enerjisi maviye kayma gösterir [64]. Başka bir ifade ile maviye kaymanın sebebi, bariyer büyütme sıcaklığının değiştirilmesiyle ortaya çıkan zorlama ve dolayısıyla da kuyu genişliğinin azalmasıdır. Kuantum kuyulardaki zorlama piezoelektrik alan oluşturacak ve bu durum etkin band aralığını etkileyecektir. Bariyer malzeme kalınlığının optiksel kalite üzerindeki etkileri de araştırma konusu olmuştur. Bu konudaki çalışmaların sonuçlarına göre kalınlık artırıldığında FL pik şiddeti azalmıştır. Aynı zamanda pik daha yayvan hale gelmektedir [52].



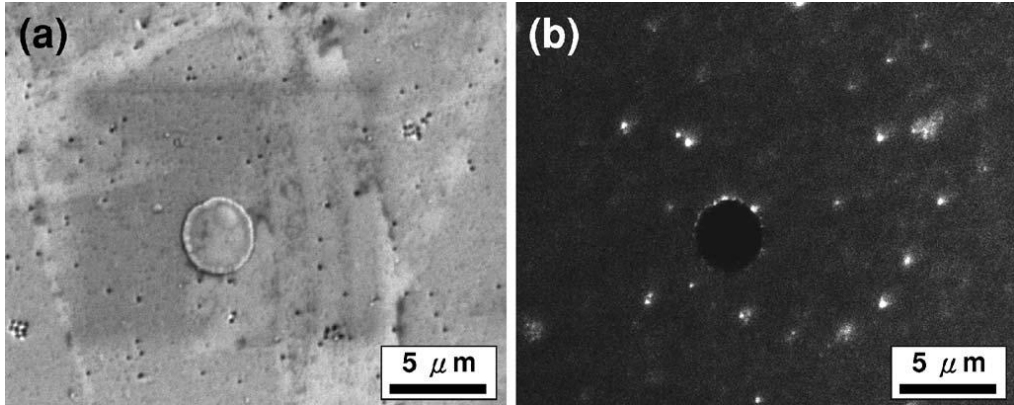
InGaN'ın yapısal özellikleri de ışık yayan cihazların performansını önemli ölçüde etkiler. Kristalin mikroyapısal kalitesi büyüme parametreleri ile yakından ilişkilidir ve dolayısıyla bu parametreler filmin kalitesini önemli ölçüde etkiler. MOCVD tekniği ile yüksek kalitede InGaN tabakalar büyütmek her zaman zordur. Çünkü 500 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde InN termal kararsızlık gösterir. 1000 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yapılan büyütme işlemlerinde ise nispeten daha kaliteli malzeme üretmek mümkündür. Fakat üretilen bu malzeme düşük miktarda InN fazı içerir. Daha düşük sıcaklıklarda (500 °C) InN oranı yüksek malzemeler büyütülebilir. Fakat bu durumda kristal kalitesi düşer [65]. Büyütme sıcaklığı düşürüldüğünde yüksek kalitede malzeme üretmek için InGaN filmlerin büyüme hızı azaltılmalıdır. Büyütme sıcaklığının seçiminde tabaka kalitesi ile InN'in alaşıma katılması arasında tercih yapılması gerektiği açıktır. Kaliteli malzeme üretmek için büyümenin yapılacağı en uygun sıcaklık 500-850 °C aralığıdır. Şekil 1.8' de farklı sıcaklıklarda büyütülmüş InGaN için X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri görülmektedir. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yapılan analizlerde 750 °C ve üstündeki büyüme sıcaklıklarında mikron altı boyutlarda hegzogonal tepe şekillenimli yüzeyler görüldüğü rapor edilmektedir [41].



Şekil 1.8. Farklı sıcaklıklarda büyütülmüş InGaN için X-ışını kırınımı (XRD) [41].

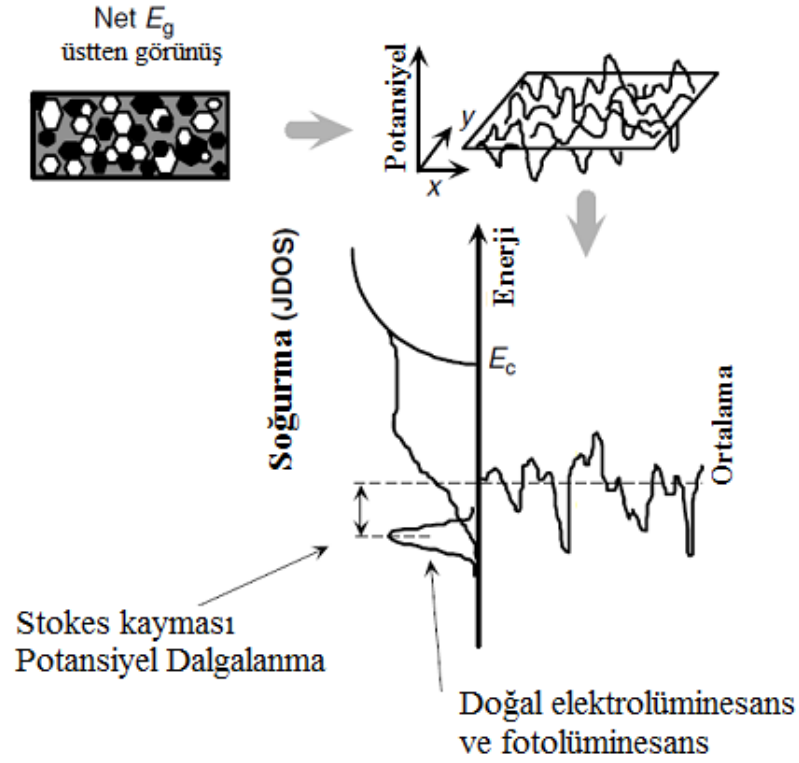
Kuantum kuyulu yapılar için önemli bir diğer kavram, oldukça karışık olan yerelleşmedir. Örneğin, kuantum kuyulu yapılardaki bileşimsel dalgalanmaların hacimsel yapılardaki gibi aynı deseni takip etmesi gerekli değildir. InN molar oranı farklı olan bölgelerdeki enerji farklılığı; alaşım enerji aralığı, piezoelektrik etkinin neden olduğu kuantum hapisli Stark kaymasındaki değişim ve kuyu kalınlık dalgalanmaları gibi etkilerin bir araya gelmesinden kaynaklanır. Farklı mikroskopik teknikler kullanılarak InGaN kuantum kuyularda birkaç nanometre boyutlarındaki InN oranı yüksek bölgeler tespit edilmiştir. Monokromatik katotlüminesans tekniği kullanılarak elde edilen yayılım şiddetindeki değişimler ki bazı bölgelerin karanlık görüldüğü noktalardır tabaka içindeki bileşim oranının homojen olmadığını gösterir. Fakat homojen olmayan bu bölgelerin boyutları, çözünürlüğün kısıtlı

olması ve elektron demeti tarafından oluşturulan elektron ve deşiklerin yan al difüzyonundan dolayı belirlenememektedir. Fakat yine de başarılı çalışmalar bulunmaktadır. Huang ve arkadaşları kendi InGaN numunelerinde In oranındaki dalgalanmalar ve faz ayırımına direkt bir kanıt bulmak için SEM ve katot-lüminesans tekniklerini kullanarak yapısal ve optiksel özellikleri arasında benzeşim olup olmadığı araştırmışlardır [66]. Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) ölçümlerinden görüntülerdeki aydınlık noktaların In oranlarının diğer bölgelerden daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır. Şekil 1.9' da numunenin aynı bölgesinden çekilen SEM ve katot-lüminesans görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerdeki aydınlık noktaların birbirlerine karşılık geldikleri ve uyuşum içerisinde oldukları gözlenmiştir. In oranındaki dalgalanmanın bir sonucu olarak bu aydınlık noktalardan gelen yayınımların daha düşük enerjide fakat daha büyük şiddette oldukları vurgulanmıştır.



Şekil 1.9. (a)  $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$  ince filmin SEM görüntüsü. (b) (a)'nın aynı bölgesinde çekilen katot-lüminesans görüntüsü [66].

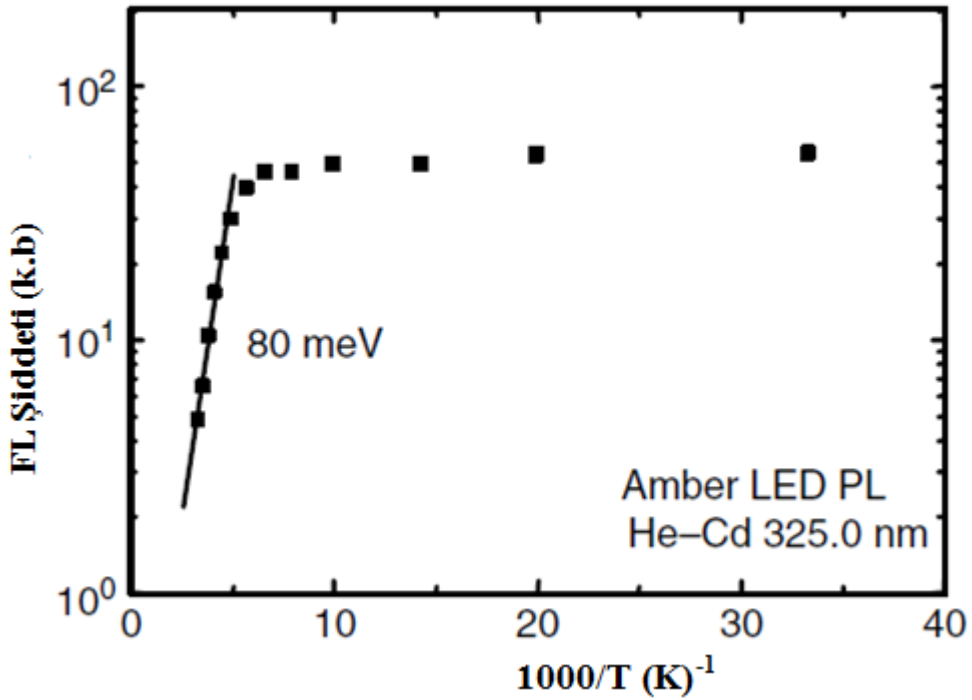
InGaN kuantum kuyulardaki potansiyel dalgalanmalar, Stokes kayması ve konumlanım kuyruk durumları Şekil 1.10'da gösterilmektedir. Nedeninin ne olduğuna bakmayarak homojen olmayan bölgelerin band aralığı üzerindeki etkisinin hacimsel ve aynı zamanda kuantum kuyulu yapılar için Varshni denklemine uygun olmadığı görülmüştür. Bölgesel zorlama ve farklı mertebedeki bölgesel yükler GaN içerisinde homojen olmayan bölgeler oluşturabilmektedir. In içeren alaşımlarda bu durum çok daha yoğun oranlarda gerçekleşmektedir.



Şekil 1.10. InGaN kuantum kuyularında gözlenen bileşimsel düzensizliğin (sol üst), potansiyel dalgalanmalarının (sağ üst), birleşik durum yoğunluğunun (JDOS), Stokes-tipi kaymanın ve yerelleşmiş eksitonların artistik gösterimi [67].

Bu alaşımlar aynı zamanda bileşimsel dalgalanmalar da gösterme eğilimindedir. Eksitonların yerelleşmesi veya bant kuyruğu, Stokes kayması ve ayarlanmış Varshni denklemi  $In_{0.23}Ga_{0.77}N/GaN$  kuantum kuyulu yapıların araştırılmasında kullanılmıştır [68,69]. Sıcaklığa bağlı FL ölçümleri kullanılarak, özellikle kuantum kuyu kalınlığı ile ilişkilendirilen optiksel yayınım enerjisi ve uzaysal  $In$  dalgalanmalarının band aralığı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Band kuyruk modelini temel alarak ve eksitonların durum yoğunluklarının Gaussian dağılımı gösterdiği kabul edilerek kuyu kalınlığı arttığında yerleşme etkileri daha belirgin hale gelmektedir. Kuyu kalınlığı 2.5 nm' ye kadar artırıldığında eksiton yerleşme etkilerinde artış gözlenmiştir. Bunun yanında yerleşme etkisi 2.5 nm'nin üzerindeki değerlerde zayıflamaya başlar ve 5 nm civarında gözlenemez olur. Yapılan bir başka gözleme göre de, kuyu kalınlığının artmasıyla polarizasyon kaynaklı QCSE etkisi FL şiddetinde azalmaya neden olmuştur [68,69]. Numune sıcaklığının fonksiyonu olarak yapılan standart FL ölçümlerinde nitrit yarıiletkenlere özgü sönümlenme davranışı gözlenir.

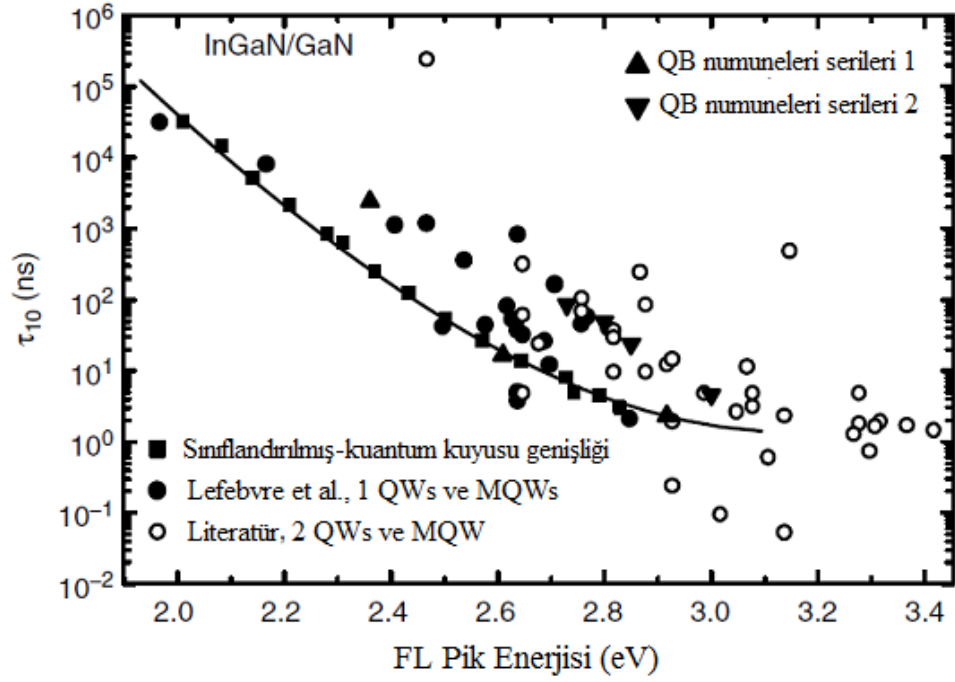
Şekil 1.11’ de görülen grafikte söndürme enerjisi 80 meV olarak hesaplanmıştır. Bu davranış, ışınsal olmayan yeniden birleşim kanallarının ve/veya kesin bir sıcaklık değerinin üzerinde konumlanmış enerji bariyerinin termal olarak aktif edilmesiyle ortaya çıkar. Şekilde gösterilen numune için bu sıcaklık değeri 200 K’ dir. Eğer ikinci durum söz konusu ise bariyerin üzerindeki uyarmalarda ışınsal olmayan veya InGaN gibi direkt band aralığına sahip yarıiletkenler için gerçekleşmesi pek mümkün olmayan düşük oranda yeniden birleşme süreci meydana gelir. Bunlardan farklı olarak ölçülen dalga boyu spektrumunun dışında foto-üretilen taşıyıcıların etkili olduğu farklı bir ışınsal süreç gerçekleşir. Gerçekte üst üste binmiş iki süreci ayırt edebilmek oldukça zordur.



Şekil 1.11 Amber tekli kuantum kuyulu LED tabaka için sıcaklığın fonksiyonu olarak FL şiddeti. FL spektrumunda 200 K üzerinde aktivasyon enerjisi 80 meV olan termal sönüm görülmektedir [70]

İç içe geçmiş polarizasyon ve yerleşme etkilerini tespit edebilmek için amonyak RMBE tekniği ile büyütülen InGaN çoklu kuantum kuyulu yapılar içeren numunelerin zaman-çözümlü FL ölçümleri alınmıştır [71,72]. Ölçülen yarı ömürlerin hiç birisi tek eksponansiyel olarak fit edilememiştir. Onun yerine ölçülen yarı ömürler genişletilmiş eksponansiyel olarak iyi bir şekilde fit edilebilmektedir.

Şekil 1.13 farklı kalınlıkta kuantum kuyulara sahip InGaN çoklu kuantum kuyular içeren yapılar için FL yarı ömür zamanı  $\tau_{10}$ 'nun FL şiddetine karşı çizilen grafiğini göstermektedir. Bu grafikte ayrıca literatürden seçilmiş InGaN kuantum kuyular ve kuantum noktalar içeren numunelere ait veriler de bulunmaktadır. Kuantum kuyusunun boyutları değiştiğinde-yayınım enerjisi değişir- $\tau_{10}$  değeri sürekli exponansiyel bir azalış göstermektedir. Bu azalış değeri  $10^4$  kattan daha fazladır. UV bölgede yayınım yapan numuneler için genel eğilim yarı ömür zamanının birkaç nano saniye olmasıdır. Kırmızı renkte yayınım yapanlar için ise bu zaman daha uzundur (mikro saniye mertebesinde). Kırmızıya kayma, oluşturulan alanın bir sonucu olduğu için bu beklenen bir durumdur. Bu alan aynı zamanda sözü edilen taşıyıcıları kuyu duvarlarının karşılıklı köşelerine doğru iteceği için elektron deşik dalga fonksiyonlarının örtüşmesini azaltır. Başka bir deyişle, elektron deşik dalga fonksiyonlarının örtüşmesinin değerlendirilmesi, sözü edilen örtüşme azalınca azalan titreşim kuvvetinin değerlendirilmesidir. Işınsal olarak yeniden birleşim sürecinde, titreşim kuvvetinin artması yaşam süresinin daha kısa olması demektir. Eğer kuyu genişliği tek değişken ise, eksitonlar için hesaplanan titreşim kuvvetinin tersinin geçiş enerjisine karşı çizilen grafiği verilerle oldukça uyumludur. Bu durum Şekil 1.12'de sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Dış kabuk yaklaşımının kullanıldığı [71]  $2.45 \text{ MVcm}^{-1}$  değerindeki boyuna elektrik alanı içeren hesaplamalar, bu numune için ölçülen Stokes kayması ile oldukça uyumludur [73]. Bu durum, taşıyıcı yarı ömür zamanı  $\tau_{10}$ 'nun kuyu kalınlığına bağlılığının QCSE ile açıklanabileceğini basitçe gösterir. Daha kötü bir durum, üretilen taşıyıcılar piezoelektrik alanı perdelediğinde ölçülen yarı ömürlerin uyarım şiddetine bağlı olmasıdır ki bu da yarı ömür zamanının aynı zamanda kuyulardaki taşıyıcı konsantrasyonunun bir fonksiyonu olması demektir



Şekil 1.12 InGaN/GaN kuantum kuyular ve kuantum kutular için 75 nolu referans ve onun içerisinde verilen diğer referansdaki FL yarı-ömür zamanlarının derlemesi. Bu referans dışındaki literatürde,  $\tau_{10}$  üstel olarak verilen yarıömür zamanı  $\tau$  kullanılarak  $\tau_{10} = \tau \ln 10$  eşitliği ile elde edilmiştir. Sürekli eğri bu referantaki yazarların sınıflandırılmış kuantum kuyu genişliği için kendi hesapladıkları sonuçları göstermektedir [72].

InGaN/GaN kuantum kuyular için tüm band arası soğurma spektrumunun hesaplanarak dar kuyulardaki etki için bir tez ileri sürüldü. Bu teze göre e1h1 temel durum geçişi izinli bir geçiştir ve sistemin başlangıcındaki keskin soğurma bu geçişe karşılık gelir [72]. Dolayısıyla 0.12 eV'lik Stokes kaymasının sebebi tam olarak yerleşmeye dayandırılır. Aslında Stokes kayması ve optiksel çizgi genişliğinin her ikisi, farklı yerleşme bölgelerinde elektron ve deşikler için bazı enerji dağılımlarının varlığına karşılık gelir. Kuyu kalınlığının artmasıyla e1h1 geçişinin gerçekleşme ihtimali azalır ve soğurma başlangıcı uyarılmış durumlar arasında çoklu geçişler içerir. Soğurma başlangıcının hemen hemen sabit bir enerji değerinde kaldığı kuyu kalınlığı ile şeklinin değiştiğine dikkat etmek gerekir. e1h1 geçişi dar kuyular için dar bir şekle sahipken kalın kuyular için yayvan bir şekle sahiptir. FL enerjisi ikinci dereceden bağlılığın olduğu bölgelerden önce kuyu kalınlığına bağlı olarak hemen hemen lineer bir azalma gösterir ve yerleşme etkisi dikkate

alındığında, 0.12 eV'lik sabit değer azalarak geçiş enerjisi e<sub>h1</sub> geçiş enerjisine eşit olmaya başlar.

Bu çalışmada, fotoluminesans, elektrolüminesans, akım-voltaj ve x-ışını kırınımı teknikleri kullanılarak Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde (NANOTAM) (0001)-doğrutuda safir alt tabaka üzerine MOCVD tekniği ile büyütülen görünür/mor ötesi bölgelerde ışık yayan InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulu diyotlar incelenmiştir. Bu çalışma için LED'lerin aktif bölgelerinin büyütme sıcaklıkları 650-730 °C aralığında olan altı adet numune tasarlandı. Diğer büyütme şartları mümkün olduğu kadar sabit tutulmaya çalışıldı. Daha sonra bu numunelerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans ölçümleri alındı. Numunelerin FL spektrumlarında gözlenen InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin, şiddetinin ve çizgi genişliklerinin örgü sıcaklığına bağlı değişimleri temel modellerde desteklenerek incelendi. Dolayısıyla, InGaN/GaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığının ve dolayısıyla indiyum alaşım oranının bu parametreler üzerindeki etkisi araştırılmış oldu. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildi. Çalışmanın ikinci kısmında fabrikasyonu yapılan iki LED örneğimizin oda sıcaklığında sürekli modda sürücü akımına bağlı elektrolüminesans spektrumları ile birlikte bunlardan birinden tel bağlantıları alınarak örgü sıcaklığına bağlı akım-voltaj ve elektrolüminesans özellikleri detaylı olarak incelendi.

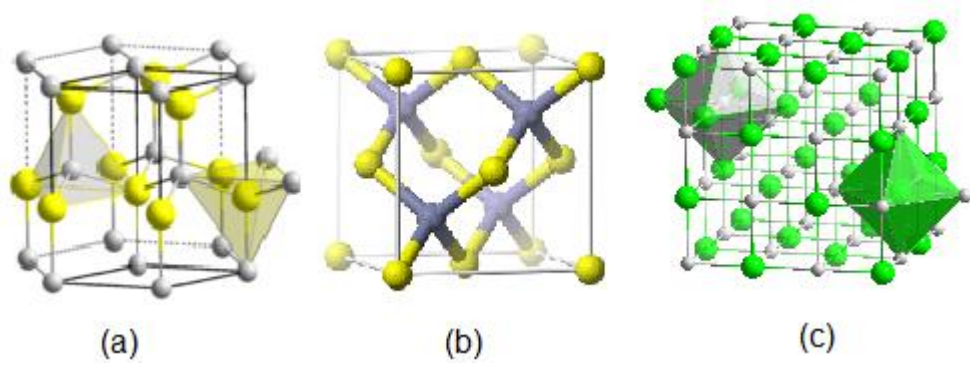


## 2. NİTRİTLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

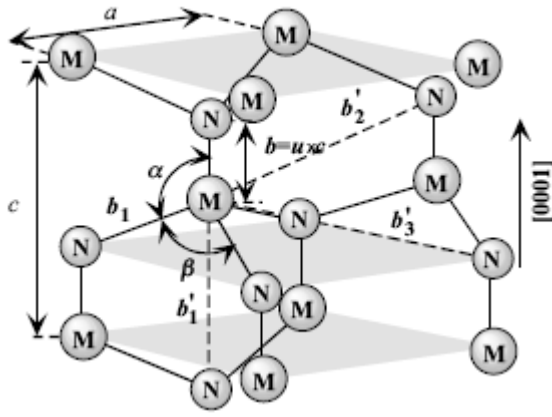
Nitrit temelli aygıtların performanslarının artırılması ve buna bağlı olarak da tasarım parametrelerin optimizasyonu için AlN, GaN ve InN yarıiletkenlerin temel bazı fiziksel özelliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Bu bölümde ilk olarak AlN, GaN ve InN yarıiletkenlerin kristal yapısı ile birlikte elektriksel, mekanik, termal özellikleri bir çizelge halinde verilecektir. Daha sonra nitrit temelli yapılarda gözlenen kusurlardan ve dislokasyonlardan bahsedilip heteroeklem yapılarda oluşan polarizasyon ile ilgili bilgi verilecektir. İncelediğimiz konunun gereği olarak nitritlerin (özellikle GaN), farklı şartlarda büyütülen InGaN epitabaka ve InGaN/GaN heteroeklem ve kuantum kuyulu yapıların optiksel özellikleri detaylı bir şekilde aktarılacaktır.

### 2.1. Kristal yapısı

III-Nitrit grubu yarıiletkenler (GaN, AlN ve InN), wurtzite, zincblende ve NaCl (kaya tuzu) yapıda kristalleşirler (Şekil 2.1). Normal şartlar altında hacimsel yapıdaki AlN, GaN, InN için termodinamik olarak daha kararlı olan yapı wurtzite yapıdır. Zincblende yapıda kristalleşen GaN ve InN; Si, SiC, MgO, GaAs gibi kübik yapıdaki alt tabakalar üzerine (011) kristal düzleminde epitaksiyel olarak büyütülerek kararlı hale gelebilir. Kaya tuzu yapısı ise ancak yüksek hidrostatik basınç altında kararlı olabilir. Şekil 2.2 ise wurtzite yapı için örgü parametreleri, birinci yakın komşuluk, ikinci yakın komşuluk ve atomlar arası açılar gösterilmektedir.



Şekil 2.1 (a) Wurtzite, (b) zincblende ve (c) NaCl (kaya tuzu) yapıların şematik gösterimi.



Şekil 2.2 Wurtzite metal nitrit yapısının şematik gösterimi ( $a, c$  ve  $u$  örgü parametreleri,  $b (= uc)$  en yakın komşu uzaklığı,  $b_1, b_2, b_3$  üç tip ikinci yakın komşu uzaklığı,  $\alpha$  ve  $\beta$  atomlar arası açığı ifade etmektedir).

Wurtzite yapı, iki sıkı paketli altıgen yapının (hcp) iç içe geçmesi ile oluşur. Her bir hücrede dört atom bulunur. Wurtzite yapının birim hücresi altıgen yapıda olduğu için  $c$  ve  $a$  olarak adlandırılan iki örgü parametresi vardır. Bunlardan  $a$  taban düzlemindeki parametre,  $c$  ise buna dik düzlemdeki parametredir.  $c$  parametresi birim hücrenin yüksekliğine karşılık gelir. Bu yapı için bir diğer parametre ise anyon ve katyon arasındaki bağ uzunluğu  $b$ 'nin (veya en yakın komşular arası bağ uzunluğu)  $c$ 'ye oranı olan  $u$  parametresidir.  $u = 0.375$  ve eksenler oranı  $c/a = 1.633$  değerlerini aldığı anda ideal bir wurtzite yapıdan söz edilebilir. Tüm wurtzite yapıdaki III nitritler için gözlenen  $c/a$  oranı ideal değerinden küçüktür.

$c/a$  oranı ve  $u$  değerinin değişmesinden dolayı ideal değerden sapıldığı düşünülebilir.  $c/a$  oranı ile  $u$  değeri arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu oran azaldığında, dört tetrahedral uzaklığı sabit bir değerde tutmak için tetrahedral açıları bozarak  $u$  değeri artar.

Kristal örgü parametresi genellikle oda sıcaklığında yüksek çözünürlü X-ışını kırınım (XRD) tekniği ile belirlenir. Üçlü veya dördü bileşiklerde bu teknik aynı zamanda alaşımdaki alaşım oranının belirlenmesinde kullanılır. Bununla beraber, epitabakalar yabancı alttabakalar üzerine büyütüldüğünde zorlamalar, örgü parametresi hesaplarına dahil edilmelidir. Örgü parametresi, (i) serbest elektron yoğunluğu, (ii) yabancı atom ve kusurların yoğunluğu, (iii) dış zorlamalar (örnek olarak alttabanın neden olduğu zorlamalar), (iv) sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır [74]. Çizelge 2.1'de AlN, GaN ve InN için deneysel olarak gözlenen örgü parametreleri, en yakın ve ikinci yakın komşuluk uzaklıkları ve bağ açıları verilmiştir [75].  $c/a$  oranı, bileşenlerin elektronegatiflik farkı ile ilişkili olduğundan en büyük farka sahip bileşenlerde  $c/a$  oranının, ideal değerinden daha büyük sapmalar gözlenmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi GaN için  $c/a$  oranı ve  $u$  değeri 1.634 ve 0.377 olarak ölçülmüş olup ideal değere yakındır. Diğer taraftan  $c/a$  oranı 1.606 ve  $u$  değeri 0.382 olarak ölçülen AlN ideal değerlerden kayda değer bir sapma göstermektedir. İncelenen örneklerdeki homojenlik, zorlama ve bunun kısmi gevşemesi ve yüksek konsantrasyonlu yapısal kusurların farklılıklarından dolayı literatürde Çizelge 2.1' de verilen değerlerden farklı değerler de bulunmaktadır [76-81].

## 2.2. Diğer Fiziksel Özellikler

### 2.2.1. Mekanik Özellikler

Malzemelerin mekaniksel özellikleri sertlik, esneklik sabitleri, hacimsel modül, Young modülü, yield kuvveti... gibi birçok farklı kavram içerir. Altıgen yapılar  $C_{11}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$  ve  $C_{44}$  olarak bilinen 5 tane bağımsız esneklik sabitine sahiptir.  $C_{11}$  ve  $C_{33}$  sırasıyla [1000] ve [0001] doğrultularındaki boyuna optik modu

verir.  $C_{44}$  ve  $C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$  elastik sabitleri sırasıyla [0001] ve [1000] yönlerinde yayılan enine modların ses hızından belirlenebilir.  $C_{13}$  ise [0011] gibi simetrisi düşük doğrultuda yayılan modların hızındaki diğer dört modülün kombinasyonu ile hesaplanır [82].

Grup III-Nitrit tabanlı uygulamalar malzemenin termal iletkenliğine bağlıdır ve termal özelliklerin anlaşılabilmesi için tek kristaldeki titreşimsel modların iyi bilinmesi gerekir. Nitritler için merkez bölgedeki ve bazı sınır bölgelerindeki fonon modlar kızılötesi saçılma ve Raman spektroskopisi yöntemleri ile belirlenebilir. Grup teorisine göre sıkı paketli altıgen yapılar 8 moda sahiptir. Bunlar 2A1, 2E1, 2B1 ve 2E2 modlarıdır. Bu modlardan 2 tanesi akustik diğerleri ise optiksel moddur. Wurtzite yapının birim hücresinde 4 atom olduğu için 3'ü akustik (1 LA ve 2 TA), 9'u (3 LO ve 6 TO) optiksel olmak üzere toplam 12 moda sahiptir.

Çizelge 2.1 AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler.

Örgü parametreleri	AlN	GaN	InN
$a$ (Å)	3.110	3.199	3.585
$c$ (Å)	4.982	5.185	5.760
$c/a$	1.606	1.634	1.618
$u$	0.382	0.377	0.379
$b$ (Å)	1.907	1.971	2.200
$b_1$ (Å)	1.890	1.955	2.185
$b_1'$ (Å)	3.087	3.255	3.600
$b_2'$ (Å)	3.648	3.757	4.206
$b_3'$ (Å)	3.648	3.749	4.198
$\alpha$	108.19	109.17	108.69
$\beta$	110.73	109.18	110.24

### 2.2.2. Elektriksel Özellikler

GaN ve diğer nitritlerin elektriksel özellikleri de oldukça etkileyicidir. Bu materyal grubu geniş ve direkt band aralığına, yüksek kırınım voltajlarına, yüksek sürüklenme hızlarına ve yüksek mobilite değerlerine sahiptir. Ayrıca uygulama alanına göre yeterli seviyede n-tipi ve p-tipi iletkenlikte sağlanabilmektedir. Elektriksel özelliklerin belirlenmesinde Hall etkisi, Shubnikov de Haas etkisi (SdH) ve akım-voltaj (I-V) ölçümleri gibi teknikler kullanılmaktadır. Hall etkisi tekniği en çok kullanılan teknik olup yarıiletkenin taşıyıcı yoğunluğu, tipi ve mobilitesi hakkında bilgi verir. SdH yüksek manyetik alan etkisi altında ki elektriksel direnç olup bu yöntemle taşıyıcı yoğunluğu, etkin kütle, taşıyıcı mobilitesi belirlenebilir. I-V ölçümleriyle de üretilen Schotky ve/veya p-n eklemine akım voltaj karakteristiği incelenir.

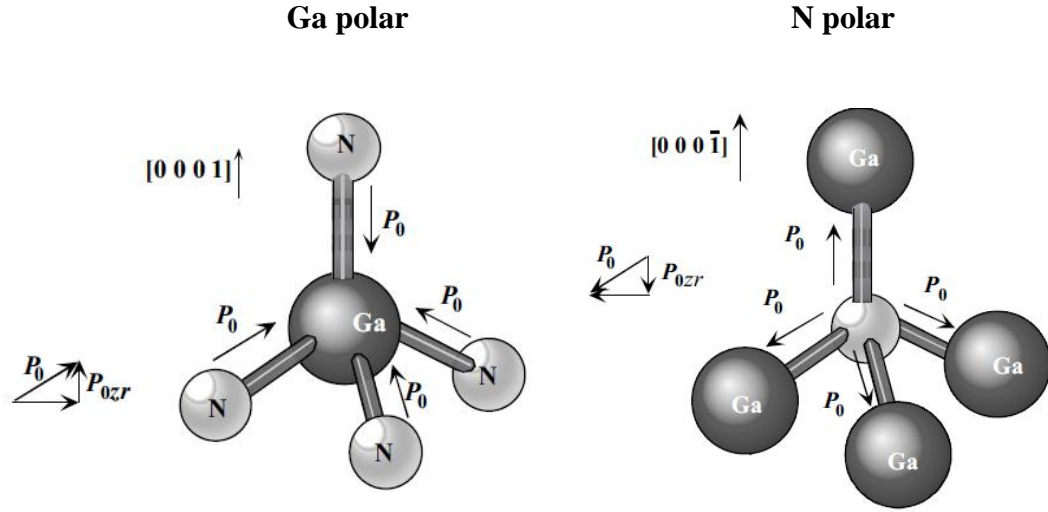
### 2.2.3. Termal Özellikler

Termal genleşme Kelvin başına örgü parametresindeki değişimdir. Yarıiletkenlerin örgü parametreleri sıcaklığa bağlıdır ve  $\Delta a/a$  ( $\alpha_a$ ) ve  $\Delta c/c$  ( $\alpha_c$ ) termal genleşme katsayısı ile ifade edilirler. Termal genleşme katsayısı stoichiometriye, kusurlara ve serbest taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır. GaN ve diğer III-nitrit yarıiletkenler elektronik ve optoelektronik aygıtlarda yüksek güç/yüksek sıcaklıkta kullanılacağı zaman termal iletkenlik, gerçekten büyük önem taşır. Kinetik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir materyal özelliği olan termal iletkenlik ( $\kappa$ ) titreşim, dönme ve serbestlik elektronik derecesi ile belirlenir. Isı transportu genelde fonon-fonon Umklapp (*kaydırma*) saçılması ve fonon saçılması (boşluklar, oksijen gibi safsızlıklar ve izotop (kütle) dalgalanmalar gibi nokta ve çizgisel kusurlar tarafından oluşan) ile belirlenir. Çizelge 2.2 Birçok deneysel teknik ve teorik hesaplama sonucunda elde edilen wurtzite yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreleri göstermektedir.

#### 2.2.4. Polarizasyon

Katılarda atomik seviyede üç çeşit polarizasyon vardır. Birincisi, polar moleküllerin elektrik alan ile kısmi ya da tamamen düzenlenmesi sonucu oluşan polarizasyon; ikincisi, tamamen veya kısmi iyonik kristallerde pozitif ve negatif iyonların elektrik alan altında göreceli hareketleri sonucu oluşan dipolün indüklediği iyonik polarizasyon; üçüncüsü ise, tüm dielektriklerde mevcut olan elektronik polarizasyondur. Polarizasyon etkisi III-V nitrit yarıiletkenler grubunda gerek bunların temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde gerekse alan etkili transistörler, LED'ler gibi aygıt uygulamalarında son derece büyüktür. Nitrit yarı iletkenlerde terslenim simetrisi yoktur ve  $\langle 0001 \rangle$  doğrultusunda zorlamaya maruz kaldıklarında piezoelektrik etki ortaya çıkar [83]. Piezoelektrik (*PE*) etkinin iki bileşeni vardır. i) örgü uyumsuzluğundan kaynaklanan uyumsuzluk zorlaması ii) alt tabaka ile üzerine büyütülen tabakaların termal katsayıları arasındaki farktan kaynaklanan termal zorlama. Doğal polarizasyon ise farklı elektronegatifliğe sahip iki nitrit yarıiletkenin arayüzeylerinde oluşur. Etkisini arayüzeyde biriken polarizasyon yükü olarak gösterir. Dolayısıyla zorlamanın bulunmadığı yapılarda bile iki tabakanın doğal polarizasyonlarındaki farktan dolayı arayüzeylerinde bir polarizasyon yükü oluşur. Grup III-nitritlerin doğal polarizasyonlarının işareti negatiftir ve ikili bileşimlerdeki büyüklüğü AlN, InN ve GaN şeklinde sıralanır.

Polarizasyonun yönü dolayısıyla kristalin polarlığı, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi *c*-doğrultusundaki bağların katyondan anyona mı yoksa anyondan katyona mı olduğu belirler. Nitrojen  $\langle N \rangle$  yüzü düzlemden galyum  $\langle Ga \rangle$  yüzü düzleme doğru  $\langle 0001 \rangle$  eksenindeki noktalar pozitif *z*-yönü olarak kabul edilir. Başka bir deyişle, *c*-doğrultusundaki bağların Ga (katyon) atomundan N (anyon) atomuna doğru olduğu kabul edilirse polarlık, Ga polarlığı olarak adlandırılır ve *z*-yönündeki bu yönelim genelde pozitif kabul edilir. Benzer şekilde tersi durumu düşündüğümüzde *c*-doğrultusundaki bağların anyon N atomundan katyon Ga atomuna doğru olduğu kabul edilirse polarlık, N polarlığı olarak kabul edilir ve *z*-yönündeki bu yönelim genelde negatif olarak kabul edilir.



Şekil 2.3. Düzlem içinde homojen polarizasyona sahip Ga- ve N-polar tetrahedron GaN'ın top ve çubuk gösterimi. Ga-polar için net polarizasyon  $[001]$  yönünde iken N-polar GaN için  $[00\bar{1}]$  doğrultusundadır [1].

İlk olarak PE polarizasyona baktığımızda, piezoelektrik tensörünün üç bağımsız bileşeni olduğunu görüyoruz. Bunlardan ikisi c-ekseni boyunca indüklenen polarizasyon büyüklüğünü, diğeri de taban düzlemindeki polarizasyonun büyüklüğünü belirlemektedir. Dolayısıyla, piezoelektrik polarizasyonun büyüklüğü;

$$P_{PE} = e_{33}\varepsilon_z + e_{31}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (2.1)$$

ilişkisi ile verilir. Burada  $\varepsilon_z = \frac{c - c_0}{c_0}$  c-ekseni doğrultusundaki zorlamayı,  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{a - a_0}{a_0}$  ise izotropik durum için taban düzlemindeki zorlamayı göstermektedir.  $e_{33}$  ve  $e_{31}$  piezoelektrik katsayıları ise,  $a$  ve  $c$  de yapısında zorlama bulunan tabakanın örgü sabitlerini vermektedir. Hegzagonal yapıdaki kristal sistemlerinde örgü sabitleri arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilir;

$$\frac{c - c_0}{c_0} = -2 \frac{C_{13}}{C_{33}} \frac{a - a_0}{a_0} \quad (2.2)$$

Burada  $C_{13}$  ve  $C_{33}$  elastik sabitlerdir. Denklem (2.1) ve denklem (2.2)'yi kullanarak c-ekseni yönündeki piezoelektrik polarizasyon

$$P_{PE} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} \left( e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir. Nitritlerin InGaN veya  $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$  gibi üçlü ve dördü bileşiklerinde piezoelektrik polarizasyon, Vegard yasası çerçevesi içinde lineer interpolasyonu ile

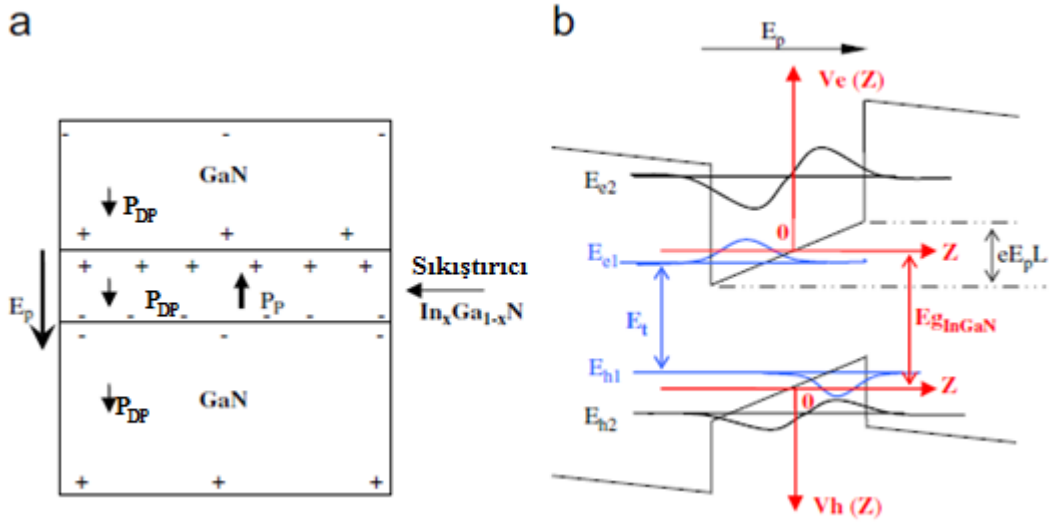
$$\vec{P}_{PE} = \left[ \vec{e}_{AlN} + (-x) \vec{e}_{InN} + (-x-y) \vec{e}_{GaN} \right] \vec{\epsilon} \quad (2.4)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada  $\vec{e}$  ve  $\vec{\epsilon}$  piezoelektrik ve zorlama tensörlerini göstermektedir [84]. İkili nitritlerin (GaN, InN ve AlN) kendiliğinden polarizasyon değerleri Çizelge 2.2 de verilmektedir. GaN'ın AlN ve/veya InN ile üçlü veya dördü alaşım yaptığı bileşiklerde ise bunların kendiliğinden polarizasyonları Vegard's yasası yardımıyla ikili bileşiklerin lineer kombinasyonu şeklinde hesaplanabilir. Örneğin  $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$  alaşımı için polarizasyon

$$\vec{P}_{KP} = xP_{AlN}^{KP} + yP_{InN}^{KP} + (-x-y)P_{GaN}^{KP} \quad (2.5)$$

eşitliği ile hesaplanır. GaN tabaka üzerine InGaN tabaka büyütüldüğünde iki tabakanın doğal polarizasyonları arasındaki fark oldukça küçük olur. Şekil 2.4' de görüldüğü gibi GaN üzerine büyütülen InGaN tabaka sıkıştırıcı bir zorlama altında olacaktır. Bu durumda piezoelektrik polarizasyon doğal polarizasyondan büyük olur ve yönleri birbirine zıttır (antiparalel).





Şekil 2.4 (a) Ga-polar bir psödomorfik InGaN/GaN kuantum kuyusunda piezoelektrik ve kendiliğinden polarizasyonun yönleri, indüklediği bağlı yükler ve iç alan şematik diyagramı, (b) Polarizasyonun indüklediği elektrik alandan  $E_p$  alınanda etkisini gösteren InGaN/GaN kuantum kuyusunun uzaysal enerji profilinin şematik gösterimi. İletim ve valans bantın kuantize olmuş taban ve 1. uyarılmış durumların enerjileri ve dalga fonksiyonları da gösterilmektedir.

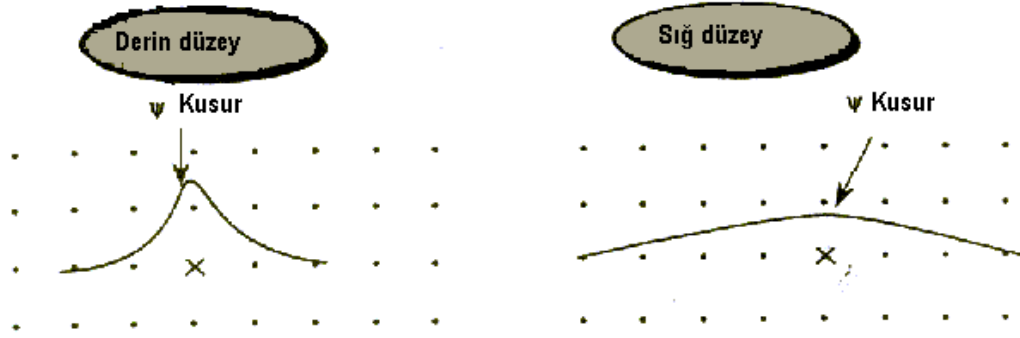
Çizelge 2.2: Wurtzite yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler [85]

Parametreler	AlN	GaN	InN
<b>Optiksel Özellikler</b>			
Oda sıcaklığındaki enerji bant aralığı, $E_g$ ( $\Gamma$ ) (eV)	6.2	3.42	0.78
Kırılma indisi, $n$	2.15	2.35	2.80
Dielektrik sabitleri	$\epsilon_r=8.5$ $\epsilon_{\infty}=4.77$	$\epsilon_r=10.4$ $\epsilon_{\infty}=5.33$	$\epsilon_r=15.3$ $\epsilon_{\infty}=8.4$
<b>Polarizasyon</b>			
$e_{33}(C/m^2)$	1.46	0.73	0.97
$e_{31}(C/m^2)$	-0.60	-0.49	-0.57
$\epsilon_{11}$	9.0	9.5	-
$\epsilon_{33}$	10.7	10.4	14.6
$P_{KP}(C/m^2)$	-0.081	-0.029	-0.032
<b>Elektriksel Özellikler</b>			
Elektron etkin kütlesi, $m^*$ (kg)	0.33 $m_0$	0.20 $m_0$	0.11 $m_0$
Oda sıcaklığında elektron mobilitesi, $\mu$ ( $cm^2/V.s$ )	300	1500	100-2100
Doyum sürüklenme hızı, $v_s$ (cm/s)	1.4x10 <sup>7</sup>	2.5x10 <sup>7</sup>	2.5x10 <sup>7</sup>
<b>Mekanik Özellikler</b>			
$C_{11}$ , (GaP)	345-411	296-396	190-271
$C_{12}$ , (GaP)	125-149	120-160	104-124
$C_{13}$ , (GaP)	90-127	80-158	92-121
$C_{33}$ , (GaP)	373-395	209-405	182-224
$C_{44}$ , (GaP)	96-125	81-105	10-48
Poisson oranı, $\nu$	0.216	0.372	--
Hacim modülü, $B$ (GaP)	160-218	195-245	125-147
Young modülü, $E$ (GaP)	295-374	150	--
Kesme modülü,	117-154	121	43
Akma dayanımı, $\sigma_y$ (GaP)	1000 <sup>0</sup> C'de 0.3	900 <sup>0</sup> C'de 0.1-0.2	--
Sertlik (GaP)	Mikro; 17.7 Nano; 18	Mikro; 10.2 Nano; 18-20	Nano; 11.2
Elektronik deformasyon potansiyel, $E_{ds}$ (eV)	9.5	8.54	7.10
Boyuna optik fonon enerjisi, $\hbar\omega_{LO}$ (meV)	99.2	91.2	73
<b>Termal Özellikler</b>			
Isısal genleşme ( $K^{-1}$ )	$\Delta a/a=4.2x10^{-6}$ $\Delta c/c=5.3x10^{-6}$	$\Delta a/a=5.59x10^{-6}$ $\Delta c/c=3.17x10^{-6}$	$\Delta a/a=2.85x10^{-6}$ $\Delta c/c=3.75x10^{-6}$
Isısal iletkenlik, $\kappa$ (W/cmK)	3.2	2.3	0.8
Oluşum ısısı, $\Delta H_{298}$ (kcal/mol)	-64	-26.4	-4.6
Erime noktası ( <sup>0</sup> C)	3000	>1700	1100

### 2.3. Noktasal ve Çizgisel Kusurlar

Yarıiletkenler hem kristalin termodinamik davranışları nedeniyle (doğuştan kusurlar) hem de büyütme işlemi sırasında ortaya çıkan safsızlıkların varlığı nedeniyle bazı kusurlar içerir. Kusurların oluşumu büyütme şartları, katkılama seviyesi, safsızlıkların cinsi, alttabaka ve tampon tabaka gibi faktörlere bağlıdır [86]. Kusurlar genellikle noktasal kusurlar ve çizgisel kusurlar (dislokasyon) olarak sınıflandırılırlar.

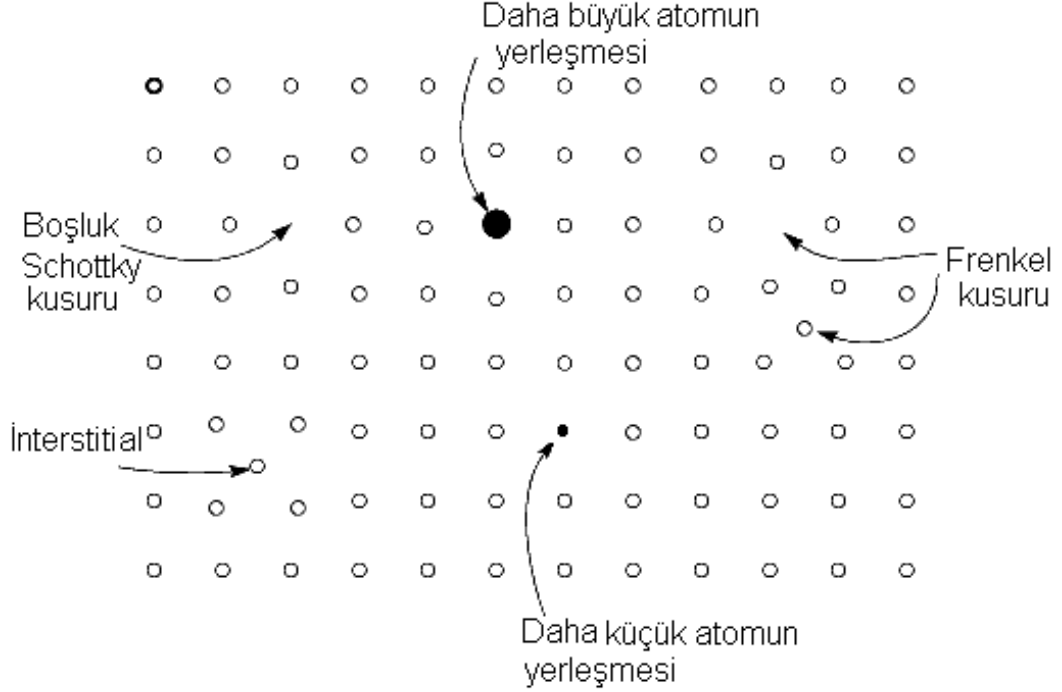
Noktasal kusurlar kristalin periyodikliğini yalnızca bir veya birkaç birim hücrede etkileyen kusurlardır. Bu kusurların kristal içerisindeki dağılımları Şekil 2.5’de görüldüğü gibi derin ve sığ kusurlar olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.5 (a) Derin seviye: dağılım, kristal potansiyelinden bir ya da birkaç birim hücrelik farklılık göstererek bir potansiyel profili oluşturmaktadır (b) Sığ seviye: daha fazla birim hücreyi kapsayan bir bölgede potansiyel profili oluşturmaktadır.

Noktasal kusurlar, örgüde atom eksikliğinden kaynaklanan boşluk kusurları (*Schottky kusuru*), bileşik kristallerde bir ev sahibi atomun diğer ev sahibi atomun yerine yerleşmesi ile zıt-yerleşme kusurları, örgü noktalarının arasına yerleşmesi ile arayer kusurları (*interstitial*), istenen ve istenmeden oluşan safsızlık kusurlarını içerir. İyonik kristallerde boşluk kusuru ile orataya çıkan + veya – iyon eksikliği arayer kusuru tarafından dengelenirse (*nötr*) bu kusur çiftine Frenkel kusuru denir. Nokta kusurların tipi, enerji seviyeleri ve yoğunlukları deneysel olarak Hall ölçümü ve fotoluminesans gibi elektriksel ve optiksel

metodlarla belirlenebilir. Şekil 2.6'da noktasal kusurların şematik gösterimi verilmiştir.

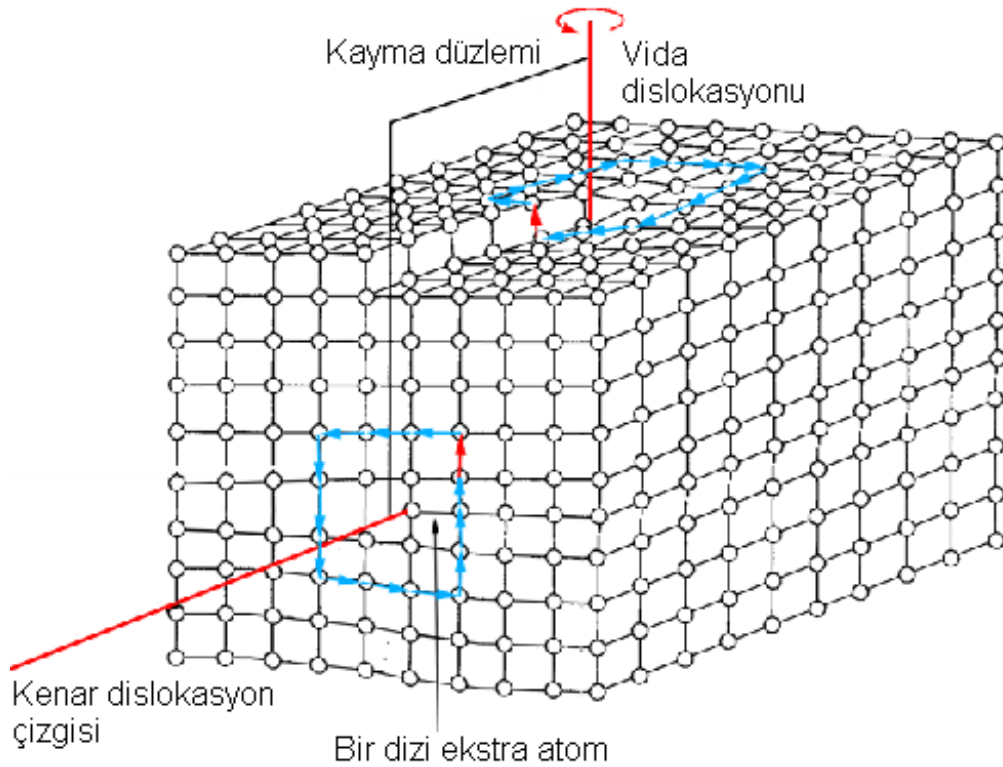


Şekil 2. 6 Noktasal kusurların şematik gösterimi.

Katkılama, boşluk kusurunu artırır ve n-tipi GaN'da galyum boşlukları ( $V_{Ga}$ ) baskın kusur olurken, p-tipi GaN'da nitrojen kusurları ( $V_N$ ) baskın olur. n-tipi GaN'ta Fermi seviyesi iletkenlik bandına yakın olduğunda  $V_{Ga}$  düşük formasyon enerjisine sahip olup, alıcı (*akseptor*) gibi davranır [87,88]. Nitrojen boşluğu durumunda ise Ga-Ga arasında metalik bir bağ oluşur ve enerji seviyeleri iletim bandının üstüne çıkar. Formasyon enerjileri Fermi enerjisi ile artan  $V_N$  ise verici (donor) gibi davranır [89]. Ga ve N arayer kusurları büyük formasyon enerjisi gerektirmektedir. Ga zıt-yerleşme ve N zıt-yerleşme kusurları GaN yapısında mevcut olan diğer içsel kusurlar olup GaN içerisinde birkaç derin seviyeler oluştururlar. Safsızlık durumunda ise genelde C, Si ve Ge safsızlıkları Ga tarafında ve O, S ve Se safsızlıkları N tarafında sığ vericiler gibi davranırken, Be, Mg, Ca, Zn ve Cd safsızlıkları Ga tarafında ve C, Si ve Ge safsızlıkları N tarafında sığ alıcı gibi davranırlar [88]. Bunlara ek olarak doğal kusurlar ve safsızlıklar arasında özellikle hidrojen içeren kompleksler oluşabilir ve bu

kompleksler derin seviyeler oluşturabilirler. Örnek olarak Ga yerine yerleşen bir Mg atomu ile bir nitrojen boşluğu arasında oluşan nötral  $Mg_{Ga}V_N$  kompleksi, iletkenlik bandının altında yaklaşık 0.4 eV enerji seviyeli derin verici oluşturur [88].

Dislokasyonlar genellikle büyütülen film ile alttabaka arasındaki örgü ve termal uyumsuzluktan kaynaklanır ve örgü içerisinde oldukça uzun atomik boyutlarda ortaya çıkarlar. Oluşum özellikleri Burgers vektörü ile belirlenir. Bu kusurlar kristalin elektriksel ve optiksel özelliklerine etki edebilen önemli kusurlardır. Dislokasyonlar, kenar dislokasyonu ve vida dislokasyonu şeklinde sınıflandırılır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi atomlar normal düzenlenmenin yanı sıra ekstra yarı bir düzlem oluştururlarsa bunlara kenar dislokasyonu denir (Burgers vektörü dislokasyon çizgisine dik). Aynı şekilden görüldüğü gibi kristal bağların bir bölümü kırılırsa ve atomlar normal yerlerinden kayıp tekrar birbirleriyle bağ yapmazlarsa bu dislokasyonlara da vida dislokasyonu denir (Burgers vektörü dislokasyon çizgisine paralel).



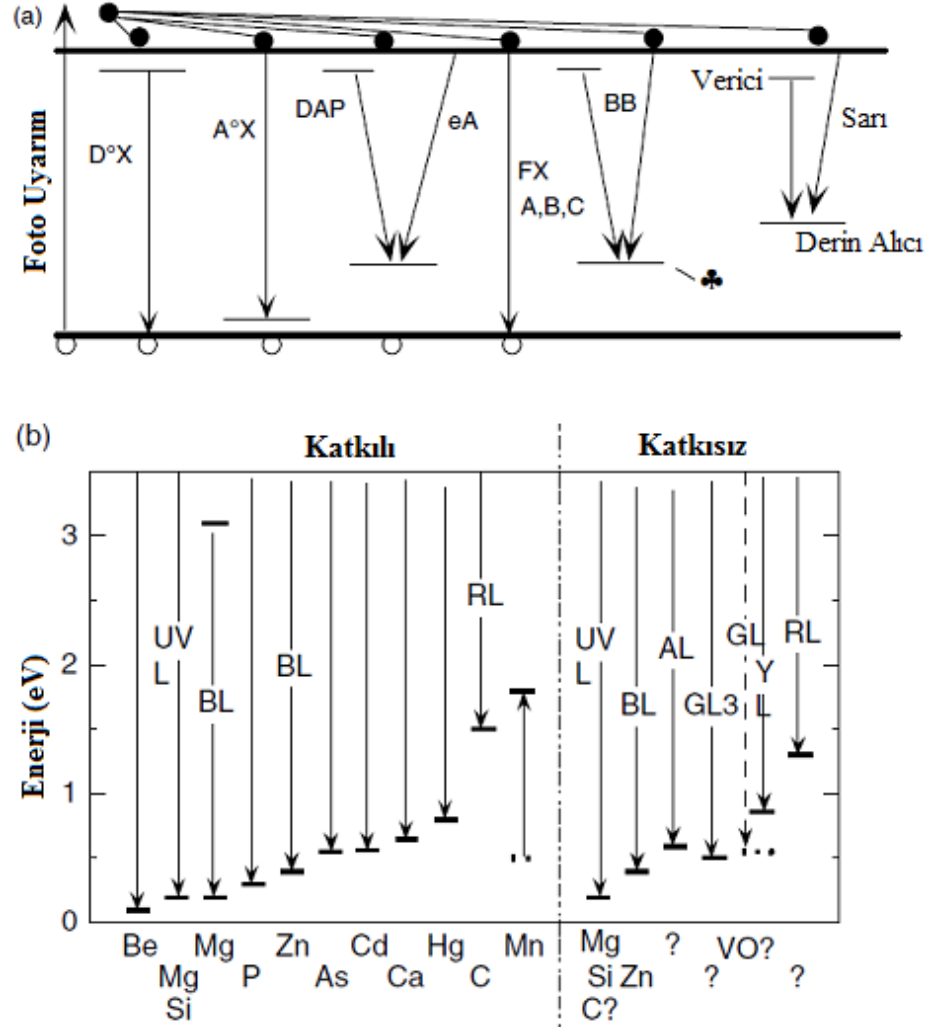
Şekil 2.7 Kenar dislokasyonu ve vida dislokasyonunun şematik gösterimi.

Dislokasyonlar uyumsuz ve tedirgin edici dislokasyonlar olarak iki grupta toplanabilir. Uyumsuz dislokasyonlar, GaN ile epitaksiyel tabaka ve alt tabaka arayüzlerinde bulunurlar. Bu tip dislokasyonlar GaN tabaka içine ulaşamazlar ve dolayısıyla tabakadaki zorlamayı oldukça rahatlatırlar. Tedirgin edici dislokasyonlar ise çizgi, vida ve karışık tip dislokasyon olarak 3 farklı etki ile kendisini gösterir ve bu tip dislokasyonlar GaN tabakalardaki ışınsal olmayan geçiş merkezleri ve taşıyıcı mobilitesini etkileyen saçılma merkezleri gibi davranır. Dislokasyon etkisinin görüntüleri (çizgi, vida ve karışık) iki ışın kullanılarak alınan parlak alan (TEM) ile yapılır. Yapılan ölçümler ve hesaplamalarda, genel olarak GaN tabakalardaki dislokasyon yoğunluğu  $10^8$ -  $10^{10}$   $\text{cm}^{-2}$  aralığında olmaktadır. Epitaksiyel yanal tekrarbüyütme (kısaca ELO veya LEO olarak adlandırılmakta) yöntemi ile büyütülen GaN ince filmlerde dislokasyon yoğunluğu  $10^6$  mertebelerine kadar düşürülmektedir. Bu teknikle oda sıcaklığındaki yarı ömrü 10000 saat olan lazer diyotlar üretilmiştir [90].

## 2.4. Optiksel Özellikler

Yarıiletkenlerin optiksel özellikleri hem içsel hem de dışsal etkilerle ilişkilendirilir. Lazer gibi dışarıdan uygulanan bir uyarıcı yardımıyla tedirgin edilen GaN kristalinde gözlenebilecek içsel ve dışsal ışınsal geçiş mekanizmaları şematik olarak Şekil 2.8' de gösterilmektedir. Bir yarıiletkenin fotoluminesans olayında üç temel süreç meydana gelir. Bu süreçler kısaca; —*Uyarılma*: İlk olarak incelenen malzeme tek dalgaboylu optik uyarma kaynağı tarafından uyarılır.  $h\nu$  kadar bir enerjiye sahip uyarıcı fotonlar elektronları valans bandından iletim bandına çıkarırlar. Optik uyarma kaynağının enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığından  $E_g$  büyük olduğunda elektron-deşik çiftleri oluşur. *Termalizasyon*:  $h\nu \geq E_g$  için üretilen elektron-deşik çiftleri ilk anda çok yüksek bir kinetik enerjiye sahiptirler. Bu fazla enerjilerini akustik ve optik fonon yayınımları yoluyla hızlı bir şekilde (0,2-100 ps gibi bir zaman içerisinde) boşaltarak bant kenarına (elektronlar iletim bandının minimumuna doğru, deşikler ise valans bandının maksimumuna doğru) doğru hareket ederek termal denge dağılımlarına ulaşırlar.

*Yeniden birleşme:* Elektron-deşik çiftleri yeniden birleşirler ve elektron valans bandına geri döner. Bu işlem sonucunda, fazlalık enerji ışımalı veya ışımsız olarak salınır.



Şekil 2.8 (a) GaN'ın içsel ve dışsal optiksel geçişlerinin şematik gösterimi (b) GaN'ın katkılanmasında kullanılan belirli safsızlıklara ve istem dışı oluşan kusurlara ait ışımsal geçişlerin enerji dağılımları. Şekildeki VO terimi yeşil ve sarı lüminesansdan sorumlu  $V_{Ga}O_N$  kompleksinin iki yük durumunu ifade etmektedir. Yeşil hat 2 (GL2) ve kırmızı hat 2 (RL2) içsel olduğu kabul edilmekte olup ilişkili olduğu kusur seviyeleri bilinmemektedir. [1].

Herhangi bir kristal yapıda bekleneceği üzere nitritlerde büyütme sırasındaki ortam ve termodinamik şartlardan dolayı yukarıda bahsedilen doğal ve yapay kusur ve dislokasyonlar mevcuttur. Örneğin, GaN yarıiletkeni herhangi bir bilinçli katkılama yapılmadığında dahi n-tipi iletkenlik gösterebilir. Bu doğal (kendiliğinden olan) iletkenliğin sebebini açıklamak için, GaN'nin kristal yapısında hiçbir müdahale yapılmadan kendiliğinden oluşan kusurların var olduğu, kusur modelleri tanımlanmıştır [1]. Bu kusurlar kristal içerisinde çoklu verici (*donor*) ya da alıcı (*akseptor*) atomu gibi davranabilirler. Bunun sonucu olarak çoğu yarıiletkenlerde olduğu gibi GaN'ın fotoluminesans spektrumunda birçok içsel (*intrinsic*) ve dışsal (*extrinsic*) geçişler görülmektedir. Her ne kadar literatürde farklı semboller ile gösterilebilse de Şekil 2.8' de sembollenen geçişler şöyledir:

*Safsızlık geçişleri ( $D^{\circ}h$ ):* Yarıiletkenin yapısında doğal olarak bulunan ya da istenmeden oluşmuş veya kasıtlı olarak katkılanan verici-alıcı seviyelerinin sebep olduğu geçişlerdir. Bu geçişler, nötr verici (donor)-deşik ( $D^{\circ}h$ ) ve elektron-nötr alıcı (acceptor) ( $eA^{\circ}$ ) geçişleridir. Bazı durumlarda, iyonize olmuş verici ve iyonize olmuş alıcı enerji seviyelerinde de geçişler görünmektedir. Bu geçişler nötr geçişlere benzemekte olup tepe enerji değerleri daha büyüktür. Genelde bu geçişler literatürde ( $D^+h$ ) ve ( $eA^-$ ) terimleri ile de gösterilirler.

*Verici-alıcı çifti geçişleri ( $D^{\circ}A^{\circ}$ ):* Bu geçişler, yarıiletkene hiçbir katkılama yapılmamasına rağmen yarıiletkenin yapısında doğal olarak bulunan safsızlıklar arasında gözlenen geçişlerdir. Verici - alıcı çiftleri arasındaki geçişlerin enerjisi;

$$(D^{\circ}A^{\circ}): E = E_g - E_A - E_D + \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r} \quad (2.6)$$

ile verilir. Buradaki  $\frac{e^2}{4\pi \epsilon_0}$ , Coulomb etkileşimi terimini,  $r$  ise verici ve alıcı arasındaki uzaysal mesafeyi göstermektedir. Formüldeki Coulomb kuvvetinin anlamı, Nötral durumdaki ( $D^{\circ}A^{\circ}$ )'nın iyonize olmasıyla oluşan ( $D^+A^-$ ) çiftinin sahip olduğu elektrostatik enerjiyi ifade etmektedir. Bu nedenle FL spektrumunda ayırık



çizgiler grubu ( $D^0A^0$ ) geçişleri gözlenebilir. Eğer  $r$  yeterince büyükse, ( $D^0A^0$ ) arasındaki enerji dağılımı azalır ve böyle durumlarda ayrı çizgiler gözlenmez. Verici – alıcı geçişleri, sadece ( $D^0A^0$ ) çiftini oluşturan elemanlar arasındaki mesafe kritik yarıçap  $r_c$  değerinden daha büyük olduğunda meydana gelir. Eğer çiftler arasındaki etkileşim enerjisi elektron ve deşik tarafından perdelenirse, çiftler arasındaki elektrostatik etkileşim enerjisi sıfır olur ve  $E_D + E_A$  enerjisi örgüye aktarılır. Bu nedenle perdeleme süreci sadece  $E_D + E_A \geq \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0}$  olduğunda meydana gelebilir.

*Bantdan-banda geçişler (e-h):* Bu geçişler valans bandındaki serbest deşiklerle iletim bandındaki serbest elektronlar arasındaki geçişleri içermektedir ve yüksek sıcaklıkta veya uyarım yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda meydana gelirler. Bu tip geçişler eksiton bağlanma enerjilerinin yüksek olduğu malzemelerde oda sıcaklığında dahi gözlenmezler.

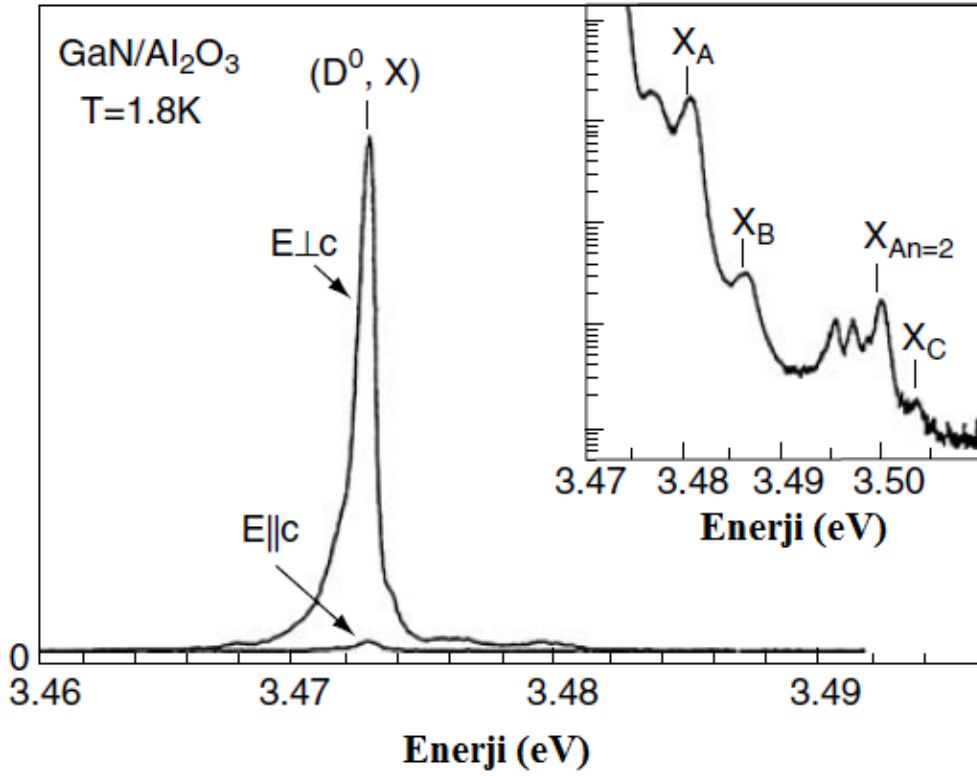
*Eksitonik geçişler (FE, BE):* Bu geçişler daha karmaşık olup genelde sıvı helyum sıcaklığı gibi düşük sıcaklıklarda görülürler. Basit bir tanımla eksitonlar, birbirine Coulomb etkileşimi yoluyla küçük bir bağlanma enerjisi ( $E_x$ ) ile bağlı elektron-deşik ( $e-h$ ) çiftleridir. Buradaki Coulomb etkileşimi hidrojen atomu gibi düşünülebilir. Coulomb etkileşimi ile birbirine bağlı olan  $e-h$  çiftleri başka hiçbir merkezle etkileşmiyorsa bunlara *serbest eksitonlar* denir ve bağlanma enerjileri hidrojen atomuna benzetilerek hesaplanabilir. FL spektrumunda serbest eksitona ait tepe enerji değeri  $E=E_g-E_x$  olacaktır ve genelde literatürde (FE) yada (FX) olarak gösterilmektedir. *Bağlı eksitonlar* ise nötr veya iyonize olmuş sığ safsızlık merkezleri, derin safsızlık merkezleri ya da yarıiletken örgüsündeki diğer kusurlar gibi çekici merkezlere bağlıdırlar. Bağlı eksitonların enerjisi eksitonun bağlı olduğu merkez tarafından düşürüldüğünden serbest elektronun enerjisinden düşüktür ( $E_{BE} < E_{FE}$ ). Bağlı eksitonlar bir kusur ya da safsızlık merkezine bağlı olduklarından herhangi bir kinetik enerjiye sahip değildirler. Çizgi genişliği doğal çizgi genişliğidir ve  $\Delta E = \hbar/\tau$  belirsizlik ilkesi ile belirlenir. Burada  $\tau$ ; eksitonun doğal yaşam süresidir. Fakat, pratikte düzensizlik ve sıcaklıktan dolayı çizgi genişlikleri malzemenin kalitesine göre daha büyük değerler göstermektedir.

GaN'ın sahip olduğu kristal yapısını ve simetrisini yansıtan ve A, B ve C olarak adlandırılan eksitonik geçişler, yansıma soğurma, fotoluminesans gibi farklı optiksel yöntemler ile belirlenmiştir. Şekil 2.9' da HVPE tekniği ile safir üzerine büyütülmüş yapısında zorlama olmayan yüksek kalitede kalın bir GaN tabakaya ait FL spektrumu görülmektedir. 2 K sıcaklığında alınmış bu spektrumun yüksek enerji bölgesinde A, B ve C serbest eksitonlarına ait geçişler ve A eksitonun birinci uyarılmış durumuna ait geçişi açık bir şekilde gözlenmiştir. A eksitonun taban ve 1. uyarılmış geçiş enerjilerinden faydalanarak A eksiton için bağlanma enerjisi 25 meV olarak hesaplanmıştır. Literatürde, incelenen yapıların kalitesi ve zorlama miktarları farklılık gösterdiğinden çeşitli optiksel yöntemlerle yapılan incelemelerde serbest eksiton geçişleri A eksiton için 3.474-3.496, B eksiton için 3.481-3.505 eV ve C eksiton için 3.493-3.528 eV enerji aralığında gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü gibi bu spektrumda vericiye bağlı eksitonlardan kaynaklanan güçlü yayınının baskın olduğu görülmektedir. Bağlı eksitonların yeniden birleşimi her bir kusura özgü foton enerjisi olan keskin bir pik şeklindedir. Her bir parçacık bağlı eksiton spektrumunda kusur kaynaklı titreşimsel mod ile örgü modlarının her ikisini içeren tipik fonon çiftlenimi görülür. Yapısında zorlama olmayan GaN' a ait 2 K' de alınmış vericiye bağlı eksitonların bağlandığı verici atomuna bağlı olarak geçiş enerji bölgesi yaklaşık olarak 3.470-3.4733 eV aralığında gözlenmiştir [85]. HVPE tekniği ile büyütülen kalın heteroepitaksiyel tabakalara ait spektrumlarda (Şekil 2.10) gözlenen optiksel çizgi genişliği 1 meV veya daha küçüktür. GaN yapısındaki en etkin iki artık sığ vericinin O ve Si olduğu ileri sürülmüştür. MOVPE tekniği ile ön işlemden geçirilmiş tek GaN tabaka üzerine büyütülen homoepitaksiyel GaN numuneler için alınan FL spektrumunda vericiye bağlı eksitonların yayınınının 3.4709'de gerçekleştiği ve optiksel çizgi genişliğinin 0.1 meV'e kadar azaldığı gözlenmiştir [91]. Bu durumda, vericiye bağlı eksitonların yayınım pikinin her iki tarafında da bulunan tanımlanamamış keskin uydu piklere ek olarak baskın durumdaki sığ vericiye bağlı eksitonların yayınım pikinin Si verici atomundan kaynakladığı ileri sürülür [92].

Bu nedenle spektrumun yüksek enerji bölgesindeki optiksel çizgi O ile ilişkilendirilir ve GaN' ın büyütüldüğü bütün tekniklerde gözlenen bir bulaşmadan

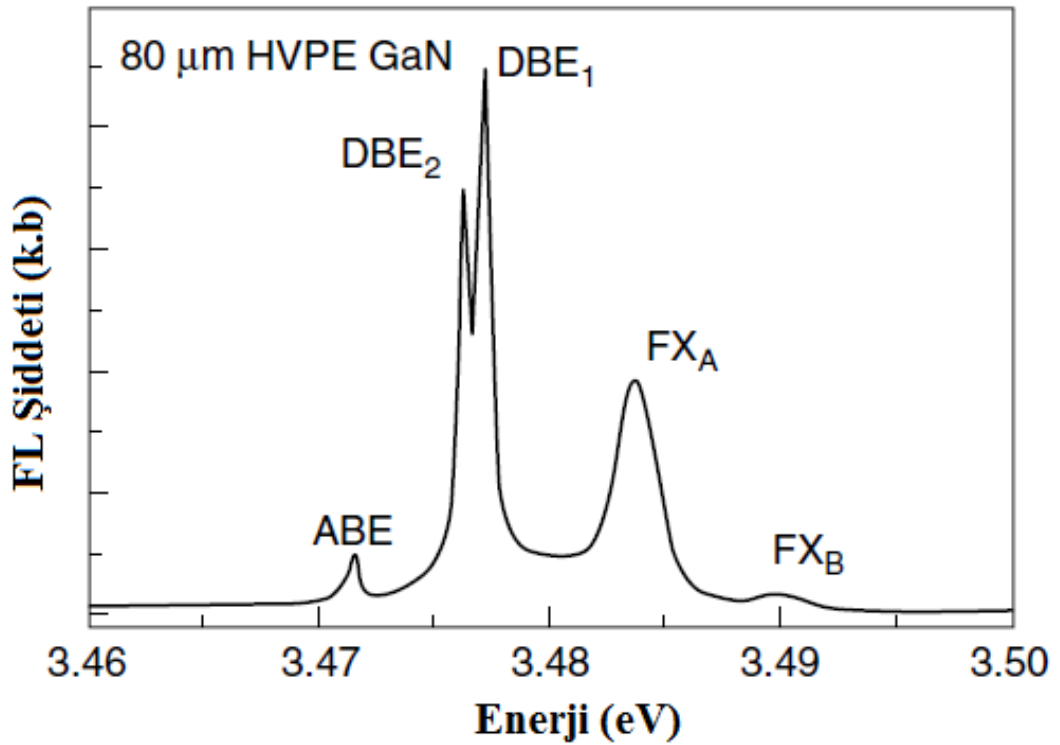
kaynaklanır. Yüksek kalitede büyütülmüş GaN' kristaline ait verici bağlı eksitonik geçiş sırasında vericinin uyarılmış durumda kaldığı iki-elektron uydu pikleri ise 3.44-3.46 eV enerji aralığında gözlenmektedir.

Vericiye bağlı eksitonlara ait geçişlerin altındaki enerji bölgesinde alıcı atomlara bağlı eksitonlardan kaynaklanan geçişlerin etkin olduğu gözlenir. Bu geçişlerin belirginliği DBE geçişlerine göre daha azdır. Yapısında zorlama olmayan GaN'a ait spektrumda sıg vericiye bağlı eksiton olarak düşünülen  $Mg_{Ga}$ 'dan kaynaklanan en baskın ABE geçişinin 3.466 eV değerinde olduğu gözlenmiştir. Dahası bu geçiş kendisini hafif Mg katkılanmış GaN'a ait spektrumda da göstermiştir [93].



Şekil 2.9 Safir üzerine büyütülmüş 400- $\mu$ m kalınlığındaki GaN için 1.8 K'de alınmış Fotoluminesans Spektrumu. Spektrumda gözlenen etkin geçişler vericiye bağlı eksiton geçişleridir, fakat yüksek enerji bölgesinde iç eksiton durumlarının varlığı da görülmektedir [94].

Birçok grup, bu bağlı eksiton geçişinin yüklü verici atomuna bağlı eksitonlardan kaynakladığını kabul eden alternatif açıklamalar ileri sürmüştür [95-97]. 3.455 eV'deki diğer pik Zn ile ilişkilendirilir fakat bu görüş tam olarak doğrulanamamıştır. 3.44 eV'de gözlenen 3.455 eV'deki ana pikin düşük enerji bölgesinde bulunan geniş pik ise ABE'ye özgü bir davranış olarak akustik fonondan kaynaklanır [98-99]. Aynı zamanda spektrumda oldukça güçlü LO fonon çiftlenimini gösteren ve DBE'den daha güçlü olan fonon replikaları görülmektedir.



Şekil 2.10 HVPE tekniği ile büyütülmüş GaN tabakaya ait Fotoluminesans Spektrumu. Spektrumda iki DAP ve bir ABE geçişi görülmektedir. Yapısında sıkıştırılmış zorlama bulunan GaN'a ait spektrum zorlama olmayan GaN'a ait spektruma göre 6 meV kaymıştır [100].

GaN'ın fotoluminesans spektrumun 3.45-1.20 eV aralığında büyütülen numunelerin kalitesine ve/veya katkılı olup olmamasına bağlı olarak yukarıda bahsedilen eksitonik geçişlerin yanı sıra yoğun bir şekilde farklı kusur merkezli geçişlerde gözlenmektedir. Bunların detaylı incelemesi M.A. Reshchikov ve and H. Morkoç tarafından yayınlanan çalışmada verilmektedir. Burada bunların detayına girmek çalışma alanımızın dışında olduğu için daha sonra görüleceği gibi

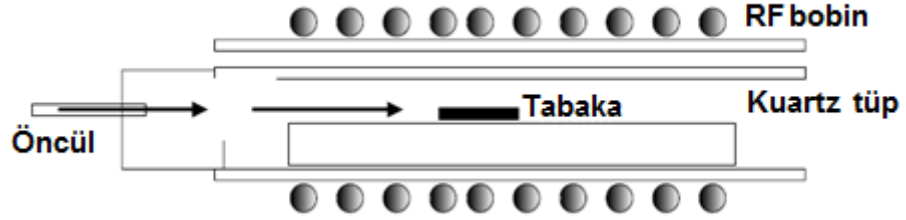
incelediğimiz örneklerde gözlenen kusur merkezli geçiş hakkında kısa bilgi verilecektir.

GaN'a ait spektrumda tepe değeri yaklaşık 2.2 eV'de konumlanan ve oldukça geniş bir çizgi genişliğine sahip olan bu ışımsal geçiş Sarı Lüminesans (SL) olarak adlandırılmaktadır. Bu geniş pik katkılanmamış ya da n tipi katkılanmış GaN spektrumlarında sistematik olarak gözlenir. Bu geçişin orijini hakkında birçok farklı görüş ortaya sürülmüştür [101-105]. SL pikinin iletim bandından veya sığ vericiden derin alıcıya olan geçişlerden kaynakladığı düşünülmektedir. Bu konudaki farklı bir açıklama ise bu geçişlerin derin vericiden sığ alıcıya olduğunu kabul etmektedir. Derin merkezleri; Ga eksikliği, N eksikliği veya Ga atomunun örgüde başka bir yerde bulunmasından kaynaklanan kusurların oluşturduğu tahmin edilmektedir. GaN'de sığ vericileri için en büyük aday silikon (Si) ve oksijen (O) atomudur. Oksijenin, büyütme sırasında kristal tabandan ( $Al_2O_3$ ) ya da su buharından bulaştığı düşünülmektedir. Karbon da (C) sığ vericiler için gösterilen diğer aday olarak değerlendirilmektedir. Alıcı merkezlerinin ise Ga eksikliği sonucu oluşan kusur ile N örgüsünde bulunan O yabancı atomundan kaynaklanan kusurun birlikte kompleks bir yapı ( $V_{Ga}-O_N$ ) oluşturarak ortaya çıktığı düşünülmektedir [106].

### 3. DENEYSEL YÖNTEMLER

#### 3.1. MOCVD (Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirmesi)

Metal Organik Kimyasal Buhar Yerleşimi (MOCVD), yarıiletken tabakanın gaz halindeki reaktantların ısıtılmış alttabaka üzerinden geçip kimyasal reaksiyona girmesiyle oluştuğu, dinamik bir akış içeren büyütme tekniğinin adıdır [107]. Birçok III-V malzemenin hızlı ve hassas olarak büyütülmesine olanak sağladığı için kullanımı oldukça yaygındır. Optoelektronik cihazların büyütülmesindeki mevcut başarı ve büyük deneyim ve Moleküler Işın Epitaksi (MBE) tekniğine göre daha büyük büyütme hızına sahip olmasından dolayı III-N tabanlı malzemelerin MOCVD tekniği ile büyütülmesi tercih edilmektedir [108,109]. Şekil 3.1’de III-N malzemelerin MOCVD tekniği ile büyütülmesinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.1 MOCVD büyütmenin şematik gösterimi

Trimetil-Galyum (TMGa), Trimetil-Alüminyum (TMAI), Trimetil-İndiyum (TMIn) gibi öncüller sıcak alt tabaka yüzeyinin üzerinde amonyak ( $\text{NH}_3$ ) ile reaksiyona girerek yarıiletken tabakayı oluştururlar. Nitrojen,  $\text{SiH}_4$  (Silane),  $\text{Si}_2\text{H}_6$  (Disilane) [110] ve Bis(siklopentadienil) magnezyum ( $\text{Cp}_2\text{Mg}$ ) gibi ek kaynaklara da ihtiyaç duyulur [111,112]. Alt tabaka grafit suseptör üzerine yerleştirilmiştir. Gaz akışının büyük yüzey alanlarda [113] ve çoklu tabaka tasarımlarında [110,114,115] daha düzgün olması için farklı reaktörler geliştirilmiştir [116]. Bu çalışmada incelenen numunelerin büyütüldüğü Bilkent Üniversitesi bünyesindeki NANOTAM da bulunan MOCVD sistemi ülkemizdeki ilk ve tek sistemdir. Araştırma ve geliştirme amaçlı kullanılacak sistemin modeli AIX 200/4 RF-S'tir. Bu sistem bir büyütme

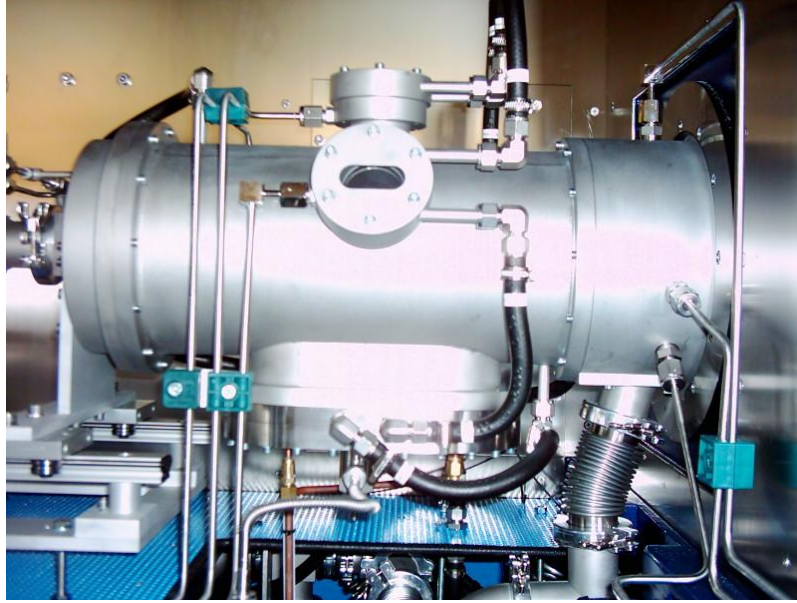
esnasında 2 inçlik tek bir materyal üretme kapasitesine sahiptir. Aynı zamanda bu sistem, firmanın sıcaklık kontrolü, büyütme sırasında görüntüleme, büyütülen materyalin yüzey düzgünlüğünün sağlanması konularında yaptığı bütün geliştirmelere, yenileştirme ve iyileştirmelere sahiptir. Numuneler büyütülürken kaynak olarak aşağıda belirtilen metal-organik (MO) bileşikler kullanmıştır. MOCVD sisteminde büyütme olayının geçtiği reaktör kısmı gaz girişi ve pozisyonuna göre yatay ve dikey reaktör olmak üzere iki tiptir. Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde kullanılan MOCVD sistemi yatay gaz akışına sahip bir reaktördür. Şekilde bu sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde kurulan AIX 200/4 RF-S MOCVD sistemi.

Bu sistem yılda ortalama 1000 adet büyütme yapabilecek kapasiteye sahiptir. Diğer sistemlere karşı avantajları nitrat uygulamaları için özel yüksek sıcaklık (1200 °C) reaktörüne sahip olması, küçük ölçekli üretim ve araştırma geliştirme amaçlı dizaynı, diğer AIXTRON reaktörlerine kolayca uyarlanabilecek proselere sahip olması, büyütülen filmin kalınlığının ve homojenliğinin mükemmel olması, bileşenlerinin ayarlanabilirliği, filmin elektriksel ve optik kalitesinin mükemmel olması şeklinde sıralanabilir. Sistem 3 fazlı 50 Hz 380 V 24kVA RF jeneratörü ile reaktörü ısıtır. Elektronik bileşenleri yine 3 faz 50Hz 380V 20kVA ile beslenmektedir. Yüksek saflıkta N<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> kullanmaktadır. Ayrıca gaz kabinlerinde %2 SiH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, ve %H<sub>2</sub> %95 N<sub>2</sub> gaz karışımı olan oluşturma gazı bulunmaktadır.

Her bir gaz yaklaşık 3,5 bar basınçla sisteme verilmektedir. Taşıyıcı gaz harcaması yaklaşık 10 l/min kadardır. Pnömatik kontrol elemanları için yaklaşık 7 bar basınca sahip teknik N2 kullanılır. Kabin havalandırması 2x1000 m<sup>3</sup>/saat kadar olup soğutma suyu için 15 l/dak bir akışa ve giriş çıkış arasında 4 bar basınç farkına ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemin 2005 yılı başında faaliyete geçmesinden sonra bu malzemenin üretiminde oldukça önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.



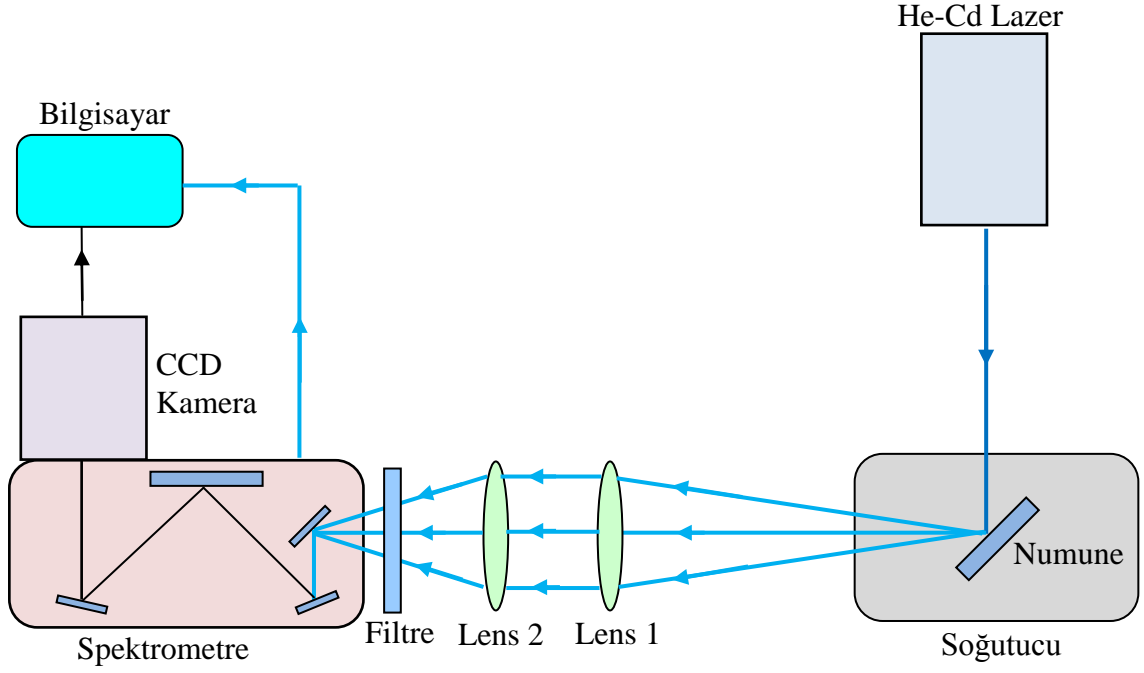
Şekil 3.3 NANOTAM’da kurulan MOCVD sistemi reaktörünün fotoğrafı

### 3.2. Fotolüminesans

Fotolüminesans lazer veya bir ışık kaynağı vasıtasıyla optik uyarma altında bir materyalden ışığın kendi kendine doğal yayılmasıdır. Işık, bir malzeme üzerine gönderilerek enerji soğrulur. Malzeme, soğurulan bu enerjiyi kendiliğinden bir ışık yayarak salar. Bu süreçte malzemenin ışıkla uyarılmasına “foto-uyarım”; foto-uyarım sonucunda oluşan kendiliğinden ışımaya olayına “fotolüminesans” ya da “foto-ışımaya” adı verilir. Foto-uyarım madde içerisindeki elektronların izin verilebilir uyarılmış durumlara hareket etmesine yol açar. Bu elektronlar kendi denge durumlarına dönerken ışıklı ya da ışıksız geçişler yaparlar. Yapılan ışıklı geçiş sonucunda malzemedan salınan fotonlar (optik sinyal) ayna sistemi ve



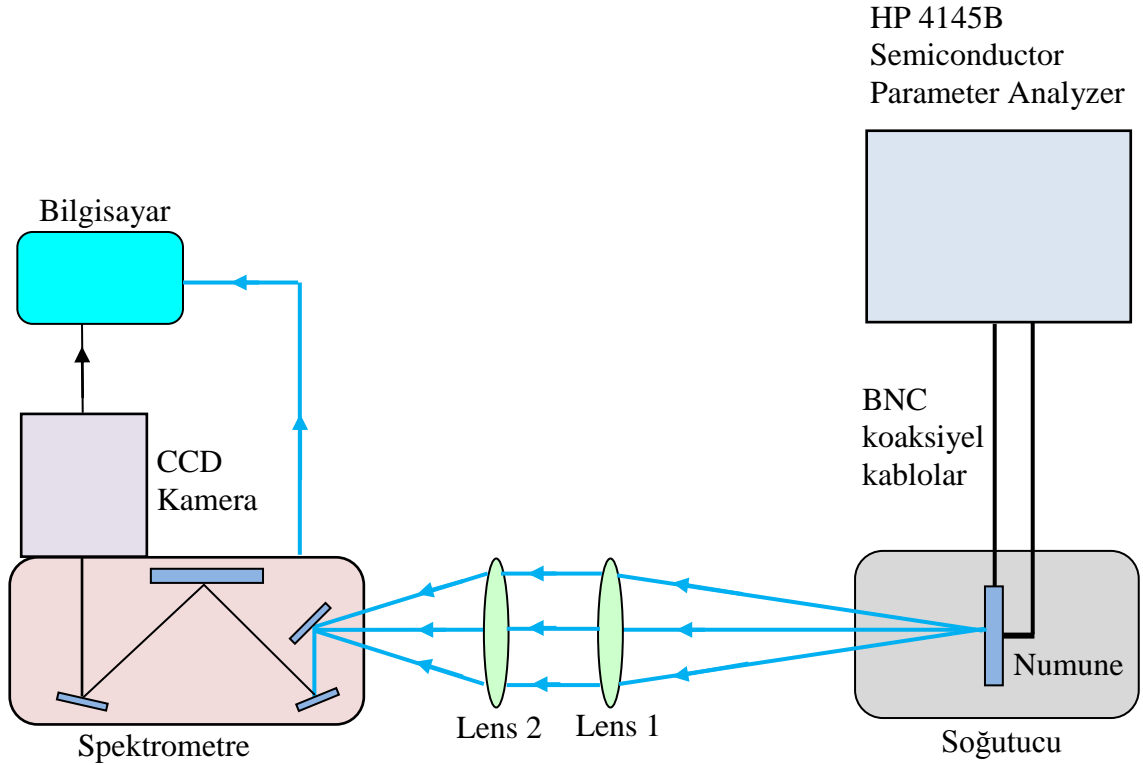
monokromatör yardımıyla ayrıştırılarak dedektöre aktarılır. Dedektör yardımı ile elde edilen bu optik sinyal elektriksel sinyaline dönüştürülür. Malzemenin lüminesans ışımaya karşılık gelen bu sinyalin; şiddet-dalgaboyu (veya enerji) grafiği çizilerek fotolüminesans spektrumu elde edilir. Bu teknik, yarıiletkenlerin optiksel özelliklerini belirlemek için kullanılan çok duyarlı, kullanışlı ve numuneye zarar vermeyen bir deneysel tekniktir. Bu teknik ile yarıiletken malzemelerin kalitesi, yasak enerji bant aralığı, malzemenin yapısında görülen doğal kusurlar ve safsızlıkların orijinleri ve miktarları hakkında bilgiler elde edilebilir. Bu çalışmada, fotolüminesans ölçümleri için kullanılan deneysel düzenek şematik olarak Şekil 3.4' de gösterilmektedir. Numunelerin 10-300 K sıcaklık aralığında çeşitli sıcaklıklarda fotolüminesans ölçümlerini almak için numuneler kapalı-devirli soğutucuya yüklenir. Fotolüminesans ölçümlerinde optiksel uyarıcı olarak 30 mW gücünde 325 nm dalgaboyunda sürekli dalgalı lazer kullanılmıştır. Bu lazer numunenin üzerine düşürülür. Yüksek uyarım yoğunluğundan kaçınmak için uyarım yoğunluğu yaklaşık olarak  $1 \text{ W/cm}^2$  değerinde sabit tutulmuştur. Numuneden yayılan kendiliğinden ışınım lens ve aynalar ile yönlendirilerek spektrometrenin girişine odaklanır. Örneğin yüzeyinden yansıyan ve saçılan lazerin spektrometreye girmesini engellemek için 330 nm ve ikincil harmonikleri engellemek için ise 410 nm kesim noktalarına sahip uzun-dalgaboyu-geçiş filtreler kullanılmıştır. Spektrometrenin içine giren fotolüminesans milimetredeki çizgi sayısı 2400 groove/mm olan yüksek dağıtım özelliğine sahip *grating* ile dağıtılarak ışınım CCD dedektörünün üzerine düşürülür. Dedektöre gelen fotolüminesans şiddeti giriş ve çıkış yarığının 0-2000 mm arasında, ışık toplama zamanının da 20-2000 ms aralığında değiştirilmesiyle ayarlanır. Kullanılan fotolüminesans sistemin enerji çözünürlüğü 0.1 meV' den daha iyi olup spektrumda görülebilecek keskin ve birbirine yakın piklerin ayırt edilmesini sağlayabilmektedir. Bu düzenekte CCD kamera ve spektrometre tamamen bilgisayar tarafından bir software ile kontrol edilmektedir.



Şekil 3.4, FL deney düzeneği

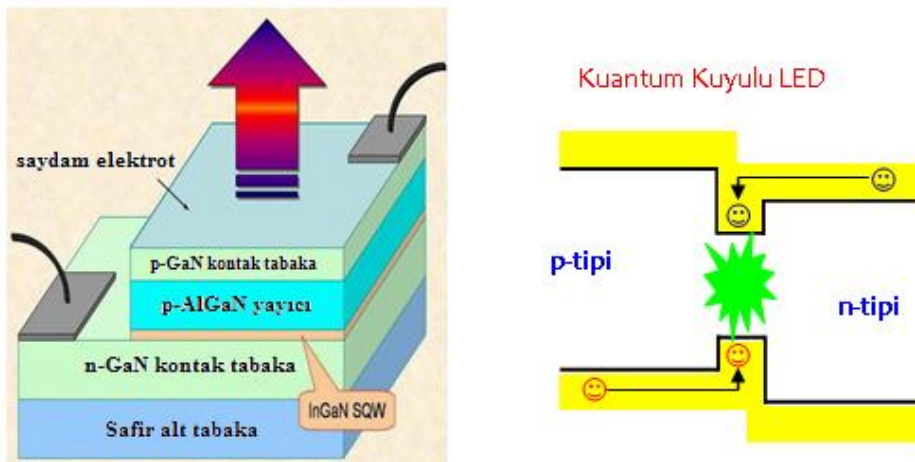
### 3.3. Elektrolüminesans

Elektrolüminesans (EL) deney düzeneği Şekil 3.5’de görüldüğü gibi fotolüminesans ölçümleri için kullanılan deney düzeneğindeki He-Cd lazer yerine HP 4145B Semiconductor Parameter Analyzer veya LDP-3811 Precision-Pulsed/CW Akım kaynağı kullanılarak oluşturulmuştur. Sıcaklığa bağlı elektrolüminesans spektrumları alınırken aynı zamanda numunelerin akım-voltaj eğrileri de belirlenmiştir.



Şekil 3.5 EL deney düzeneği

Elektrolüminesans (EL) bir dış voltajın uygulanması ile p-n eklemi, heteroyapı, kuantum kuyusu veya benzer yapıların aktif bölgesine giren elektron ve deşiklerin kendiliğinden yeniden birleşmesidir. Şekil 3.5, tipik bir kuantum kuyulu LED nin yapısını ve ileri besleme sonucu oluşan elektrolüminesans ışınım mekanizmasını göstermektedir.

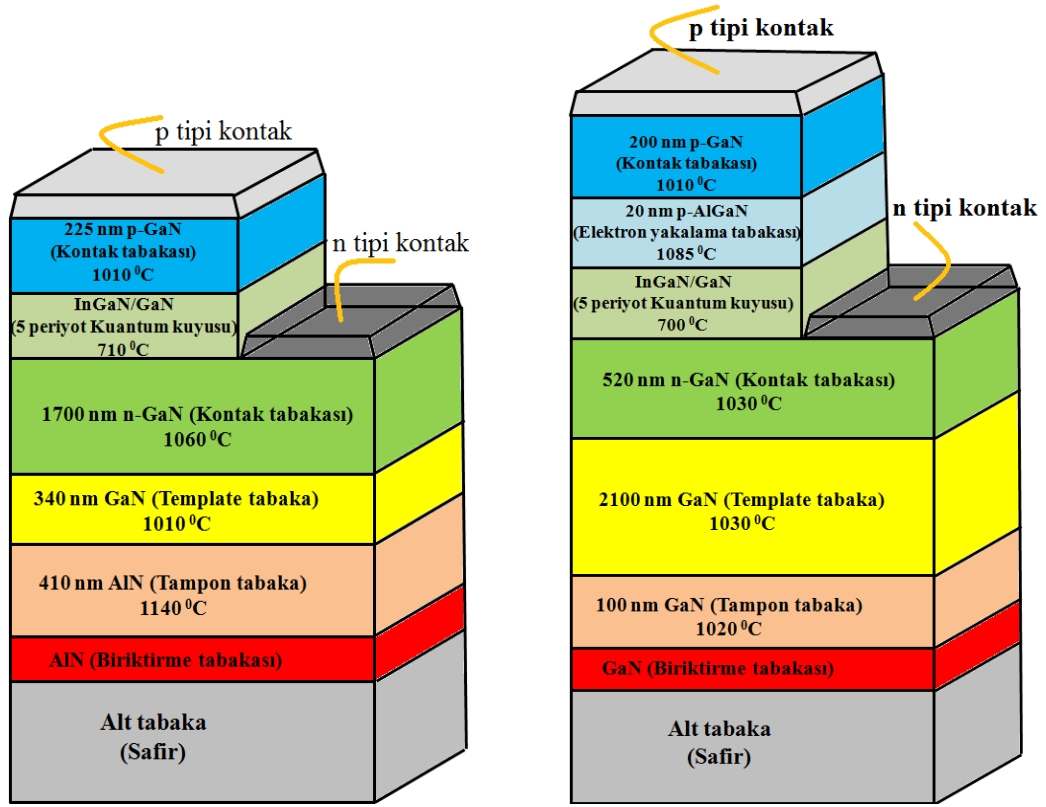


Şekil 3.6. Tipik bir kuantum kuyulu LED nin yapısı ve ileri besleme durumundaki emisyon mekanizması ile birlikte potansiyel profilinin karton gösterimi.

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR

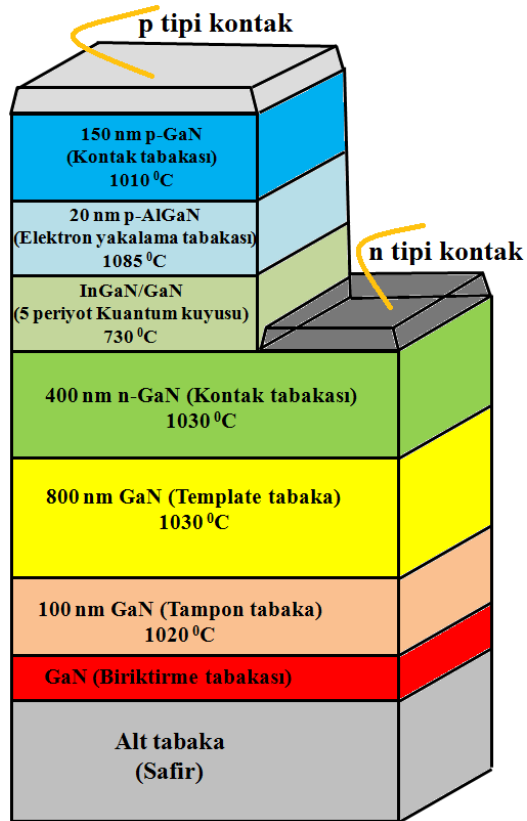
### 4.1. Numunelerin Yapısı

İncelenen InGaN/GaN numunelerin yapıları Şekil 4.1' de şematik olarak gösterilmiştir. Büyütülen 6 numune de safir ( $Al_2O_3$ ) alttabakanın c-(0001) düzlemi üzerine MOCVD yöntemi ile büyütüldü. Trimetilgalyum (TMGa), trimetilalimünyum (TMAI), trimetilindiyum (TMIn), ve amonyum ( $NH_3$ ) sırasıyla Ga, Al, In ve N kaynağı olarak kullanıldı. Epitaksiyel büyütmeden önce yüzeydeki oksitleri temizlemek için alt tabaka  $1100\text{ }^{\circ}C$  de 10 dakika boyunca nitrojen ortamında ısıtılma tabi tutuldu. Büyütülen numunelerin tabaka yapıları birbirine benzemektedir. Sadece B-292 kodlu numune için biriktirme tabakası ve tampon tabaka olarak AlN tercih edilmiştir. Diğer numuneler için ise bu tercih GaN'dan yana kullanılmıştır. GaN tampon tabakalar  $1020\text{ }^{\circ}C$ 'de 100 nm kalınlığında, AlN tampon tabakası ise  $1140\text{ }^{\circ}C$ 'de 410 nm kalınlığında büyütülmüştür. Tampon tabakalar üzerine  $1030\text{ }^{\circ}C$ ' de GaN template tabakalar büyütülmüştür. AlN tampon tabaka üzerine büyütülen template tabakasının büyütülme sıcaklığı ( $1010\text{ }^{\circ}C$ ) diğerlerinden farklıdır. Template tabakası üzerine  $1030\text{ }^{\circ}C$ 'de farklı kalınlıklarda n tipi GaN kontak tabakası büyütülmüştür. B-292 kodlu numune için büyütülen n tipi GaN tabakasının büyütme sıcaklığı  $1060\text{ }^{\circ}C$ 'dir. Bu tabakaların üzerine sırasıyla farklı sıcaklık ve kalınlıklarda InGaN kuantum kuyusu ve GaN bariyer tabakası büyütülmüştür. Bariyer tabaka üzerine  $1085\text{ }^{\circ}C$ 'de p tipi AlGaN elektron yakalama tabakası büyütülmüştür. B-292 kodlu numunemizde elektron yakalama tabakası büyütülmemiştir. Son olarak kontak tabakası olarak büyütülen farklı kalınlıktaki p tipi GaN' ın B-292 numunesi hariç diğer numunelerdeki büyütme sıcaklığı  $1010\text{ }^{\circ}C$ 'dir. B-292 için bu değer  $1030\text{ }^{\circ}C$ 'dir. Tez çalışmamızda kullandığımız numuneler B-292 B-377, B-437, B-493, V008 ve V009 olarak kodlanmıştır. Büyütülen numuneler Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

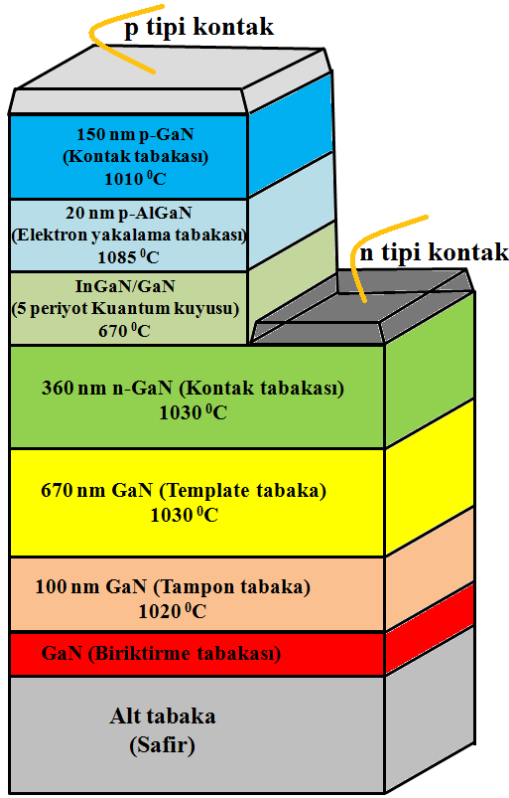


(a) B-292

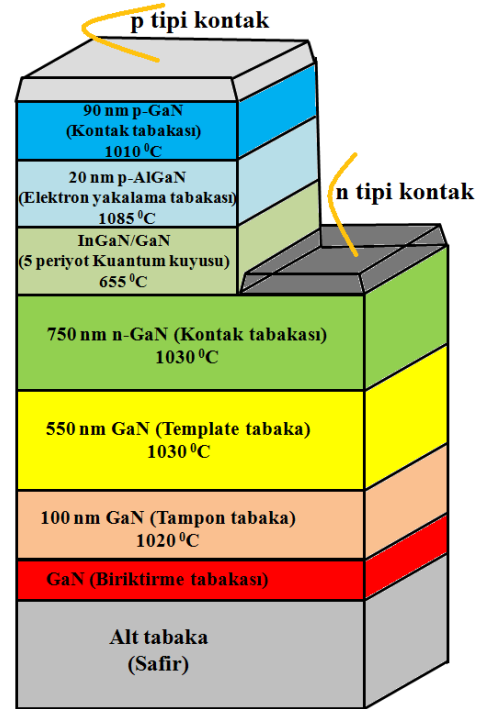
(b) B-377



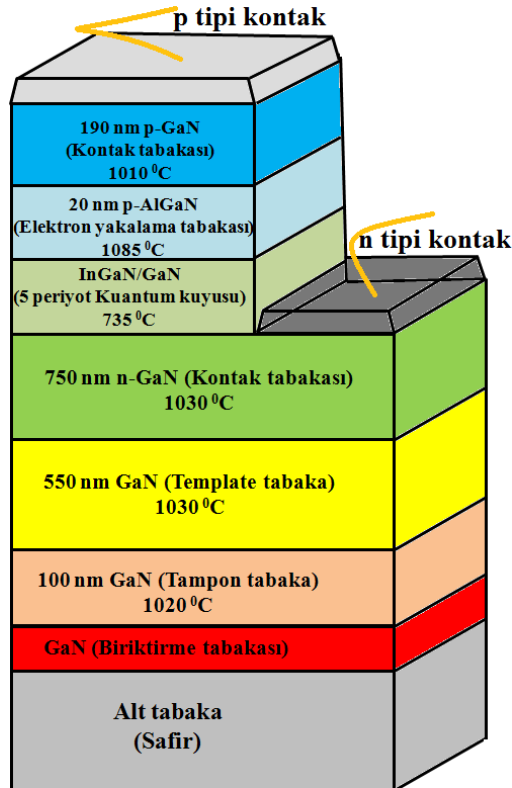
(c) B-437



(d) B-493



(e) V008

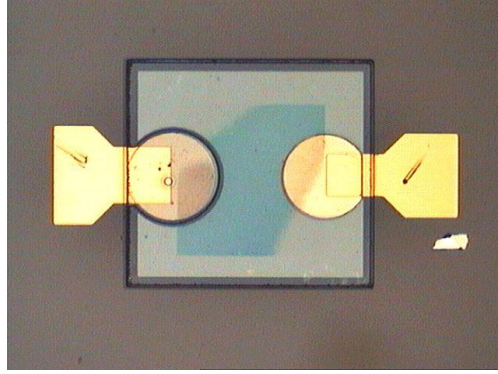


(f) V009

Şekil 4.1 (a) B-292 (b) B-377, (c) B-437, (d) B-493, (e) V008, (f) V009

## 4.2. Mikrofabrikasyon

Tabaka yapısı; en üstte p+ GaN tabaka, B-292 kodlu numune haricinde altında AlGaIn yakalama tabakası, daha sonra n+ GaN tabaka ile AlGaIn yakalama tabakası arasında yığılmış 5 çiftten oluşan InGaIn/GaN kuantum kuyu-bariyer çiftleri şeklindedir. Geniş band aralığına sahip AlGaIn yakalama tabakası InGaIn/GaN çiftlerine yakın elektronları hapislemek için kullanılmıştır. Dolayısıyla foton üretmek için daha fazla yükün yeniden birleşmesi sağlanarak LED çıkışının artırılması amaçlanmıştır. İstenilen dalga boyunda yayılım elde etmek için kuyu, bariyer genişlikleri ve büyütme sıcaklığı gibi parametreler uygun değerlerde ayarlanmıştır. Fabrikasyondaki ilk adım tüm numunelerin n+ tabakaya doğru dağlanmasıdır. Daha sonra Ti/Au metallere oluşan n tipi kontaklar yerleştirilmiştir. n+ tabakadan safire doğru cihazın dışındaki alanlar dağlanarak fabrikasyon işlemine devam edilmiştir. Bir sonraki adım maskelenmiş numuneler üzerine 800 Å kalınlığındaki p tipi Ni/Au kontakların buharlaştırılarak yerleştirilmesidir. Bu metal LED yüzeyinin tümünü kapladığı için şeffaf ve ince olmalıdır. Daha sonra Ti/Au metallere içeren temas tamponu yerleştirilmiştir. Ni/Au kontaklar 550 °C'de tavlansmıştır. Numunenin üzeri temas metalinden sonra dielektrik malzeme SiO<sub>2</sub> ile kaplanmıştır. Arabağlantılar için açıklıkların dağlanmasından sonra elektriksel özellikleri ölçebilmek için Ti/Au metali yerleştirilmiştir. Optiksel litografi maskeleyişinin yapıldığı cihaz alanları 160µm x 160µm ile 480µm x 480µm aralığındadır. Bu değerler daha sonraki e-ışın litografi için oldukça büyüktür. Dolayısıyla e-ışın litografisinde işlenen alanlar toplam yayılım alanından küçüktür. Litografi ve maskeleyiş yapılmış LED'lerin yapısı şekildeki gibidir.

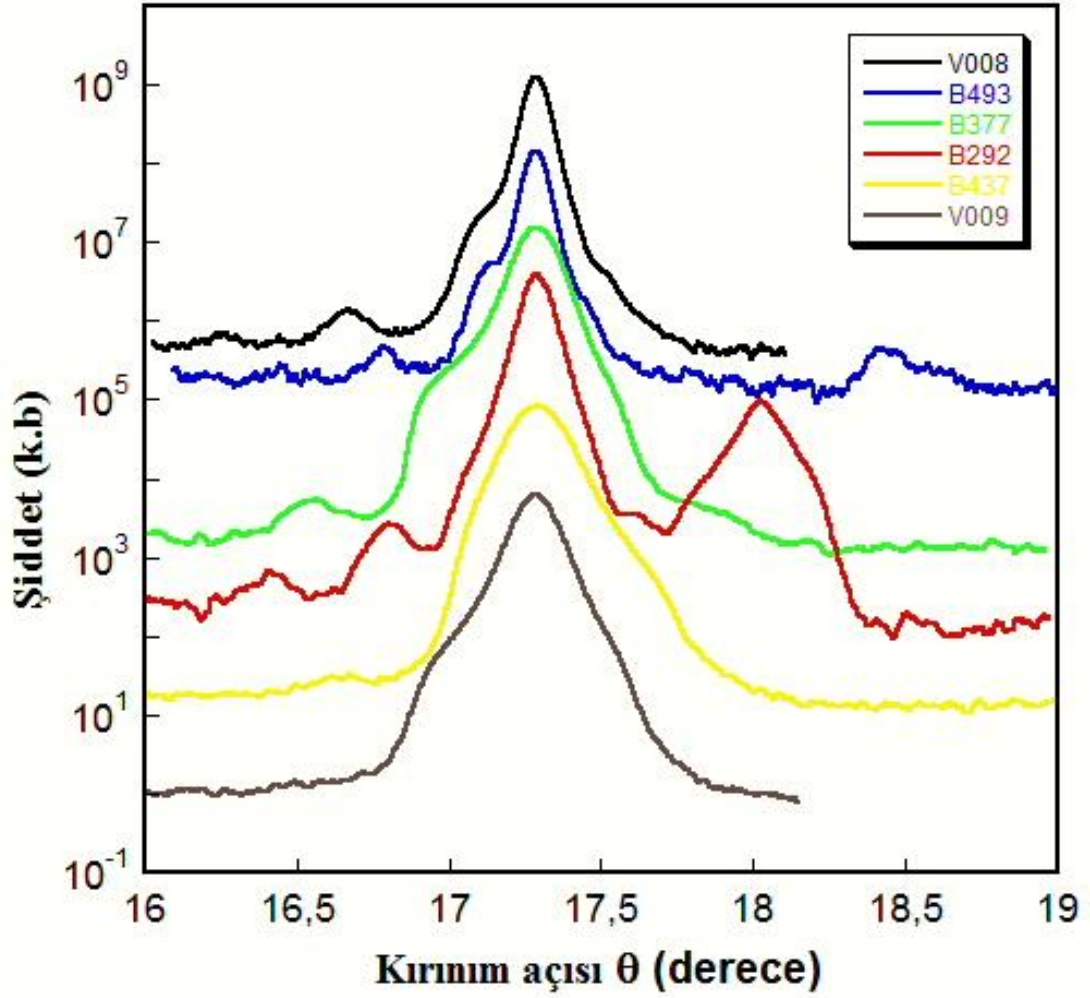


Şekil 4.2 Bilkent NANOTAM’da üretilen LED yapısı, 5 nm boyutlarında kuantum kuyuları içermektedir.

### 4.3. X-Işını Kırınımı

Büyütülen InGaN/GaN kuantum kuyulu yapıların yapısal analizleri Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümündeki STARLAB bünyesinde bulunan Bruker D-8 yüksek çözünürlü X-ışını kırınım tekniği ile yapıldı. Şekil 4.3 her numune için  $\omega$ - $\theta$  taraması ile (0002) etrafında elde edilen yansımaları göstermektedir. XRD spektrumlarında yaklaşık  $17.3^\circ$  de gözlenen ana yansıma pikleri GaN tabakasına aittir. B-292 numunesi için yaklaşık  $18^\circ$  de gözlenen pik ise AlN tampon tabakasına aittir. Ayrıca, her numuneye ait XRD eğrisinde de herhangi bir faz ayrımının olmadığını görmekteyiz. Çizelge 2.1’ de verilen GaN, InN örgü sabitlerinden ve XRD’de gözlenen görelî pik pozisyonlarından Vegard’ s yasası yardımıyla bulunabilir. Fakat numunelerin XRD pik genişlikleri çok yayvan olduğundan özellikle düşük In oranlarına sahip kuantum kuyusunun sıfırıncı dereceden pikinin pozisyonunu belirlemek güçtür. Sıfırıncı ve yüksek mertebeden kuantum kuyusu pikleri daha belirgin olan numunelerin ortalama In oranları deneysel verilere simülasyon yaparak elde edilebilir.





Şekil 4.3. Numunelerin XRD ölçümleri

#### 4.4. Fotolumineans Ölçümleri

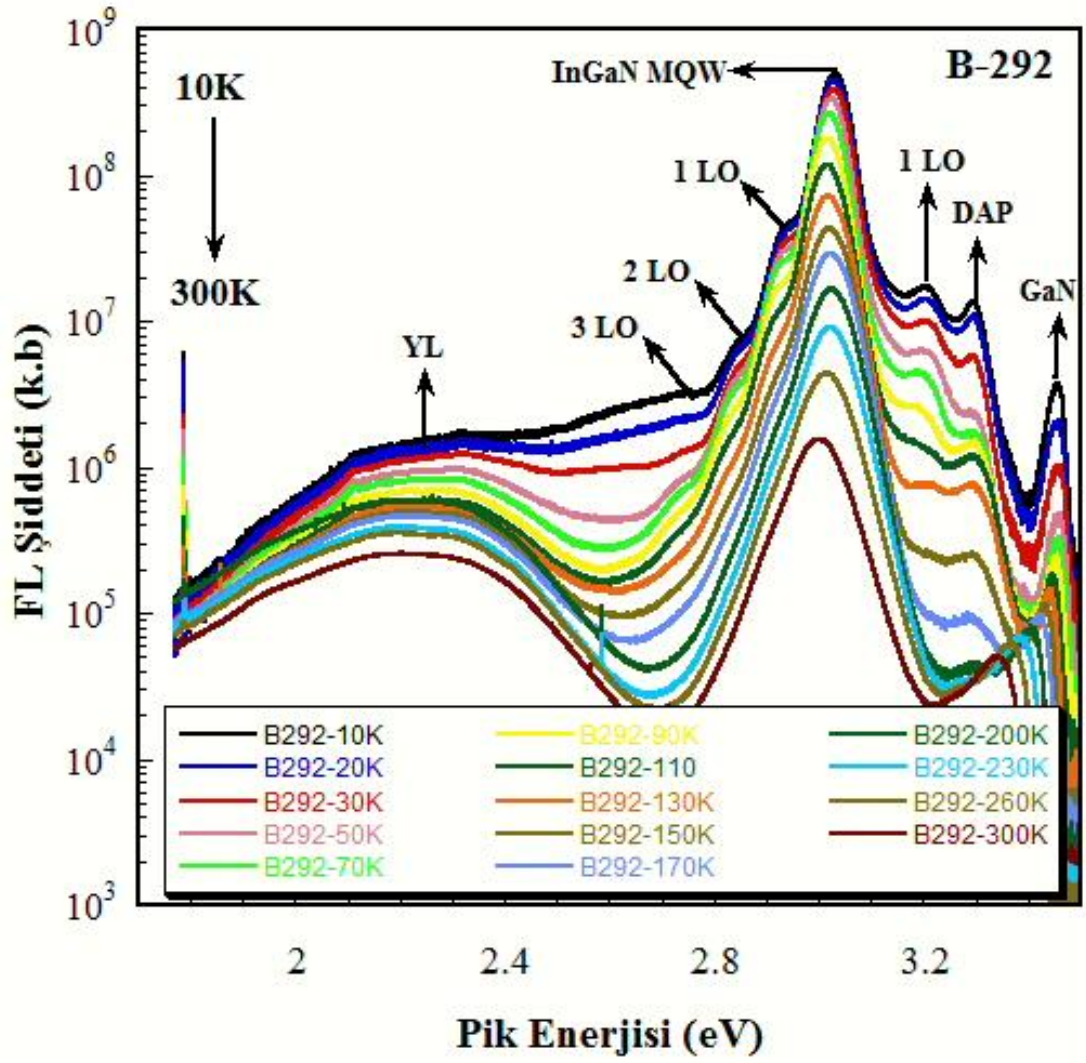
Literatürde, InGaN/GaN kuantum kuyulu yapılarıdaki ışınımı açıklamak için, çeşitli mekanizmalar önerilmektedir. Piezoelektrik alandan kaynaklanan Kuantum Hapisi Stark Etkisi (QCSE) [36], indiyum bileşim oranındaki dalgalanmalar sonucu ortaya çıkan yerelleşme, InGaN kuantum kuyulardaki olağan kusurlar ve/veya indiyum faz ayrışımı [37-38] ile yüksek band aralıklı malzemenin oluşturduğu potansiyel bariyerler tarafından çevrilmiş ve kuantum noktalar gibi davranan indiyum oranı yüksek nano ölçekli kümeler [39] en çok öne çıkan mekanizmalardır. InGaN kuantum kuyulardaki In alaşım oranının artmasıyla taşıyıcı yerelleşmesinin derecesinin arttığı gözlenmiştir. FL yayılım pikinin sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği ve S-tipi olarak adlandırılan davranışın genel olarak In-yerelleşmesinin

bir sonucu olarak ortaya çıktığı kabul edilir. Bu davranışı açıklamak için farklı görüşler de ileri sürülmüştür [117-120]. Taşıyıcı yerleşmesi ve QCSE modellemeleri InGaN/GaN kuantum kuyulu yapılarda gözlenen optiksel olaylar için kesin bir açıklama sağlayabilir [121].

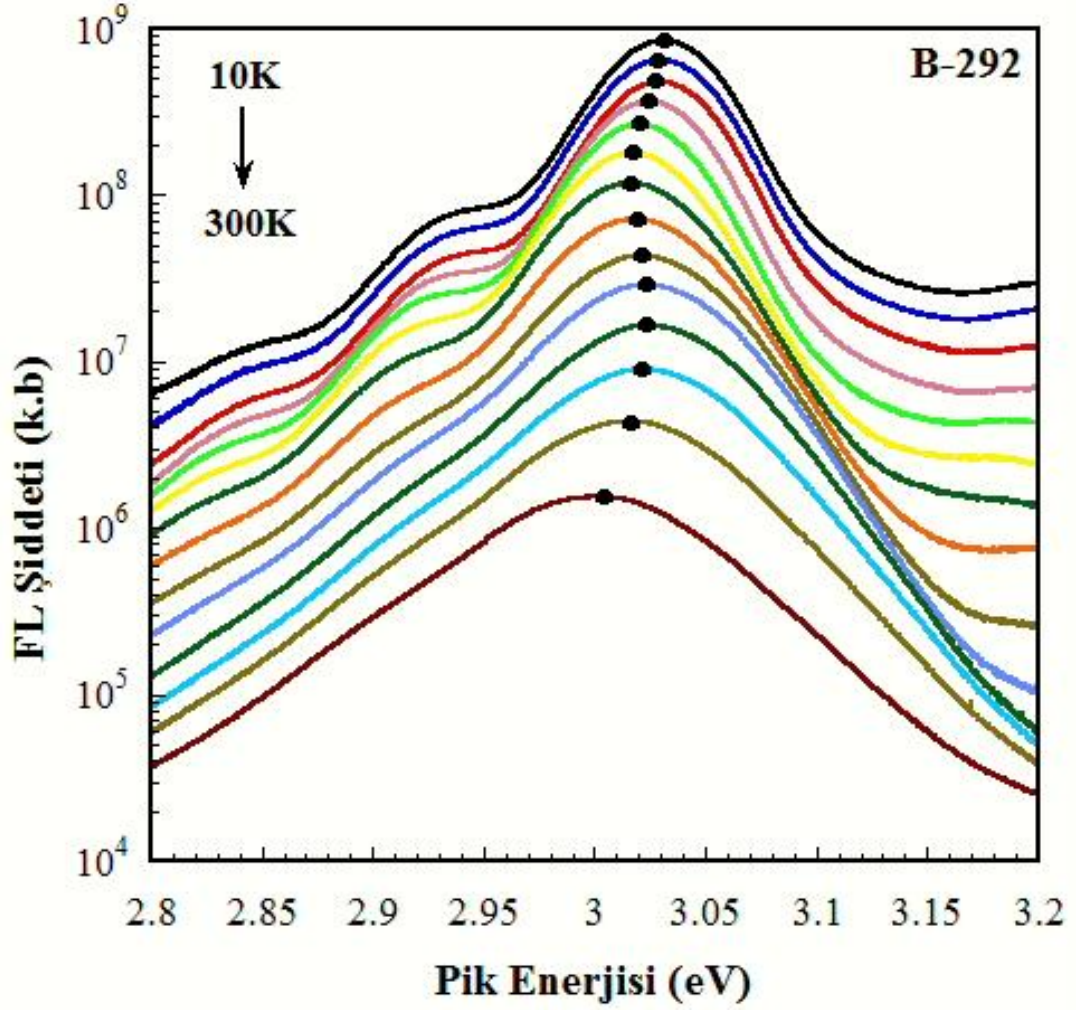
Gözlenen S-tipi davranışın yanında InGaN kuantum kuyusundan kaynaklanan FL piklerinin şiddeti, ışımsal olmayan geçiş merkezleri nedeniyle sıcaklık arttıkça azalma gösterir. Farklı büyüme sıcaklıklarına sahip numunelere ait sıcaklığa bağlı spektral değişimler bir sonraki kısımda detaylı olarak incelenecektir. Burada öncelikli olarak düşük sıcaklık FL spektrumunda gözlenen piklerin orijinleri hakkında bilgi verilecektir.

#### **4.4.1. Numune B-292**

Şekilde 4.4 (a) ve (b), InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna sahip B-292 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı (10-300 K aralığında) FL ölçümlerini göstermektedir. Bu amaç için Şekil 4.4 (c)' de görüldüğü gibi 10 K sıcaklıkta ölçülen FL spektrumuna Gaussian fitler yapılarak gözlenen geçişlerin pik enerjileri ve çizgi genişlikleri (FWHM) belirlenmiştir. Spektrumun en yüksek enerji bölgesinde gözlenen ve merkezi 3.456 eV olan pik GaN'a ait band kenarı geçişidir. Bu pikin çizgi genişliği 26 meV olarak bulunmuştur. Bu geçişin düşük enerji bölgesinde 3.294 eV tepe değerinde gözlenen pik alıcı-verici çiftlerinin (DAP) kendiliğinden birleşiminden kaynaklanmaktadır. Bu geçişin yaklaşık 90 meV solunda bulunan (3.204 eV) pik ise DAP pikinin fonon replikasıdır. 3.031 eV değerinde gerçekleşen yayılım, numunemizin aktif tabakasını oluşturan InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna aittir ve bu pikin çizgi genişliği 49 meV'dir. Ana pikin sol tarafındaki düşük enerji bölgesinde yaklaşık 90 meV'lik uzaklıklarda 2.941 eV ve 2.851 eV değerlerinde gözlenen pikler ile 95 meV'lik uzaklıkta 2.756 eV değerinde gözlenen pik sırasıyla ana pikin birinci ikinci ve üçüncü dereceden fonon replikalarıdır. Merkezi 2.2 eV civarında olan geniş pik GaN malzemelerde gözlenen ve sarı lüminesans olarak adlandırılan geçiştir.



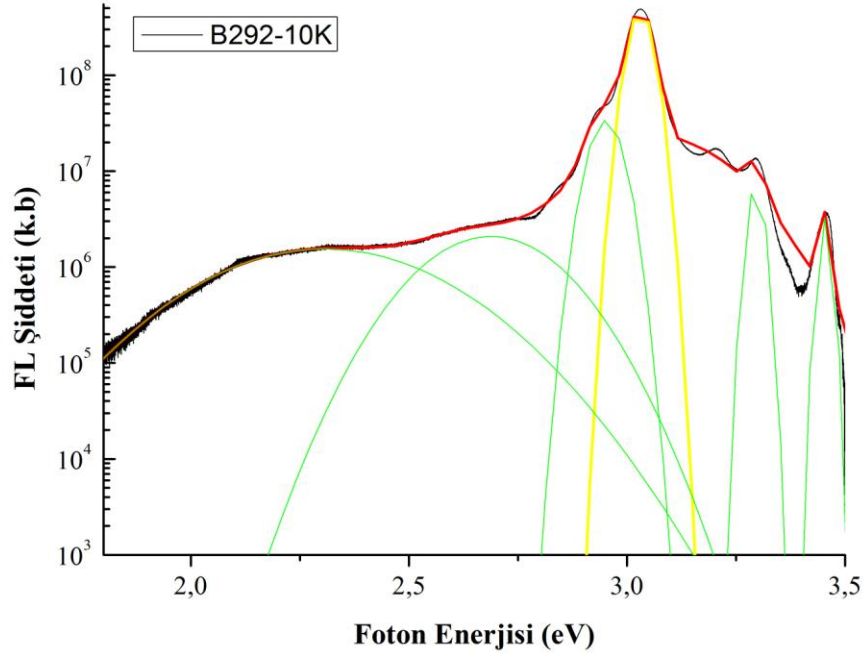
Şekil 4.4 (a) B-292 numunesine ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.4 (b) InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen yayınının açık gösterimi

Şekil 4.5 B-292 numunesinde InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait optiksel geçişin pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. Herhangi bir tuzak ve yerleşmiş durumların olmadığı ideal çoklu kuantum kuyulu yapılarda FL pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi Varshni denkleminin uygun hareket eder [26]. Şekilde de görüldüğü gibi B-292 numunesine ait yayının için gözlenen kayma, Varshni denkleminin göre beklenen enerji aralığının sıcaklığa bağlı olarak daralması ile uyumlu değildir. İlk olarak sıcaklık arttıkça pik enerjisi azalmakta olup yaklaşık 110 K'de 3.016 eV değerine sahiptir. Bu sıcaklıktan itibaren pik enerjisinin maviye kaydığı gözlenmektedir. Daha sonra 200 K üzerinde tekrar bir kırmızıya kayma gözlenmektedir. Kırmızı-mavi-kırmızı kayma şeklinde

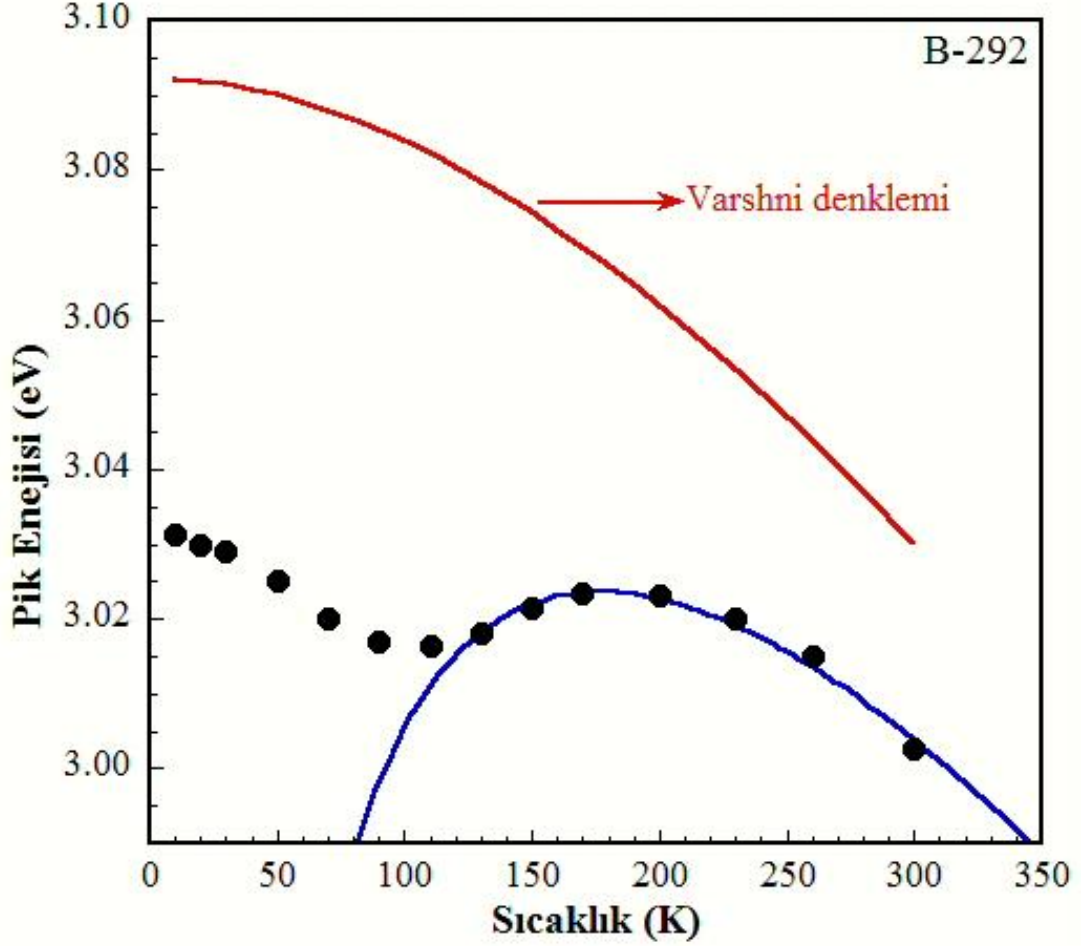
gözlenen bu davranış S-tipi davranış olarak bilinmekte olup yerelleşme etkisinin bir sonucudur.



Şekil 4.4 (c) 10 K için B-292 numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası

Bu etki, alaşım dağılımı homojen olmadığına ortaya çıkan bölgesel potansiyel dalgalanmalardan kaynaklanır. 10-110 K aralığında pik enerjisinin 14 meV kırmızıya kaydığı gözlenir. Varshni denklemine göre ise bu sıcaklık aralığında 10 meV'lik bir daralma beklenir. Dolayısıyla beklenen değere göre 4 meV'lik daha bir kırmızıya kayma söz konusudur. 110-200 K aralığında ise FL pik enerjisi 8 meV maviye kaymıştır. Band aralığında sıcaklığa bağlı olarak beklenen daralmanın 20 meV olduğu dikkate alınır ise bu sıcaklık aralığında FL pik enerjisinde görülen maviye kayma gerçekte 28 meV' dir. 200 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde pik enerjisinde 24 meV' lik yeniden bir kırmızıya kayma gözlenir. Bu sıcaklık değerleri için band aralığındaki daralmanın 33 meV olduğu dikkate alınır ise pik enerjisinin aslında 9 meV maviye kaydığı söylenebilir. Dolayısıyla 10-300 K aralığındaki net maviye kayma 33 meV'dir. Eksiton yerelleşme etkisi band aralığındaki potansiyel

dalgalanmadan kaynaklandığı için yerleşme etkisini araştırırken band kuyruk modelini kullanabiliriz.



Şekil 4.5 B-292 numunesine ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit

Band kuyruk modelinde yayınım enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini açıklamak için, Varshni denklemine 3. bir terimin eklenmesiyle elde edilen denklem aşağıdaki gibidir.

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

Bu denklemdeki ilk terim 0 K' deki enerji band aralığını,  $\alpha$  ve  $\beta$  ise Varshni fit parametrelerini göstermektedir. Denklemdeki 3. terim ise yerleşme etkisinden

kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla  $\sigma$ 'nın değeri yerelleşme etkisinin bir göstergesidir. Yerelleşme etkisi güçlü ise  $\sigma$  değeri büyüktür. Denklemdaki  $k_B$  Boltzman sabitini göstermektedir. Bu denklemi kullanarak yaptığımız fit deneysel veriler ile oldukça uyumludur.

Bu uyumdan elde edilen  $E(0)$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerini kullanarak Varshni denklemini çizdiğimizde B-292 numunesi için yerelleşme olmadığı durumda beklenen geçiş enerjisi 3.09 eV' dir. Buna karşılık ölçülen gerçek pik ise 60 meV kırmızıya kaymış olup 3.03 eV değerindedir. Sıcaklık arttıkça bu fark azalmaktadır. Örneğin oda sıcaklığına Varshni denkleminin öngördüğü pik enerji değeriyle deneysel olarak ölçülen pik değeri arasında 27 meV'lik bir fark vardır.

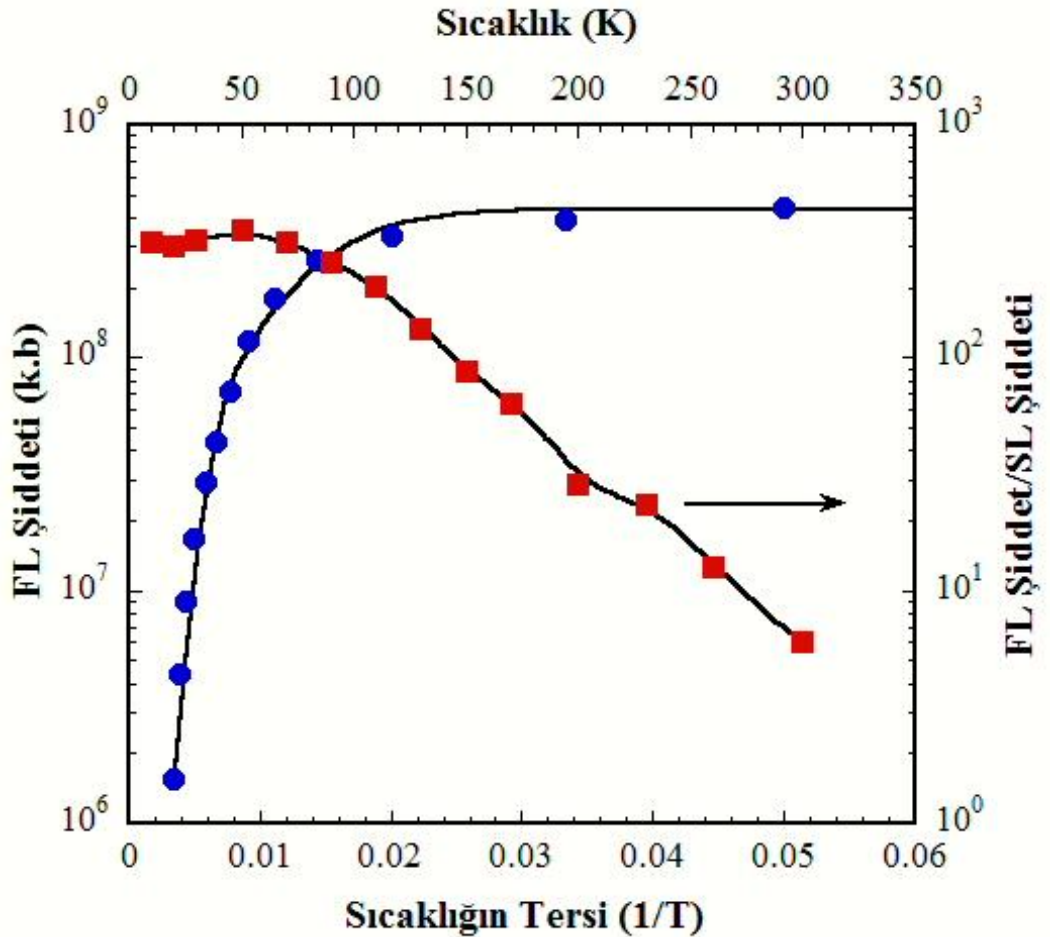
Şekil 4.6, B-292 numunesi için kuantum kuyusuna ait geçişin FL pik şiddetinin, sıcaklığın tersine göre değişimini göstermektedir. FL şiddeti sıcaklık arttıkça azalmaktadır. 10 K ile oda sıcaklığındaki yayılım şiddetinde gözlenen azalma yaklaşık 100 kat kadardır. FL pik şiddetinin sıcaklık karakteristiğini anlamak için aşağıdaki çift-üstel fonksiyona sahip denklem kullanılır.

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{k_B T}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{k_B T}\right)} \quad (4.2)$$

Buradaki  $E_1$  ve  $E_2$  ışınal olmayan geçiş merkezlerini temsil eden aktivasyon enerjisidir.  $A_1$  ve  $A_2$  proses hızı parametresi,  $k_B$  ise Boltzmann sabitidir. Şekilde görüldüğü gibi (4.2) denklemini kullanarak yapılan fit deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur. Bu sonuç, iki ışınal olmayan geçiş merkezi için aktivasyon enerjilerinin  $E_{A_1} = 22$  meV ve  $E_{A_2} = 122$  meV olması gerektiğini gösterir. Buradan, FL şiddetinin sıcaklıkla azalmasında iki farklı mekanizmanın rol aldığını söyleyebiliriz. Düşük sıcaklıklarda etkin olan mekanizma InGaN/GaN kuantum kuyusunda In kümeleşmesinden ve/veya kalınlık değişiminden kaynaklanan potansiyel dalgalanmaların etkisiyle belirli bölgelerde sınırlanan eksitonların termiyonik bozunumunu açıklar. Bu sebeple, InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulardaki taşıyıcıların potansiyel engeli aşmalarını sağlayan aktivasyon enerjisi yani  $E_1$ , yayılımın gerçekleştiği bölgelerdeki etkin potansiyel dalgalanmaların

büyüklüğüne karşılık gelir. Yüksek sıcaklıklarda FL şiddetinin azalmasında etkin olan mekanizma, taşıyıcıların termiyonik ve/veya tünelleme yoluyla delokalize olup, ışımsal olmayan geçiş yapacak şekilde yanal doğrultuda dislokasyon bölgelerine yapılan difüzyonu açıklar. Dolayısıyla,  $E_2$  aktivasyon enerjisi bu mekanizmaya karşılık gelmektedir.

Şekil 4.6 aynı zamanda InGaN/GaN kuantum kuyusuna ait geçişin pik şiddetinin sarı lüminesans pik şiddetine oranının sıcaklık davranışını göstermektedir. 10 K için bu oran 310 iken 300 K'de 50 kat azalarak 6'ya düşmektedir. Bu sonuç, yukarıda bahsedilen mekanizmalara uygun olarak sıcaklık arttıkça ışımsal olmayan geçişlerdeki artışın hızlı olduğunu göstermektedir.

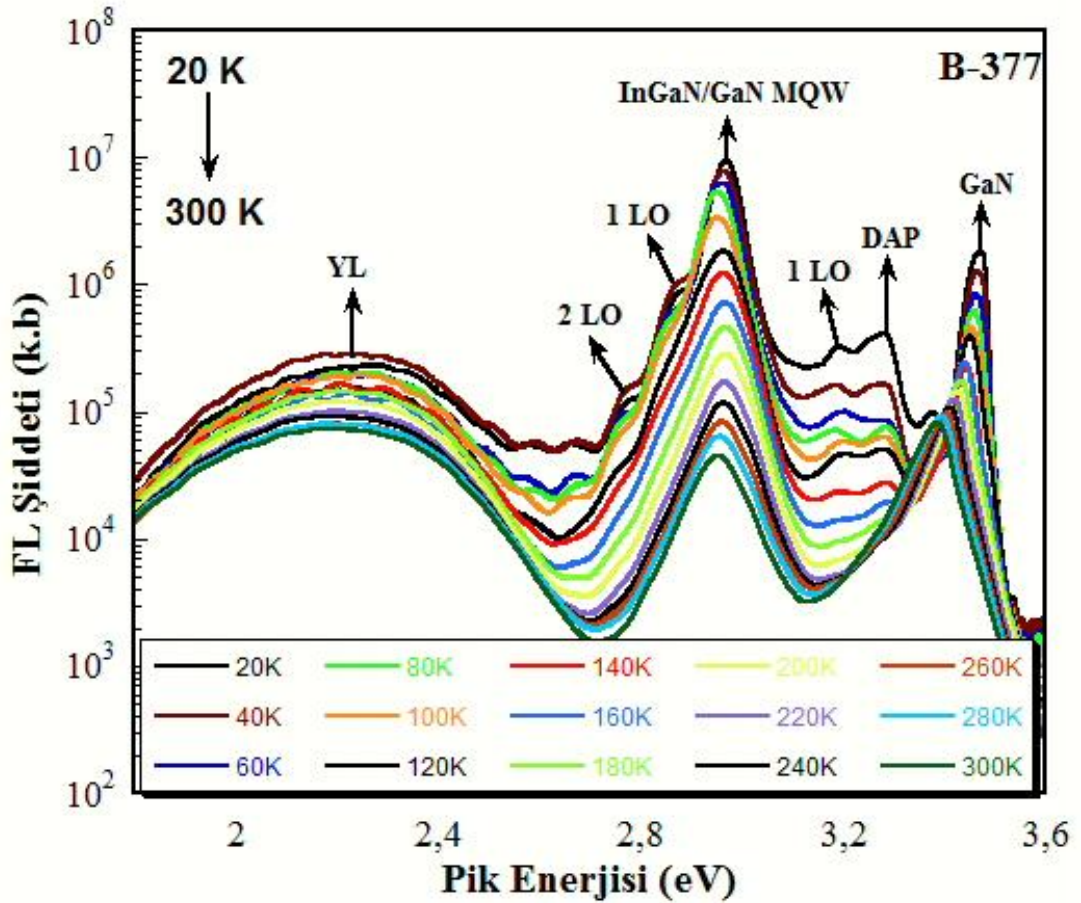


Şekil 4.6 B-292 numunesine ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılan fit



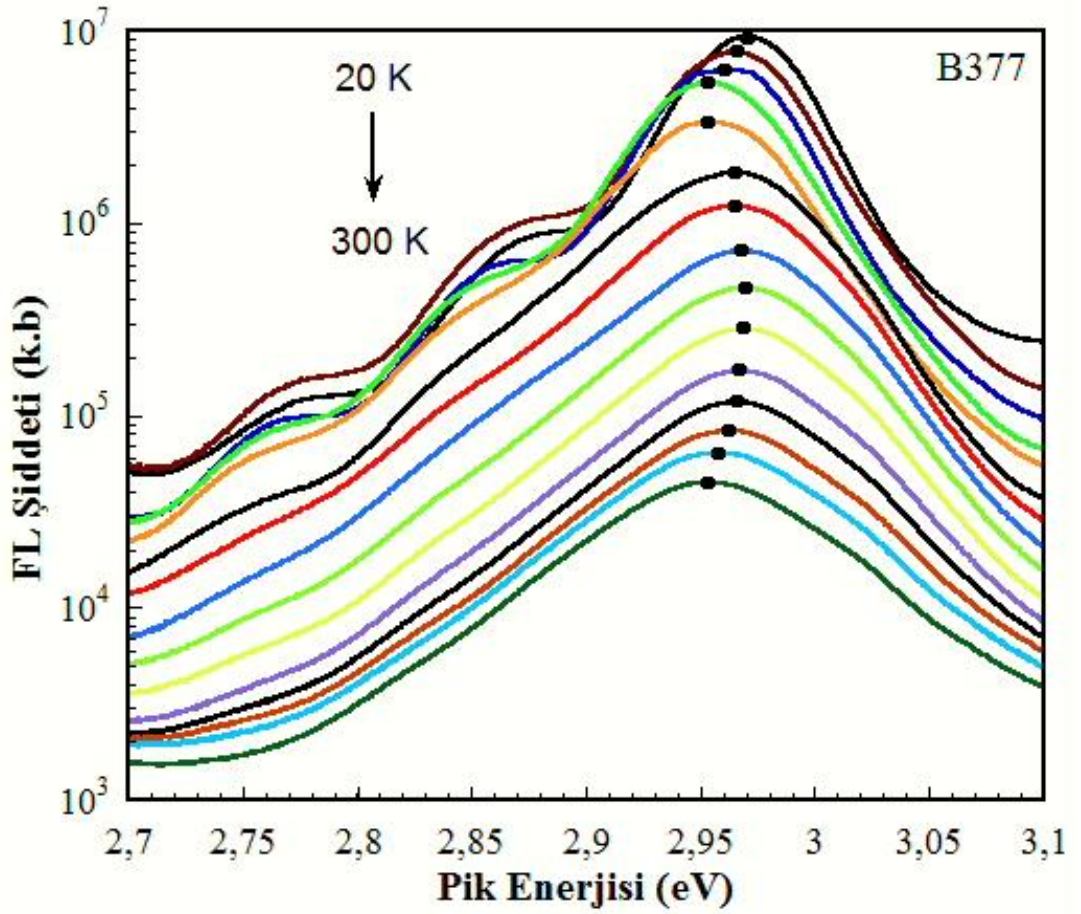
#### 4.4.2. Numune B-377

Şekilde 4.7 (a) ve (b), InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna sahip B-377 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı (20-300 K aralığında) FL ölçümlerini göstermektedir. Şekil 4.7 (c)' de ise 10 K sıcaklıkta ölçülen FL spektrumuna yapılan Gaussian fitini göstermektedir. Bu fit yardımıyla GaN'a ait 3.471 eV değerinde gerçekleşen band kenarı geçiş pikinin çizgi genişliği 32 meV olarak bulunmuştur. Bu geçişin sol tarafında 3.280 eV ve 3.193 eV tepe değerlerinde sırasıyla DAP geçişi ve bu pike ait fonon replikası görülmektedir.

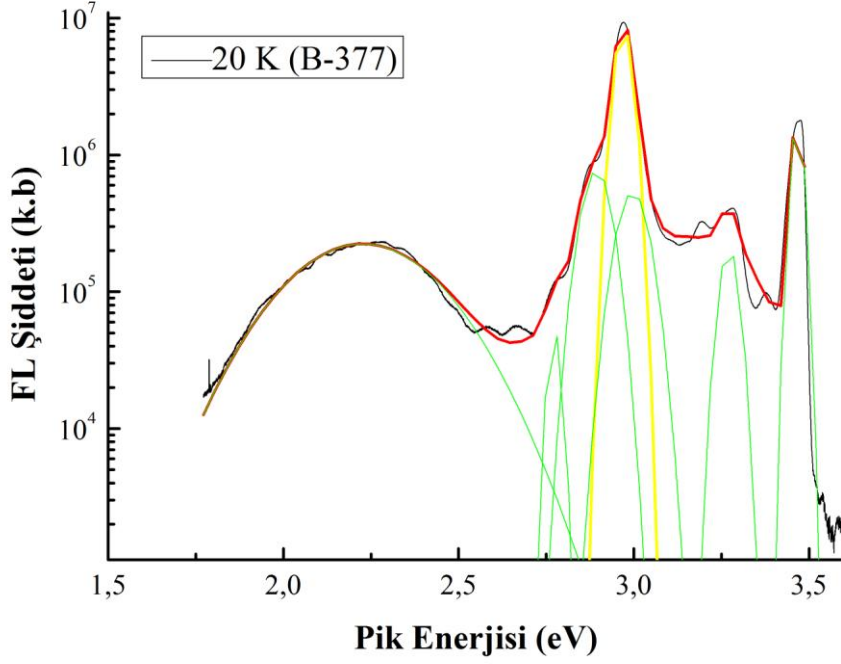


Şekil 4.7 (a) B-377 numunesine ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi.

2.970 eV değerinde gerçekleşen ve ana pik olarak adlandırılan yayınım, numunemizin aktif tabakasını oluşturan InGaN/GaN oklu kuantum kuyusuna aittir ve bu pikin çizgi genişliği 46 meV'dir. Ana pikin sol tarafındaki duşuk enerji bölgesinde yaklaşık 90 meV'lik uzaklıkta 2.880 eV değerinde birinci fonon replikası, bu değerden 96 meV uzaklıkta 2.784 eV değerinde ikinci fonon replikası görülmektedir. Sarı lüminesans geçişi ise 2.2 eV civarında gözlenmektedir.



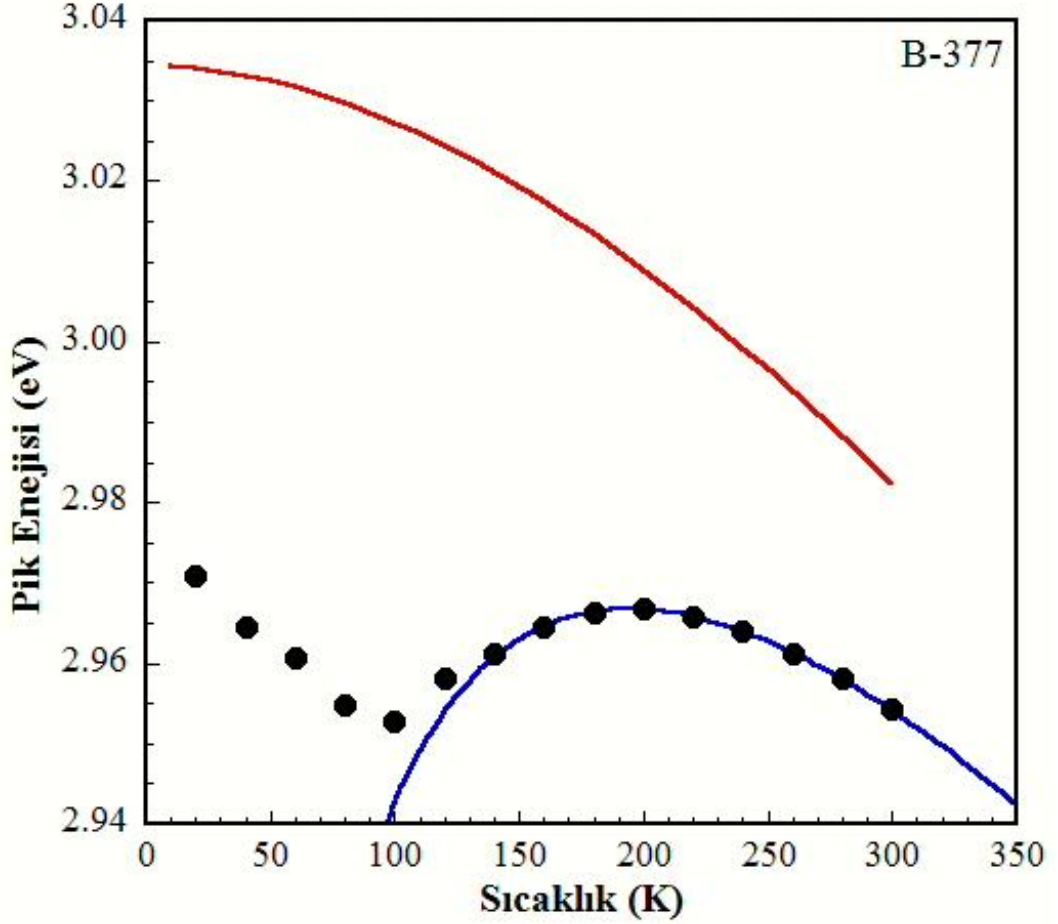
Şekil 4.7 (b) B-377 InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen yayınımın açık gösterimi



Şekil 4.7 (c) 10 K için B-377 numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrası

Şekil 4.8, B-377 numunesinde InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait optiksel geçişin pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. İlk olarak sıcaklık arttıkça pik enerjisi azalmakta olup yaklaşık 100 K'de 2.953 eV değerine sahip olmaktadır. Bu sıcaklıktan itibaren pik enerjisinin maviye kaydığı gözlenmektedir. Daha sonra 200 K üzerinde tekrar bir kırmızıya kayma gözlenmektedir. 20-100 K aralığında pik enerjisinin 17 meV kırmızıya kaydığı gözlenir. Varshni denklemine göre bu sıcaklık aralığında beklenen daralma ise 7 meV'dir. Dolayısıyla beklenen değere göre 10 meV'lik daha bir kırmızıya kayma söz konusudur. 100- 180 K aralığında ise FL pik enerjisi 15 meV maviye kaymıştır. Band aralığında sıcaklığa bağlı olarak beklenen daralmanın 14 meV olduğu dikkate alınırsa bu sıcaklık aralığında FL pik enerjisinde görülen maviye kayma gerçekte 29meV' dir. 180 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde pik enerjisinde 12 meV' lik yeniden bir kırmızıya kayma gözlenir. Bu sıcaklık değerleri için band aralığındaki daralmanın 31 meV olduğu dikkate alınırsa pik enerjisinin aslında 19 meV maviye kaydığı söylenebilir. Dolayısıyla 10-300 K aralığındaki net maviye kayma 35 meV'dir. Deneysel veriler ile oldukça uyumlu olan Denklemi (4.1)'i kullanarak yaptığımız fit ile elde edilen  $E(0)$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerini kullanarak çizilen Varshni

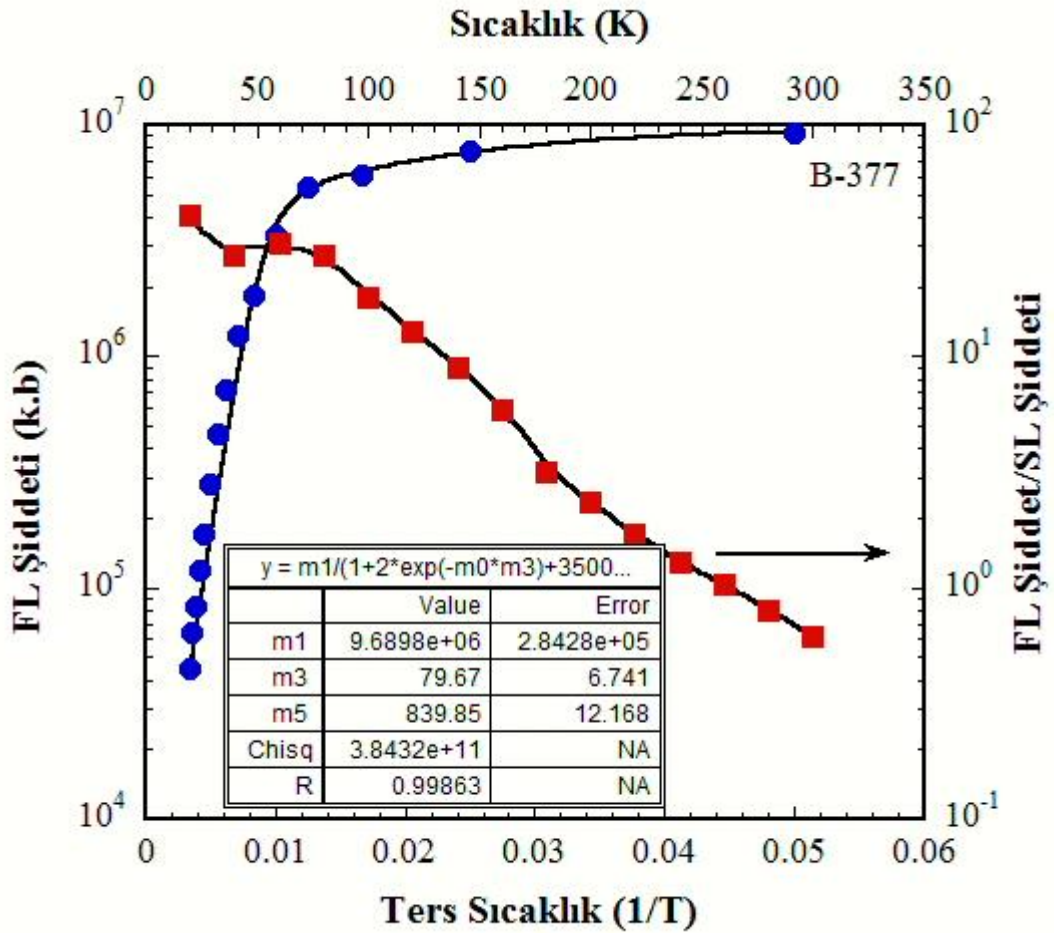
grafiginde B-377 numunesi için yerelleşme olmadığı durumda beklenen geçiş enerjisi 3.034 eV' dir.



Şekil 4.8 B-377 numunesine ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit

Buna karşılık ölçülen gerçek pik ise 63 meV kırmızıya kaymış olup 2.971 eV değerindedir. Sıcaklık arttıkça bu fark azalmaktadır. Oda sıcaklığında Varshni denklemiyle hesaplanan pik enerji değeriyle deneysel olarak ölçülen pik değeri arasında 28 meV'lik bir fark vardır. Şekil 4.9, B-377 numunesi için kuantum kuyusuna ait geçişin FL pik şiddetinin, sıcaklığın tersine göre değişimini göstermektedir. FL şiddeti sıcaklık arttıkça azalmaktadır. 10 K ile oda sıcaklığındaki yayılım şiddetinde gözlenen azalma yaklaşık 200 kat kadardır. Şekilde görüldüğü gibi (4.2) denklemini kullanarak yapılan fit deneysel sonuçlarla oldukça uyumludur. Bu sonuç, iki ışınsal olmayan geçiş merkezi için aktivasyon

enerjilerini  $E_{A_1} = 7$  meV  $E_{A_2} = 72$  meV olması gerektiğini gösterir. Şekil 4.9 aynı zamanda B-377 numunesi için InGaN/GaN kuantum kuyusuna ait geçişin pik şiddetinin sarı lüminesans pik şiddetine oranının sıcaklık davranışını göstermektedir. Sıcaklık arttıkça ışınal olmayan geçişlerin hızı hakkında fikir sahibi olmak için 10 K ve 300 K'deki FL şiddetleri oranına bakabiliriz. 10 K'de bu oran 40 iken 300 K'de 65 kat azalarak 0.6'ya düşmektedir.

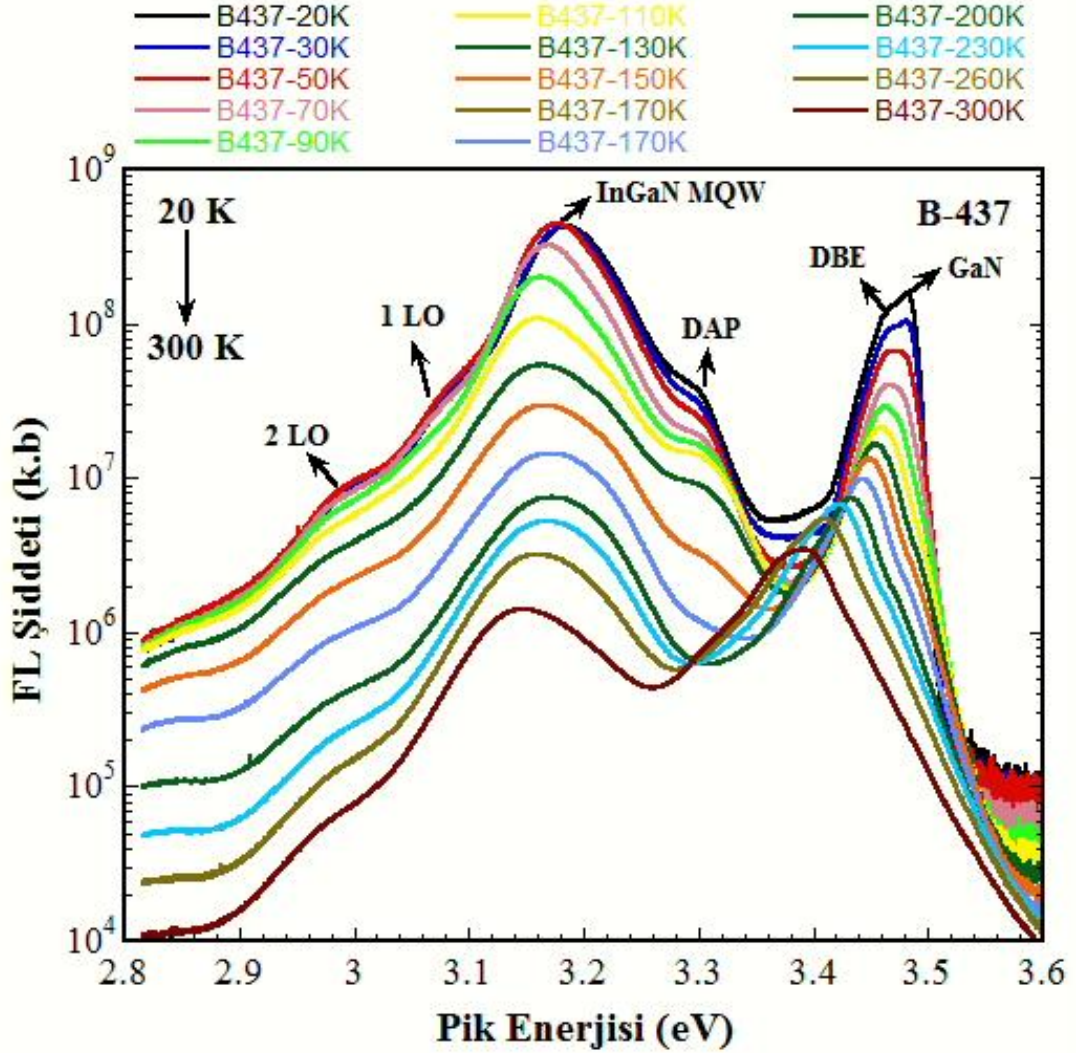


Şekil 4.9 B-377 numunesine ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılan fit.

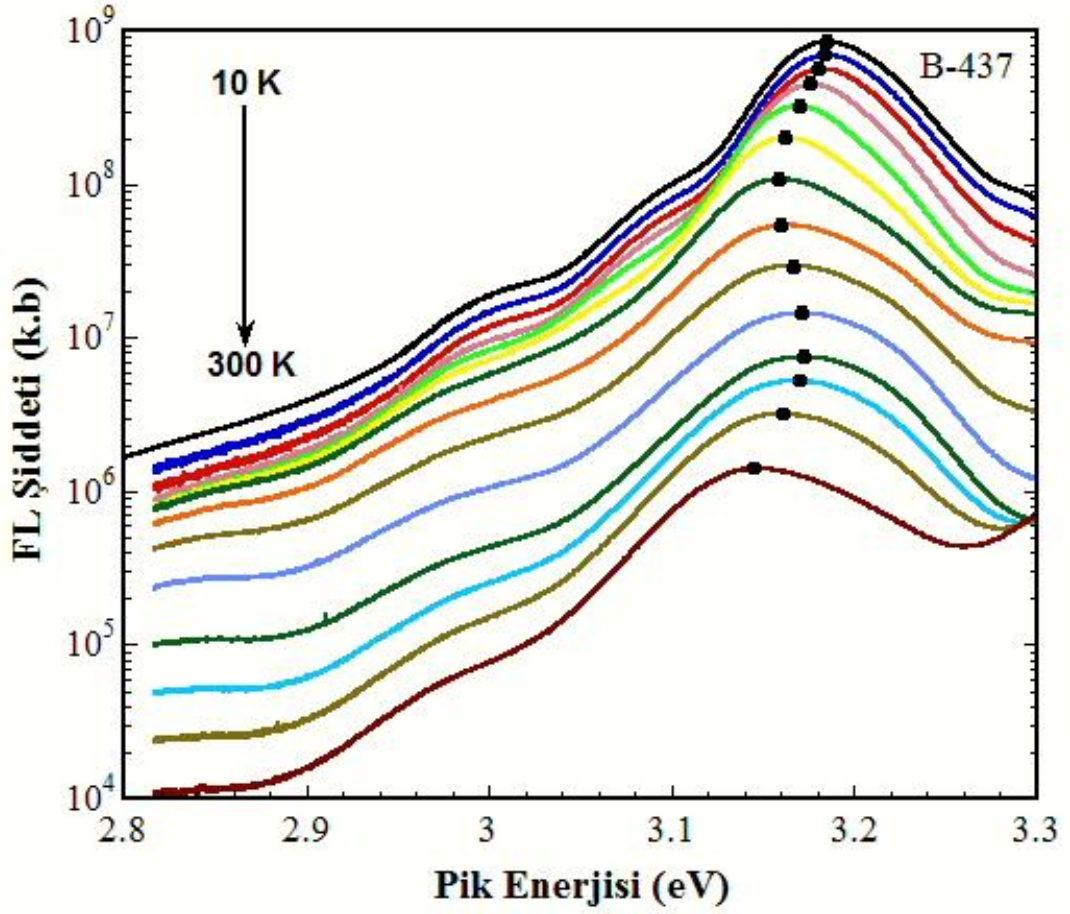
#### 4.4.3. Numune B-437

Şekilde 4.10 (a) ve (b), InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna sahip B-437 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı (10-300 K aralığında) FL ölçümlerini göstermektedir. Şekil 4.10 (c)' de ise 10 K sıcaklıkta ölçülen FL spektrumuna

yapılan Gaussian fitini göstermektedir. Bu fit yardımıyla GaN'a ait 3.471 eV değerinde gerçekleşen band kenarı geçiş pikinin çizgi genişliği 12 meV olarak bulunmuştur. 3.468 eV değerinde ise DBE geçişi gözlenir. Bu geçişin düşük enerji bölgesinde 3.298 eV tepe değerinde gözlenen pik alıcı-verici çiftlerinin (DAP) kendiliğinden birleşiminden kaynaklanmaktadır. Ana pik olarak adlandırdığımız numunemizin aktif tabakasını oluşturan InGaN/GaN ait geçişi gösteren pik 3.185 eV değerindedir ve bu pikin çizgi genişliği 61 meV'dir. Ana pikin birinci ve ikinci dereceden fonon replikaları spektrumun sol tarafındaki düşük enerji bölgesinde sırasıyla 85 meV ve yaklaşık 94 meV'lik uzaklıklarla 3.100 eV ve 3.006 eV değerlerinde gözlenmektedir.



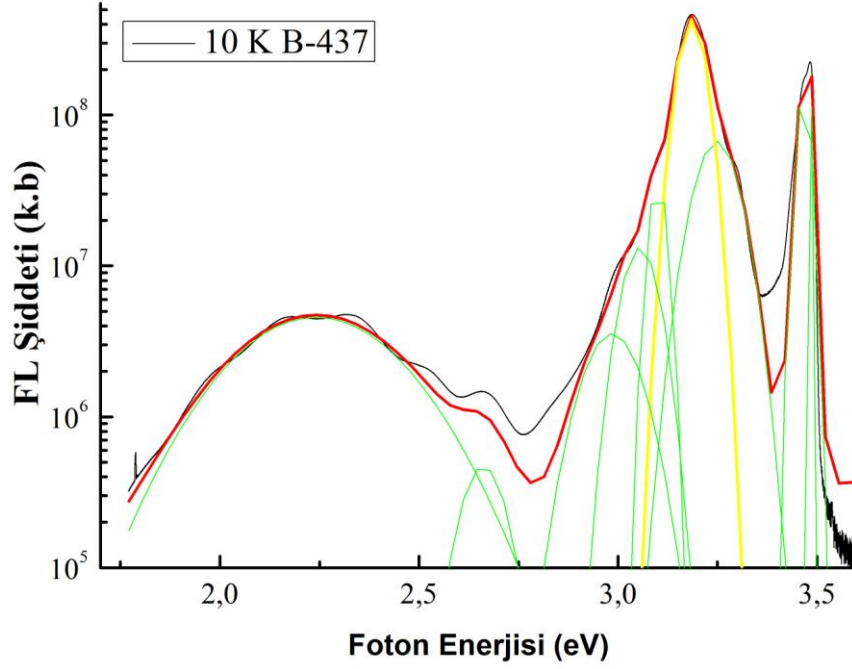
Şekil 4.10 (a) B-437 numunesine ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişim



Şekil 4.10 (b) B-437 InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen yayınının açık gösterimi

Şekil 4.11, B-437 numunesinde InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait optiksel geçişin pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. B-437 numunesine ait yayınım için gözlenen kayma, denklem 4.1' e göre beklenen band daralması ile uyumlu değildir. Bu durum numunemizin aktif tabakasında tuzaklar ve kusurlar bulunduğunun bir göstergesidir. İlk olarak sıcaklık arttıkça pik enerjisi azalmakta olup yaklaşık 110 K'de 3.162 eV değerine sahip olmaktadır. Bu sıcaklıktan itibaren pik enerjisinin arttığı yani maviye kaydığı gözlenmektedir. Daha sonra 170 K üzerinde tekrar bir kırmızıya kayma gözlenmektedir. 10-110 K aralığında pik enerjisinin 23 meV kırmızıya kaydığı gözlenir. Varshni denkleminde göre bu sıcaklık aralığında beklenen daralma ise 8 meV'dir. Dolayısıyla beklenen değere göre 15 meV'lik daha bir kırmızıya kayma söz konusudur. 110- 170 K aralığında ise FL pik enerjisi 8 meV maviye kaymıştır. Band aralığında sıcaklığa

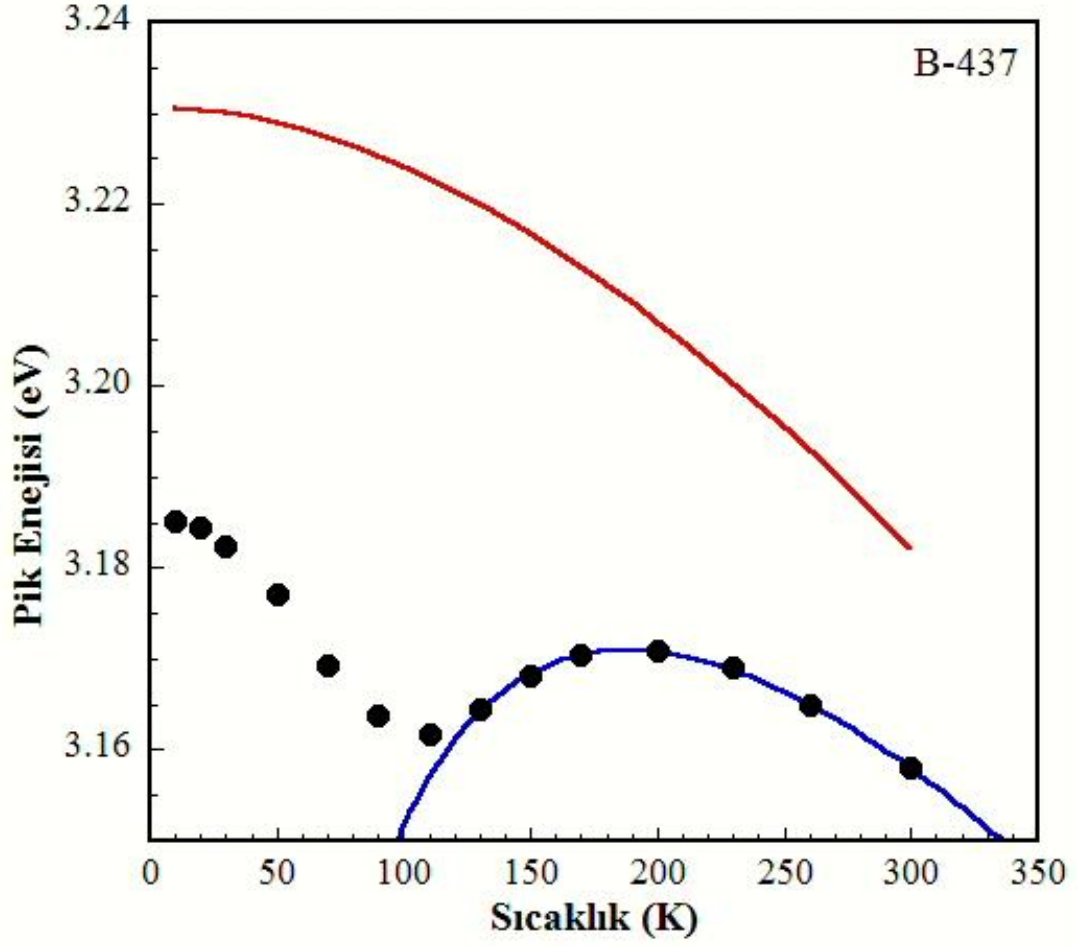
bağlı olarak beklenen daralmanın 10 meV olduğu dikkate alınırsa bu sıcaklık aralığında FL pik enerjisinde görülen maviye kayma gerçekte 18 meV' dir.



Şekil 4.10 (c) 10 K için B-437 numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrumu

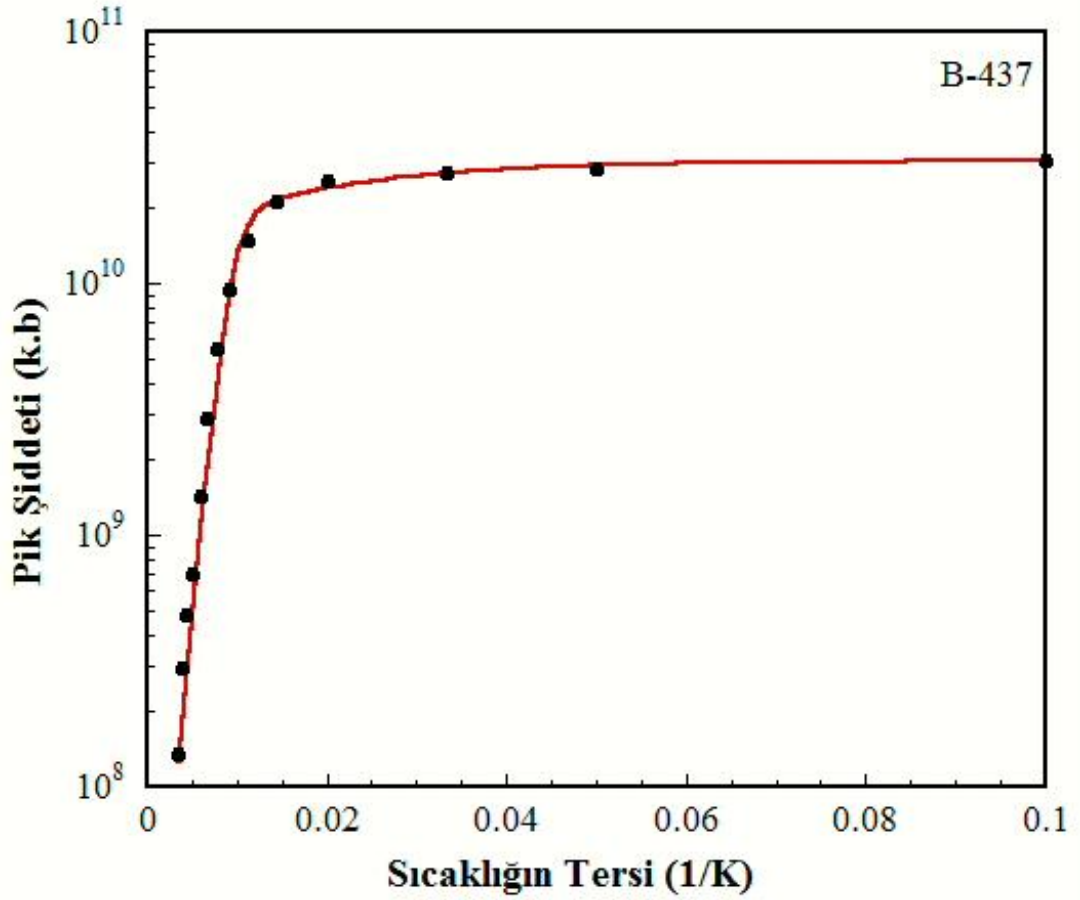
170 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde pik enerjisinde 12 meV' lik yeniden bir kırmızıya kayma gözlenir. Bu sıcaklık değerleri için band aralığındaki daralmanın 31 meV olduğu dikkate alınırsa pik enerjisinin aslında 19 meV maviye kaydığı söylenebilir. Dolayısıyla 10-300 K aralığındaki net maviye kayma 22 meV'dir. Şekil 4.10' de de görüldüğü gibi B-437 numunesi için deneysel veriler ile denklem (4.1)'i kullanarak yaptığımız fit oldukça uyumludur.  $E(0)$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerini kullanarak çizilen Varshni grafiğinde B-437 numunesi için yerleşme olmadığı durumda beklenen geçiş enerjisi 3.231 eV' dir. Buna karşılık ölçülen gerçek pik ise 46 meV kırmızıya kaymış olup 3.185 eV değerindedir. Diğer numunelere ait grafiklerde görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça bu fark azalmaktadır. Oda sıcaklığında alınan ölçümde hesaplanan ve gözlenen enerji değerleri arasındaki fark 24 meV'dir.





Şekil 4.11 B-437 numunesine ait pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit.

Şekil 4.12, B-437 numunesi için kuantum kuyusuna ait geçişin FL pik şiddetinin, sıcaklığın tersine göre değişimini göstermektedir. 10 K ile oda sıcaklığındaki yayınım şiddetinde gözlenen azalma yaklaşık 300 kat kadardır.

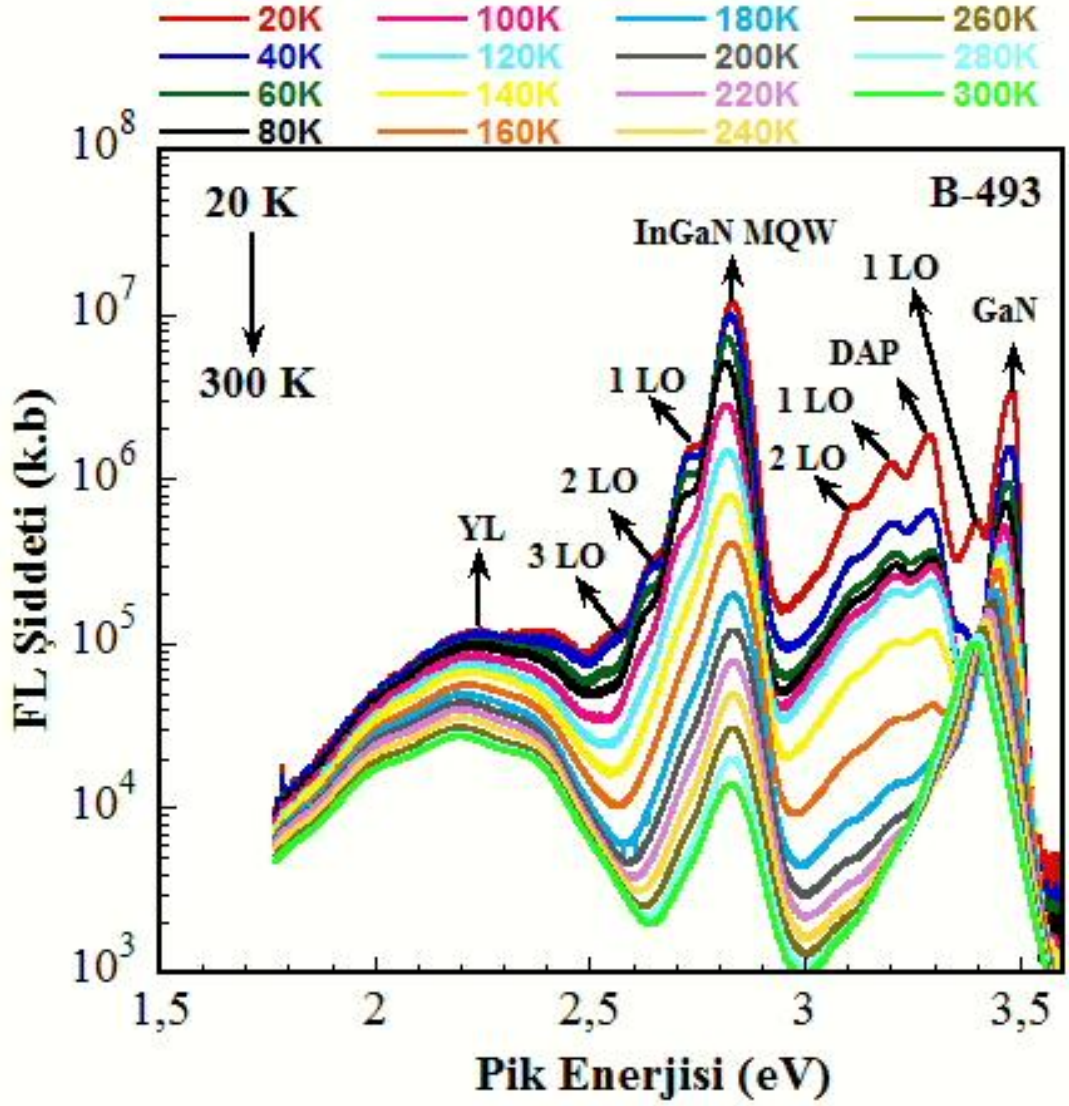


Şekil 4.12 B-437 numunesine ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılan fit

#### 4.4.4. Numune B-493

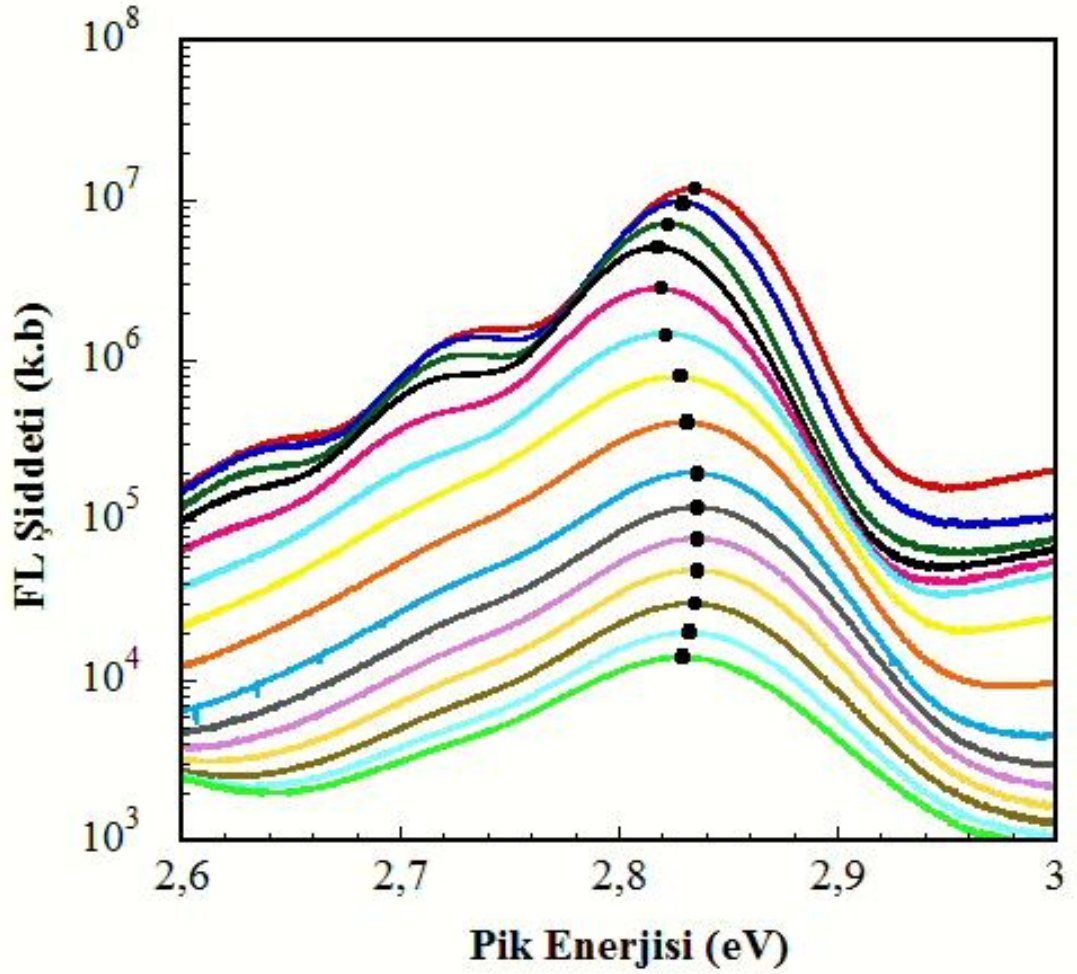
Şekilde 4.13 (a) ve (b), InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna sahip B-493 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı (20-300 K aralığında) FL ölçümlerini göstermektedir. Şekil 4.13 (c)' de ise 10 K sıcaklıkta ölçülen FL spektrumuna yapılan Gaussian fitini göstermektedir. Bu fit yardımıyla GaN'a ait çizgi genişliği 30 meV olarak hesaplanmıştır. GaN band kenarı geçişi 3.484 eV değerinde gerçekleşmiştir. Bu pikin 84 meV solunda 3.400 eV değerinde bu pike ait fonon replikası görülmektedir. 3.291 eV tepe değerinde gerçekleşen geçiş (DAP)'a ait bir geçiştir. 3.201 ve 3.111 eV değerlerinde DAP pikine ait birinci ve ikinci dereceden fonon replikaları görülmektedir. InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait geçişi gösteren pik 2.833 eV değerindedir ve bu pikin çizgi genişliği 52 meV'dir. Ana pikin birinci, ikinci ve üçüncü dereceden fonon replikaları spektrumun sol

tarafındaki düşük enerji bölgesinde sırasıyla 95 meV, 93 meV ve 90 meV' lik uzaklıklarla 2.738, 2.645 ve 2.555 eV değerlerinde gözlenmektedir.



Şekil 4.13 (a) B-493 numunesine ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi

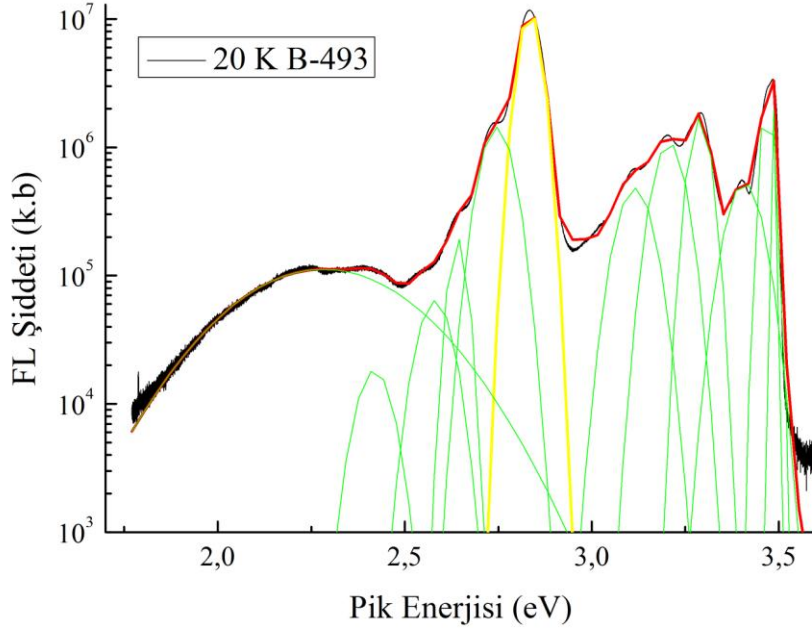
Şekil 4.14, B-493 numunesinde InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait optiksel geçişin pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. Numunenin aktif bölgeyi içeren tabakasında bulunan tuzaklar ve kusurlar nedeniyle B-493 numunesine ait yayılım için sıcaklığa bağlı gözlenen kayma, denklem 4.1' e göre beklenen band daralması ile uyumlu değildir. 20 K' de 2.833 eV değerinde bulunan pik enerjisi sıcaklık arttıkça azalarak 80 K' de 2.817 eV değerine sahip olmaktadır. Pik enerjisi bu sıcaklık değerinden 200 K'ye kadar bir artış gösterir.



Şekil 4.13 (b) B-493 InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen yayınının açık gösterimi.

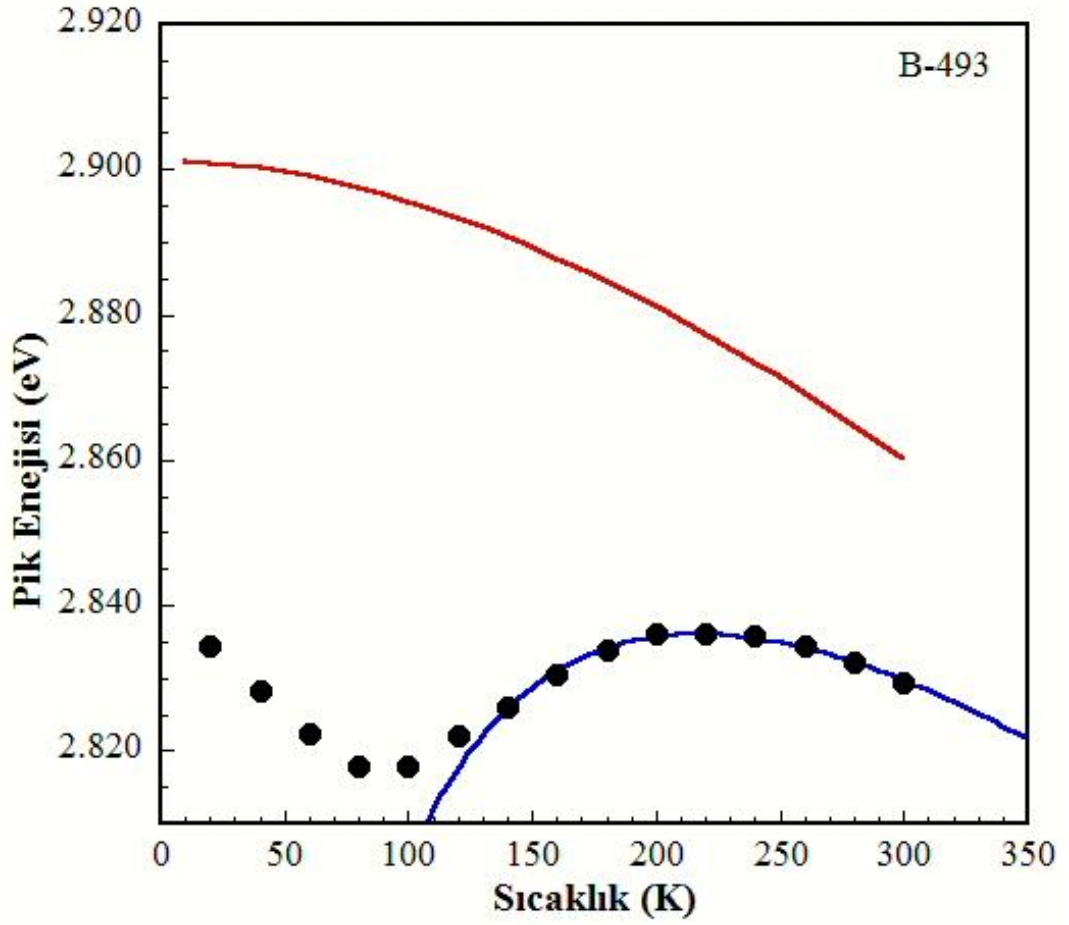
Yani enerji değeri maviye kayar. Son olarak 200 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde tekrar bir kırmızıya kayma gözlenmektedir. 20-80 K aralığında pik enerjisinde gözlenen kırmızıya kayma 16 meV'dir. Denklem 4.1' e göre bu sıcaklık aralığında beklenen daralma ise 3 meV'dir. Dolayısıyla beklenen değere göre 13 meV'lik bir kırmızıya kayma söz konusudur. 80- 200 K aralığında ise FL pik enerjisi 19 meV maviye kaymıştır. Band aralığında sıcaklığa bağlı olarak beklenen daralmanın 16 meV olduğu dikkate alınırsa bu sıcaklık aralığında FL pik enerjisinde görülen maviye kayma gerçekte 35 meV' dir. 200 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde pik enerjisinde 7 meV' lik yeniden bir kırmızıya kayma gözlenir. Bu sıcaklık değerleri için band aralığındaki daralmanın 21 meV olduğu dikkate alınırsa pik enerjisinin

aslında 14 meV maviye kaydığı söylenebilir. Dolayısıyla 10-300 K aralığındaki net kayma 36 meV'dir.



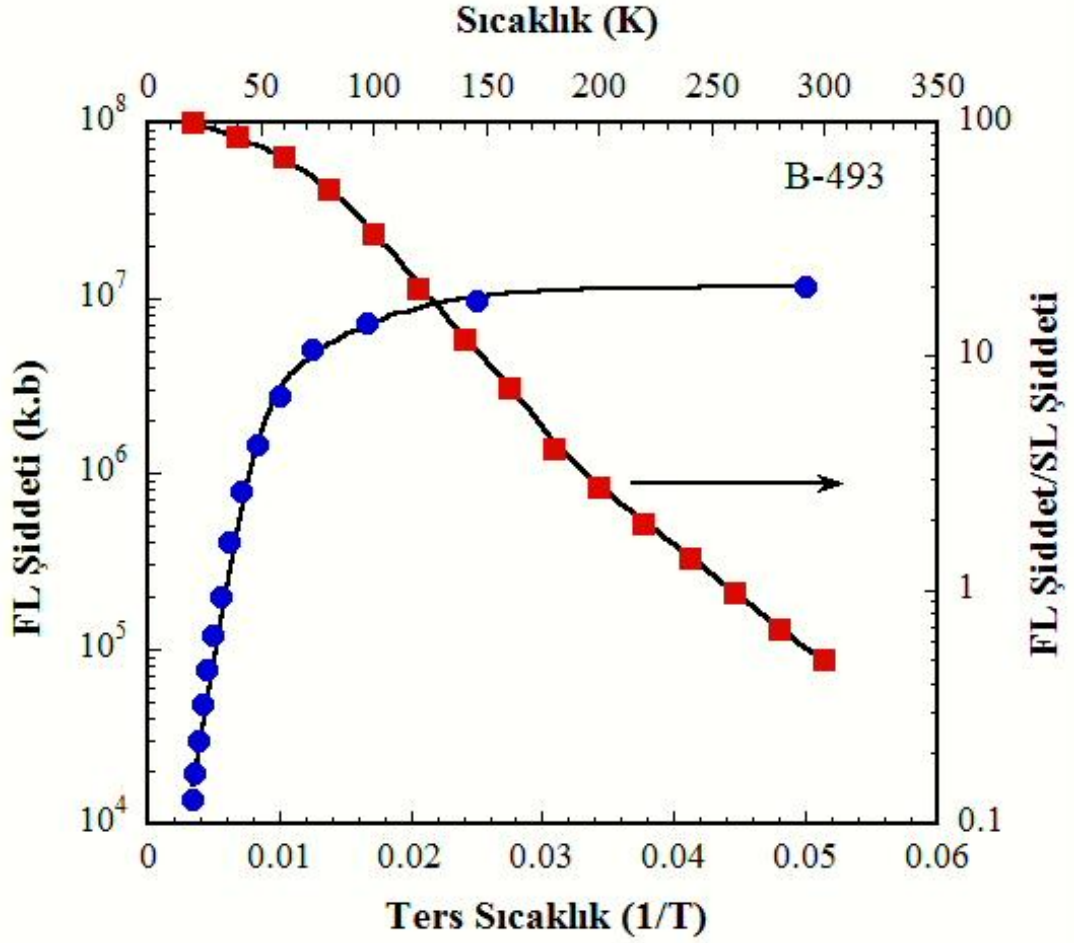
Şekil 4.13 (c) 10 K için B-493 numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrumu

Şekil 4.14' de de görüldüğü gibi B-493 numunesi için deneysel veriler ile denklem (4.1)' i kullanarak yaptığımız fit oldukça uyumludur. Denklem 4.1' e göre çizilen grafikte B-437 numunesi için yerleşme olmadığı durumda beklenen geçiş enerjisi 2.901 eV' dir. Buna karşılık ölçülen gerçek pik değeri 66 meV kırmızıya kaymış olup 2.833 eV değerindedir. Oda sıcaklığı için hesaplanan ve gözlenen enerji değerleri arasındaki fark ise 31 meV'dir. Bu sonuçlar aradaki farkın sıcaklık arttıkça azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.14, B-493 numunesine ait pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit

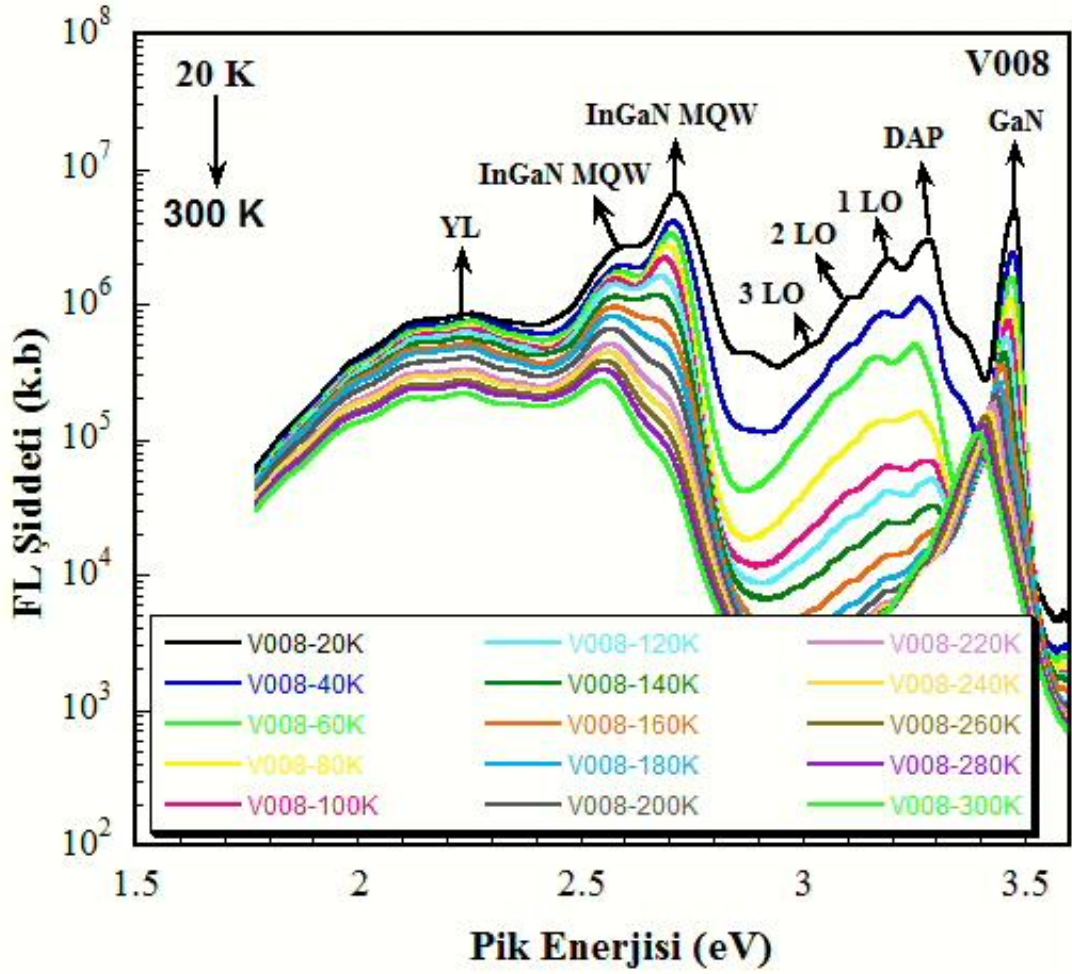
Şekil 4.15, B-493 numunesi için kuantum kuyusuna ait geçişin FL pik şiddetinin, sıcaklığın tersine göre değişimini göstermektedir. 10 K ile oda sıcaklığındaki yayınım şiddetinde gözlenen azalma yaklaşık 300 kat kadardır. Işınsal olmayan geçiş merkezi için aktivasyon enerjileri  $E_{A_1} = 16$  meV  $E_{A_2} = 90$  meV olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.15 aynı zamanda ışınsal olmayan geçişlerin hızının sıcaklığa bağlı davranışını da göstermektedir. FL/SL oranı 100 iken 300K'de 200 kat azalarak 0.5' e düşmektedir.



Şekil 4.15 B-493 numunesine ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılan fit.

#### 4.4.5. Numune V008

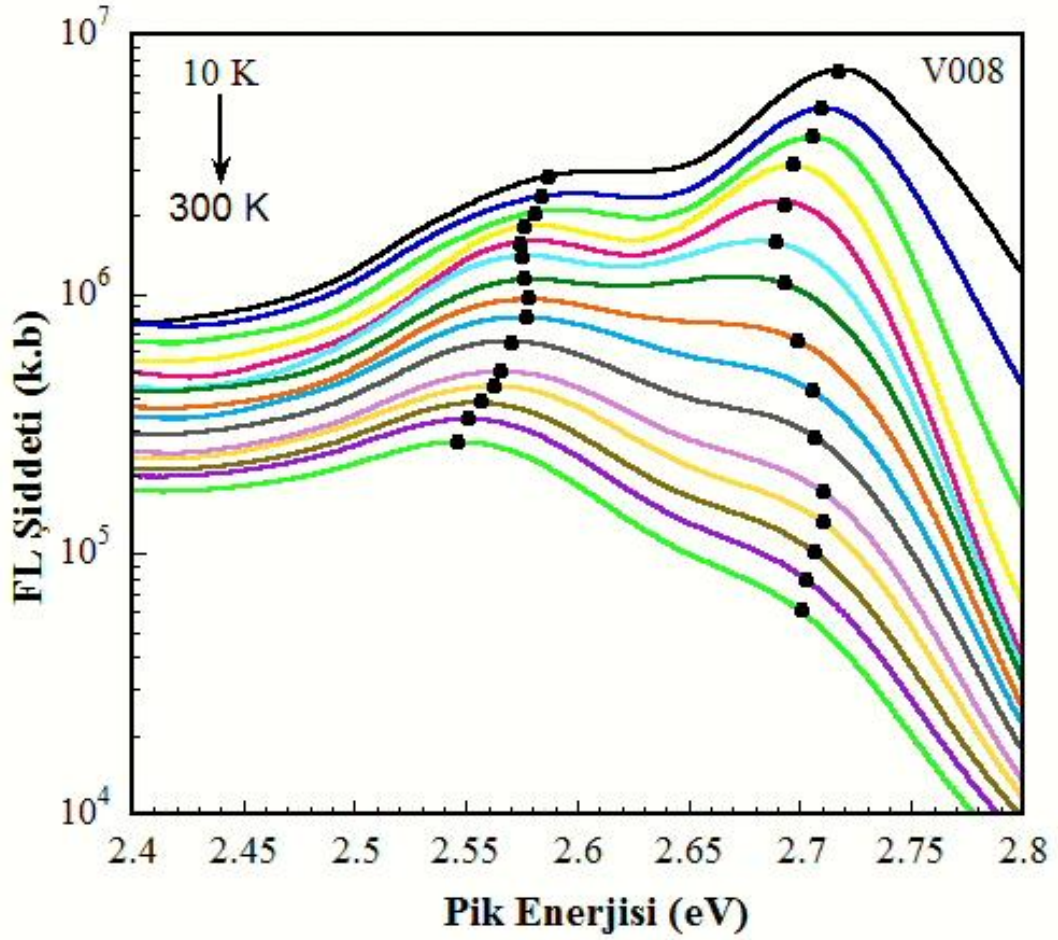
Şekilde 4.16 (a) ve (b), InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna sahip V008 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı (20-300 K aralığında) FL ölçümlerini göstermektedir. Şekil 4.16 (c)' de görüldüğü gibi 20 K sıcaklıkta ölçülen FL spektrumuna Gaussian fitler yapılarak gözlenen geçişlerin pik enerjileri ve çizgi genişlikleri (FWHM) belirlenmiştir. Spektrumun en yüksek enerji bölgesinde gözlenen ve merkezi 3.480 eV olan pik GaN'a ait band kenarı geçişidir. Bu pikin çizgi genişliği 29 meV olarak bulunmuştur. Bu geçişin düşük enerji bölgesinde 3.283 eV tepe değerinde (DAP) geçişinden kaynaklanan pik görülmektedir. Bu geçişin solunda sırasıyla 91 meV, 84 meV ve 85 meV aralıklarla (3.192 eV),



Şekil 4.16 (a) V008 numunesine ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi.

(3.108 eV), (3.023 eV) değerlerinde DAP pikinin birinci, ikinci ve üçüncü dereceden fonon replikaları görülmektedir. 2.720 eV değerinde gerçekleşen yayılım ise, numunemizin aktif tabakasını oluşturan InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna aittir ve bu pikin çizgi genişliği 57 meV'dir. Ana pik olarak adlandırdığımız bu pikin sol tarafındaki düşük enerji bölgesinde 2.605 eV değerinde gözlenen pik InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusunun 2. enerji seviyesinden kaynaklanan geçişe aittir. Son olarak merkezi 2.2 eV civarında olan geniş pik, GaN malzemelerde gözlenen ve sarı lüminesans olarak adlandırılan geçiştir.

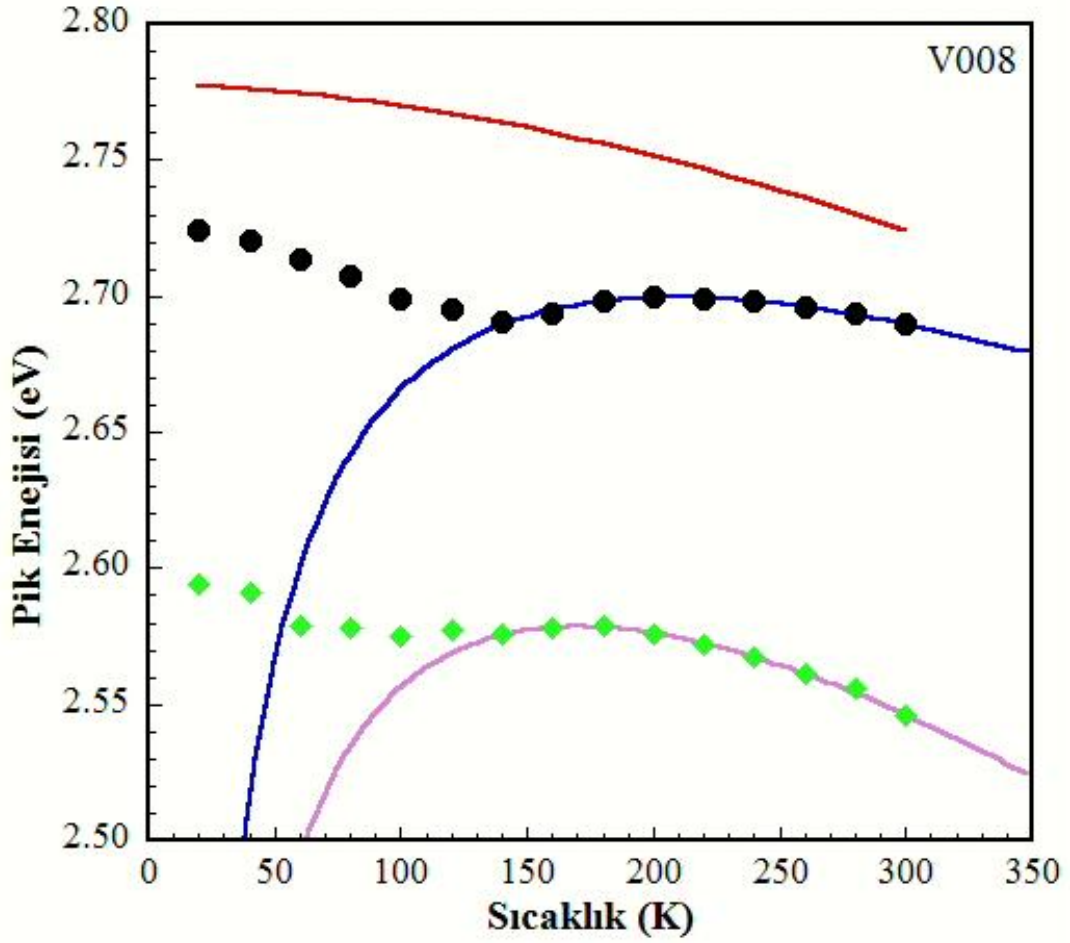




Şekil 4.16 (b) V008 InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen yayınının açık gösterimi

Şekil 4.17, V008 numunesindeki InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusunun 1. ve 2. enerji seviyelerinden kaynaklanan optiksel geçiş pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi V008 numunesine ait 1.pik için gözlenen kayma, denklem 4.1 ile uyumlu değildir. İlk olarak sıcaklık arttıkça ana pik enerjisi azalmakta olup 140 K'de yaklaşık 2.691 eV değerine sahip olmaktadır. Bu sıcaklıktan itibaren 1.pik enerjisinin 200 K' ye kadar maviye kaydığı gözlenmektedir. Bu sıcaklık değerinin üzerinde ise enerji değeri tekrar kırmızıya kayma gösterir.



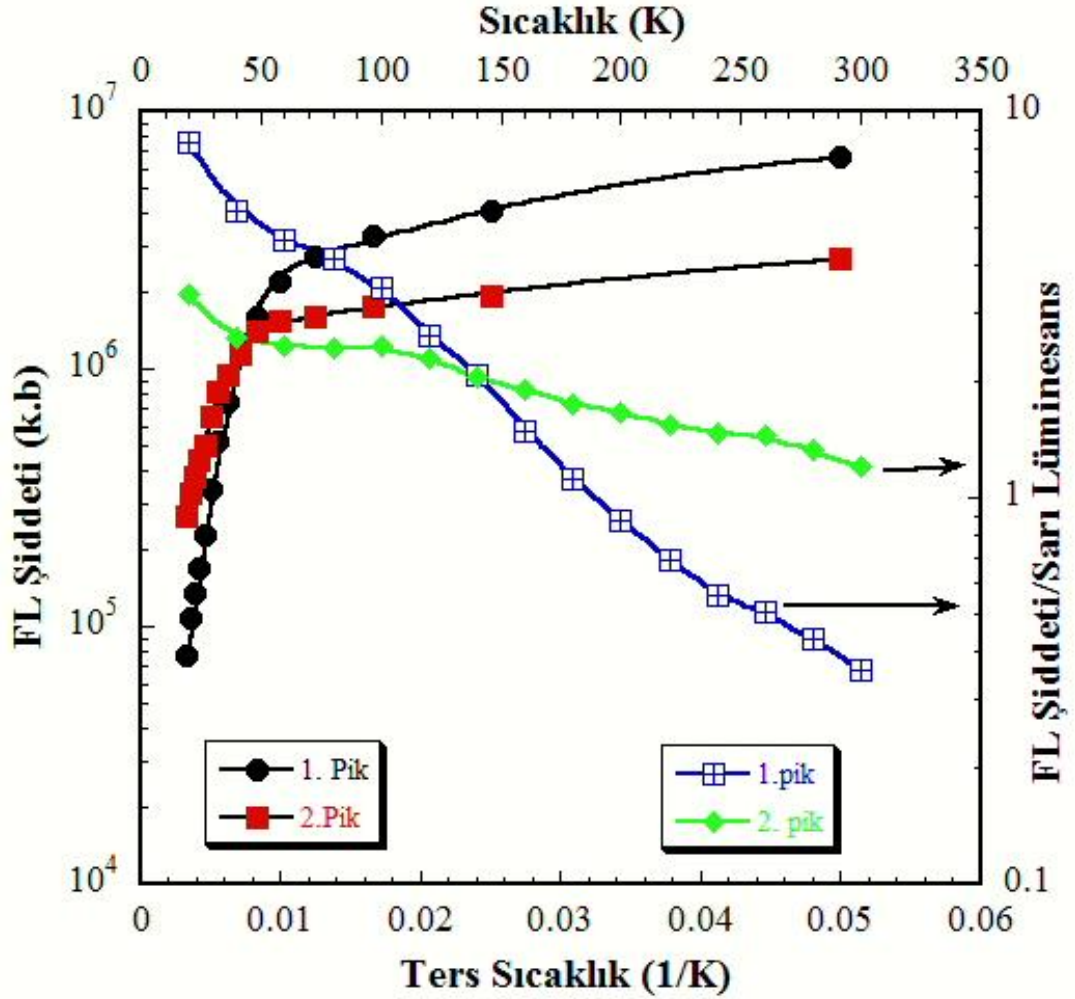


Şekil 4.17 V008 numunesine ait pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit.

Denklem 4.1' e göre bu değer 13 meV olacağı dikkate alınırsa beklenen değere göre 16 meV daha kırmızıya kayma söz konusudur. 140-180 K aralığında 2.pik enerjisi 3 meV maviye kaymıştır. Band aralığındaki beklenen daralmanın bu sıcaklık değerleri arasında 8 meV olduğu düşünülürse 2. Pik enerjisi gerçekte 11 meV maviye kaymış olur. 180-300 K aralığında ise 2.pik enerjisi 34 meV kırmızıya kaymıştır. Band aralığında beklenen daralma 31 meV olduğu için gerçekte kırmızıya kayma 3 meV'dir. Dolayısıyla 10-300 K aralığındaki 2.pik için gözlenen net kırmızıya kayma 8 meV'dir. Denklem 4.1' i kullanarak 1. Ve 2. Pik enerjileri için deneysel verilere yapılan fitler oldukça başarılıdır. Bu denklemi kullanarak çizilen grafiğe göre V008 numunesi için yerleşme olmadığı durumda beklenen 20 K'deki 1.pik geçiş enerjisi 2.777 eV' dir. Buna karşılık ölçülen gerçek pik ise 57 meV

kırmızıya kaymış olup 2.720 eV değerindedir. Sıcaklık arttıkça bu fark azalmaktadır. Örneğin oda sıcaklığına Varshni denkleminin öngördüğü pik enerji değeriyle deneysel olarak ölçülen pik değeri arasında 35 meV'lik bir fark vardır.

Şekil 4.18, B-V008 numunesi için kuantum kuyusuna ait geçişin FL pik şiddetinin, sıcaklığın tersine göre değişimini göstermektedir. 10 K ile oda sıcaklığındaki yayılım şiddetinde gözlenen azalma yaklaşık 100 kat kadardır. Işınsal olmayan geçiş merkezi için 1. pike ait aktivasyon enerjileri  $E_{A_1} = 5$  meV  $E_{A_2} = 76$  meV, 2. pike ait aktivasyon enerjileri ise  $E_{A_1} = 3$  ,  $E_{A_2} = 71$  meV olarak hesaplanmıştır.

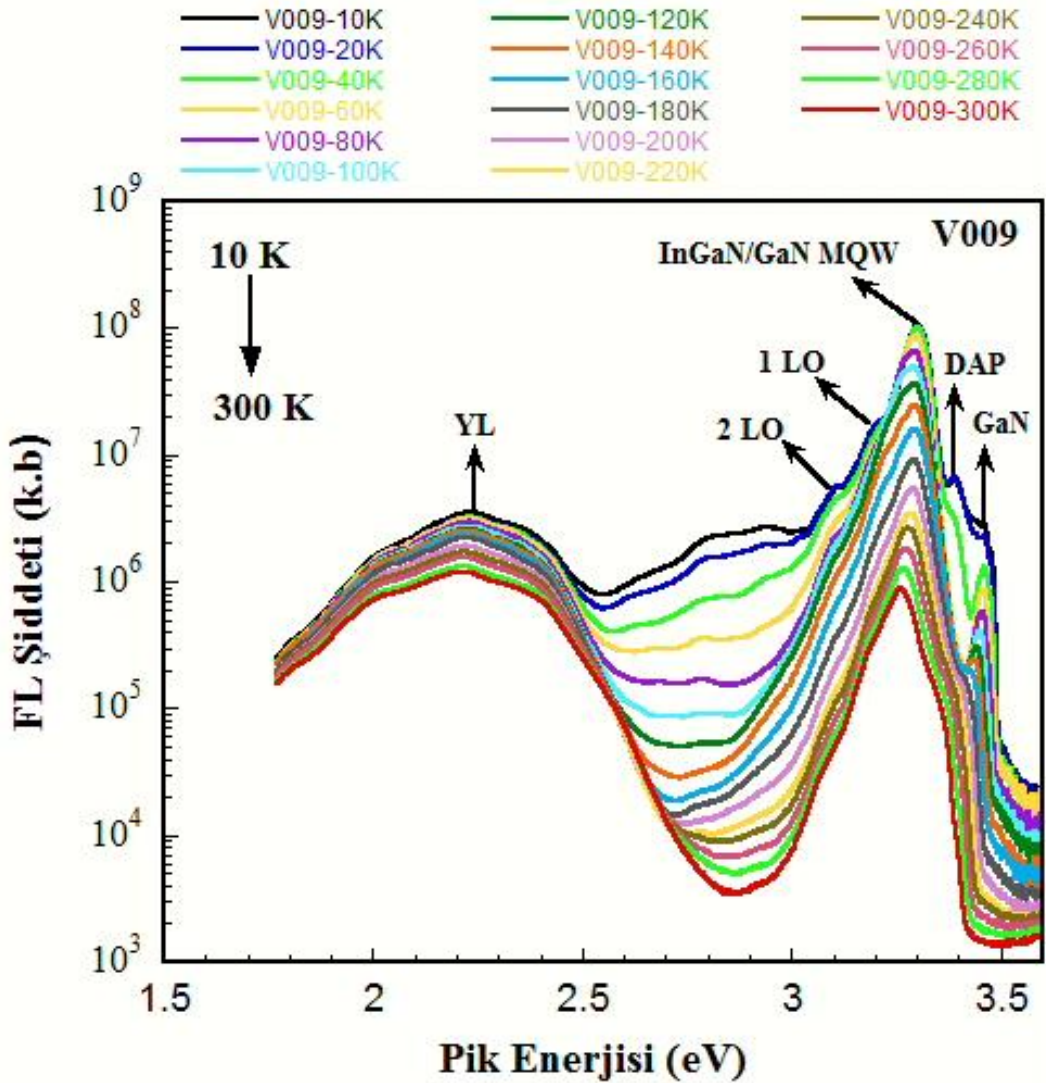


Şekil 4.18 V008 numunesine ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılan fit.

Şekil 4.18 aynı zamanda ışınsal olmayan geçişlerin hızının sıcaklığa bağlı davranışını da göstermektedir. 1.pik için FL/SL oranı 10 K' de 8 iken 300K'de 20 kat azalarak 0.4' e düşmüştür. 2.Pik için ise FL/SL oranı 10 K' de 3 iken 300K'de 25 kat azalarak 0.12'ye düşmüştür.

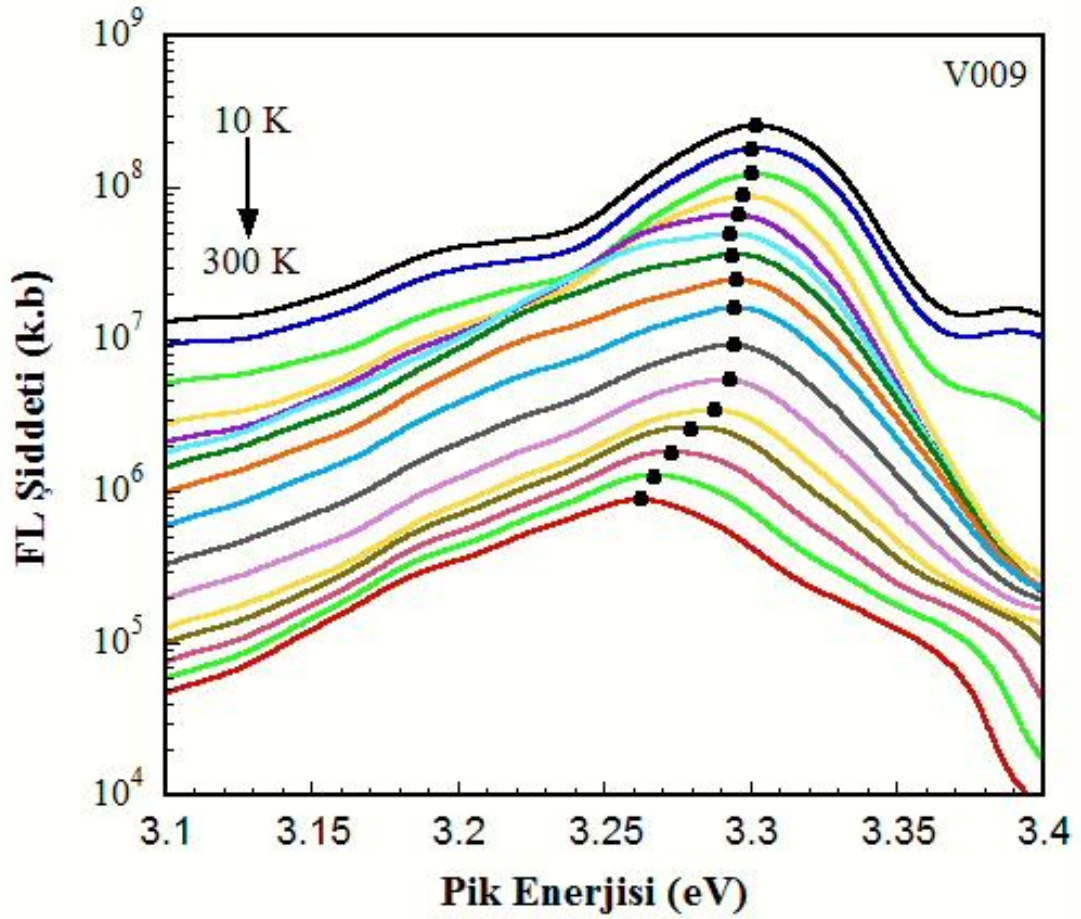
#### 4.4.6. Numune V009

Şekilde 4.19 (a) ve (b), InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna sahip V009 kodlu numunenin sıcaklığa bağlı (10-300 K aralığında) FL ölçümlerini göstermektedir. Şekil 4.19 (c)' de ise 10 K sıcaklıkta ölçülen FL spektrumuna yapılan Gaussian fitini göstermektedir.

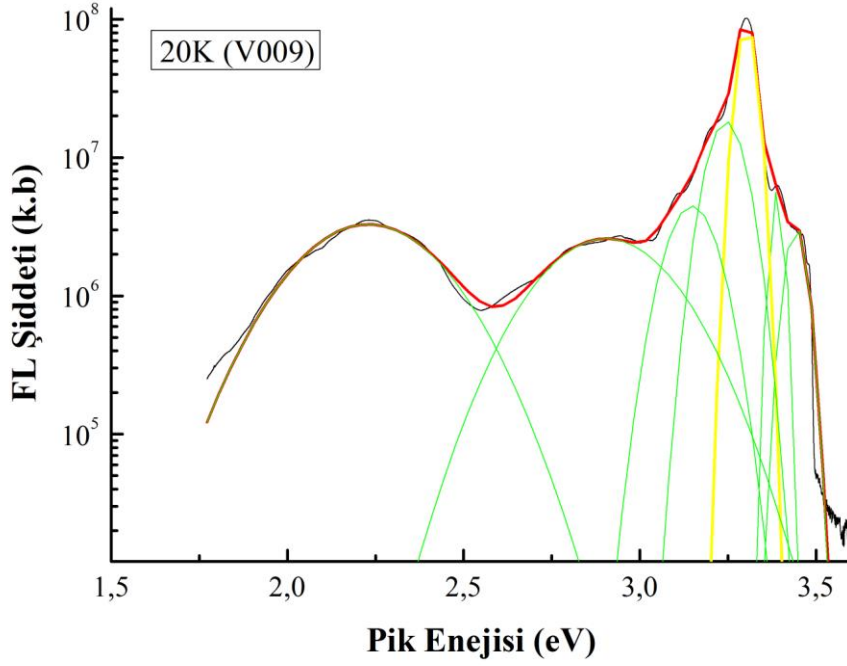


Şekil 4.19 (a) V009 numunesine ait FL Şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi

3.462 eV değerinde gözlenen GaN band kenarı geçişinden kaynaklanan pikin fit yardımıyla hesaplanan çizgi genişliği 53 meV'dir. Bu geçişin düşük enerji bölgesinde 3.389 eV tepe değerinde gözlenen pik alıcı-verici çiftlerinin (DAP) kendiliğinden birleşiminden kaynaklanmaktadır. 3.298 eV değerinde gerçekleşen yayınım, numunemizin aktif tabakasını oluşturan InGaN/GaN oklu kuantum kuyusuna ait geçişi göstermektedir ve bu pikin çizgi genişliği 48 meV'dir. Bu pikin birinci ve ikinci dereceden fonon replikaları spektrumun sol tarafındaki düşük enerji bölgesinde 92 meV'lik uzaklıklarla 3.206 eV ve 3.114 eV değerlerinde gözlenmektedir.



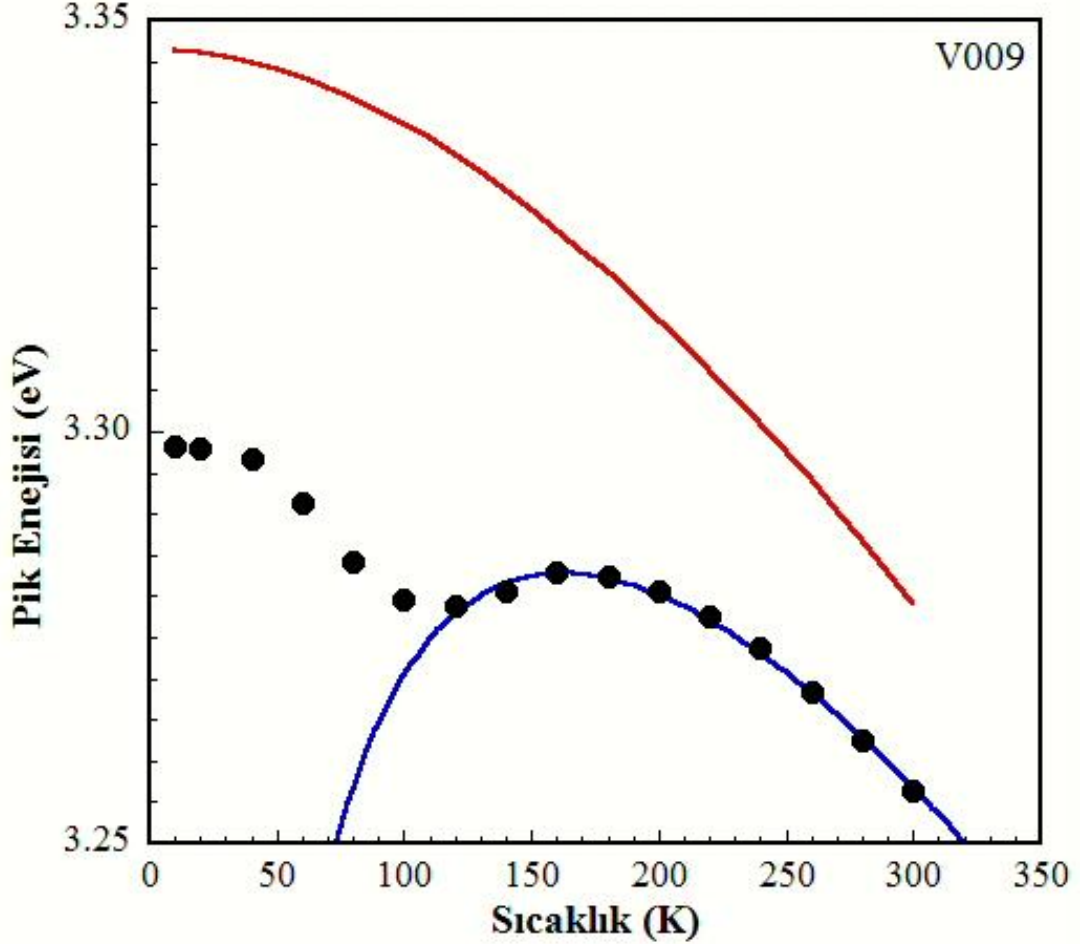
şekil 4.19 (b) V009 InGaN/GaN kuantum kuyusundan gelen yayınımın açık gösterimi.



Şekil 4.19 (c) 10 K için V009 numunesine ait Gaussian fiti uygulanmış FL Spektrumu.

Şekil 4.20, V009 numunesinde InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait optiksel geçişin pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi band aralığının sıcaklığa bağlı değişimi denklem 4.1 ile uyumlu değildir. 10 K' de 3.346 eV değerinde bulunması gereken pik enerji değeri 48 meV' lik bir farkla 3.298 eV değerinde gözlenmiştir. Pik enerjisi 120 K' de 3.279 eV değerine sahip olmaktadır. Yani sıcaklık arttıkça pik enerji değeri azalmıştır. 120 K ile 160 K arasında ise pik enerjisinde artış olduğundan pik enerjisinde maviye kayma gözlenir. 160 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde ise pik enerjisi azalarak tekrar kırmızıya kayma gösterir. 10-120 K aralığında pik enerjisinde gözlenen kırmızıya kayma 19 meV'dir. Denklem 4.1' e göre bu sıcaklık aralığında beklenen daralma ise 13 meV'dir. Dolayısıyla beklenen değere göre 6 meV'lik daha bir kırmızıya kayma söz konusudur. 120- 160 K aralığında ise FL pik enerjisi 4 meV maviye kaymıştır. Band aralığında sıcaklığa bağlı olarak beklenen daralmanın 9 meV olduğu dikkate alınırsa bu sıcaklık aralığında FL pik enerjisinde görülen maviye kayma gerçekte 13meV' dir. 160 K üzerindeki sıcaklık değerlerinde pik enerjisinde 27 meV' lik yeniden bir kırmızıya kayma gözlenir. Bu sıcaklık değerleri

için band aralığındaki beklenen daralmanın 45 meV olduğu dikkate alınırsa pik enerjisinin aslında 18 meV maviye kaydığı söylenebilir.

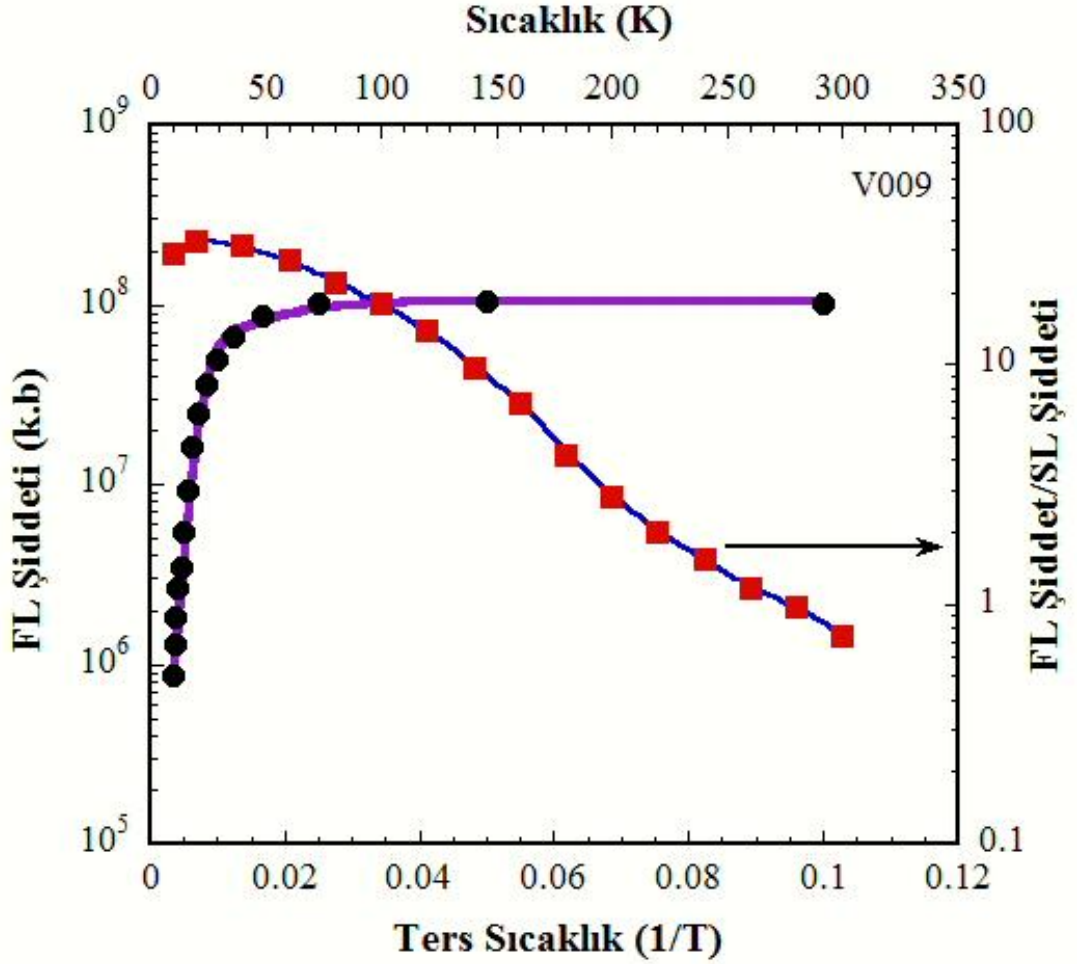


Şekil 4.20 V009 numunesine ait Pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimine yapılmış fit

Dolayısıyla 10-300 K aralığındaki net maviye kayma 25 meV'dir. Şekil 4.20' de de görüldüğü gibi V009 numunesi için deneysel veriler ile denklem (4.1)' i kullanarak yaptığımız fit oldukça uyumludur. Denklem 4.1' e göre çizilen grafikte V009 numunesi için yerleşme olmadığı durumda 10 K' de beklenen geçiş enerjisi 3.346 eV değerindedir. Buna karşılık ölçülen gerçek pik değeri 48 meV kırmızıya kaymış olup 3.298 eV değerindedir. Oda sıcaklığı için hesaplanan ve gözlenen enerji değerleri arasındaki fark ise 23 meV'dir. Bu sonuçlar aradaki farkın sıcaklık arttıkça azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.21 V009 numunesi için kuantum kuyusuna ait geçişin FL pik şiddetinin, sıcaklığın tersine göre değişimini göstermektedir. 10 K ile oda sıcaklığındaki yayının şiddetinde gözlenen azalma yaklaşık 140 kat kadardır. Deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu Şekil 4.9’ da görülen, denklem (4.2)’ yi kullanarak yapılan fit yardımıyla ışınsal olmayan geçiş merkezi için aktivasyon enerjileri  $E_{A_1} = 10$  meV  $E_{A_2} = 81$  meV olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.21 aynı zamanda ışınsal olmayan geçişlerin hızının sıcaklığa bağlı davranışını da göstermektedir. FL/SL oranı 29 iken 300 K’de 40 kat azalarak 0.7’ ye düşmektedir.



Şekil 4.21 V009 numunesine ait FL şiddetinin sıcaklığın tersine bağlı grafiğine yapılan fit.

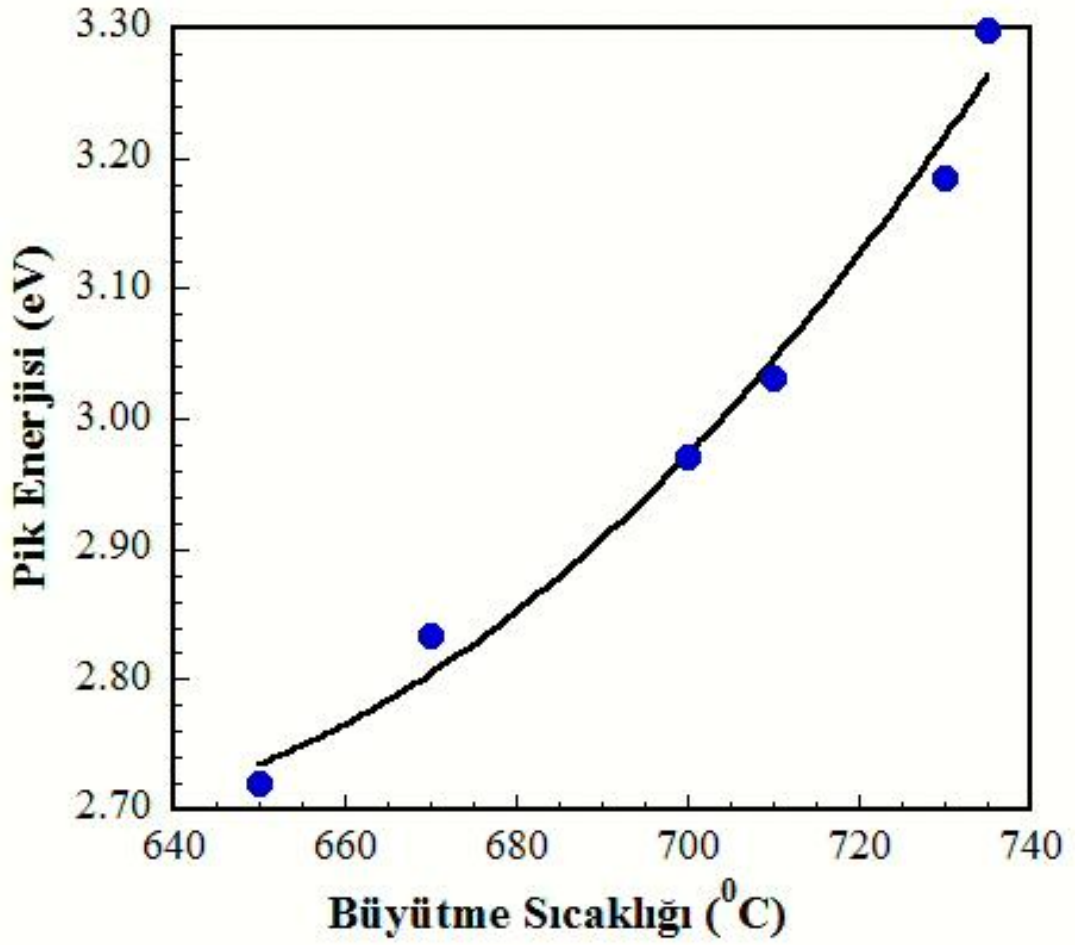
#### 4.4.7 Fotolüminesans Sonuçlarının Büyütme Sıcaklığına Bağlı Analizi

İndiyum atomunun ayrışma sıcaklığının düşük olması ve N atomunun denge basıncının yüksek olması nedeniyle In atomu alaşıma Ga atomuna göre daha zor katılmaktadır. Bu durum, faz ayrışmasına ve yüksek In içeren filmlerde In kümeleşmelere sebep olur. Nitrit filmlerdeki elektron deşik yeniden birleşimleri bu potansiyel dalgalanmalar ile ilişkilendirilmektedir. Dolayısıyla büyütme sıcaklığı, alaşımdaki In oranının önemli ölçüde etkiler. In oranı da malzeme kalitesi üzerinde oldukça etkilidir. Bu sebeple diğer büyütme parametreleri aynı, InGaN aktif bölgenin büyütme sıcaklıkları farklı numunelerimizin optiksel özelliklerini Fotolüminesans tekniği kullanarak detaylı bir biçimde araştırdık. İncelenen örneklerin düşük sıcaklıkta alınan Fotolüminesans spektrumlarının analizlerinden çıkarılan sonuçlar Çizelge 4.1’ de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 Numunelere ait parametreler

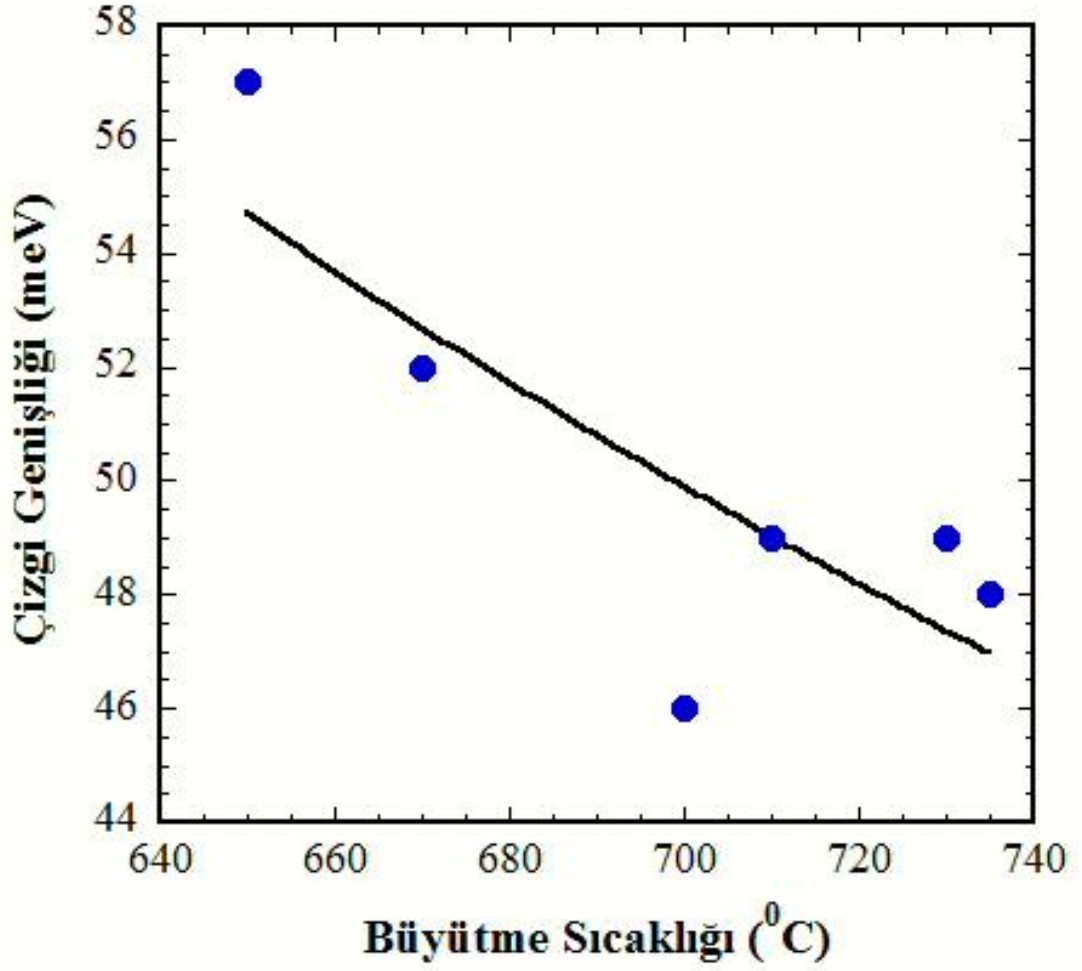
Numune	Büyütme Sıcaklığı (°C)	Pik Enerji (eV)	Çizgi Genişliği (meV)	E1 Aktivasyon Enerjisi (meV)	E2 Aktivasyon Enerjisi (meV)	FL/SL	Kayma (meV)
V008	650	2.720	57	5	76	3.4	57
B-493	670	2.833	52	16	90	100	67
B-377	700	2.970	46	7	72	41	63
B-292	710	3.0313	49	22	122	310	60
B-437	730	3.185	49	6	73	-	46
V009	735	3.298	48	10	81	29	48

Pik enerjilerinin büyütme sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 4.22’ de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi büyütme sıcaklığı arttıkça kuantum kuyusunda gerçekleşen yayınının pik enerji değeri de artmaktadır. Bunun sebebi InGaN kuantum kuyusundaki In oranının büyütme sıcaklığı arttıkça azalmasıdır. In oranı azaldıkça enerji bant aralığı artacaktır ve bunun sonucu olarak da gözlenen pik enerji değeri artacaktır. Deneysel sonuçlarımız hem literatür ile hem de bu beklentiler ile oldukça uyumludur.



Şekil 4.22, Numunelere ait pik enerjilerinin büyüme sıcaklığına bağlı davranışı

Şekil 4.23, çizgi genişliğinin büyüme sıcaklığı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Büyütme sıcaklığı arttıkça In atomlarının alaşıma katılması zorlaşacağından numunenin aktif tabakasında görülen potansiyel dalgalanmalar dolayısıyla da yerelleşme etkisi azalacaktır. Yerelleşme etkisinin az olduğu durumlar banttan banda geçişlerin etkin olmasına neden olur. Geçişlerin banttan banda olması da çizgi genişliğinin azalması anlamına gelir. Bunun sonucu olarak da büyüme sıcaklığı arttıkça geçiş çizgi genişliğininin azalması beklenir. Bizim sonuçlarımızda çizgi genişliğinin bu eğilimde olduğu görülmektedir.



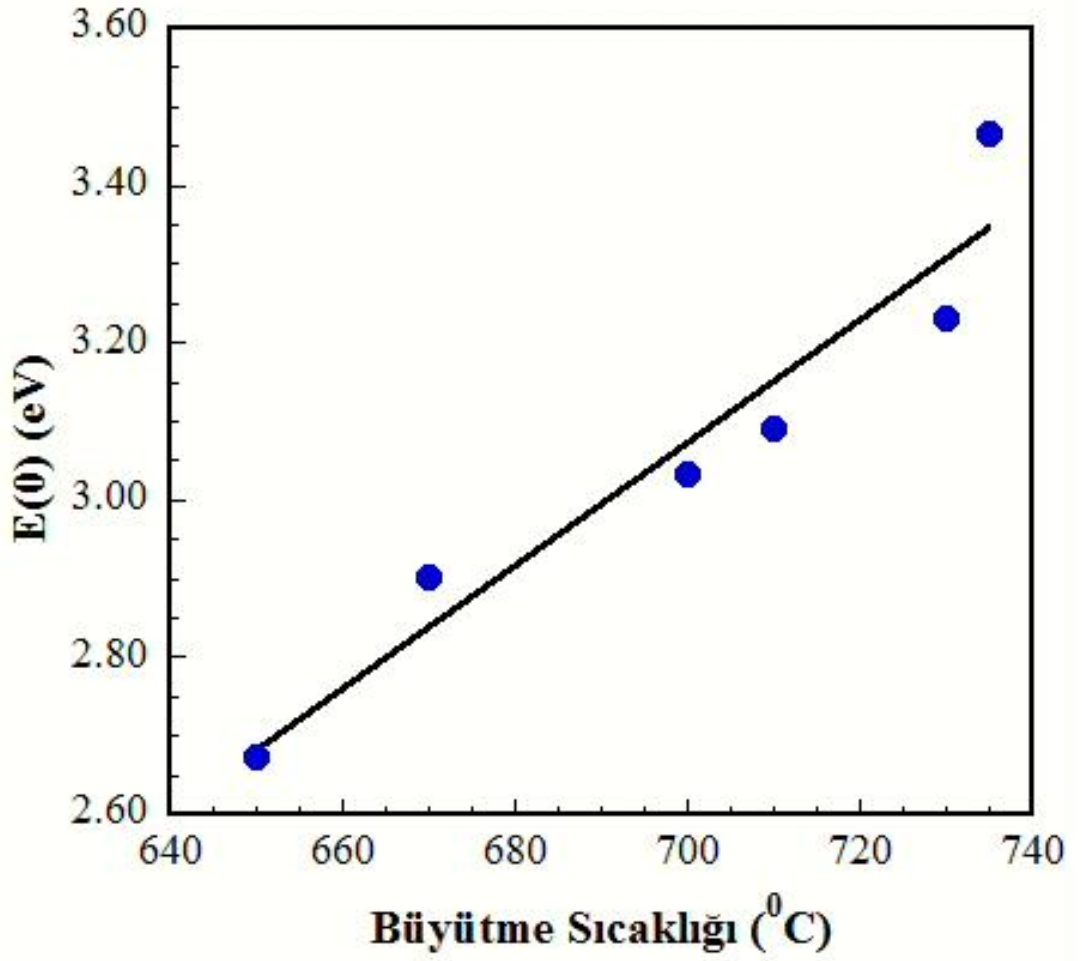
Şekil 4.23, Numunelere ait FL sinyallerinin çizgi genişliğinin büyüme sıcaklığına bağlı davranışı.

Büyütme sıcaklığına bağlı In katılım oranının ve dolayısıyla yerleşme etkisinin etkinliğini görmek için incelediğimiz numunelerinin pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinde kullanılan fit parametrelerine daha yakından bakalım. Çizelge 4.2, deneysel sonuçlarımıza fit yaparken kullandığımız parametrelerin büyüme sıcaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.2, Deneysel sonuçlara yapılan fit için kullanılan parametreler

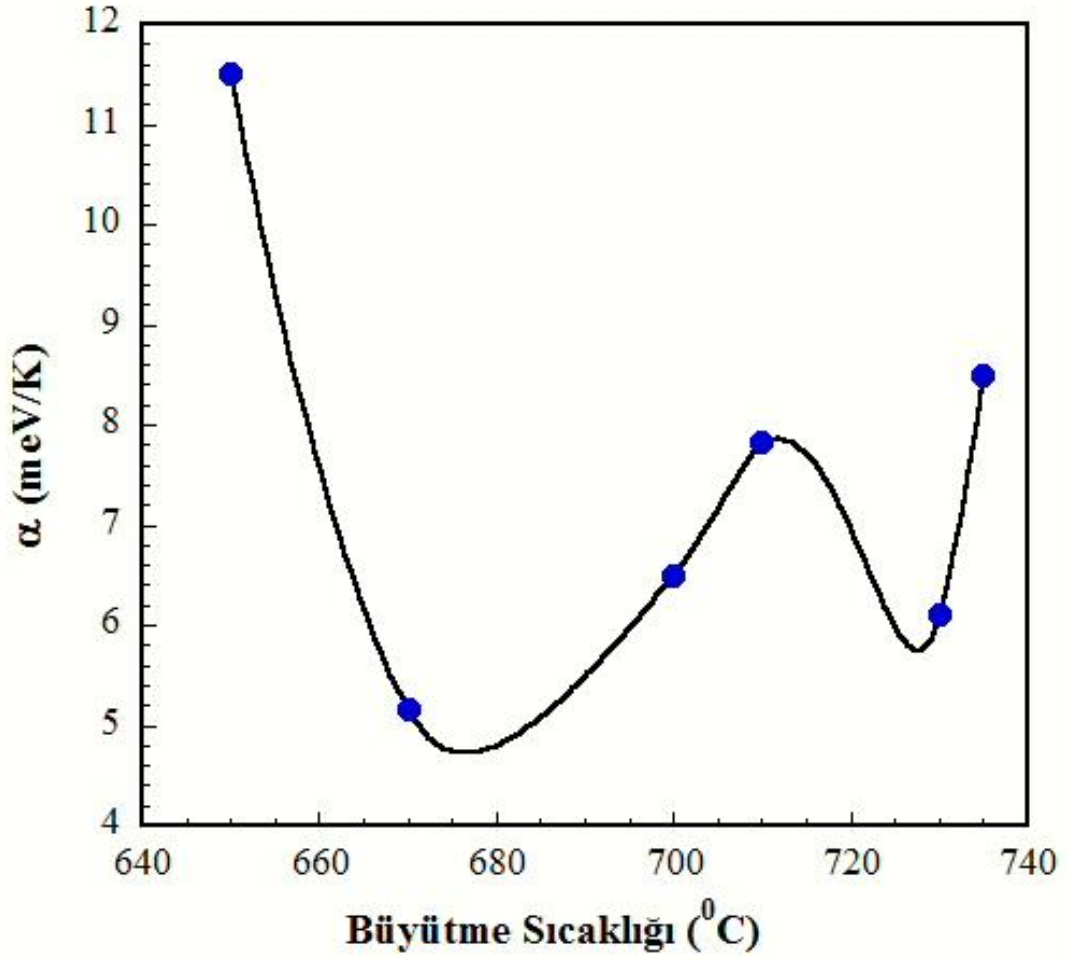
Numune	Büyütme Sıcaklığı (°C)	E(0) (eV)	$\alpha$ $\times 10^{-4}$ (meV/K)	$\sigma$ $\times 10^{-3}$ (meV)
V008	650	2.6734	11.5	30
B493	670	2.9012	5.16	28
B377	700	3.0344	6.5	27
B292	710	3.0923	7.82	26
B437	730	3.2307	6.1	25
V009	735	3.4665	8.5	24

Şekil 4.24, E(0) enerjisinin büyütme sıcaklığına bağlı değişimini göstermektedir. Buradaki E(0), Vegard's yasası kullanılarak hesaplanan T=0 K' deki InGaN' in enerji band aralığını göstermektedir. E(0) değeri, büyütme sıcaklığının artması ile artar. Büyütme sıcaklığının artması aktif tabakadaki In oranını azaltacağı için yerleşme etkisi azalır ve enerji band aralığı daha geniş olur.



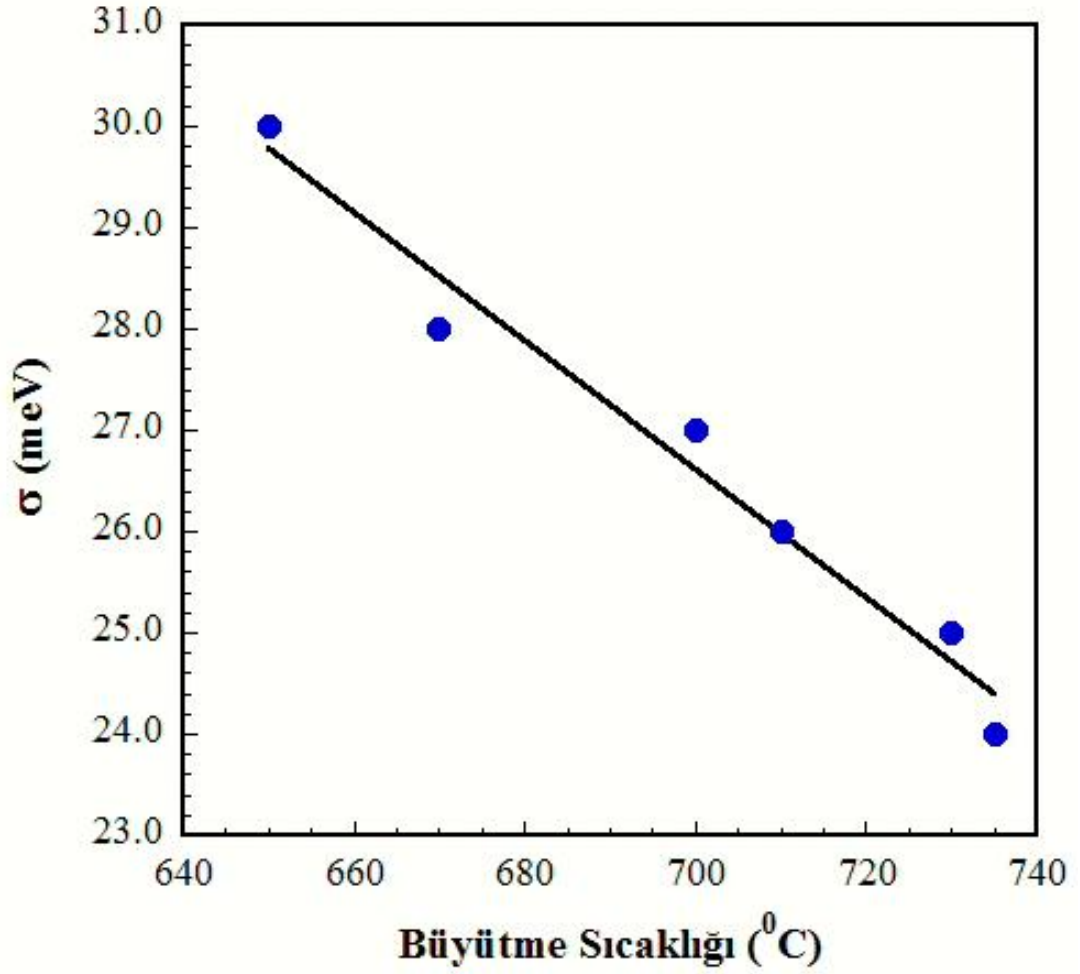
Şekil 4.24,  $E(0)$  enerjisinin büyütme sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 4.25,  $\alpha'$  nın büyütme sıcaklığına bağlı değişimini göstermektedir.  $\alpha$  parametresi birim sıcaklıktaki enerji değişimini göstermektedir. Denklem 4.1' e göre  $\alpha'$  nın büyük olması durumunda sıcaklığa bağlı band aralığında görülen daralmanın az olması beklenir. Şekil 4.25' deki değişim incelendiğinde  $\alpha'$  nın büyüme sıcaklığına bağlı belirli bir davranış sergilemediği görülür. Dolayısıyla  $\alpha$  ile büyüme sıcaklığı arasında direkt bir ilişki kurulamamıştır. Deneysel sonuçlarımıza fit yapmak için kullandığımız  $\alpha$  değeri literatürdeki değerler ile kıyaslandığında büyük olduğu görülmüştür [122].



Şekil 4.25,  $\alpha$ ' nın büyütme sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 4.26,  $\sigma$ ' nın büyütme sıcaklığına bağlı değişimini göstermektedir.  $\sigma$ , aktif bölgedeki yerleşme etkisinin büyüklüğünün bir göstergesidir. Dolayısıyla yüksek büyütme sıcaklıklarında In atomunun alaşıma katılması zor olacağından yerleşme etkisinin az olması beklenir. Başka bir ifade ile büyütme sıcaklığı arttıkça  $\sigma$ ' nın azalması beklenir. Deneysel sonuçlarımızı fit için kullandığımız  $\sigma$  değerinin büyütme sıcaklığına bağlı değişiminin bu beklentiye uyduğu görülmüştür. Ayrıca ölçüm sonuçlarında kullandığımız  $\sigma$ ' nın literatürdeki değerleri ile kıyaslandığına büyük olduğu görülmüştür [122].



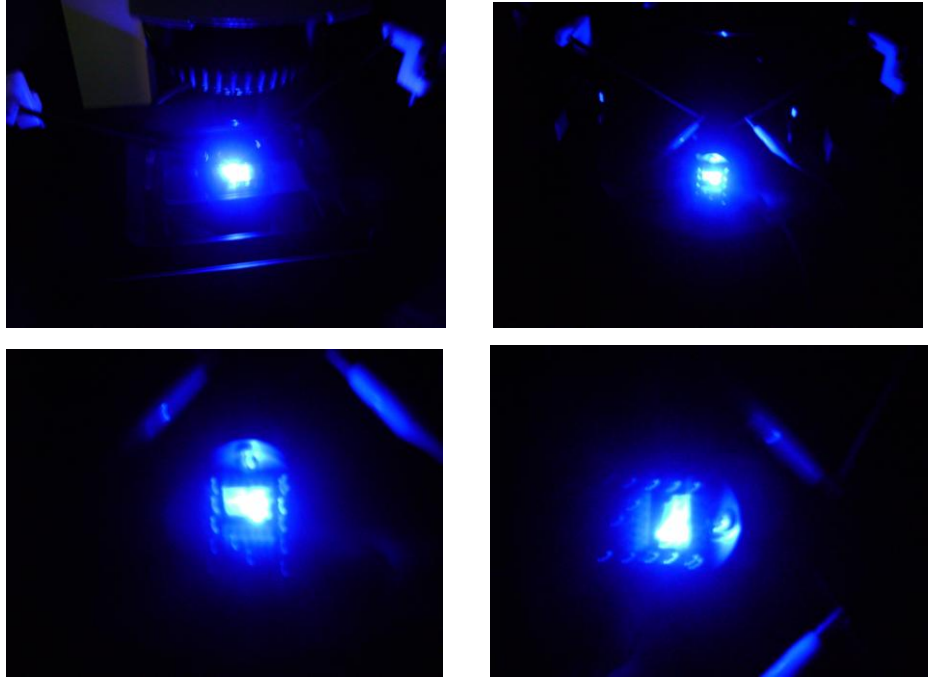
Şekil 4.26,  $\sigma$ ' nın büyüme sıcaklığına bağlı değişimi

#### 4.5. Elektrolüminesans ölçümleri

##### 4.5.1. Numune 493

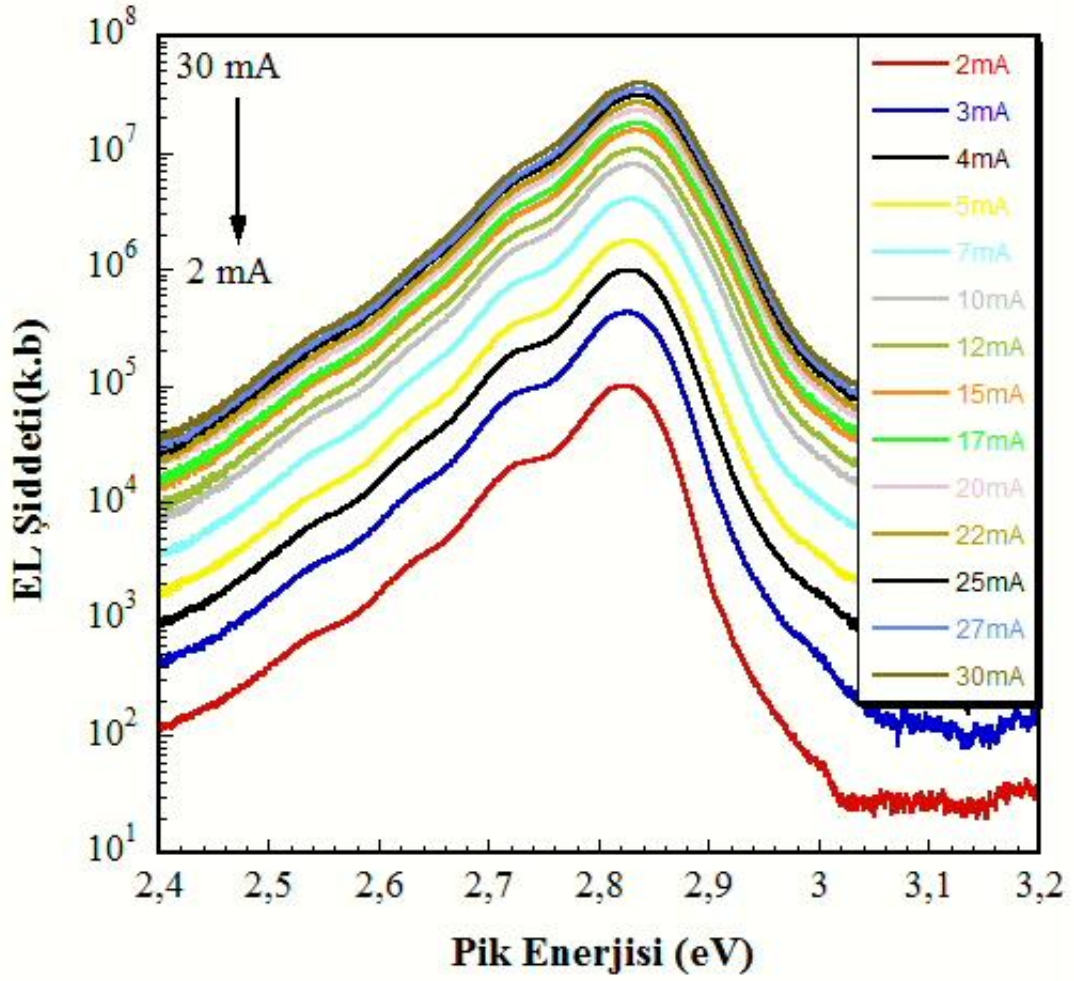
20 mA sürücü akım değerinde ısıtılan LED in fotoğrafı Şekil 4.27' de verilmektedir. Kontaklar arasından homojen bir dağılımla oldukça parlak bir ışımaya görülmektedir. Işıma, spektral karakteristiğinin aşağıda daha detaylı analizleri yapılacağı üzere dalgaboyu 437 nm pik dalgaboyunda olup mavi renkte görülmektedir.





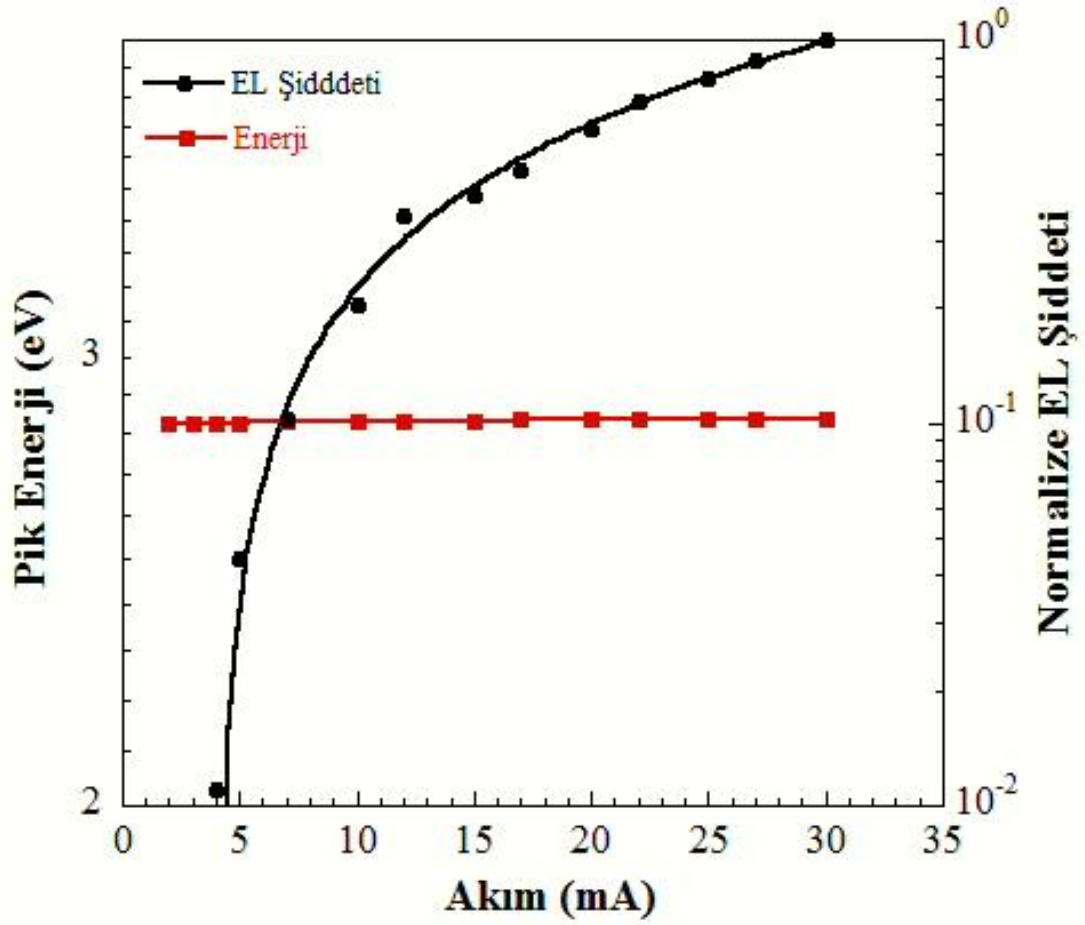
Şekil 4.27, B-493 Numunesine ait ışım

Bu örneğin 20 K' de akıma bağılı spektrumları Şekil 4.28' de verilmektedir. Numuneden ölçülebilir bir ışınım için minimum 1 mA civarında bir akım sürülmüş olup ısınmadan dolayı zarar görmemesi için sürülen akımın değeri 30 mA de sonlandırılmıştır.



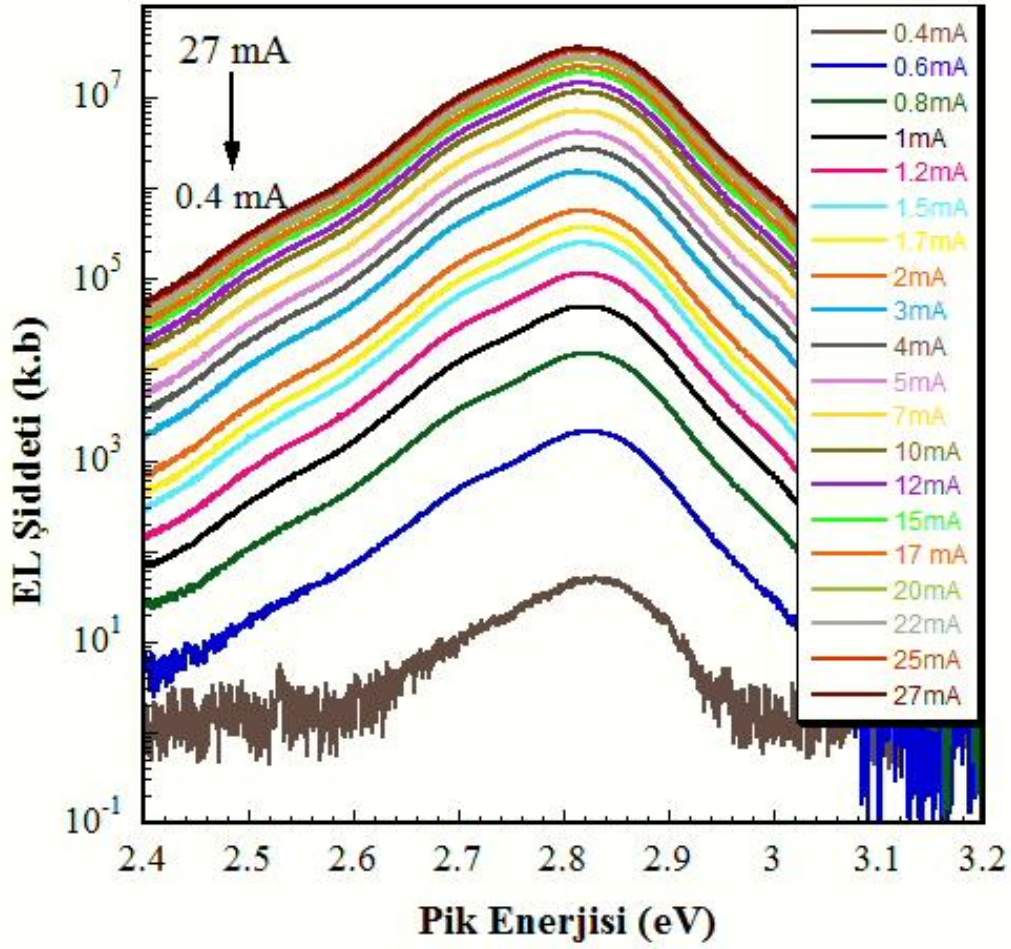
Şekil 4.28, B-493 numunesine ait 20 K'deki EL şiddetinin akıma bağlı değişimi

Şekil 4.29' da EL şiddetinin ve pik enerji konumunun akıma bağlı değişimi görülmektedir. Bu ölçümler 20 K' de alınmıştır. Sürücü akım değeri ise 2-30 mA aralığında değişmektedir. Bu akım aralığında pik enerji konumu küçük dalgalanmalar haricinde kaydadeğer bir değişim göstermeyip ortalama 2.824 eV değerinde sabit kalmaktadır. EL şiddetinin akıma bağlı değişiminde ise sürülen akım aralığında lineer bir davranışın olduğu görülmektedir. Düşük akım değerlerinde kısmen sublineer davranış göstermesinin sebebi olarak kontakların tam omik olmaması gösterilebilir. EL şiddetinin akıma bağlı değişiminin lineer olması incelediğimiz örneğin iyi bir LED davranışı gösterdiğini vurgulamaktadır. Burada, ayrıca sürücü akımının artması ile ısınan eklem bölgesinin (Joule Heating) LED çıkış performansında herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.



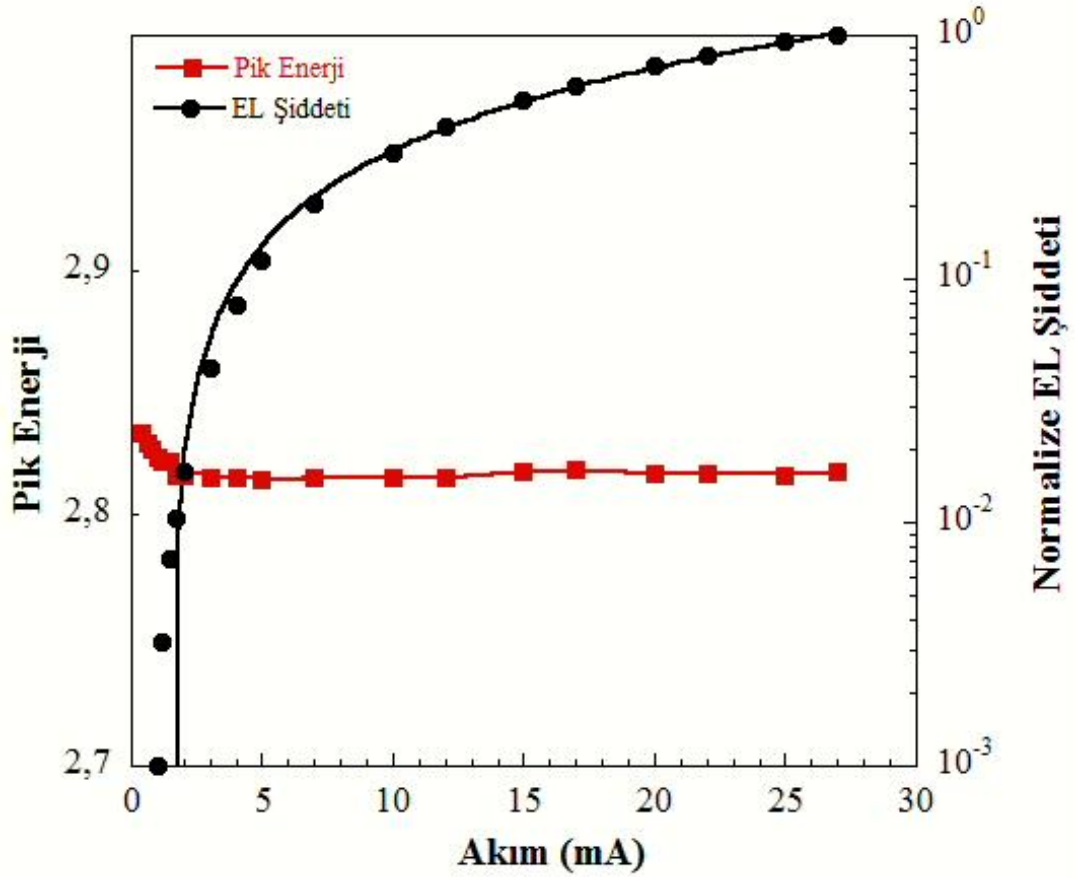
Şekil 4.29, B-493 numunesine ait 20 K'deki pik enerjisi ve EL şiddetinin akıma bağlı değişimi.

Bu örneğin 300 K' de alınan akıma bağlı spektrumları Şekil 4.30' da verilmektedir. Numuneden ölçülebilir bir ışınım için minimumum 0.4 mA civarında bir akım sürülmüş olup ısınmadan dolayı zarar görmemesi için sürülen akımın değeri 27 mA de sonlandırılmıştır.



Şekil 4.30, B-493 numunesine ait 300 K'deki EL şiddetinin akıma bağlı değişimi

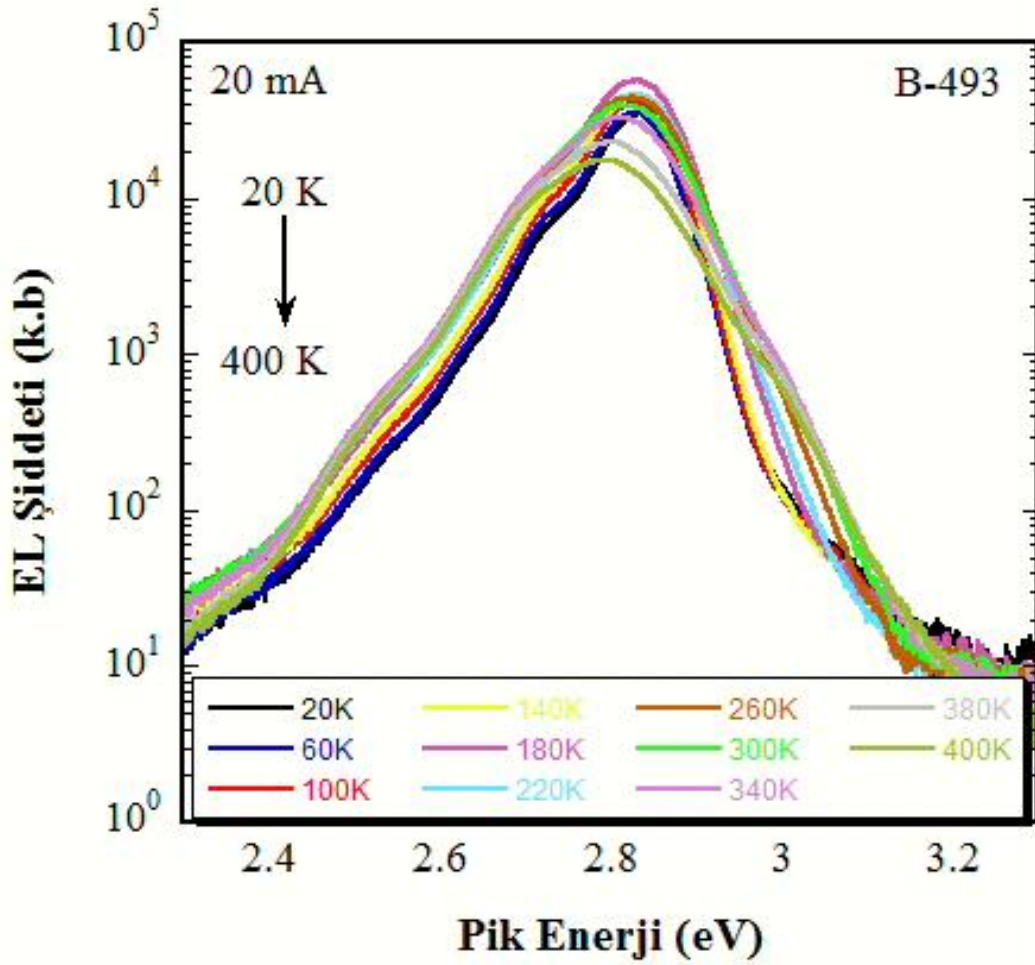
Şekil 4.31, 300 K' de yapılan ölçümler için EL şiddetinin ve pik enerji konumunun akıma bağlı değişimini göstermektedir. Sürücü akım değeri 0.4-27 mA aralığında değişmektedir. Pik enerji konumu 0.4-5 mA aralığında kırmızıya kayma göstermektedir. Akım değeri 0.4 mA iken pik enerji değeri 2.833 eV' dir. Akım 5 mA olduğunda pik enerji konumu 2.814 eV' dedir. Yaklaşık olarak 19 meV' lik bir kırmızıya kayma söz konusudur. 5-27 mA aralığında ise belirgin bir değişiklik görülmemektedir.



Şekil 4.31, B-493 numunesine ait 300 K'deki pik enerjisi ve EL şiddetinin akıma bağlı değişimi.

EL şiddetinin sürülen akıma bağlı değişimi incelendiğinde, EL şiddetinin sürülen akıma bağlı olarak lineer bir değişim gösterdiği görülmektedir. Kontakların tam omik olmaması yukarıda da belirtildiği, düşük akım değerlerinde görülen kısmen sublineer davranışın sebebi olarak gösterilebilir. Bu numunemiz için de eklem bölgesinin ısınmasının çıkış gücü üzerindeki etkisinin az olduğu söylenebilir.

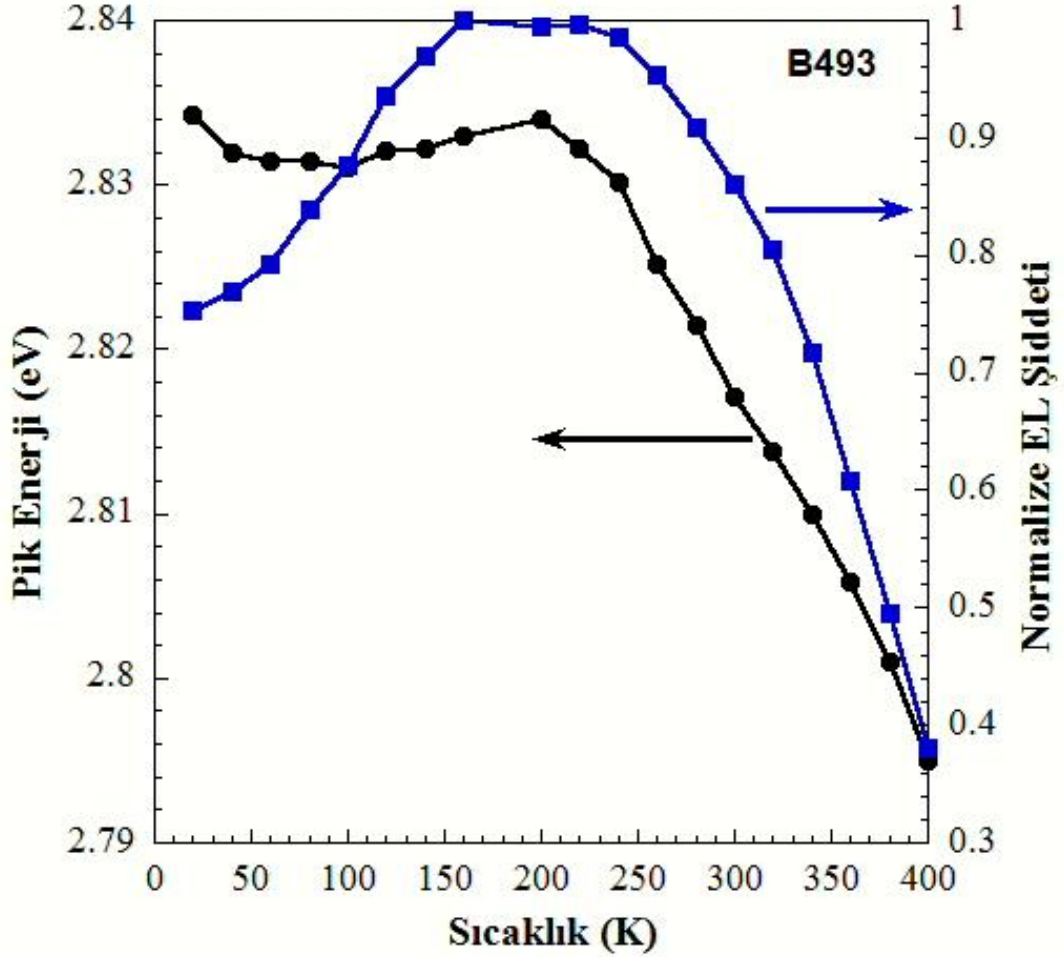
EL spektrumunun 20-400 K aralığında sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.32' de gösterilmektedir. Bu ölçümlerde LED üzerinden sürülen akım tüm sıcaklıklarda 20 mA değerinde sabitlenmiştir. Bu örneğin oda sıcaklığındaki ışınım dalga boyu 437 nm (2.833 eV)' dir.



Şekil 4.32, B-493 numunesine ait 20 mA’da sıcaklığa bağlı EL spektrumu

Şekil 4.33 ise bu spektrumundan elde edilen normalize edilmiş EL şiddetinin ve pik enerjilerinin sıcaklık değişimini göstermektedir. Sıcaklık değeri 400 K’ den 160 K’ ye düşürüldüğünde EL şiddetinde yaklaşık 3 kat artış görülür. Sıcaklık 160 K’nin altında ise sıcaklık düştükçe EL şiddetide azalmaktadır. EL şiddetinin 400-160 K sıcaklık aralığında sıcaklık azalırken artmasının sebebi, ışımsal olmayan yeniden birleşim merkezlerin etkinliğinin azalmasıdır. Fakat 160-20 K aralığında sıcaklık düştükçe EL şiddetindeki azalmanın temel sebebi olarak derin alıcı atomlarının enerji seviyelerindeki boşlukların sıcaklık azaldıkça etkinliğini yitirmesi (*freeze-out*) gösterilebilir. Çünkü p-GaN tabakasında bulunan Mg atomlarının aktivasyon enerjileri oldukça yüksektir. Dolayısıyla sıcaklık düştükçe InGaN kuantum kuyusu içerisindeki elektronların ışımsal tekrarbirleşme yapabilecekleri boşluk yoğunluğu azalacaktır. Gerçekte, bu sıcaklık aralığında ışımsal olmayan

tekrarbirleşme mekanizmasının da aktif olduğunu belirtmek gerekir. Bu iki zıt mekanizmanın operatif olduğu bu sıcaklık aralığında EL şiddeti 20 K ile 160 K aralığında yaklaşık 1.5 kat artmaktadır.



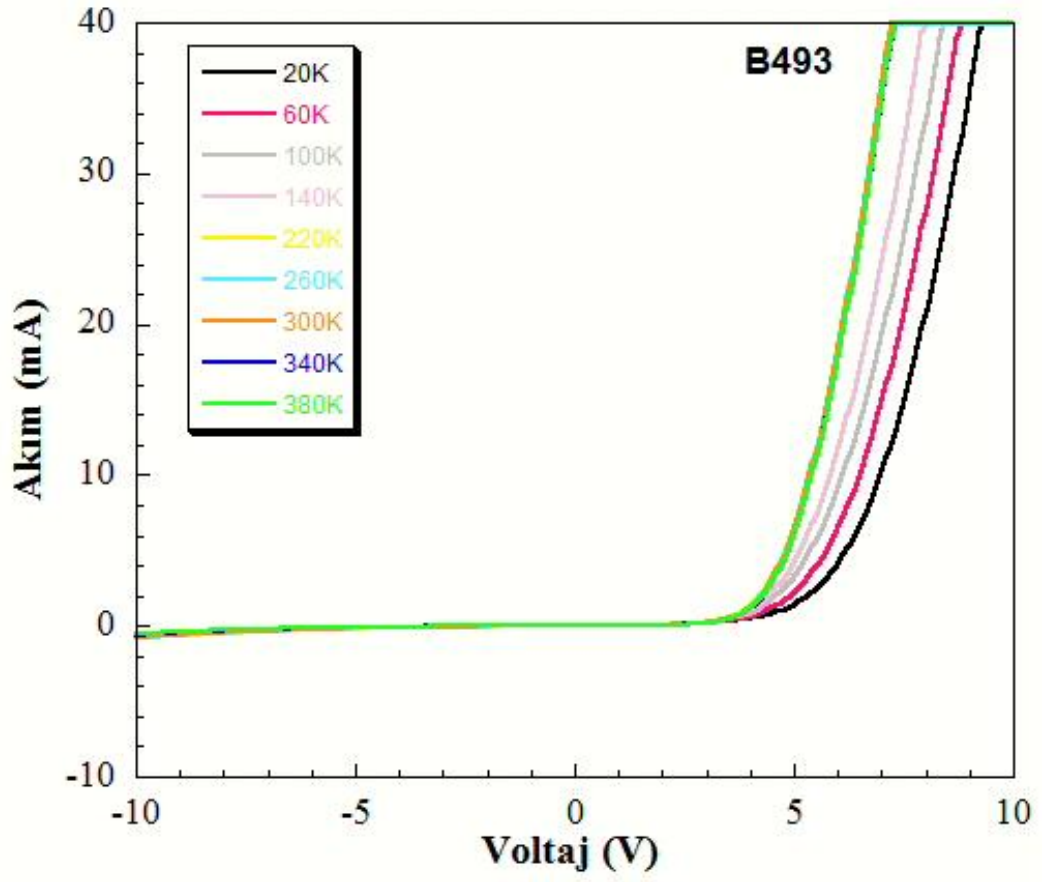
Şekil 4.33 B-493 numunesine ait pik enerjisi ve EL şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Pik enerji konumunun sıcaklığa bağlı davranışı incelendiğinde 20-200 K aralığında küçük dalgalanmalar görülür. Bu sıcaklık aralığında bant aralığı azalması sonucu pik enerji değerlerinde kırmızıya kayma beklenir. Fakat Şekil 4.33’ de böyle bir azalma görülmemektedir. Bunun sebebi, In oranından kaynaklanan potansiyel dalgalanmalardır. Bu potansiyel dalgalanmaları, kuyu içerisinde yeni enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur ve sıcaklık arttıkça taşıyıcıların bu yüksek enerji seviyelerini doldurması nedeniyle EL ışınım enerjisini mavi bölgeye kaydırır.

Sonuç olarak bu iki zıt mekanizmanın aynı anda aktif olarak çalışması sonucunda bu sıcaklık aralığında pik enerji değerlerinde küçük dalgalanmalar haricinde net bir kayma gözlenmemektedir. 200 K'nin üzerinde ise bant aralığı daralması mekanizması daha baskın hale geldiğinden pik enerji değerlerinde net bir kırmızıya kayma görülmektedir. 200-400 K sıcaklık aralığında gözlenen toplam kayma yaklaşık 40 meV tur. Bu kayma miktarı Varshni denkleminde göre beklenen kayma ise 47 meV' dir.

Şekil 4.34 ise bu numuneye ait çeşitli sıcaklıklarda alınan dc akım-voltaj grafiklerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi ileri besleme bölgesinde açılış (*turn-on*) voltajı yaklaşık 140 K' ye kadar sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Daha yüksek sıcaklıkta ise belirgin bir değişiklik gözlenmemektedir. 20 K de açılış voltajı 6.5V iken oda sıcaklığında 5V değerine düşmektedir. 140 K' ye kadar açılış voltajının azalmasının sebebi olarak daha önce EL şiddetinin sıcaklığa bağlı değişiminde tartışıldığı üzere p-GaN daki Mg atomlarının büyük aktivasyon enerjileri gösterilebilir. Ters besleme bölgesinde ise ters akımda düşük sıcaklıktan oda sıcaklığına kadar kaydadeğer bir değişiklik görülmemektedir. Örneğin, -2 V besleme voltajında 20 K deki ters akım 0.034 mA iken oda sıcaklığında 0.030 değerindedir. Oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda ise ters akımda bir azalma görülmekte olup 400 K de 0.014 mA değerine düşmektedir.

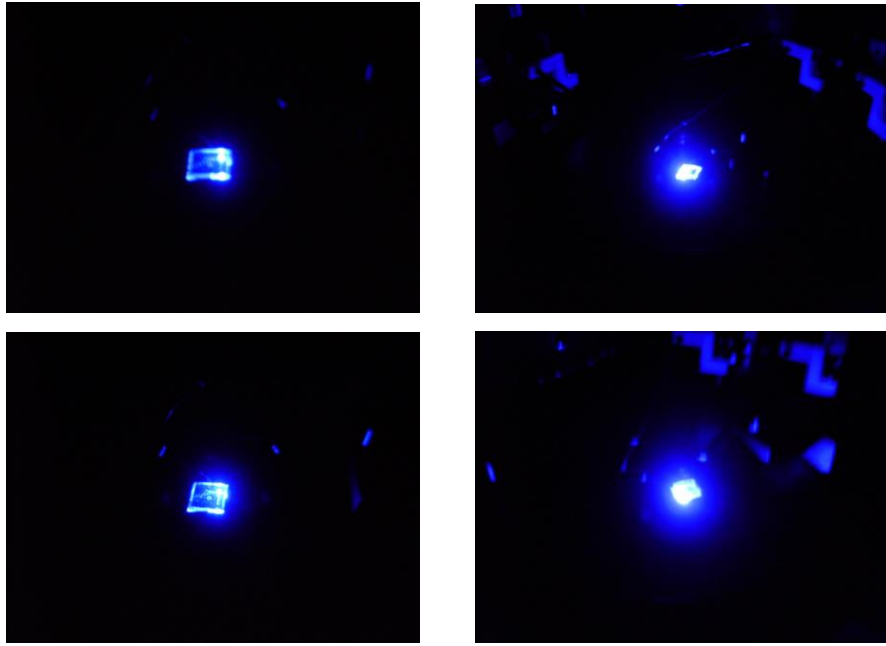




Şekil 4.34, B-493 numunesine ait sıcaklığa bağlı I-V grafikleri

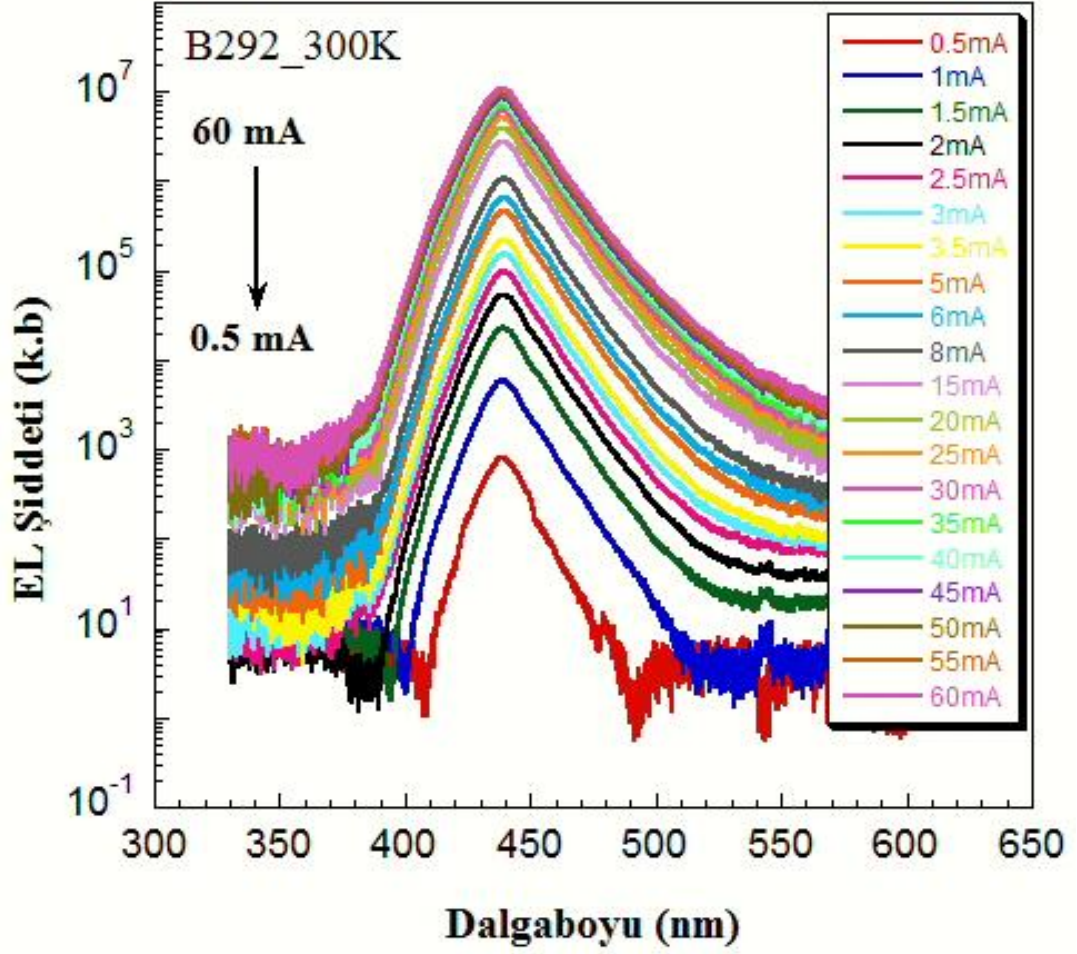
#### 4.5.2. Numune 292

20 mA sürücü akım değerinde ısıtılan LED' in fotoğrafı Şekil 4.35' de verilmektedir. Bu numuneye ait ışımının da parlak olduğu söylenebilir. Işımaya ait spektral karakteristik aşağıda daha detaylı olarak analiz edilecektir. Numuneye ait ışınım 409 nm dalgaboyundadır.



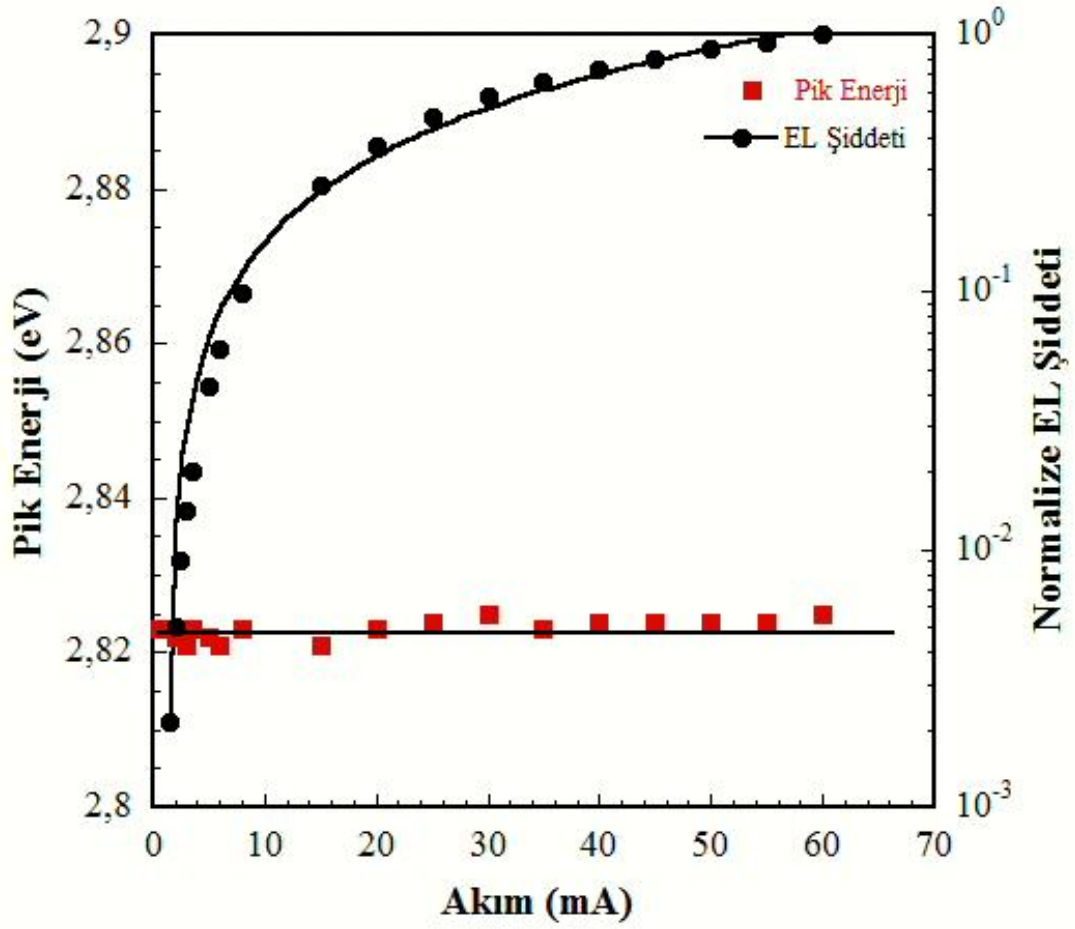
Şekil 4.35, B-292 numunesine ait ışım

Bu örneğe ait 300 K' de alınmış akıma bağlı spektrumlar Şekil 4.36' de verilmektedir. Ölçümler 0.5-60 mA akım aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.36, B-292 numunesine ait 300 K'deki EL şiddetinin akıma bağlı değişimi

Şekil 4.37, EL şiddetinin ve pik enerji konumunun akıma bağlı değişimini göstermektedir. Öncelikli olarak pik enerji konumunun sürücü akımına bağlı değişimini incelersek, akımın artması ile küçük dalgalanmalar gösterse de pik enerji değerinin yaklaşık 2.82 eV civarında hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.37, B-292 numunesi için 300 K' deki pik enerjisi ve EL şiddetinin akıma bağlı değişimi.

EL Şiddetinin akıma bağlı değişimine bakıldığında ise sürülen akım arttıkça EL şiddetinde lineer bir artış görülür. Sürülen akım arttıkça kuyu içinde tuzaklanan elektron ve deşiklerin yoğunluğu artacağından aktif bölgedeki yeniden birleşim oranı artar. Dolayısıyla EL şiddetinde artış görülür.

## 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, fotoluminesans, elektrolüminesans, akım-voltaj ve x-ışını kırınımı teknikleri kullanılarak görünür/mor ötesi bölgelerde ışık yayan InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulu diyotlar incelenmiştir. Diğer büyütme şartları mümkün olduğu kadar sabit tutularak LED'lerin aktif bölgelerinin büyütme sıcaklıkları 650-730 °C aralığında olan altı adet numune tasarlandı. Daha sonra bu numunelerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans ölçümleri alındı. Numunelerin FL spektrumlarında gözlenen InGaN/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin, şiddetinin örgü sıcaklığına bağlı değişimleri temel modellerle desteklenerek incelendi. Dolayısıyla, InGaN/GaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığının ve dolayısıyla indiyum alaşım oranının bu parametreler üzerindeki etkisi araştırılmış oldu. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildi. Çalışmanın ikinci kısmında fabrikasyonu yapılan iki LED örneğimizin oda sıcaklığında sürekli sürücü akımına bağlı elektrolüminesans spektrumları ile birlikte bunlardan birinden tel bağlantıları alınarak örgü sıcaklığına bağlı akım-voltaj ve elektrolüminesans özellikleri detaylı olarak incelendi.

Tasarlanan numunelerin sıcaklığa bağlı FL ölçümleri alındığında yayınım pik enerjisinin literatürdeki ölçüm sonuçlarına uygun olarak S-tipi davranış gösterdiği görülmüştür. S-tipi olarak adlandırılan bu davranış genel olarak In yerleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Dolayısıyla büyütme sıcaklığının In yerleşmesi üzerindeki etkisi açık bir şekilde gösterilmiştir. Gözlenen S-tipi davranışın yanında InGaN kuantum kuyudan kaynaklanan FL piklerinin şiddeti ve FWHM değişimlerinin incelenmesi sonucunda farklı sıcaklık aralıklarında etkin olan iki farklı ışımsal olmayan geçiş merkezi olduğu gözlenmiştir. Bu merkezler, etkisini Fotoluminesans şiddetinde sıcaklığa bağlı azalma olarak gösterir. Bu davranışın derecesi ve görüldüğü sıcaklık değerleri numuneden numuneye farklılık göstermektedir. Farklı büyütme sıcaklıklarına sahip numunelere ait sıcaklığa bağlı spektral değişimler detaylı olarak incelenerek FL spektrumunda gözlenen piklerin

orijinleri belirlenmiştir. Bir sonraki adım olarak büyütme sıcaklığının deneysel sonuçlarımıza fit yaparken kullandığımız  $E(0)$ ,  $\sigma$  ve  $\alpha$  parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu parametreler In atomlarının InGaN alaşımına katılma oranı ile yakından ilişkilidir. Dolayısıyla büyütme sıcaklığı arttıkça bu parametrelerin artması beklenir. Ölçüm sonuçlarımızın bu beklentiye uyduğu ve literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Elektrolüminesans ölçümleri yapmak için tasarladığımız B-493 ve B-292 kodlu numunelerden kontak alabildik. EL pik enerjisinin ve şiddetinin sıcaklığa ve akım yoğunluğuna bağlı değişimi incelenmiştir. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde oda sıcaklığı ile orta sıcaklık değerlerinde EL şiddetinin arttığı orta sıcaklık ile düşük sıcaklık bölgesinde ise azaldığı gözlenmiştir. EL şiddetinde görülen bu beklenmedik davranışın literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. EL şiddetinin ilk sıcaklık aralığında sıcaklık azalırken artmasının sebebi, ışımsal olmayan yeniden birleşim merkezlerin etkinliğinin azalmasıdır. İkinci aralıkta sıcaklık azalırken EL şiddetinin azalma sebebi ise düşük sıcaklıklarda p tipi taşıyıcı konsantrasyonunun yüksek aktivasyon enerjisinden dolayı azalmış olmasıdır. B-493 kodlu numune için pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi incelendiğinde kırmızı-mavi-kırmızı şeklinde bir davranış görülmüştür. Bu da yerleşme etkisinin bir göstergesidir. Akım yoğunluğuna bağlı ölçümlerde ise akım yoğunluğunun artması ile yeniden birleşecek taşıyıcı sayısı arttığından EL şiddetinin arttığı görülmüştür. Pik enerji konumunun akım yoğunluğuna bağlı değişiminde ise belirgin bir değişiklik görülmemiştir.

Sonuç olarak yaptığımız bu çalışma ile Fotolüminesans ve Elektrolüminesans tekniklerini kullanarak büyütme sıcaklığının optiksel özellikler üzerindeki etkisini detaylı olarak araştırdık. Yaptığımız bu çalışma ile bu alanda yapılacak çalışmalara ışık tutmayı amaçladık.

## KAYNAKÇA

- [1] Morkoç, H. “Handbook of Nitride Semiconductors and Devices”, Wiley- VCH, Berlin, Vols. I–III (2008).
- [2] Wurgaftman, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan L.R., “Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys “, *J.Appl. Phys.* **89**, (2001), 5815.
- [3] Morkoç, H., Carlo, A. Di, Cingolani, R., “GaN-based modulation doped FETs and UV detectors”, *Solid State Electron.*, **46**, (2002) 157
- [4] Martinez, E., J., “Gallium Nitride & Related Wide Bandgap Materials and Devices”, *DARPA Tech*, (2000).
- [5] “Building Energy Databook 2006” (Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S Department of Energy, Washington, DC, 2006; <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov>) (accessed January 2008)
- [6] “Navigant Consulting, U.S Lighting Market Characterization Volume:1 National Lighting Inventory and Energy Consumption Estimate” (U.S Department of Energy, Washington, DC, September, 2002; [www.eere.energy.gov/buildings/info/documents/pdfs/lmc\\_vol1\\_final.pdf](http://www.eere.energy.gov/buildings/info/documents/pdfs/lmc_vol1_final.pdf) ) (accessed January 2008)
- [7] “Light Labour’s Lost: Policies for Energy-efficient Lighting” (International Energy Agency, Paris, France) (2006)
- [8] Tsao, J., Y., “Sandia National Labs”
- [9] “Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants: The Case for Regulatory Action” (Northeast States for Coordinated Air Use Management, Boston, MA, 2003; <http://www.nescaum.org/documents/rpt031104mercury.pdf>) (accessed January 2008)
- [10] Pope M., Kallmann H.P., Magnante P., “Electroluminescence in Organic Crystals” *J.Chem.Phys.* **38**, (1963), 2042.
- [11] “Organic Light Emitting Diodes (OLEDs) for General Illumination Update” 2002, An OIDA Technology Roadmap (OIDA, Washington, DC, 2002)
- [12] Holonyak, N., Bevacqua, S., F., “Coherent (visible) light emission from Ga(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) junctions” *Appl. Phys. Lett.* **1** (1962) 82.
- [13] Tsao, J., Coltrin, M. E., Crawford, M. H., Simmons, J. A., “An Integrated Human Factors, Technology, and Economic Perspective”, *Solid-State Lighting Proc. IEEE*, **98** (2010) 1162.
- [14] Humphreys, C. J., “Solid state lighting”, *MRS Bulletin* **33** (2007) 459.

- [15] Chen, G. *et al.*, “Performance of high-power III-nitride light emitting diodes”, *phys. stat. sol. (a)* **205**, (2008) 1086.
- [16] Pankove, J.I., Miller, E.I., and Berkeyheiser, J.E., *RCA Rev.* **32** (1971) 383.
- [17] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer” *Appl. Phys. Lett.* **48** (1986) 353.
- [18] Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M., “High-Power GaN P-N Junction Blue-Light-Emitting Diodes “ *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) L1998.
- [19] Akasaki, I., Amano, H., “Widegap Column-III Nitride Semiconductors for UV/Blue Light Emitting Devices” *J. Electrochem. Soc.*, **141** (1994) 2266.
- [20] Amano, H., Hiramatsu, K., Akasaki, I., “Heteroepitaxial Growth and the Effect of Strain on the Luminescent Properties of GaN Films on (11 20) and (0001) Sapphire Substrates”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L1384.
- [21] Nakamura, S., Senoh, M., Isawa, N., Nagahama, S., “High-Brightness InGaN Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with Quantum Well Structures” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) L797
- [22] Mukai, T., Narimatsu, H., Nakamura, S., “Amber InGaN-Based Light-Emitting Diodes Operable at High Ambient Temperatures”, *Japan. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L479.
- [23] Mukai, T., Nagahama, S., Iwasa, N., Senoh, M., and Yamada, T., “Nitride light-emitting diodes”, *J. Phys. Condens. Matter.*, **13** (2001) 7089.
- [24] Mukai, T., “Recent progress in group-III nitride light-emitting diodes”, *IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics*, **8** (2002) 264.
- [25] Subramanian Muthu, Frank J. P. Schuurmans, and Michael. D. Pashley, *IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics*, **8** (2002) 78
- [26] Cho, Y. H, Sun, Y. P., Kim, H. M., Kang, T. W., Suh, E. K., Lee, H. J., Choi, R. J., Y. Hahn, B., “High quantum efficiency of violet-blue to green light emission in InGaN quantum well structures grown by graded-indium-content profiling method”, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 11912.
- [27] Shchekin, O. B., Epler, J. E., Trottier, T. A., Margalith, T., Steigerwald, D. A., Holcomb, M. O., Martin, P. S., Krames, M., R., “High performance thin-film flip-chip InGaN–GaN light-emitting diodes”, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 71109.
- [28] Wang, W. K., Wu, D. S., Lin, S. H., Han, P., Horng, R. H., Hsu, T. C., Huo, D. T. C., Jou, M. J., Yu, Y. H., Lin, A., “Efficiency improvement of near-ultraviolet



InGaN LEDs using patterned sapphire substrates”, *IEEE Journal Quantum Electronics*, **41** (2005)1403.

[29] Katsushi A., Takashi, K., Yusuke, Y., Hiroyuki, K., Koji, K., “Improvements of external quantum efficiency of InGaN-based blue light-emitting diodes at high current density using GaN substrates”, *J. Appl. Phys.* **101** (2007) 33104.

[30] Monemar, B., Paskov, P. P., Kasic, A., “[Optical properties of InN—the bandgap question](#)”, *Superlatt. Microstruct.*, **38** (2005) 38.

[31] Pearton, S.J., Ren, F., Zhang, A.P., Lee, K.P., “Mater. Sci. Eng.”, R 30 (2000) 55.

[32] Bhuiyan, A. G., Hashimoto, A., Yamamoto, A., “Indium nitride (InN): A review on growth, characterization, and properties”, *J. Appl. Phys.*, **94** (2003) 2779.

[33] Matsuoka, T. “[Progress in nitride semiconductors from GaN to InN—MOVPE growth and characteristics](#)”, *Superlatt. Microstruct.*, **37** (2005) 19.

[34] Nanishi, Y., Saito, Y., Yamaguchi, T., “RF-Molecular Beam Epitaxy Growth and Properties of InN and Related Alloys”, *Japan J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 2549.

[35] Bai, J., Wang, T., and Sakai, S., “Study of the strain relaxation in InGaN/GaN multiple quantum well structures”, *J. Appl. Phys.*, **90** (2001) 1740

[36] Narukawa, Y., Kawakami, Y., Fujita, S, and Fujita, S., “Recombination dynamics of localized excitons in  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}-\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  multiple quantum wells”, *Phys. Rev. B*, **55** (1997) R1938

[37] Chichibu, S., Azuhata, T., Sota, T. and Nakamura, S., “Luminescences from localized states in InGaN epilayers”, *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 2822.

[38] Lin, Y., S., Ma, K., J., Hsu, C., Feng, S., W., Cheng, Y., C., Liao, C., C., Yang, C., C., Chou, C., C., Lee, C., M., and Chyi, J., I., “Dependence of composition fluctuation on indium content in InGaN/GaN multiple quantum wells”, *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 2988

[39] Huang, Y., H., Cheng, C., L., Chen, T., T., Chen, Y., F., Tsen, K., T., “Studies of Stokes shift in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloys”, *J. Appl. Phys.*, **101** (2007) 103521

[40] Sasaki, C., Naito, H., Iwata, M., Kudo, H., Yamada, Y., Taguchi, T., Jyouichi, T., Okagawa, H., Tadatomo, K., and Tanaka, H., “Temperature dependence of Stokes shift in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  epitaxial layers”, *J. Appl. Phys.*, **93** (2003) 1642

[41] Lin, H. C., Shu, C. K., Ou, J., Pan, Y. C. Chen, W. K., Chen, W. H., Lee, M. C., “Growth temperature effects on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  films studied by X-ray and photoluminescence”, *J. Cryst. Growth*, **57** (1998)189–190.

- [42] Piner, E.L., McIntosh, F.G., Roberts, J.C., Aumer, M.E., Joshkin, V.A., Bedair, S.M., El-Masry, N.A., *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **1** (1996) 43.
- [43] Van der Stricht, W., Moerman, I., Demeester, P., Crawley, J.A., Thrush, E.J., *J. "Study of GaN and InGaN films grown by metalorganic chemical vapour deposition"*, *Cryst. Growth*, **170** (1997) 344.
- [44] Bedair, S.M., McIntosh, F.G., Roberts, J.C., Piner, E.L., Boutros, K.S., El-Masry, N.A., "Growth and characterization of In-based nitride compounds", *J. Cryst. Growth*, **178** (1997) 32.
- [45] Keller, S., Chichibu, S.F., Minsky, M.S., Hu, E., Mishra, U.K., Den Baars, S.P., *J. Cryst. Growth*, 195 (1998) 285.
- [46] Lee, S. N., Tan, S., Lee, W., Paek, H., Seon, M., Lee, I. H., Nam, O., Park, Y., "Characterization of optical and crystal qualities in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  multi-quantum wells grown by MOCVD", *J. Cryst. Growth*, **250** (2003) 256.
- [47] Keller, S., Mishra, U.K., DenBaars, S.P., Seifert, W., "Spiral Growth of InGaN Nanoscale Islands on GaN", *Japan J. Appl. Phys.* **37** (1998) L431.
- [48] Keller, S., Keller, B.P., Kapolnek, D. A., Abare, C., Masui, H., Coldren, L.A., Mishra, U.K., Den Baars, S.P., "Growth and characterization of bulk InGaN films and quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 3147.
- [49] Keller, S., Keller, B.P., Kapolnek, D., Den Baars, S.P., Shmagin, I.K., Kolbas, R.M., Krishnankutty, S., "Growth of bulk InGaN films and quantum wells by atmospheric pressure metalorganic chemical vapour deposition", *J. Cryst. Growth*, **170** (1997) 349.
- [50] Grandjean, N., Massies, J., *Mater. Sci. Eng. B*, **59** (1999) 39.
- [51] Sohmer, A., Off, J., Bolay, H., Harle, V., Syganow, V., Im, J.S., Wagner, V., Adler, F., Hangleiter, A., Dornen, A., Scholz, F., Brunner, D., Ambacher, O., Lakner, H., *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **2** (1997) 14.
- [52] D.-J. Kim, Y.-T. Moon, K.-M. Song, S.-J. Park, "Effect of barrier thickness on the interface and optical properties of InGaN/GaN multiple quantum well", *Japan J. Appl. Phys.* **40** (2001) 3085.
- [53] Shee, S. K., Kwon, Y. H., Lam, J. B., Gainer, G. H., Park, G. H., Hwang, S. J., Little, B. D., Song, J. J., "MOCVD growth, stimulated emission and time-resolved PL studies of InGaN/(In)GaN MQWs: well and barrier thickness dependence", *J. Cryst. Growth* **221** (2000) 373.
- [54] Grandjean, N., Damilano, B., Massies, J., "Group-III nitride quantum heterostructures grown by molecular beam epitaxy" *J. Phys.: Condens. Matter* **13** (2001) 6945.

- [55] Lai, Y. L., Liu, C. P., Chen, Z.Q., “Tuning the emitting wavelength of InGaN/GaN superlattices from blue,green to yellow by controlling the size of InGaN quasi-quantum dot”, *Thin Solid Films*, **498** (2006) 128.
- [56] Damilano, B., Grandjean, N., Pernot, C., Massies, J., “Monolithic White Light Emitting Diodes Based on InGaN/GaN Multiple-Quantum Wells”, *Japan J. Appl. Phys.* **40** (2001) L918. Pt.2, 9A/B.
- [57] P. Lefebvre, T. Taliercio, S. Kalliakos, A. Morel, X.B. Zhang, M. Gallart, T. Bretagnon, B. Gil, N. Grandjean, B. Damilano, J. Massies, “Carrier Dynamics in Group-III Nitride Low-Dimensional Systems: Localization versus Quantum-Confined Stark Effect”, *Phys. Status Solidi b* **228** (2001) 65.
- [58] Chichibu, S.F., Abare, A.C., Mack, M.P., Minsky, M.S., Deguchi, T., Cohen, D., Kozodoy, P., Fleischer, S. B., Keller, S., Speck, J. S., Bowers, J.E., Hu, E., Mishra, U.K., Coldren L.A., DenBaars, S.P., Wada, K., Sota, T., Nakamura, S., *Mater. Sci. Eng. B* **59** (1999) 298.
- [59] Naranjo, F.,B., Fernandez, S., Sanchez-Garcia, M.,A., Calle, F., Calleja, E., Trampert, A., Ploog, K., H., “Structural and optical characterization of thick InGaN layers and InGaN/GaN MQWs grown by molecular beam epitaxy”, *Mater. Sci. Eng.B* **93** (2002) 131.
- [60] Amano, H., Takeuchi, T., Sota, S., Sakai,H. and Akasaki, I. “Free and Bound Excitons in GaN Epitaxial Films” (eds F.A.Ponce, T.D. Moustakas, I. Akasaki and B.Monemar), *Materials Research Society,Pittsburgh, PA (Materials Research Society Symposium Proceedings*, **449** (1997) 1143.
- [61] P. Hurst, P. Dawson, S.A. Levetas, M.J. Godfrey, I.M. Watson, G. Duggan, “Temperature Dependent Optical Properties of InGaN/GaN Quantum Well Structures”, *Phys. Status Solidi b*, **228** (2001) 137.
- [62] Kim,D., J., Moon, Y., T., Song, K.,M., Choi, C.,J., Ok, Y.,W., Seong, T.,Y., Park, S.,J., “Structural and optical properties of InGaN/GaN multiple quantum wells: The effect of the number of InGaN/GaN pairs”, *J. Cryst. Growth* **221** (2000) 368.
- [63] Cheong, M.,G., Suh, E.,K., Lee, H.,J., “High-quality In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N/GaN quantum well growth and their optical and structural properties”, *Semicond. Sci. Technol.* **16** (2001) 783.
- [64] Wen, T.,C., Lee, W.,I., “Influence of Barrier Growth Temperature on the Properties of InGaN/GaN Quantum Well”, *Japan J. Appl. Phys.* **40** (2001) 5302.
- [65] Popovici, G., Morkoc, H., in: S.J. Pearton (Ed.), “GaN and Related Materials II”, *Gordon and Breach Science*, Netherlands, p. **93**, 2000

- [66] Huang, Y., H., Cheng, C., L., Chen, T., T., Chena, Y., F., and Tsen, K., T., “Studies of Stokes shift in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloys” *Journal of Applied Physics* **101**, 103521 2007
- [67] Chichibu, S., Sota, T., Wada, K. And Nakamura, S. “Exciton localization in InGaN quantum well devices.”, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, **16** (4), (1998) 2204–2214,
- [68] Bai, J., Wang, T. and Sakai, S. “Influence of the quantum-well thickness on the radiative recombination of InGaN/GaN quantum well structures.”, *Journal of Applied Physics*, **88** (8), (2000) 4729–4733.
- [69] Wang, T., Nakagawa, D., Lachab, M., Sugahara, T. and Sakai, S. “Investigation of the optical properties in InGaN/GaN quantum well structure.”, *Physica Status Solidi b: Basic Research*, **216**, (1999) 279.
- [70] Chichibu, S.F., Azuhata, T., Sota, T., Mukai, T. and Nakamura, S., “Localized quantum well excitons in InGaN single-quantum-well amber light-emitting diodes”, *Journal of Applied Physics*, **88**, (2000) 5153.
- [71] Lefebvre, P., Taliercio, T., Kalliakos, S., Morel, A., Zhang, X.B., Gallart, M., Bretagnon, T., Gil, B., Grandjean, N., Damilano, B. and Massies, J., “Carrier dynamics in group-III nitride lowdimensional systems: localization versus quantum-confined stark effect”, *Physica Status Solidi (B), Basic Research*, vol. **228**, Issue 1, pp.65-72 (2001)
- [72] Lefebvre, P., Morel, A., Gallart, M., Taliercio, T., All\_egre, J., Gil, B., Mathieu, H., Damilano, B., Grandjean, N. and Massies, J. High internal electric field in a graded-width InGaN/GaN quantum well: accurate determination by time resolved photoluminescence spectroscopy. *Applied Physics Letters*, **78** (9), (2001) 1252–1254.
- [73] Damilano, B., Grandjean, N., Massies, J., Siozade, L. and Leymarie, J., “InGaN/GaN quantum wells grown by molecular-beam epitaxy emitting from blue to red at 300 K”, *Applied Physics Letters*, **77**, (2000) 1268.
- [74] Leszczynski, M., Suski, T., Perlin, P., Teisseyre, H., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., Porowski, S., Pakula, K., Baranowski, J.M., Foxon, C.T. and Cheng, T.S. *Applied Physics Letters*, **69** (1996) 73.
- [75] Ambacher, O., Majewski, J., Miskys, C., Link, A., Hermann, M., Eickhoff, M., Stutzmann, M., Bernardini, F., Fiorentini, V., Tilak, V., Schaff, B., and Eastman, L. F. “Piezoelectric properties of Al(In)GaN/GaN hetero- and quantum well structures”, *J.Phys:Condens. Matter*, **14** (2002) 3399.
- [76] Leszczynski, M., Suski, T., Perlin, P., Teisseyre, H., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., Porowski, S., Pakula, K., Baranowski, J.M., Foxon, C.T. and Cheng, T.S. *Applied Physics Letters*, **69** (1996) 73.

- [77] Tanaka, M., Nakahata, S., Sogabe, K., Nakata, H. and Tabioka, M., *Japanese Journal of Applied Physics*, **36** (1997) 1062.
- [78] Angerer, H., Brunner, D., Freudenberg, F., Ambacher, O., Stutzmann, M., Höppler, R., Metzger, T., Born, E., Dollinger, G., Bergmaier, A., Karsch, S. And Korner, H.-J., “Determination of the Al mole fraction and the band gap bowing of epitaxial  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  films”, *Applied Physics Letters*, **71** (1997) 1504.
- [79] Detchprohm, T., Hiramatsu, K., Itoh, K. and Akasaki, I., “Relaxation Process of the Thermal Strain in the  $\text{GaN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  Heterostructure and Determination of the Intrinsic Lattice Constants of GaN Free from the Strain”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **31** (1992) 1454.
- [80] Leszczynski, M., Teisseyre, H., Suski, T., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., Porowski, S. and Major, J. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **69** (1995) 149.
- [81] Paszkowicz, W., “X-ray powder diffraction data for indium nitride”, *Powder Diffraction*, **14** (1999) 258.
- [82] Wright, A. F., “Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN”, *J. Appl. Phys.* **82** (1997) 2833.
- [83] Bernardini, F. and Fiorentini, V. and Vanderbilt, D., “Spontaneous polarization and piezoelectric constants in III-V nitrides”, *Phys. Rev. B*, **56** (1997) R10024
- [84] Fiorentini, V., Della Sala, F., Di Carlo, A. and Lugli, P. “Effects of macroscopic polarization in III-V nitrides multiple quantum wells”, *Phys. Rev. B*, **60** (1999) 884
- [85] Gupta, Mool C., Ballato, J. (eds.), *The Handbook of photonic* CRC Press, Taylor and Francis Group (2007)
- [86] Manasreh, O., ”III Nitrides Semiconductors:Electrical,Structural and Defects Properties”, *Elsevier Science B.V. Amsterdam*, (2000).
- [87] Peter, Y., Cardona, Y. M., ” Fundamentals of Semiconductors, Physics and Materials Properties” *Springer Berlin Heidelberg New York, 3rd, Corrected Printing 2005*.
- [88] Reshchikov, M. A., and Morkoç, H., “Luminescence properties of defects in GaN”, *Applied Physics Reviews, Journal of Applied Physics*, **97** (2005) 61301.
- [89] Van de Walle, C. G., and Neugebauer, J., “First-principles calculations for defect and impurities:Application to III-nitrides”, *Applied Physics Reviews Journal of Applied Physics*, **90** (2004) 3851.

- [90] Shimada, K., Sota, T. and Suzuki, K., “First-principles study on electronic and elastic properties of BN, AlN, and GaN”, *Journal of Applied Physics*, **84**, (1998) 4951.
- [91] Kornitzer, K., Ebner, T., Grehl, M., Thonke, K., Sauer, R., Kirchner, C., Schwegler, V., Kamp, M., Leszczynski, M., Grzegory, I., and Porowski, S. *Phys. Stat. Sol. B*, **216**, (1999). 5.
- [92] Neu, G., Teisseire, M., Frayssinet, E., Knap, W., Sadowski, M. L., Witowski, A. M., Pakula, K., Leszczynski, M., and Prystawko, P.. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, (2000) 1348.
- [93] Leroux, M., Grandjean, N., Beaumont, B., Nataf, G., Semond, F., Massies, J., and Gibart, P., “Temperature quenching of photoluminescence intensities in undoped and doped GaN”, *J. Appl. Phys.*, **86**, (1999) 3721.
- [94] Eckey, L., Podlosowski, L., Goldner, A., Hoffmann, A., Broser, I., Meyer, B. K., Volm, D., Streibl, T., Hiramatsu, K., Detcprohm, T., Amano, H., and Akasaki, I. *Ins. Phys. Conf. Ser.*, **142**, (1996) 943.
- [95] Reynolds, D. C., Look, D. C., Kim, W., Aktas, O., Botchkarev, A., Salvador, A., Morkoc, H., and Talwar, D. N.. *J. Appl. Phys.*, **80**, (1996) 594.
- [96] Santic, B., Merz, C., Kaufmann, U., Niebuhr, R., Obloh, H., and Bachem, K., “Ionized donor bound excitons in GaN”, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, (1997) 1837.
- [97] Mair, R. A., Li, J., Duan, S. K., Lin, J. Y., and Jiang, H. X., “Time-resolved photoluminescence studies of an ionized donor-bound exciton in GaN”, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, (1999) 513.
- [98] Thomas, D. G. and Hopfield, J.,J., “Optical Properties of Bound Exciton Complexes in Cadmium Sulfide”, *Phys. Rev.*, **128**, (1962). 2135.
- [99] Saito, H., Shionoya, S., and Hanamura, E.. *Solid State Commun.*, **12**, (197) 3227.
- [100] Monemar, B., Paskov, P. P., Paskova, T., Bergman, J. P., Pozina, G., Chen, W. M., Hai, P. N., Buyanova, I. A., Amano, H., and Akasaki, I., “Optical Characterization of III-nitrides.”, *Mater. Sci. Eng. B.*, **93**, (2002) 112.
- [101] Gorczyca, I., Christensen, N., E., and Svane, A., “Influence of hydrostatic pressure on cation vacancies in GaN, AlN, and GaAs”, *Phys. Rev. B* **66**, (2002) 075210.
- [102] Van de Walle, C., G. and Neugebauer, J., “First-principles calculations for defects and impurities: Applications to III-nitrides”, *J. Appl. Phys.* **95**, (2004) 3851.

- [103] Neugebauer, J. and C. Van de Walle, G., “Hydrogen in GaN: Novel Aspects of a Common Impurity”, *Phys. Rev. Lett.* **75**, (1995) 4452.
- [104] Wright, A., F., Seager, C., H., Myers, S., H., Koleske, D., D., and Allerman, A., A., “Hydrogen configurations, formation energies, and migration barriers in GaN”, *J. Appl. Phys.* **94**, (2003) 2311.
- [105] Lee, S., M., Belkhir, M., A., Zhu, X., Y., Y. Lee, H., Hwang, Y., G., and Frauenheim, T., “Electronic structures of GaN edge dislocations”, *Phys. Rev. B* **61**, (2000) 16033
- [106] Neugebauer J. and Van de Walle C. G., “ *Gallium vacancies and yellow Luminescence in GaN*” *Appl. Phys. Lett.*, **69(4)**, (1996) 503-505.
- [107] Davis, R., Roskowski, A., Preble, E., Speck, J., Heying, B., Freitas, J., Glaser, E., Carlos, W., “Gallium Nitride Materials—Progress, Status, and Potential Roadblocks”, *Proc. IEEE* **90**, 993 (2004)
- [108] Nakamura, N., in *MRS Bulletin*, Warrendale, 1998, pp. 1145–1156
- [109] Keller, S., Wu, Y., Parish, G., Ziang, N., Xu, J., Keller, B., DenBaars, S., Mishra, U., “Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB”, *IEEE Trans. Electron Devices* **48**, (2001) 552
- [110] Flynn, J., Xin, H., Dion, J., Hutchins, E., Antunes, H., Corso, L., Egas, R.V., Brandes, G., “Delta doped AlGa<sub>N</sub> and AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs: pathway to improved performance?”, *Phys. Stat. Sol. C* **0**, (2003) 2327
- [111] Kozodoy, P., “PhD thesis”, *University of California Santa Barbara, Santa Barbara*, 1999
- [112] Lu, H., Bhat, I., in *MRS Symposium*, First International Conference on Nitride Semiconductors, **vol. 395**, Boston, 1996, pp. 497–502
- [113] Arulkumaran, S., Miyoschi, M., Egawa, T., Ishikawa, H., Jimbo, T., “Characterization of different-Al-content Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire”, *IEEE Electron Device Lett.* **24**, (2003) 497
- [114] Tanaka, T., Koji, Y., Meguro, T., Otoki, Y., in *Proceedings of the International Conference on GaAs Manufacturing Technology*, Miami, 2004, pp. 295–298
- [115] Wojtowicz, M., Heying, B., Smorchkova, P.C.I., Sandhu, R., Block, T., Aumer, M., Thomson, D., Partlow, D., in *Proceedings of the International Conference on GaAs Manufacturing Technology*, Miami, 2004, p. 299

- [116] Nakamura, S., Chichibu, S. (eds.), *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes* (Taylor & Francis, London New York, 2000)
- [117] Taliercio, T., Lefebvre, P., Gallart, M. and Morel, A., “Optical properties of group-III nitride quantum wells and quantum boxes”, *J. Phys.:Condens. Matter*, **13** (2001) 7027
- [118] Cho, Y-H, Gainer, G., H, Fischer, A., J., Song, J., J., Keller, S., Mishra, U., K., and DenBaars, S., P., “S-shaped” temperature-dependent emission shift and carrier dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells”, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 1370
- [119] Eliseev, P., G., Perlin, P., Lee, J., and Osinski, M., “Blue temperature-induced shift and band-tail emission in InGaN-based light sources”*Appl. Phys. Lett.* **71** (1997) 569
- [120] Teo, K., L., Colton, J., S., Yu, P., Y., Weber, E., R., Li, M., F., Liu, W., Uchida, K., Tokunaga, H., Akatsu, N., and Matsumoto, K., “An analysis of temperature dependent photoluminescence line shapes in InGaN”, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 1697
- [121] Bell, A., Christen, J., Bertram, F., Ponce, F., A., Marui, H., and Tanaka, S., “Localization versus field effects in single InGaN quantum wells”, *Appl. Phys. Lett.* **84**, (2004) 58
- [122] Wang, T., Bai, J., Sakai, S., “The investigation the emission mechanism of InGaN/GaN quantum well structure”, *Proc. Int. Workshop on Nitrite semiconductors IPAP Conf. Series I*, 524-527