

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



**InGaN TABANLI IŞIK YAYAN DİYOTLARIN OPTİK  
ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**REMZİYE BALCI EREN**

**BALIKESİR, AĞUSTOS - 2018**

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



**InGaN TABANLI IŞIK YAYAN DİYOTLARIN OPTİK  
ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LISANS TEZİ**

**REMZİYE BALCI EREN**

**Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Remziye TÜLEK (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Ali TEKE**

**Doç. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR**

**BALIKESİR, AĞUSTOS - 2018**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

REMZİYE BALCI EREN tarafından hazırlanan “InGaN TABANLI IŞIK YAYAN DİYOTLARIN OPTİK ÖZELLİKLERİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 03.08.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Doç. Dr. Remziye TÜLEK

Üye

Prof. Dr. Ali TEKE

Üye

Doç. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR

  
.....  
  
.....  
  
.....

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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez alışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri birimi tarafından 2016/148 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**InGaN TABANLI IŞIK YAYAN DİYOTLARIN OPTİK ÖZELLİKLERİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
REMZİYE BALCI EREN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. REMZİYE TÜLEK)**

**BALIKESİR, AĞUSTOS - 2018**

Bu tez çalışmasında, Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) yöntemiyle (0001) doğrultusunda safır alttaş üzerine büyütülen InGaN tabanlı çoklu kuantum kuyulu ışık yayan diyot (LED) yapısına sahip dört adet farklı örneğin optik özellikleri incelendi. Bu örneklerin lüminesans özellikleri, Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan,  $7.89-263.2 \text{ W/cm}^2$  aralığında uyarım şiddeti yoğunluğuna ayarlanabilen ve 349 nm dalgaboyunda çalışan lazer ile sıcaklığa ve uyarma şiddetine bağlı fotolüminesans (PL) yöntemi ile incelendi. Sıcaklığa ve uyarma şiddetine bağlı PL pik enerjisi, pik şiddeti ve tam genişlik yarı maksimumlar (FWHM) analiz edildi. Sıcaklığa bağlı PL ölçümlerinden  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin Varshni denklemi ile uyumlu olduğu görüldü.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  kuantum kuyularından kaynaklanan PL yoğunluğunun sıcaklık bağımlılığını karakterize etmek için çift aktivasyon enerjili ampirik denklem kullanılarak incelendi. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (NANOTAM) bulunan Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Difraksiyonu (HRXRD) yöntemi ile kristal kaliteleri incelendi. XRD'den elde edilen sonuçlar ile dislokasyon yoğunluğu kenar ve vida tipi olarak hesaplandı.

**ANAHTAR KELİMELELER:** InGaN, LED, fotolüminesans.

## **ABSTRACT**

**OPTICAL PROPERTIES of InGaN BASED LIGHT EMITTING DIODES  
MSC THESIS  
REMZIYE BALCI EREN  
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
PHYSICS  
(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. REMZIYE TÜLEK)**

**BALIKESİR, AUGUST 2018**

In this work, optical properties of different design four samples of InGaN based multi quantum well LED structures grown on sapphire by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) were investigated. The luminescence properties of these samples were determined by the temperature and excitation intensity dependence of Photoluminescence (PL) method that excitation densities between  $7.89\text{-}263.2\text{ W/cm}^2$  pulse laser at 349 nm at Balıkesir University Science and Technology Application and Research Center. The temperature and excitation intensity dependence of PL peak energy, peak intensity and full width at half maximum (FWHM) were analysed. From the temperature-dependent PL measurements, it was observed that the peak energy of the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  multi-quantum well was compatible with the Varshni equation. In order to characterize the temperature dependence of the PL intensity originating from  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  multi quantum well the empirical equation with dual activation energy was used. The quality of samples was determined by High Resolution X-ray Diffraction (HRXRD) at Bilkent University. Edge and screw type of dislocation density were calculated from XRD results.

**KEYWORDS:** InGaN, LED, photoluminescence.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ABSTRACT .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
TABLO LİSTESİ .....	v
SEMBOL LİSTESİ .....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. DENEYSEL YÖNTEMLER .....	6
2.1 Fotoluminesans (PL) Yöntemi .....	6
3. DENEYSEL SONUÇLAR .....	9
3.1 Örneklerin Yapısı .....	9
3.2 Yüksek Çözünürlüklü X-Işınımı Kırınımı (HRXRD) Sonuçları .....	13
3.3 Sıcaklığa Bağlı PL Ölçümleri.....	15
3.3.1 Enerji Pik Pozisyonlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimleri.....	17
3.3.2 Pik Şiddetlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri .....	19
3.3.3 PL Piklerinin FWHM Değerlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri ....	21
3.4 Uyarma Gücü Yoğunluğuna Bağlı PL Ölçümleri .....	24
4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	28
5. KAYNAKLAR.....	32

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Tipik bir LED yapının potansiyel profilinin ve çalışma mekanizmasının şematik gösterimi .	2
Şekil 1.2: LED'lerin çeşitli kullanım alanlarını gösteren görseller.	2
Şekil 1.3: İki farklı atomlu (örneğin GaN) wurtzite kristaline ait örgü yapısının şematik gösterimi.	3
Şekil 2.1: Yarıiletkenlerde içsel ve dışsal etkilere bağlı olan optik geçişler	7
Şekil 2.2: PL düzeneği ve şematik gösterimi.	8
Şekil 3.1: Örneklerin tabaka yapıları ve enerji bant profillerinin şematik gösterimleri.	12
Şekil 3.2: Örneklerin $\omega$ -2 $\theta$ taraması ile elde edilen XRD sallanma eğrileri.	14
Şekil 3.3: Örneklerin 10-300 K sıcaklık aralığında PL spektrumları.	16
Şekil 3.4: Örneklerin PL pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimleri.	18
Şekil 3.5: Örnek gauss fiti.	18
Şekil 3.6: Örneklerin PL pik şiddetinin sıcaklığın tersi ile değişimleri.	21
Şekil 3.7: Örneklerin sıcaklığa bağlı FWHM değişimleri.	23
Şekil 3.8: Örneklerin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı PL spektrumları.	26
Şekil 3.9: PL pik enerjisinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimi.	27
Şekil 3.10: Normalize pik şiddetinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimi.	27
Şekil 3.11: FWHM değerinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimi.	27



## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1:</b> Örneklerin XRD ölçüm tablosu. ....	15
<b>Tablo 3.2:</b> Deneysel sonuçlar için kullanılan fit parametreleri. ....	19
<b>Tablo 3.3:</b> Örnekler için elde edilen FWHM fit parametreleri. ....	23

## SEMBOL LİSTESİ

- E<sub>g</sub>**: Enerji Bant aralığı  
**n**: Elektron yoğunluğu  
**p**: Deşik-yoğunluğu  
**∂**: Enerjinin sıcaklık ile değişimi  
**∂**: Debye sıcaklığı  
**k<sub>B</sub>**: Boltzmann sabiti  
**E<sub>LO</sub>**: Boyuna optik fonon enerjisi  
**∂(T)**: Eksitonik çizgi genişliği  
**∂<sub>LA</sub>**: Eksiton-akustik fonon bağlanma kuvveti  
**∂(LO)**: Eksiton-optik fonon bağlanma kuvveti  
**PL**: Fotoluminesans  
**LED**: Işık yayan diyot  
**GEI**: Kademeli Elektron Enjektör  
**QCSE**: Kuantum sınırlı Stark etkisi

## ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince ilgisi ve desteği ile yanımda olan değerli danışmanım Doç. Dr. Remziye TÜLEK' e ve bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Ali TEKE' ye teşekkürü bir borç bilirim.

Virginia Commonwealth Üniversitesinde üretilen örnekler için Prof. Dr. Hadis MORKOÇ'a, Dr. Ümit Özgür'e ve çalışma arkadaşlarına teşekkür ederim.

Bu örneklere ait XRD sonuçları için Prof. Dr. Ekmel Özbay ve Prof. Dr. Engin ARSLAN'a ve çalışma arkadaşlarına teşekkür ederim.

Son olarak okul hayatım boyunca beni destekleyen aileme ve tez çalışmam boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen değerli eşime çok teşekkür ederim.

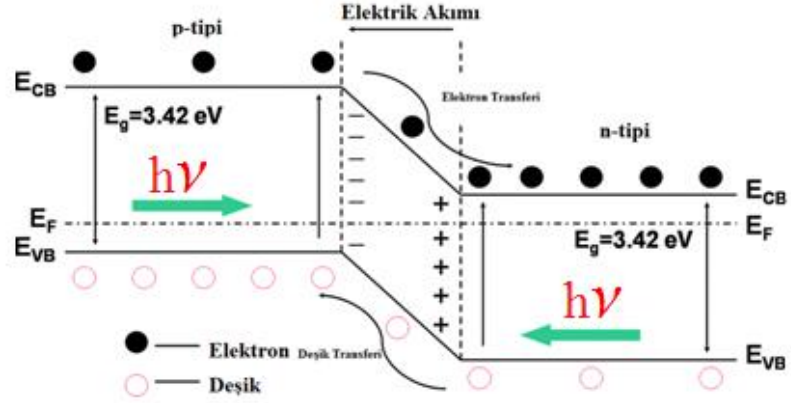
## 1. GİRİŞ

Işık yayan diyotlar (LED), temel olarak elektrik enerjisini optik enerjiye dönüştüren optoelektronik aygıtlar olup yapısı basitçe ileri beslenmiş bir pn-ekleminden oluşmaktadır (Şekil 1.1). Yayılan radyasyon kendiliğinden bir ışınım olup dalga boyu genelde taşıyıcı tekrar birleşmelerinin gerçekleştiği yarıiletkenin enerji bant aralığı ile belirlenir [1]. Spektrumun morötesi, görünür ve kızılötesi bölgesinde ışık yayan diyotların üretiminde, GaAs, GaP, GaN, AlInGaP ve InGaN tabanlı farklı yarıiletken materyaller kullanılır. Yüksek performanslı ve farklı dalga boylarında ışınım yapacak olan LED'lerin aktif bölgelerinin tasarımında heteroeklem, tekli /çoklu kuantum kuyuları, kuantum teller ve kuantum noktaları gibi düşük boyutlu sistemler de kullanılmaktadır [1].

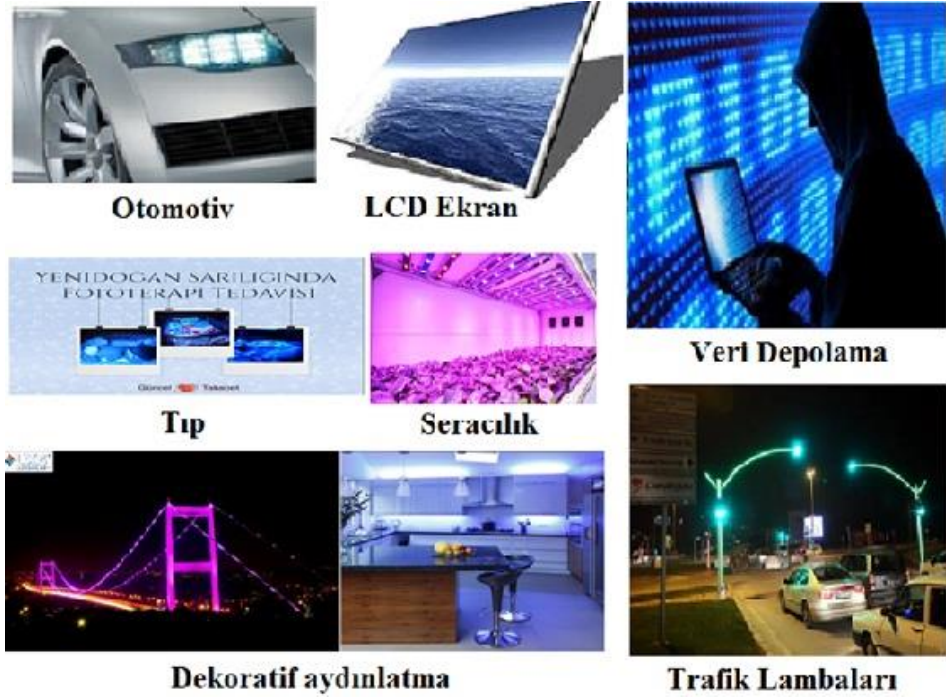
In(Al)GaN tabanlı çoklu kuantum kuyulu yapılar, görünür ve yakın morötesi (UV) LED, lazer diyot ve fotodetektörler gibi birçok optoelektronik ve elektronik aygıtların üretilmesinde ve geliştirilmesinde önemli bir yere sahiptir [2-6].

LED'lerin gelecekte yoğun olarak kullanılacağı uygulamalar arasında; ev ve iş yerlerindeki iç aydınlatmalar, cadde, sokak, park, karayolları ve yerleşim yerlerindeki dış aydınlatma sistemleri, reklam panoları, trafik lamba ve işaretleri, alışveriş merkezlerinde, büyük caddelerde ve stadyumlarda ki düz ekran televizyonları gibi görüntü ve aydınlatma teknolojileri sıralanabilir (Şekil 1.2). LED tabanlı beyaz ışık kaynakları günümüz teknolojisinde kullanılan akkor ve flüoresan ampuller ile karşılaştırıldığında verimlilik, kullanım ömrü ve enerji tüketimi gibi birçok farklı parametreler açısından önemli avantajlara sahiptir [7]. Günümüzde kırmızı, yeşil/sarı, mavi LED'lerin uygun oranlarda karıştırılması veya parlak mavi LED'lerin fosforlu dalga boyu dönüştürücüsü ile katılarak elde edilen beyaz ışık kaynaklarının hızlı bir şekilde kullanıma girdiği görülmektedir. Gelecekte aydınlatma sistemlerinde daha yoğun bir şekilde LED tabanlı teknolojilerin kullanılacağı beklentisi büyüktür [8-11]. Nehir sularının ve endüstriyel su atıklarının temizlenmesi ve arıtılması gibi çevrenin korunması ile ilgili alanlarda da UV bölgede ışınım yapan LED'ler kullanılabilir. Son zamanlarda özellikle UV LED'ler yeni doğan kliniklerindeki küvezlerde neo-blue LED fototerapi denilen yöntemle sarılık

tedavisinde, deri hastalığının tedavisinde (akne, sedef hastalıkları ve cilt kırışıklıklarının tedavileri, bronzlaşma gibi), UV kürleme, DNA analizi ve kimyasal sensör uygulamalarında, sahte banknot algılamada, foto katalizör hava temizleme ve aydınlatma uygulamalarında, lazer bıçakları, sterilizatörler ve su veya hava temizleyicilerinde kullanılmaktadır [12].



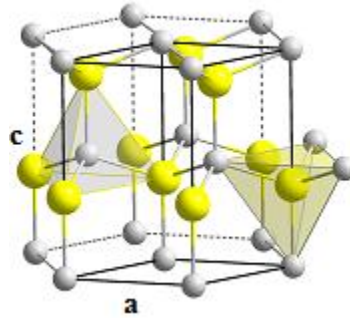
**Şekil 1.1:** Tipik bir LED yapının potansiyel profilinin ve çalışma mekanizmasının şematik gösterimi.



**Şekil 1.2:** LED'lerin çeşitli kullanım alanlarını gösteren görseller.

Yarıiletkenlerin ışık yayabildiği ilk defa 1900'lerin başlarında Henry Round tarafından gözlenmiş ve ilk LED 1920'de Oleg Vladimirovich Losev tarafından üretilmiştir. 1962 yılında ilk LED'i keşfeden Nick Holonyok Jr'nin öğrencisi olan M. George Craford tarafından kırmızı LED'in 10 katı parlaklığında olan sarı LED üretilmiştir [13]. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano ile Shuji Nakamura, ilk kez 1980'li yıllarda birçok deneme yaparak yarıiletkenlerden mavi ışık elde etmeyi başardı [14]. Bu üç değerli bilim insanı 1990'lı yıllarda mavi LED teknolojisini daha da ileriye taşıdı ve ilk yüksek parlaklıktaki mavi LED Nakamura ve ekip arkadaşları tarafından InGaN temelli olarak üretilmiştir ve 2014 yılında Nobel Fizik ödülü almışlardır. Kırmızı ve yeşil LED üretiminin ardından geliştirilen mavi LED sayesinde, yarıiletkenlerle beyaz ışığın oluşturulmasının önünü açmıştır.

Nitrür tabanlı AlN (6.2eV), GaN (3.4eV) ve InN (0.7eV) ve bunların üçlü ve dörtlü bileşikleri doğrudan bant aralığına sahip olup morötesinden, görünür ve kızılötesi bölgesine kadar geniş dalga boyu aralığını taramaktadır [15]. Bu yapılar wurtzite, çinkosülfür (zinblend) ve kayatuzu (NaCl) yapıda kristalleşirler. Yüksek kristal kalitesi ve termodinamik olarak kararlı olan wurtzite yapı elektriksel ve optik uygulamalarda daha yaygın tercih edilmektedir (Şekil 1.3). Wurtzite yapı iki sıkı paketli altıgen yapının (hcp) iç içe geçmesi ile oluşur. Her bir hücrede 4 atom vardır. Wurtzite yapının birim hücresi altıgen yapıda olduğu için c ve a olarak adlandırılan iki örgü parametresi vardır. Bunlardan a taban düzlemindeki örgü parametresini, c ise buna dik düzlemindeki parametreyi göstermektedir [16].



**Şekil 1.3:** İki farklı atomlu (örneğin GaN) wurtzite kristaline ait örgü yapısının şematik gösterimi.

Literatürde, MOCVD ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemleri ile büyütülen gerek bulk (hacimli), gerekse düşük boyutlu InGaN tabanlı yapıların yapısal, elektriksel ve optik özelliklerin belirlenmesi ve bunların aygıt uygulamaları üzerine oldukça fazla çalışma bulunmaktadır [3,5,6,7]. InGaN tabakalarındaki In oranı ve bu tabakaların kristal kalitesi ve fazı, büyütme sistemi ve kullanılan bu sistemlerdeki büyütme hızı, alttaş sıcaklığı, III/V akı oranları gibi büyütme parametrelerine son derece bağımlıdır [17,18-21]. LED, lazer gibi optoelektronik aygıtların aktif bölgelerini oluşturan InGaN ve GaN tabakalarının örgü ve ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk, InN ve GaN'ın farklı buhar basınçlarına sahip olmaları özellikle büyütme sıcaklığının ve diğer büyütme parametrelerinin optimizasyonunda önemli zorluklar getirmektedir [22]. Büyüyen kristalin mikro yapı kalitesi, elektrik ve optik özellikleri büyüme parametreleri ile yakından ilişkilidir. Örneğin, MOCVD ile yüksek sıcaklıkta ( $T_g > 750$  °C) dolayısıyla düşük In oranlı InGaN yapılarda yakın enerji bant emisyonu gözlenirken düşük sıcaklıkta ( $T_g < 700$  °C) dolayısıyla yüksek In oranlı örneklerde ise derin seviye veya safsızlık geçişlerinin baskın olduğu gözlenmiştir [18]. Ayrıca, InGaN yapılarının sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumlarında gözlenen S-tipi davranışın In oranına son derece bağlı olduğu da bilinmektedir. Yüksek In oranlı örneklerde yerleşme etkisinin daha belirgin olduğu ve dolayısıyla S-tipi karakterin net olarak gözlemlendiği, buna karşın düşük In oranlı yapılarda PL tepe enerjisi değerinin sıcaklık karakteristiğinin bant daralmasını takip ettiği görülmektedir [23-26].

LED'ler daha öncede bahsedildiği üzere genel aydınlatma başta olmak üzere birçok uygulama alanında hızlı bir şekilde yer almaktadır. Geleneksel aydınlatma teknolojilerine göre LED aydınlatmanın esas avantajı yüksek enerji verimliliğidir. Bununla birlikte GaN tabanlı LED'ler şuana kadar düşük akım ve düşük parlaklıkta yüksek verimlilik sunarlar. Yüksek parlaklık ve yüksek enjeksiyon akımına sahip uygulamalarda LED veriminin azaldığı görülmektedir. Verimlilik düşüşünü açıklamak için öne sürülen nedenler arasında taşıyıcı delokalizasyonu [27-30], güçlendirilmiş Auger rekombinasyonu [31], elektron kaçağı [32] ve Shockley-Read-Hole (SRH) rekombinasyonu [33] bulunmaktadır. Kompakt flöresanlara göre, LED'ler daha uzun ömre ve daha hızlı tepki zamanına sahiptirler. Bu avantajlara rağmen, sürücü akım yoğunluğu değerlerinde beklenmeyen verim kayıpları LED'lerde mevcut problemlerin başında gelmektedir. Uygulanan kaynaktan enjekte

edilen her bir elektron-deşik çiftinin ışınsal rekombinasyon yoluyla bir fotona dönüşmesi beklenen ideal bir LED yapısının %100 verimle çalışması mümkün olmakla birlikte, elektriksel enerjinin optik enerjiye dönüşümü ve oluşan fotonların salınımı sırasında, her zaman elektron-deşik çifti ve foton kayıpları olmaktadır [34].

Bu tez çalışmasında, aktif bölgeleri farklı periyot ve alaşım oranlarına sahip  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  çoklu kuantum kuyulu tabakaların bulunduğu 4 farklı LED tasarımına sahip yapıların yapısal ve optik özellikleri araştırılmıştır. İncelenen örnekler Virginia Commonwealth Üniversitesi altyapısında kurulu MOCVD yöntemiyle büyütülmüştür. Örneklerin yapısal özellikleri, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (NANOTAM) bulunan Yüksek Çözünürlü X-Işını Difraksiyonu (HRXRD) yöntemiyle belirlendi. Optik özellikler ise Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan sıcaklığa ve uyarma şiddetine bağlı PL yöntemi ile incelendi.



## 2. DENEYSEL YÖNTEMLER

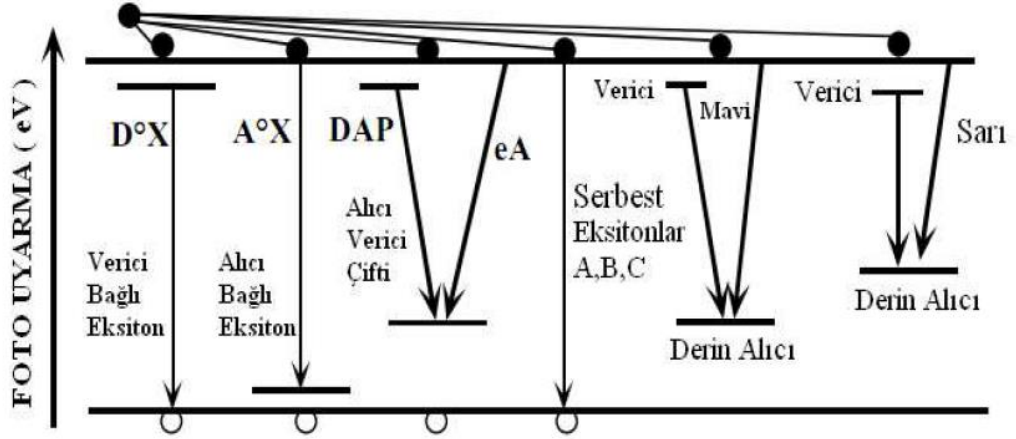
Bu çalışmada yukarıda belirtilen laboratuvarlarda üretilen ve/veya ölçümleri yapılan örneklerimizin verileri direkt olarak kullanıldığı için bu bölümde sadece PL ölçüm tekniğinden detaylı olarak bahsedilecektir. Yaygın olarak kullanılan ve iyi bilinen MOCVD ve HRXRD yöntemleri ile ilgili geniş bilgi ve açıklamalara ilgili literatürde ulaşılabilir [2]. MOCVD bir alttaş üzerine çoklu epitaksiyel katmanların nanometre hassasiyetinde büyütülmesi amacıyla kullanılan bir kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. MOCVD yöntemi özellikle çok yüksek kalitede ve çok yüksek saflıkta nitrür malzemelerinin büyütülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. HRXRD yöntemi epitaksiyel ve/veya düşük boyutlu yarıiletken yapıların kristal yapısı, örgü parametreleri, dislokasyon yoğunlukları, epi tabakaların kalınlıkları veya alaşım oranları gibi birçok önemli özelliğinin, incelenen örneğe hasar vermeden belirlenmesinde çok yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [35, 36].

### 2.1 Fotoluminesans (PL) Yöntemi

Fotoluminesans yöntemi, yarıiletkenlerin optik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan çok duyarlı ve kullanışlı bir deneysel yöntemdir. Bu yöntem ile yarıiletken malzemelerin kalitesi, yasak enerji bant aralığı, malzemenin yapısında görülen doğal kusurlar ve safsızlıklar hakkında bilgiler elde edilebilir.

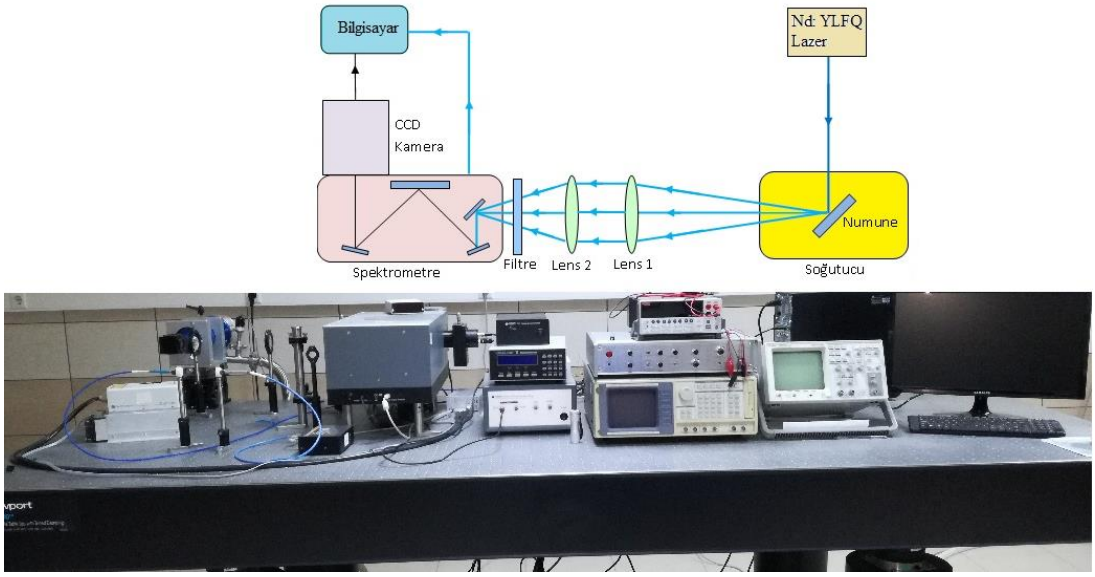
Fotoluminesans olayında ilk olarak, incelenen örnek tek dalgaboylu optik uyarma kaynağı tarafından uyarılır.  $h\nu$  kadar bir enerjiye sahip uyarıcı fotonlar elektronları valans bandından iletim bandına çıkarır. Optik uyarma kaynağının enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığından ( $E_g$ ) büyük olduğunda elektron-deşik çiftleri oluşur. İlk anda yüksek kinetik enerjiye sahip elektron-deşik çiftleri bu fazla enerjilerini akustik ve optik fonon yayınımlı yoluyla hızlı bir şekilde (0,2-100 ps) boşaltarak bant kenarına (elektronlar iletim bandının minimumuna doğru, deşikler ise valans bandının maksimumuna) doğru hareket ederek termal denge dağılımlarına ulaşırlar. Elektron-deşik çiftleri yeniden birleşerek, fazlalık enerji ışımali veya ışımsız olarak salınır. Büyütme sırasında yapı içerisinde, ortam ve termodinamik

şartlardan dolayı oluşan doğal/yapay kusurlar ve dislokasyonlar fotoluminesans spektrumunda safsızlık geçişleri, verici-alıcı geçişleri, eksitonik geçişler, banttan banda geçişler gibi birçok içsel (*intrinsic*) ve dışsal (*extrinsic*) geçişler görülmesine neden olur (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1:** Yarıiletkenin içsel ve dışsal etkilere bağlı olan optiksel geçişleri.

Bu çalışmada kullanılan PL sisteminin görüntüsü ve sistemin şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmektedir. 10-300 K sıcaklık aralığında fotoluminesans ölçümlerini almak için ilk olarak örnekler kapalı-devirli soğutucuya yüklendi. Bu sistemde, uyarma kaynağı olarak 349 nm çıkış dalgaboyuna sahip frekansı üçleyicili Nd: YLFQ kitlemeli atma lazer kullanıldı. Bu uyarma kaynağının sürücü akımını değiştirerek uyarım güç yoğunluğu  $7.89-263.2 \text{ W/cm}^2$  aralığında ayarlanabilir. Örneklerden yayılan ışımali geçişler uygun mercekler yardımıyla yönlendirilerek yarık genişliği 0-3 mm arasında değiştirilebilen spektrometrenin girişine odaklanır. SR-500 mm spektrometreye giren optik sinyaller ayna sistemi ve monokromatör yardımıyla 1200 line/mm dağıtıcı (grating) ile dağıtılarak ICCD dedektörünün üzerine düşürülür. Elde edilen optik sinyal, bilgisayar tarafından bir yazılım ile kontrol edilen ICCD kamera ile elektriksel sinyale dönüştürülür ve daha sonra bu sinyalin; şiddet-dalgaboyu grafiği çizilir ve fotoluminesans spektrumu elde edilmiş olur.



Şekil 2.2: PL düzeneği ve şematik gösterimi.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

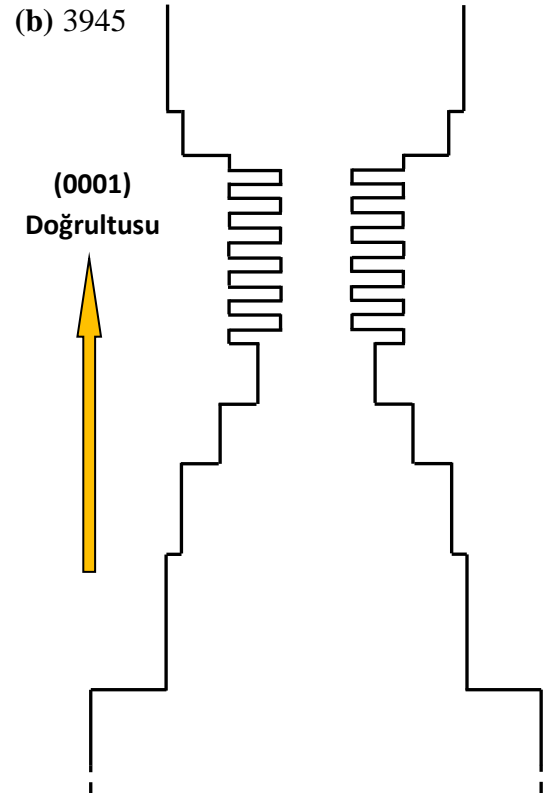
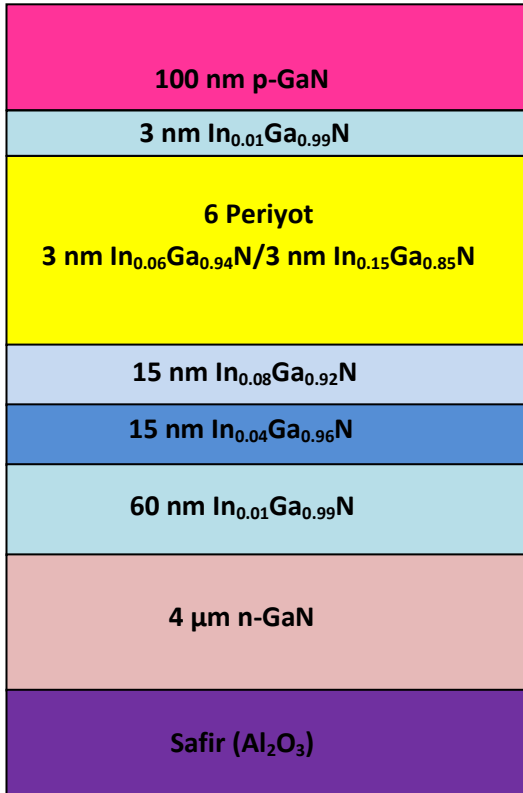
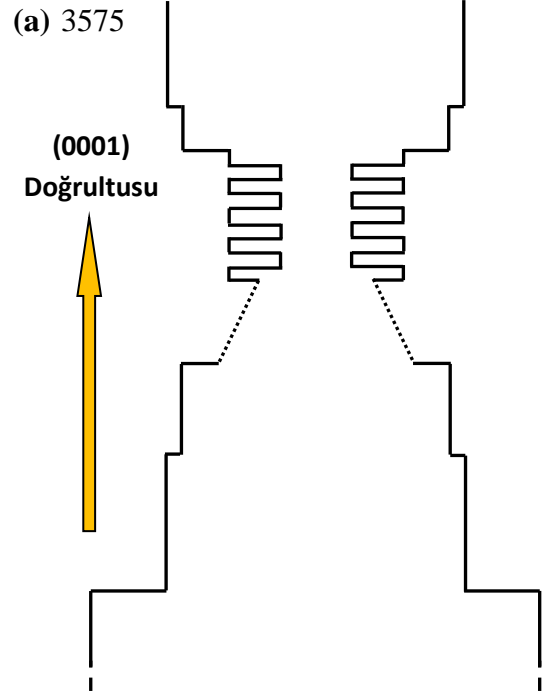
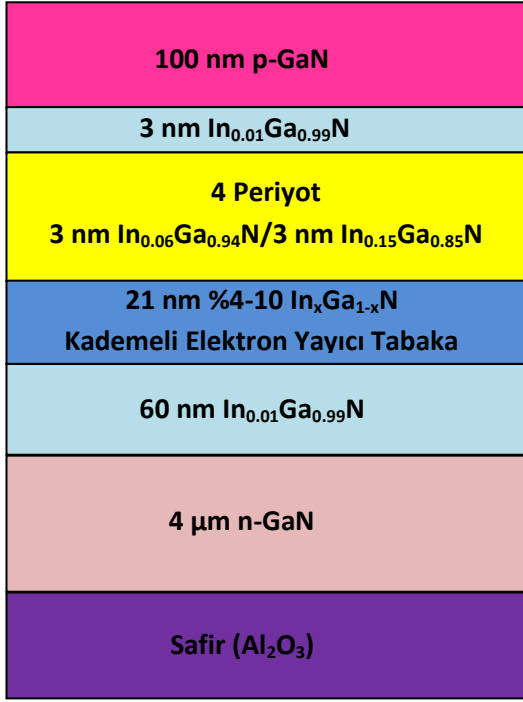
#### 3.1 Örneklerin Yapısı

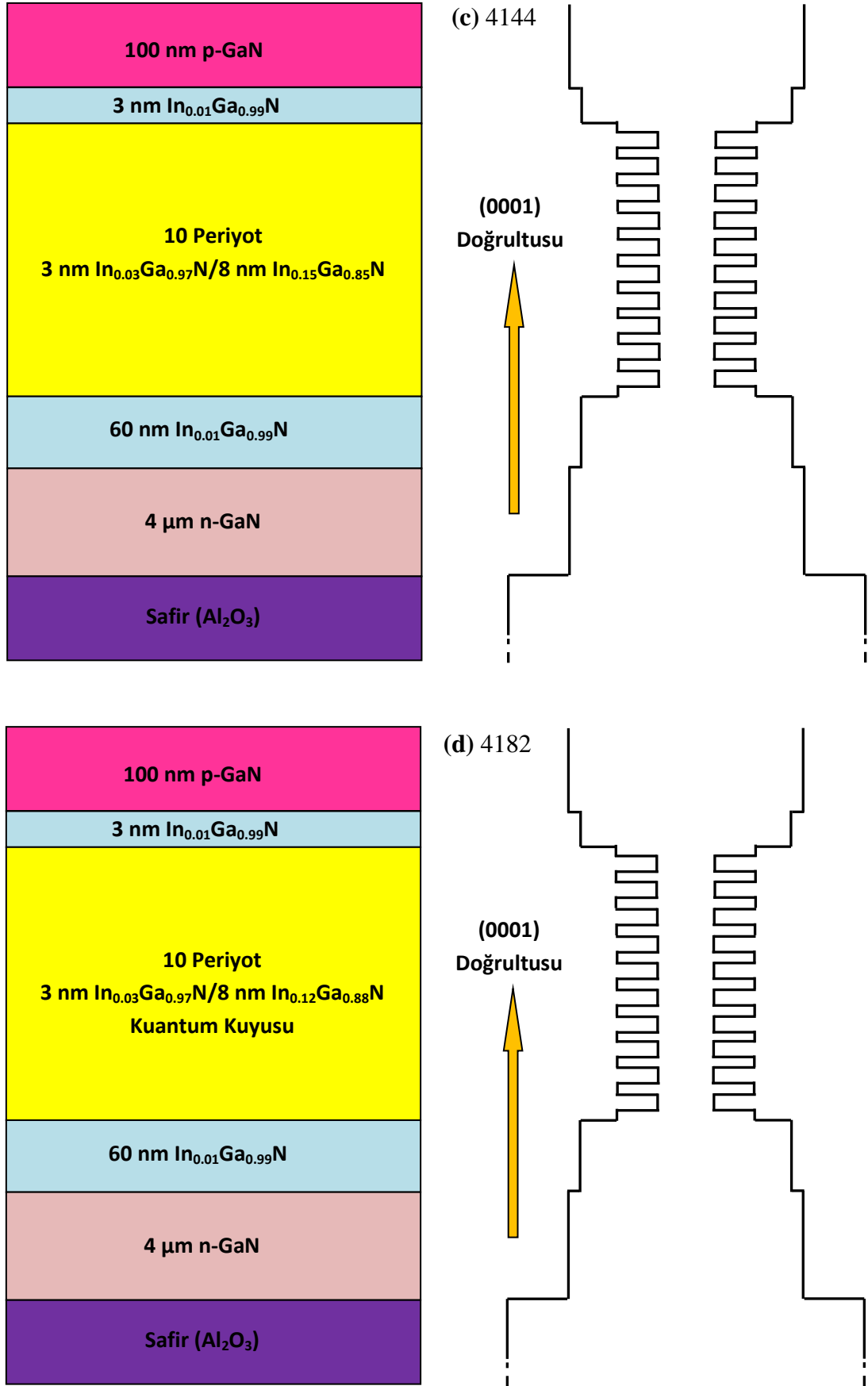
3575 kodlu örneğin büyütülmesine c-düzlemi (0001) safir alttaş ( $Al_2O_3$ ) üzerine yaklaşık 4  $\mu m$  kalınlıkta n-tipi GaN tabakası ile başlanmıştır. Bunun üzerine toplam 21 nm kalınlıkta In oranı %4-10 aralığında değişen 7 kademeli elektron yayıcı (GEI-Graded Electron Injection layer) tabaka büyütülmüştür. Aktif bölgedeki zorlamayı azaltmak için n-GaN ile kademeli elektron yayıcı tabaka arasına GaN'a kıyasla daha yumuşak bir örgü yapısına sahip 60 nm kalınlıkta  $In_{0.01}Ga_{0.99}N$  tabakası yerleştirilmiştir. Kademeli elektron yayıcı tabaka üzerine büyütülen ve 4 periyotdan oluşan aktif tabaka, kuantum kuyusu ve engelinin kalınlıkları 3 nm olan ve sırasıyla %15 ve %6 In oranına sahip bir yapıdan oluşmaktadır. Yapı, en üst tabaka olarak 100 nm kalınlıkta p-GaN büyütülmesi ile tamamlanmıştır. p-GaN ile aktif bölge arasındaki örgü geçişini yumuşatmak için yine ikisi arasında 3 nm kalınlığında %1 In oranına sahip InGaN tabakası yerleştirilmiştir.

3945 örneği; 3575'in tasarımına benzerdir. Bu örnekte de büyütmeye safir alttaş üzerine yaklaşık 4  $\mu m$  kalınlıkta n-tipi GaN büyütülerek başlanmıştır. Bunun üzerine toplam 30 nm kalınlıkta In oranı %4 ve 8 olan InGaN tabakası büyütülmüştür. Bu örnekte de aktif bölgedeki zorlamayı azaltmak için 60 nm kalınlıkta  $In_{0.01}Ga_{0.99}N$  tabakası GaN ile  $In_{0.08}Ga_{0.92}N$  arasına yerleştirilmiştir. Bunun üzerine büyütülen aktif bölge 6 periyot ve 3 nm kalınlığa sahip %15 In (kuyu) ve %6 In (bariyer) oranlarına sahip bir yapıdan oluşmaktadır. Yapının en üst tabakası 100 nm kalınlıkta p-GaN ile tamamlanmıştır. Bu yapıda da yine p-GaN ile aktif bölge arasındaki örgü geçişini yumuşatmak için ikisi arasında 3 nm kalınlığında %1 In oranına sahip InGaN tabakası yerleştirilmiştir.

4144 ve 4182 kodlu örnekler yukarıda verilen örneklerden kısmen farklı yapılara sahiptir. Bu iki örneğinde büyütülmesine yaklaşık 4  $\mu m$  kalınlıkta n tipi GaN büyütülerek başlanmıştır. Bu örneklerde de aktif bölgenin altında ve üstünde örgü uyuşumunu yumuşatmak için 60 nm kalınlıkta  $In_{0.01}Ga_{0.99}N$  tabakası

yerleştirilmiştir. Her iki örneğinde aktif bölgesi 10 periyot InGaN/InGaN çoklu kuantum kuyusu içermektedir. 4144 örneğinde kalınlığı 8 nm ve In oranı %15 olan bir InGaN tabakası kullanılırken 4182 örneğinde aynı kalınlıkta fakat %12 In oranına sahip InGaN tabakası kullanılmıştır. Her iki örneğinde bariyer tabakası aynı olup 3 nm kalınlığında %3 In oranında InGaN katmanından oluşmaktadır. Her iki örnekte de yukarıdaki örneklerde olduğu gibi aktif bölgedeki zorlamaları yumuşatmak için aktif bölgenin altında ve üstünde aynı kalınlık ve oranlarda InGaN örgü yumuşatma tabakaları yerleştirilmiştir. Bu örneklerin tabaka yapılarının ve enerji bant profillerinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmektedir.





Şekil 3.1: Örneklerin tabaka yapıları ve enerji bant profillerinin şematik gösterimleri.

### 3.2 Yüksek Çözünürlüklü X-Işınımı Kırınımı (HRXRD) Sonuçları

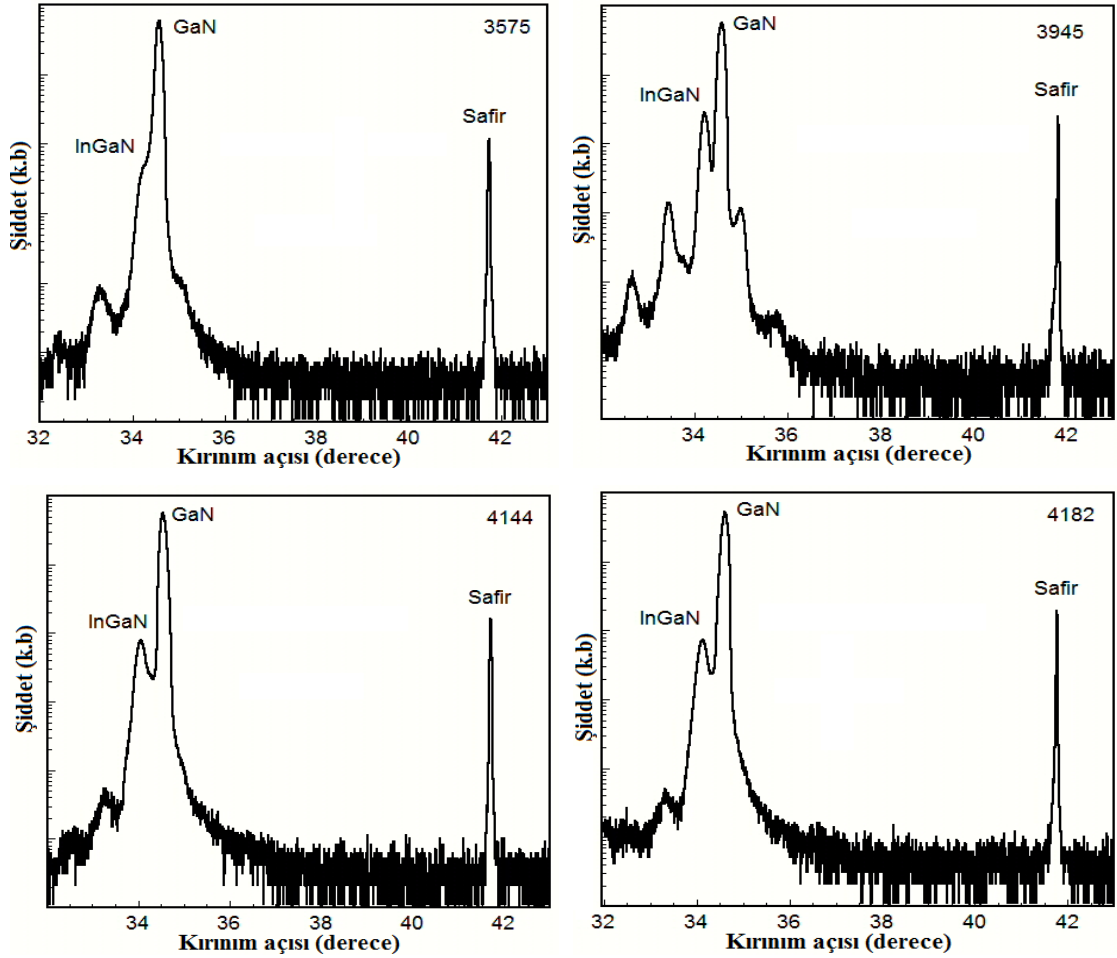
Örgü eşleşmeli ince filmlerde, HRXRD sallanma eğrileri, filmlerin tabaka kalınlığı, süperörgü periyodu, gerinim, gevşeme, örgü uyumsuzluğu ve alaşımların kompozisyon oranı ve profilini incelemek için kullanılabilir. Mükemmel bir kristalde, XRD sallanan eğrinin genişliği, demet geometrisi ve kaynağın spektral genişliği ile belirlenir. Kristal kusurları sallanan eğrinin genişlemesine neden olur. Genellikle ölçülen sallanma eğrisinin yarı genişliği, mükemmel bir kristal varsayarak hesaplanan değerle karşılaştırılarak yorumlanır. Bu çalışmada, HRXRD analizlerinden incelenen örneklerin kristal kalitesi ile birlikte dislokasyon yoğunlukları belirlendi. Örneklerin simetrik (002) ve asimetrik (102) düzlemlerinden gelen yansımaları toplandı. Şekil 3.2, bütün örnekler için  $\omega$ -2 $\theta$  taraması ile elde edilen simetrik (002) düzlemlerinden gelen XRD sallanma (rocking) eğrilerini göstermektedir. Simetrik  $\omega$ -2 $\theta$  taramasında gözlenen ve değeri yaklaşık  $41.7^\circ$  bulunan yansıma tepesi safir alltaşa aittir. Yaklaşık  $34.6^\circ$  gözlenen ve GaN tabakasına ait yansıma tepelerin sol tarafında bulunan ve 3575 için bir omuz şeklinde ve diğer örnekler için ise net tepeler şeklinde gözlenen sıfırıncı dereceden yansımalar yapı içerisindeki tüm InGaN tabakalarının ortalama In oranını yansıtan XRD tepelerini göstermektedir. InGaN'a ait bu tepe açısı değerlerinin simetrik olarak sağında ve solunda bulunan yansıma tepeleri ise InGaN/InGaN kuantum kuyularının periyodu ile ilişkili birinci ve daha yüksek dereceden uydu tepelerini göstermektedir. Simetrik (002) ve asimetrik (102) XRD salınım eğrisinin FWHM değerleri esas olarak vida ve kenar dislokasyon yoğunlukları hesaplanabilir.

Kenar dislokasyonu ve vida dislokasyonu sırasıyla  $b = \frac{1}{3}\langle 11\bar{2}0 \rangle \langle a \rangle$  ve  $b = \langle 0001 \rangle \langle c \rangle$  Burgers vektörleri ile ifade edilirler [37]. Dolayısıyla, simetrik (002) ve asimetrik (102) XRD salınım eğrisinin FWHM değerleri kullanarak örneklerimizin kenar ve vida dislokasyon yoğunlukları [38];

$$D_{vida} = \frac{\beta^2(0002)}{9b_{vida}^2}, \quad D_{kenar} = \frac{\beta^2(1012)}{9b_{kenar}^2} \quad (3.1)$$



eşitliklerinden elde edildi. Burada  $D_{vida}$  vida dislokasyon yoğunluğunu,  $D_{kenar}$  kenar dislokasyon yoğunluğunu,  $\beta$ , XRD eğrisinden ölçülen FWHM değerini ve  $b$  burger vektörünün uzunluğunu göstermektedir ( $b_{vida} = 0.5185$  nm,  $b_{kenar} = 0.3189$  nm). İncelenen örneklerin XRD analizleri tablo 3.1 de özetlenmiştir.



Şekil 3.2: Örneklerin  $\omega$ -2 $\theta$  taraması ile elde edilen XRD sallanma eğrileri.

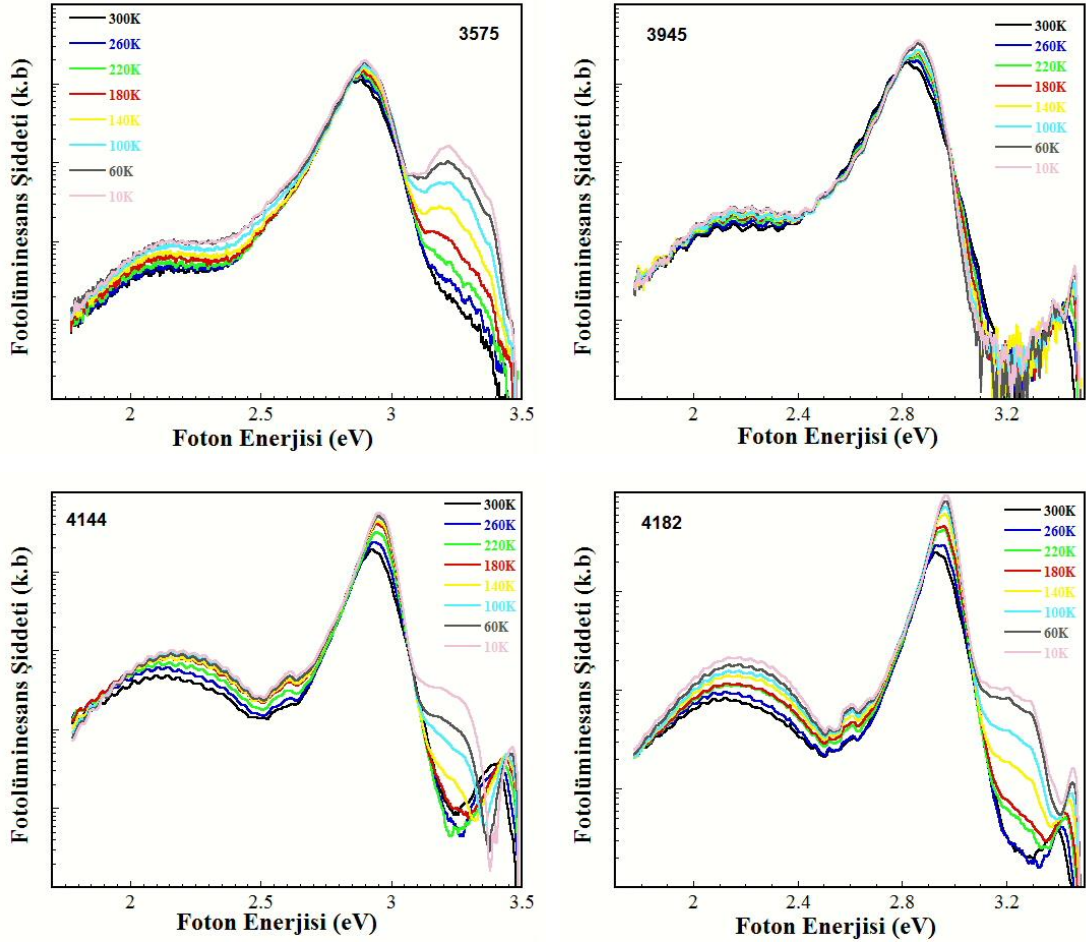
**Tablo 3.1:** Örneklerin XRD ölçüm tablosu.

Örnek	GaN (002)		GaN (102)		D (vida) cm <sup>-2</sup>	D (kenar) cm <sup>-2</sup>	2θ (derece)		
	Deg	FWHM	Deg	FWHM			GaN	InGaN	Δ(2θ)
3575	0.085	306	0.107	385	9.1x10 <sup>7</sup>	3.8x10 <sup>8</sup>	34.58	34.08	0.5
3945	0.095	342	0.151	544	1.1x10 <sup>8</sup>	7.6 x10 <sup>8</sup>	34.60	33.90	0.7
4144	0.104	374	0.170	612	1.4x10 <sup>8</sup>	9.6 x10 <sup>8</sup>	34.50	33.70	0.8
4182	0.113	407	0.170	612	1.6x10 <sup>8</sup>	9.6 x10 <sup>8</sup>	34.67	33.47	1.2

### 3.3 Sıcaklığa Bağlı PL Ölçümleri

İncelenen örneklerin sıcaklığa bağlı PL spektrumları 40 K aralıklarla 10-300 K aralığında alınmıştır. Elde edilen spektrumlar Şekil 3.3’ de gösterilmektedir. Spektrumlarda gözlenen en yüksek şiddete sahip pik, InGaN/InGaN çoklu kuantum kuyularına ait geçişleri göstermektedir. Bu pikin yüksek enerji tarafında bulunan yaklaşık 3.46 eV enerji değerindeki geçişler GaN’a ait eksitonik geçişlerdir. Bu geçişin pik enerjisinin sıcaklık bağımlılığı tipik enerji-bant aralığının daralmasını takip etmektedir. 4144 dışında diğer örneklerde gözlenen ve şiddeti sıcaklıkla hızlı bir şekilde azalan 3.2-3.25 eV aralığındaki geniş pikin kusurlara bağlı geçişlerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Spektrumların düşük enerji tarafında gözlenen ve nitrür temelli yapıların tipik geçişi olan sarı lüminesansın (SL) enerji pik değeri yaklaşık 2.2 eV’dir. Bu spektrumlarda görüleceği üzere SL’nin sıcaklık bağımlılığı ana geçişin sıcaklık bağımlılığına benzer bir davranış göstermektedir. Örneğin, bu geçişin tepe şiddeti 3945 örneğinde sıcaklıkla hemen hemen değişmez iken 4182’de sıcaklıkla azalmaktadır. 3575, 3945, 4144, 4182 örnekleri için InGaN kuantum kuyusunudan kaynaklı PL pik şiddeti ile kusur merkezlerinden kaynaklı SL PL şiddetinin oranları sırasıyla, yaklaşık 250, 100, 33 ve 30 şeklindedir. Burada en yüksek oran 3575 örneğine ait olup benzer yapıya sahip 3945 örneğinden 2.5 kat daha büyüktür. 4144 ve 4182 örnekleri için ise bu oranlar yaklaşık birbirine eşittir.

Bu oranın yüksek olması örneklerin eksitonik geçişlerinin verimliliğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla, incelenen örnekler arasında yapısında kademeli elektron geçişi tabakasına sahip 3575 kodlu örneğin PL özelliklerinin daha iyi olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.3:** Örneklerin 10-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları.

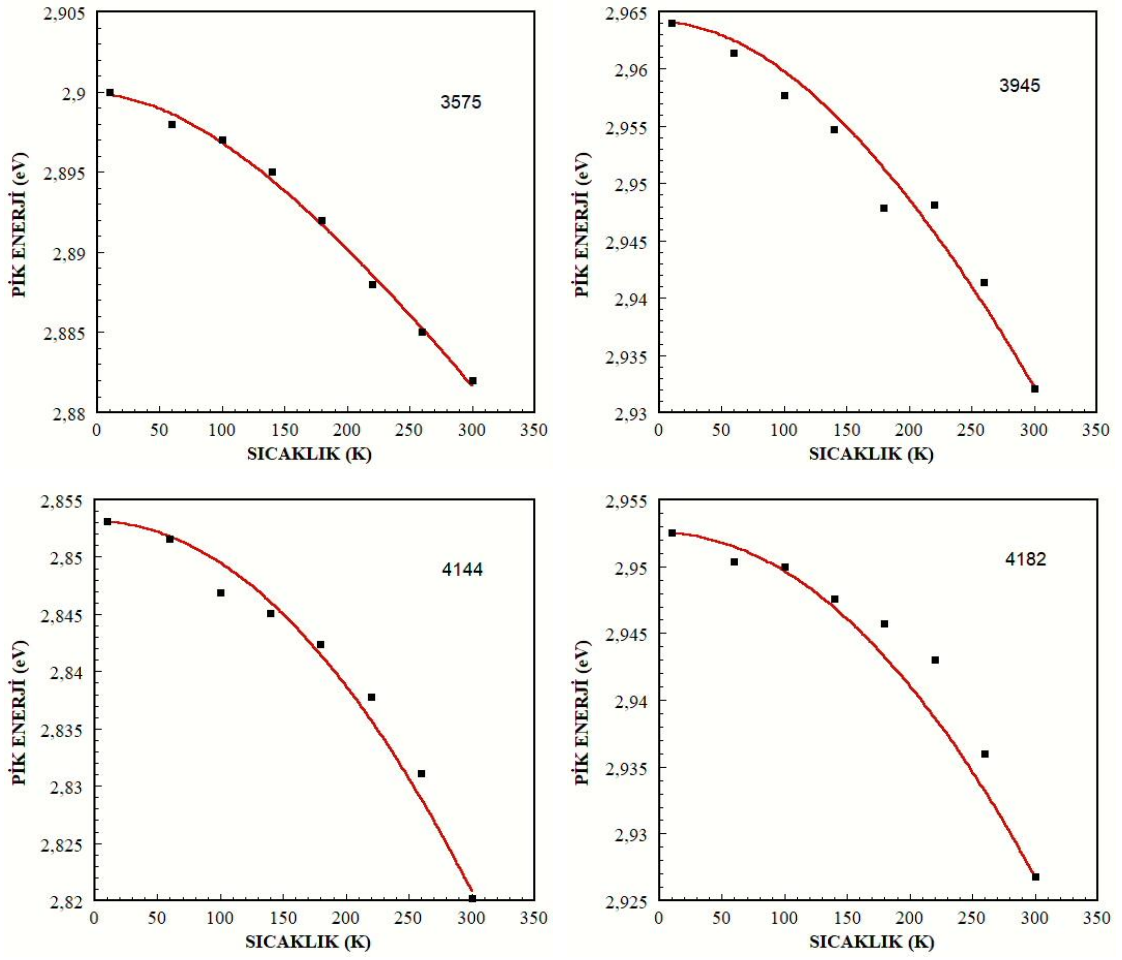
Tezin bundan sonraki kısmında tasarlanan LED yapılarının aktif bölgelerini oluşturan sadece InGaN/InGaN çoklu kuantum kuyularından yayılan lüminesans geçişleri dikkate alınarak detaylı bir inceleme yapılacaktır.

### 3.3.1 Enerji Pik Pozisyonlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

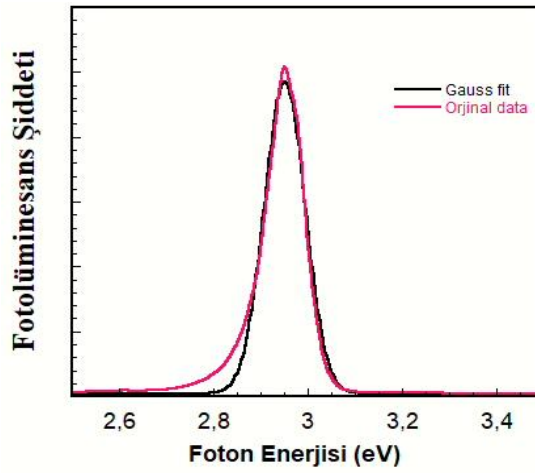
Örneklerin InGaN/InGaN çoklu kuantum kuyulu aktif bölgelerinden yayılan PL pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 3.4’de verilmektedir. Bu enerji değerleri elde edilen spektrumlara uygulanan Gauss fitlerinden çıkarılmıştır. Örnek bir Gauss fiti Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Şekil 3.4’de görüldüğü gibi elde deneysel sonuçlara yapılan fit Varshni denklemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Varshni denklemi, band kuyruk modeli yaklaşımında yayınım enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini açıklamak için yaygın olarak kullanılan bir denklem olup lokalizasyon etkileri dikkate alınmadığında aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$E(T) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (3.2)$$

Bu denklemdeki ilk terim  $E(0)$ ,  $T=0$  K’deki enerji band aralığını  $\alpha$  ve  $\beta$  ise Varshni fit parametrelerini göstermektedir. Tablo 3.2’de verilen fit parametreleri kullanarak yapılan fitler Şekil 3.4’de görüldüğü gibi deneysel sonuçlarla uyumludur. Her 4 örnekte de beklenildiği gibi sıcaklık arttıkça enerji bant aralığının daralmasından dolayı pik enerjileri kırmızıya kaymaktadır. 10 ile 300 K sıcaklık aralığındaki toplam kırmızıya kayma 3575, 3945, 4144 ve 4182 örnekleri için toplam sırasıyla, 22, 33, 26 ve 32 meV olarak gözlenmiştir. Bu kayma değerleri tipik GaN’ın A serbest eksiton geçişine ait olan yaklaşık 60 meV kayma değerinden küçüktür [39]. Örneklerimizde gözlenen bu kırmızıya kayma değerlerinin band daralmasından küçük ve aynı zamanda örnekler arasında da farklılık göstermesi, örneklerin aktif bölgelerindeki lokalizasyon ve kuantum sınırlı Stark etkilerinin (QCSE) farklı derecelerde etkili olduklarına işaret etmektedir.



Şekil 3.4: Örneklerin PL pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimleri.



Şekil 3.5: Örnek gauss fiti.

**Tablo 3.2:** Deneysel sonuçlar için kullanılan fit parametreleri.

Örnek	E(0) (eV)	$\mathcal{E}$ (meV/K)	$\mathcal{Q}$ (K)
3575	2.89	$2 \times 10^{-4}$	800
3945	2.85	$13 \times 10^{-4}$	850
4144	2.95	$5 \times 10^{-4}$	800
4182	2.96	$13 \times 10^{-4}$	850

### 3.3.2 Pik Şiddetlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

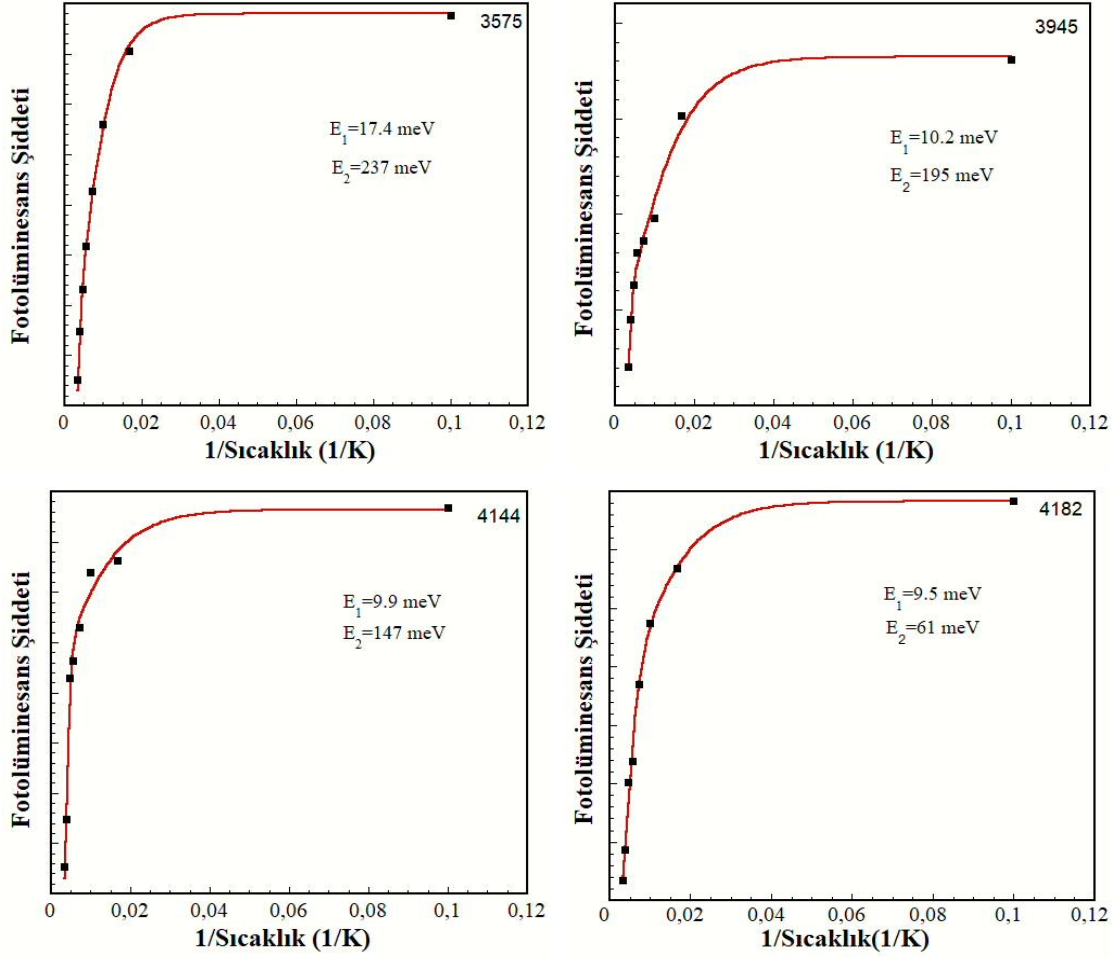
Genelde, PL pik şiddetlerinin sıcaklıkla değişimi, farklı sıcaklık aralığında farklı hızlarda olabilir. PL pik şiddeti düşük sıcaklık bölgesinde sıcaklık artışı ile göreceli olarak daha yavaş, yüksek sıcaklık bölgesinde ise daha hızlı bir artış göstermesi durumunda bu sıcaklık bölgelerinde farklı ışımsal olmayan mekanizmaların çalıştığını göstermektedir [37]. PL pik şiddetinin sıcaklıkla değişimini incelemek için,

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + \sum_i A_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)} \quad (3.3)$$

çoklu-üstel fonsiyona sahip bir ampirik denklem kullanılır. Burada,  $E_i$  ışımsal olmayan geçiş merkezlerini temsil eden aktivasyon enerjisini,  $A_i$  bu merkezlere geçiş süreç hızını ve  $I_0$  mutlak sıfır sıcaklıktaki pik şiddetini göstermektedir. Şekil 3.6 incelenen örneklerin PL pik şiddetlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini ve yukarıdaki denklemi kullanarak yapılan fitleri göstermektedir. Bu fit işleminde en uygun fit iki aktivasyonlu çift-üstlü denklem kullanılarak elde edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda etkin olan mekanizma InGaN/GaN kuantum kuyusunda In kümeleşmesinden ve/veya kalınlık değişiminden kaynaklanan potansiyel dalgalanmaların etkisiyle belirli bölgelerde sınırlanan eksitonların termoiyonik bozunumu açıklar. Bu sebeple,

InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulardaki taşıyıcıların potansiyel engelini aşmalarını sağlayan aktivasyon enerjisi, yani  $E_1$  yayınının gerçekleştiği bölgelerdeki etkin potansiyel dalgalanmaların ortalama büyüklüğüne karşılık gelir. Yüksek sıcaklıklarda PL şiddetinin azalmasında etkin olan mekanizma, taşıyıcıların termoiyonik ve/veya tünelleme yoluyla delokalize olup, ışınsal olmayan geçiş yapacak şekilde yanal doğrultuda dislokasyon bölgelerine yapılan difüzyonu açıklar. Dolayısıyla,  $E_2$  aktivasyon enerjisi bu mekanizmaya karşılık gelen parametredir.

İncelenen örneklerde, düşük sıcaklıklarda etkin olan aktivasyon enerji değerleri 3575, 3945, 4144 ve 4182 örnekleri için sırası 17.4 meV, 10.2 meV, 9.9 meV ve 9.5 meV olarak bulunmuştur. 4144 ve 4182 örneklerinin yapıları kuyudaki küçük In oranı farkı dışında aynı olduğundan belirlenen aktivasyon enerjileri birbirine yakın bulunmuştur. Bunlar arasında en yüksek aktivasyon enerjisine sahip 3575 örneğindeki In yayılmasından kaynaklı lokalizasyon etkisinin diğer örneklere göre kısmen daha az olduğuna işaret etmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise etkin olan aktivasyon enerji değeri yukarıdaki örnek sıralamasına göre 237, 195, 147 ve 61 meV olarak bulunmuştur. Bu aktivasyon enerjisinin büyüklüğü yapıdaki ışınsal olmayan kusur merkezlerinin yoğunluğunun daha az ve bunlara geçiş süreç hızlarının ise daha küçük olduğunu göstermektedir. Bu noktadan yine 3575 kodlu örneğin diğer örneklere göre daha az kusur yoğunluğuna sahip olduğu söylenebilir. Bu durum XRD ölçümleri ile de desteklenmektedir. XRD yansıma pikinin 306 arcsaniye ile en dar olduğu örnek yine 3575 kodlu örnek olmuştur.



Şekil 3.6: Örneklerin PL pik şiddetinin sıcaklığın tersi ile değişimleri.

### 3.3.3 PL Piklerinin FWHM Değerlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Eksitonik geçişlere ait PL piklerinin FWHM sıcaklık bağımlılığını incelemek için homojen ve homojen olmayan etkilerin lineer kombinasyonu olan

$$\phi(T) = \phi(0) + \gamma_{\text{LO}} T + \frac{\phi_{\text{LO}}}{\exp\left(\frac{E_{\text{LO}}}{k_B T}\right) - 1} \quad (3.5)$$

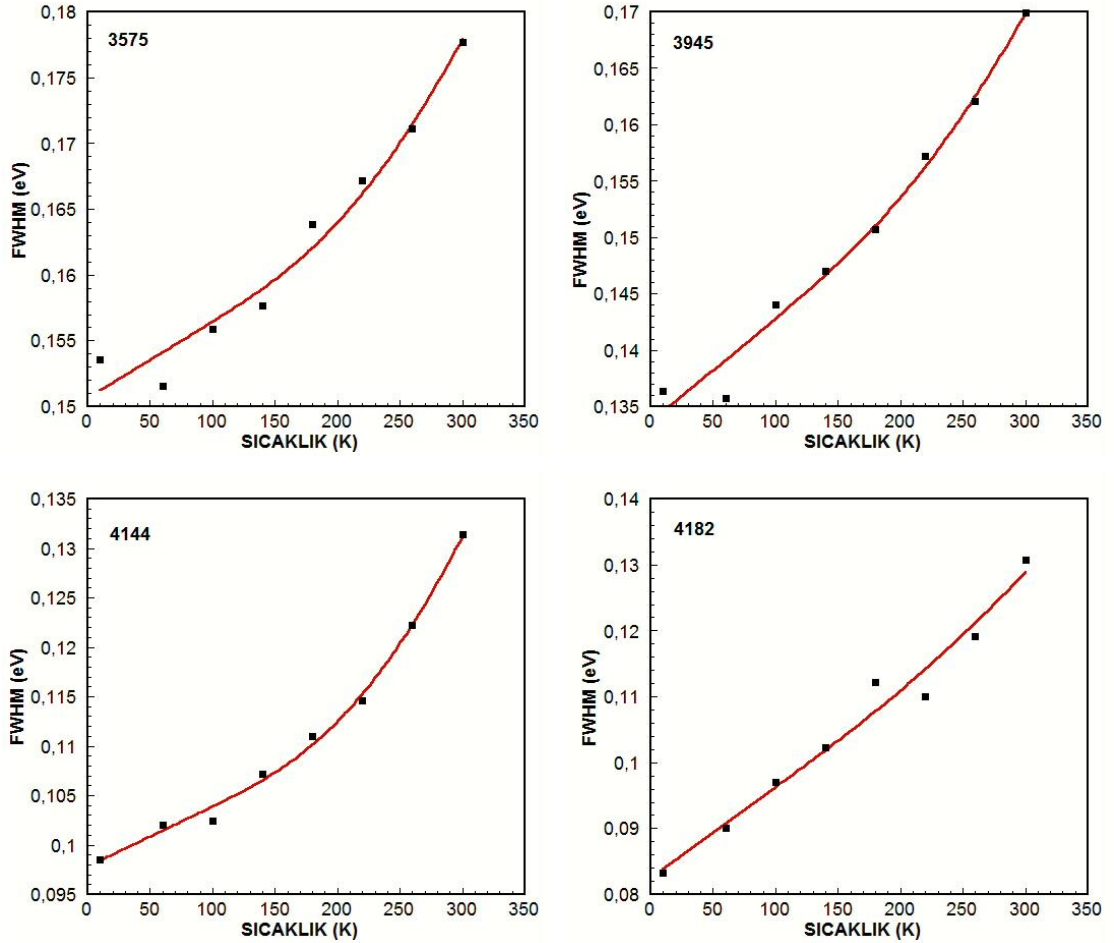
eşitliği kullanılmıştır. Burada  $\phi(0)$ ; sıcaklıktan bağımsız, dışsal etkilerden (örneğin; yabancı atomlardan veya örgü boşluklarından kaynaklı noktasal ve/veya çizgisel kusurlar, yüzey saçılımı ve elektron-elektron etkileşimler v.b. gibi) kaynaklanan



homojen olmayan genişlemeyi temsil eder. İkinci ve üçüncü terimler ise eksitonların örgünün boyuna akustik (LA) ve boyuna optik (LO) fonon modları ile etkileşmelerinden kaynaklı homojen genişleme mekanizmalarını temsil ederler.  $\Upsilon_{\text{LO-LA}}$  ve  $\Upsilon(0)$  terimleri sırasıyla eksiton-akustik fonon ve eksiton-optik fonon bağlama kuvvetini temsil etmektedir. Eksitonların LA fonon modları ile etkileşimleri sıcaklıkla lineer olarak artarken LO fononları ile etkileşimleri Fröhlich etkileşimi yoluyla olup sıcaklıkla üstel olarak artmaktadır. Bu fit işleminde kullanılan denklem 3.5'te InGaN'ın LO fonon enerjisi  $E_{\text{LO}} = 88.3$  meV olarak, diğerleri ise serbest fit parametreleri olarak alınmıştır. Bu grafiklerde herbir sıcaklık için elde edilen deneysel FWHM değerleri sıcaklığa bağlı alınan spektrumlara uygulanan Gauss fit işlemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Denklem 3.5'i kullanarak deneysel sonuçlara yapılan en iyi fit işleminden elde edilen fit parametreleri Tablo 3.3' de verilmiştir. 3575 örneğinde homojen olmayan etkilerden kaynaklı sıcaklıktan bağımsız PL pik çizgi genişliği 0.15 meV değerindedir. Sıcaklık arttıkça bu genişlik 140 K'ya kadar eksiton-LA etkileşmelerinin baskın olmasından dolayı yaklaşık lineer olarak artarken bu sıcaklığın üzerinde eksiton-LO Fröhlich etkileşimlerinde etkili olmaya başlaması ile daha hızlı artmaktadır. Oda sıcaklığında ölçülen toplam 178 meV FWHM değeri LA+LO modlarının etkilerinin yaklaşık aynı şiddette olduğunu göstermektedir. 3945 örneğinde homojen olmayan etkilerden kaynaklı sıcaklıktan bağımsız PL pik çizgi genişliği 0.13 meV değerinde olup 100 K'ya kadar eksiton-LA etkileşmelerinin baskın olmasından dolayı yaklaşık lineer olarak artarken bu sıcaklığın üzerinde eksiton-LO Fröhlich etkileşimlerinde etkili olmaya başlaması ile daha hızlı artmaktadır. Oda sıcaklığında ölçülen toplam 170 meV FWHM değeri LA+LO modlarının etkilerinin yaklaşık aynı şiddette olduğunu göstermektedir. 4144 örneği için homojen olmayan etkilerden kaynaklı sıcaklıktan bağımsız PL pik çizgi genişliği 0.098 meV olup 100-140 K'ya kadar eksiton-LA etkileşmelerinin baskın olmasından dolayı yaklaşık lineer olarak artarken bu sıcaklığın üzerinde eksiton-LO Fröhlich etkileşimlerinde etkili olmaya başlaması ile daha hızlı artmaktadır. Oda sıcaklığında ölçülen toplam 131 meV FWHM değeri LA+LO modlarının etkilerinin yaklaşık aynı şiddette olduğunu göstermektedir. 4182 örneğinde ise homojen olmayan etkilerden kaynaklı sıcaklıktan bağımsız PL pik çizgi genişliği 0.083 meV olup eksiton-LO Fröhlich etkileşimleri etkili olduğu için diğer 3 örneğe göre daha hızlı artmaktadır.

Oda sıcaklığında ölçülen toplam 130 meV FWHM değeri LA+LO modlarının etkilerinin yaklaşık aynı şiddette olduğunu göstermektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Örneklerin sıcaklığa bağlı FWHM değişimleri.

Tablo 3.3: Örnekler için elde edilen FWHM fit parametreleri.

Örnek	$\gamma_{LO}$ (meV $K^{-1}$ )	$\phi_{(LO)}$ (meV)
3575	$5.8 \times 10^{-5}$	287
3945	$9.2 \times 10^{-5}$	250
4144	$5.9 \times 10^{-5}$	455
4182	$1.4 \times 10^{-5}$	146

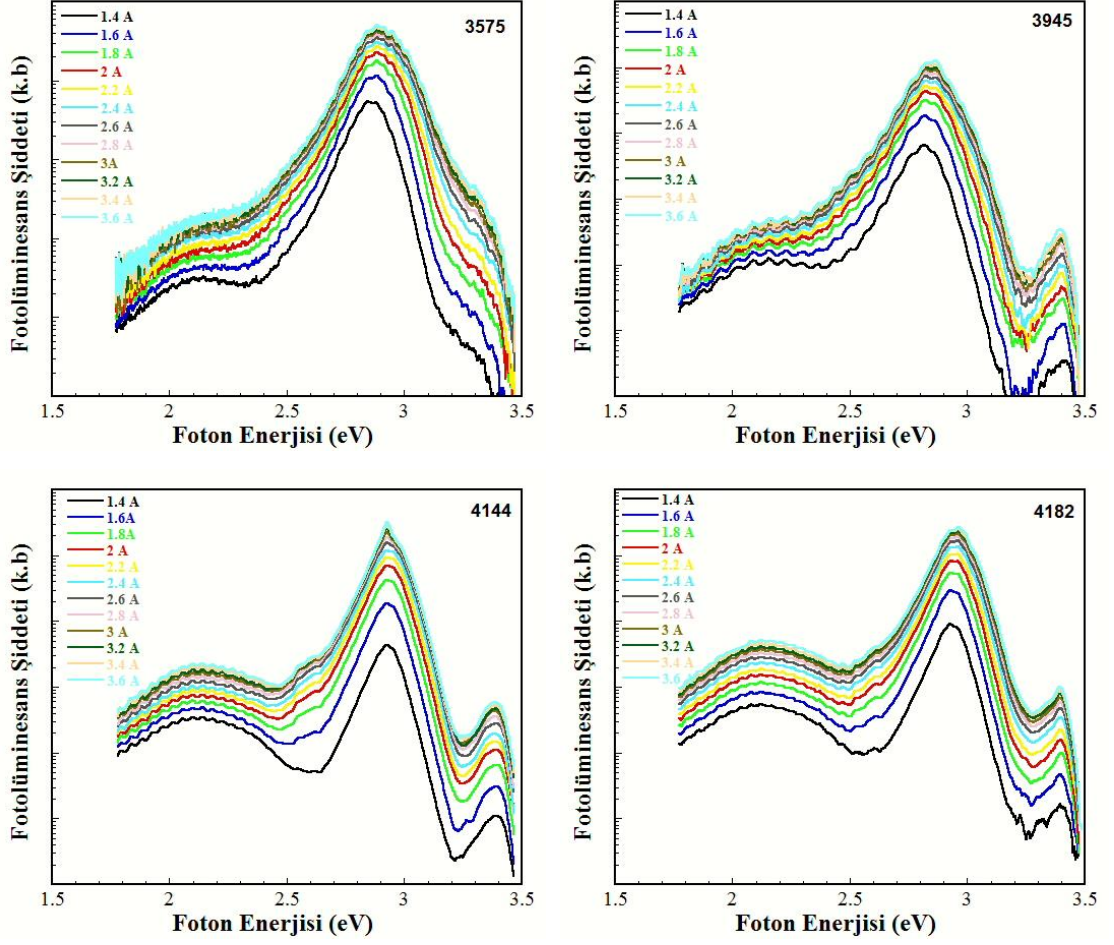
PL sonuçları XRD ölçümleri ile birlikte değerlendirildiğinde her ikisinde de ölçülen FWHM değerleri tüm örnekler için birbirine yakın oldukları ve uyumlu

oldukları gözlenmiştir. Örneklerin aktif bölgelerinin altında kullanılan farklı tampon veya elektron yayıcı tabaka tasarımları ile birlikte düşük In oranlı örgü yumuşatma tabakasının etkileri tam olarak tespit edilememiştir. Örneğin, 3575 örneğinde kullanılan kademeli elektron yayıcı tabakanın XRD sallanma eğrisinin FWHM değeri incelenen örnekler arasında en düşük değere sahip iken kuantum kuyusuna ait PL pikinin FWHM değeri en büyük olarak ölçülmüştür. Buna karşın, örneklerin  $PL_{InGaN}/PL_{SL}$  pik şiddeti oranlarına bakıldığında, 3575 içlerinde en büyük orana sahiptir örnek olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, kademeli elektron yayıcı tabakaya sahip olan 3575 örneğinin hem yapısal hem de optik özelliklerinin diğer incelenen örneklere göre daha iyi olduğunu söylebiliriz.

### 3.4 Uyarma Gücü Yoğunluğuna Bağlı PL Ölçümleri

Safirin c-düzlemi üzerine büyütülen nitrür temelli kuantum kuyulu yapılarda polarizasyondan dolayı bir iç elektrik alan meydana gelmektedir. Bu alan iletim bandı elektron dalga fonksiyonları ile valans bandı deşik dalga fonksiyonlarının örtüşme integralini etkileyerek etkin eksitonik enerji seviyelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, özellikle taban durum enerji seviyeleri arasındaki fark alan yok ikenki enerji seviyeleri farktan daha küçük olacaktır. Uyarma gücü yoğunluğuna bağlı ölçümler bize incelenen örneklerdeki QCSE'nin gücünü incelemek için bir veri sağlayacaktır. Uyarma gücü yoğunluğu arttıkça QCSE'nin perdelenmesinden dolayı PL pik enerjilerinde maviye kayma gözlenmesi beklenir.

Tüm örneklerin uyarma güç yoğunluğuna bağlı PL spektrumları Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Ölçümler oda sıcaklığında ve kullanılan lazere uygulanan akım değerlerinin izin verdiği şartlarda bu akım değerlerine karşılık gelen 8-264  $W/cm^2$  uyarma gücü yoğunluğuaralığında yapılmıştır. Bu aralık QCSE tam olarak gözlemlemek için yeterli olmayabilir, ancak bir değerlendirme yapabilmek için yeterli veri oluşturacaktır. Ölçülen PL spektrumlarına yapılan Gauss fitleri ile uyarma gücü yoğunluğuna bağlı elde edilen pik enerji, pik şiddeti ve FWHM değişimleri Şekil 3.9-3.11 aralığında gösterilmektedir.

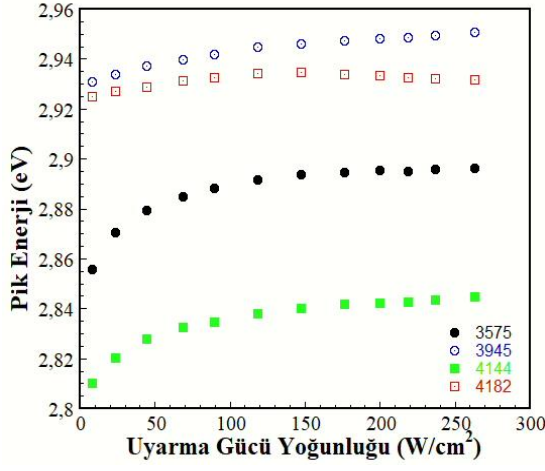


**Şekil 3.8:** Örneklerin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı PL spektrumları.

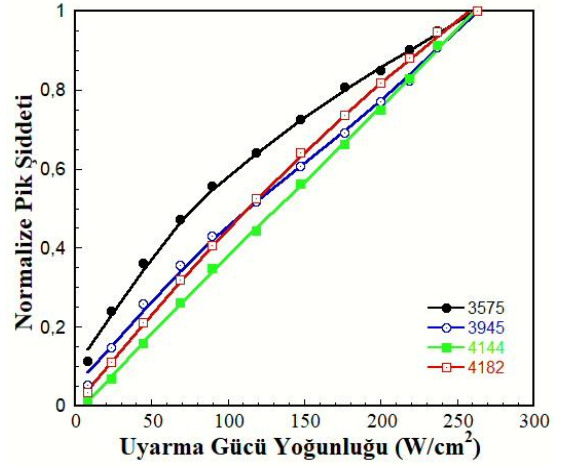
Şekil 3.9’da görüldüğü gibi tüm örnekler için farklı şiddetlerde olmak üzere uyarma gücü yoğunluğu arttıkça PL pik enerji değerleri iç elektrik alanların perdelenmesinden dolayı maviye kaymaktadır. En düşük ve en yüksek uyarma gücü yoğunluğu aralığında ölçülen toplam maviye kayma 3575, 3945, 4144 ve 4182 örnekleri için sırasıyla, 41 meV, 35 meV, 7 meV ve 20 meV olarak gözlenmiştir. Benzer yapıları (3575-3945 ile 4144-4182) karşılaştırdığımızda ilk ikili örnekteki kaymanın diğer örnek çiftine göre daha büyük olduğu ve dolayısıyla bu örneklerde QCSE’nin fazla olduğu anlaşılmaktadır. QCSE’nin örneklerin aynı doğrultuda büyütüldüğü göz önüne alındığında kuantum kuyusu ve bariyerdeki In alaşım oranına ve kalınlıklarına bağlı olması beklenir. Ayrıca, tam bir karşılaştırma ve analiz yapılabilmesi için bu parametreler ile birlikte kuyudaki In kümeleşmesinden kaynaklanabilecek yerleşme etkilerinin de dikkate alınması gerekir. Burada incelenen yapıların potansiyel profillerinin kendiliğinden-uyumlu kuantum

çözömlerleri yapılamadığı ve elimizde yerelleşme etkilerini yansıtabilecek SEM/TEM gibi sonuçlar olmadığından böyle bir analiz yapılamamıştır.

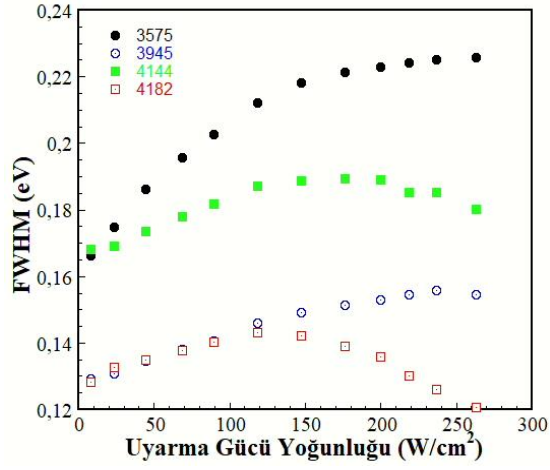
Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 sırasıyla normalize PL pik şiddetinin ve FWHM değerlerinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimlerini göstermektedir. Örneklerin PL pik şiddetlerinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimlerine bakıldığında yaklaşık 4144 örneğinin lineer bir davranış gösterdiği diğer örneklerin ise lineer altı (yüksek yoğunluklarda doyuma doğru giden) davranış gösterdikleri görölmektedir. Benzer şekilde, piklerin FWHM değerleride örnekler arasında farklılık göstermektedir. Başlangıçta iki gruba ayrılan örneklerin kendi içlerinde benzer değişim sergiledikleri görölmektedir. 3575 ve 3945 örneklerine ait FWHM değerleri uyarma şiddetine bağlı olarak uyarma gücü yoğunluğu arttıkça azalan hızda artış göstermektedir. Yüksek uyarma gücü yoğunluklarında sabit bir değere gitmektedir. Diğer grup (4144 ve 4182) örneklerde ise yaklaşık 150 W/cm<sup>2</sup> uyarma gücü yoğunluğuna kadar FWHM değerlerinde artış gözlenirken daha yüksek uyarma gücü yoğunluklarında düşüş gözlenmiştir. Bu davranışların nedeni ve ilgili mekanizmalar tam olarak ortaya konulamamıştır. Ancak burada da yine yerelleşme, QCSE ve çift-eksiton oluşumları gibi mekanizmaların farklı şiddetlerde etkili olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 3.9: PL pik enerjisinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimi.



Şekil 3.10: Normalize pik şiddetinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimi.



Şekil 3.11: FWHM değerinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimi.

## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, MOCVD yöntemi ile c-düzlemi safir alttaş üzerine büyütülen ve aktif bölgesi  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  çoklu kuantum kuyulu dört farklı tasarıma sahip LED yapılarının HRXRD ve sıcaklığa/uyarma gücü yoğunluğuna bağlı PL yöntemleri kullanılarak yapısal ve optik özellikleri incelenmiştir. Simetrik (002) ve asimetrik (102) düzlemlerinden gelen yansımaların toplandığı HRXRD analizlerinden örneklerin kristal kalitesi değerlendirilerek dislokasyon yoğunlukları hesaplandı.

İncelenen örneklerin tabaka yapıları karşılaştırıldığında bu 4 örneği ikili gruba ayırmak mümkündür. İlk grupta 3575 ve 3945, ikinci grupta ise 4144 ve 4182 kodlu örnekler bulunmaktadır. İlk grupta bulunan örneklerin aktif bölgeleri aynı olmakla birlikte elektron enjeksiyon tabaka tasarımları farklılık göstermektedir. 3575 örneğinde In oranının %4-10 arasında kademeli olarak değişen ve toplam 21 nm kalınlığında bir elektron yayıcı tabaka kullanılırken 3945 örneğinde 15'er nm kalınlığında %4 ve %8 In oranına sahip iki kademeli bir elektron yayıcı tabaka kullanılmıştır. 4144 ve 4182 örnekleri arasındaki fark ise sadece aktif bölgede kullanılan InGaN kuyusunun In oranlarıdır.

Örneklerin ölçülen sallanma eğrileri karşılaştırıldığında 4144 ve 4182 örneklerinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 3945 kodlu örneğin sallanma eğrisinde ise yüksek dereceden uydu pikleri net olarak gözlenmektedir. Bu örnekler arasında en küçük (306 arcsaniye) FWHM değerine ve dolayısıyla en az dislokasyon yoğunluğuna sahip örnek ise 3575 kodlu örnek olmuştur.

PL ölçümlerinin ilk aşamasında örneklerin aktif bölgelerinden kaynaklı PL geçişlerine ait pik enerjileri, şiddetleri ve çizgi genişliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Tüm bu değerler her bir sıcaklık için ölçülen PL spektrumlarına uygulanan Gauss fitlerinden çıkarılmıştır.

Tüm örneklerde InGaN/InGaN çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişlerin pik enerjilerinin Varshni denklemine uygun davranış gösterdikleri tespit edilmiştir. Her 4 örnekte de beklenildiği gibi sıcaklık arttıkça enerji bant aralığının daralmasından

dolayı pik enerjileri kırmızıya kaymaktadır. Örneklerimizde gözlenen bu kırmızıya kayma değerlerinin bu sıcaklık aralığında beklenen band daralmasından (~60 meV) küçük ve aynı zamanda örnekler arasında da farklılık göstermesi, örneklerin aktif bölgelerindeki In kümeleşmesinden kaynaklı lokalizasyon ve polarizasyondan kaynaklı QCSE farklı derecelerde etkili olduklarına işaret etmektedir.

Benzer şekilde, InGaN/InGaN kuantum kuyulardan kaynaklanan PL piklerinin şiddetlerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini incelemek için ikili-üstel foksiyona sahip bir ampirik denklem kullanılmıştır. Örneklerin düşük sıcaklık aktivasyon enerji değerleri 9.5-17.4 meV arasında hesaplanmıştır. Örnekler arasında 3575'in en yüksek aktivasyon enerjisine sahip olması bu örnekteki In yayılmasından kaynaklı lokalizasyon etkisinin diğer örneklerle göre kısmen daha az olduğunu göstermektedir. PL pik şiddetlerinin daha hızlı bir şekilde düşmesine neden olan daha yüksek sıcaklıkta etkili olan mekanizmanın aktivasyon enerjileri 61-237 meV aralığında hesaplanmıştır. Bu aktivasyon enerjisinin büyüklüğü yapıdaki ışınsal olmayan kusur merkezlerinin yoğunluğunun daha az ve bunlara geçiş süreç hızlarının ise daha küçük olduğunu göstermektedir. Bu anlamda örnekler arasında en yüksek aktivasyon enerjisine sahip olan örnek yine 3575 kodlu örnek olmuştur. İncelenen örneklerin optik verimliliklerinin nicel bir karşılaştırmasını yapmak için, InGaN/InGaN kuantum kuyusuna ait eksitonik geçişin pik şiddetinin sarı lüminesans pik şiddetine oranları hesaplanmıştır. Bu karşılaştırmada da 3575 örneğinin 250 kat ile diğer örneklerden daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

InGaN/InGaN kuantum kuyulardan kaynaklanan PL piklerinin FWHM değerlerinin sıcaklık ile değişimi homojen ve homojen olmayan genişleme mekanizmaları ile değerlendirilmiştir. Kusurlardan kaynaklı sıcaklıktan bağımsız homojen olmayan genişleme mekanizmaların sınırladığı FWHM değerleri karşılaştırıldığında 3575 örneğinin yukarıda tespit edilen XRD ve PL sonuçları ile uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi tespit edilememiştir. Buna rağmen, tasarımında kademeli elektron yayıcı tabaka bulunan 3575 örneğinin hem yapısal hem de optik özelliklerinin belirgin bir şekilde daha iyi olduğu ortaya konulmuştur. Tüm örneklerin PL pik şiddetlerinin FWHM değerleri düşük sıcaklıkta eksiton-LA etkileşmelerin bir sonucu olarak lineer bir artış gösterirken, yüksek sıcaklıkta buna ilaveten eksiton-LO Frölich etkileşmeleri ile üstel olarak hızla artmaktadır.



Bu tez çalışmasında son olarak, incelenen örneklerin oda sıcaklığında uyarma gücü yoğunluğuna bağlı ölçülen PL spektrumlarının da pik enerjileri, şiddetleri ve FWHM değerleri incelenmiştir. Ölçümler lazere uygulanan akım değerlerine karşılık gelen 8-264 W/cm<sup>2</sup> uyarma gücü yoğunluğu aralığında yapılmıştır. Uyarma gücü yoğunluğu arttıkça QCSE'nin perdelenmesinden dolayı tüm örneklerin pik enerjilerinde farklı miktarlarda maviye kayma gözlenmiştir. Gözlenen bu kayma miktarına etki edebilecek yerelleşme etkilerini değerlendirmek mümkün olmamıştır. Bu değerlendirmelerde bulunabilmek için SEM/TEM gibi farklı deneysel ölçümlerle birlikte incelenmesi daha doğru olacaktır. Ancak, bu tez çalışması kapsamında ilgili ölçümlere ulaşma imkanı bulunamamıştır.

Örneklerin PL pik şiddetlerinin uyarma gücü yoğunluğuna bağlı değişimlerine bakıldığında yaklaşık 4144 örneğinin lineer bir davranış gösterdiği diğer örneklerin ise lineer altı (yüksek yoğunluklarda doyuma doğru giden) davranış gösterdikleri görülmektedir. Benzer şekilde, piklerin FWHM değerleride örnekler arasında farklılık göstermektedir. Başlangıçta iki gruba ayrılan örneklerin kendi içlerinde benzer değişim sergiledikleri görülmektedir. 3575 ve 3945 örneklerine ait FWHM değerleri uyarma şiddetine bağlı olarak uyarma gücü yoğunluğu arttıkça azalan hızda artış göstermektedir. Yüksek uyarma gücü yoğunluklarında sabit bir değere gitmektedir. Diğer grup (4144 ve 4182) örneklerde ise yaklaşık 150 W/cm<sup>2</sup> uyarma gücü yoğunluğuna kadar FWHM değerlerinde artış gözlenirken daha yüksek uyarma gücü yoğunluklarında düşüş gözlenmiştir. Bu davranışların nedeni ve ilgili mekanizmalar tam olarak ortaya konulamamıştır. Ancak burada da yine yerelleşme, QCSE ve çift-eksiton oluşumları gibi mekanizmaların farklı şiddetlerde etkili olabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen bu sonuçların ve ilgili değerlendirmelerin ışığı altında gelecekte bu çalışmaların geliştirilmesi mümkün olabilir. Verimli LED üretimin önemli bir basamağı olan tasarım aşaması, büyütme şartlarının iyileştirilmesi ve optimizasyonu ile birlikte zengin karakterizasyon teknikleri ile desteklenerek geliştirilebilir. İncelenen bu 4 örnek grubundan kademeli elektron yayıcı tabakaya sahip örneğin nispeten daha üstün yapısal ve optik özellikler sergilemesi, benzer yapılarda tasarım parametrelerini ve büyütme şartlarını optimize

edecek bir çalışma yapılabileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, bu tabakanın etkisinin daha net ortaya koyulabilmesi için, aktif tabaka yapısı ve diğer katmanlar sabit kalacak şekilde kalınlık, kademe sayısı, kademelerdeki In oranları v.b. gibi elektron yayıcı tabaka parametrelerinde farklılık oluşturarak bir set örnek incelenebilir. Bu çalışmaları daha da verimli hale getirmek için XRD, PL tekniklerinin yanına elektrolüminesans, I-V, Hall Etkisi ve topografik ve kesit görüntüleme tekniklerinde dahil edildiği bir çalışma yapılması önerilmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Singh J., *Physics of semiconductor and their heterostructures*, University of Michigan, USA (1993).
- [2] Morkoç H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*, Vols. I–III, Wiley-VCH, Berlin (2008).
- [3] Nakamura S. and Fasol G., *The Blue Laser Diode*, Springer, Berlin (2000).
- [4] Ponce F. A. and Bour D. P., “Nitride based semiconductors for blue and green light emitting devices”, *Nature*, 386, 351 (1997).
- [5] Ozbay E., Biyikli N., Kimukin I., Tut T., Kartaloğlu T. ve Aytur O., “High performance solar-blind photodetectors on  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  heterostructures”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 10,742 (2004).
- [6] Teke A., Doğan S., He L., Huang D., Yun F., Mikkelsen M., Morkoç H., Zhang S. K., Wang W. B. and Alfano R. R., “p-GaN-i-GaN/AlGaIn multiple-quantum well n-AlGaIn back-illuminated ultraviolet detectors”, *J. Electronic Materials*. 32, 307 (2003).
- [7] Nakamura S., “InGaIn-based violet laser diodes”, *Semicond. Sci. Technol.* 14, 27 (1999).
- [8] Nakamura S., Mukai T. and Senoh M., “A new approach to white light emitting diodes of p-GaN/i-ZnO /n-ZnO heterojunctions”, *Appl. Phys. Lett.* 64, 1687 (1994).
- [9] Nakamura S. and Fasol G., *The Blue Laser Diode*, Springer , Berlin (1997).
- [10] Nakamura, S., “A new approach to white light emitting diodes of p-GaN / i-ZnO / n-ZnO heterojunctions”, *Science* 281, 956 (1998).
- [11] Pearton S. J. and Ren F., “A new approach to white light emitting diodes of p-GaN / i-ZnO / n-ZnO heterojunctions”, *Adv. Mater.* 12, 1571 (2000).
- [12] Sun W. H. et al., “Continuous Wave Milliwatt Power AlGaIn Light Emitting Diodes at 280 nm”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43, 1419 (2000).
- [13] Baş Y., “ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x=0.075; 0.090; 0.100$ ) Mavi Led’lerin Mikroyapısal Kusurlarının Ters Örgü Uzak Haritası ile İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Ankara, (2014).
- [14] Nobelprize.org: Press Release, “The Nobel prize in Physics”, (01/10/2014) ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/pres.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/pres.pdf)).

- [15] Teke A. and Morkoç H., *Group III Nitrides in Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Springer, Berlin (2006).
- [16] Bayrak S. T., “AlInGaN Tabanlı Yüksek Verimli Mor Ötesi Işık Saçan Diyotlar”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2010).
- [17] Piner E. L., McIntosh F. G., Roberts J. C., Aumer M. E., Joshkin V. A., Bedair S. M. and El-Masry N. A., “Development of InGaN and AlInGaN Compounds for Optoelectronic Devices”, *J. Nitride Semicond. Res.* 1, 43 (1996).
- [18] Lin H. C., Shu C. K., Ou J., Pan Y. C., Chen W. K. and Lee M. C., “Indium nitride (InN): A review on growth, characterization, and properties”, *J. Cryst. Growth*, 57, 189 (1998).
- [19] Van der Stricht W., Moerman I., Deemester P., Crawley J. A. and Thrush E. J., “Study of GaN and InGaN films grown by metalorganic chemical vapour deposition”, *J. Cryst. Growth*, 170, 344 (1997).
- [20] Tong Y. Z., Li F., Zhang G. Y., Yang Z. J., Jin S. X., Ding X. M. and Gan Z. Z., “Effect of silicon doping in InGaN / GaN heterostructure grown by MOCVD”, *Solid State Commun.*, 109, 173 (1999).
- [21] Lee C. R., Son S. J., Lee I. H., Leem J. Y. and Noh S. K., “Characteristics of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  /GaN grown by LPMOVPE with the variation of growth temperature”, *J. Cryst. Growth.*, 182, 6 (1997).
- [22] Nakamura S., “InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanism”, *Mater. Sci. Eng. B*, 43, 258 (1997).
- [23] 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, 7027 (2001).
- [24] 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, 1370 (1998).
- [25] 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, 569 (1997).
- [26] 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, 1697 (1998).

- [27] Mukai T., Yamada M. and Nakamura S., “Efficiency droop in nitride-based light emitting diodes”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, 3976 (1991).
- [28] Yang Y., Cao X. A. and Yan C., “Efficiency droop in nitride-based light emitting diodes”, *IEEE Trans. Electron Devices*, 55, 1771 (2008).
- [29] Sun W., Shatalov M., Deng J., Hu, X., Yang J., Lunev A., Bilenko Y., Shur, M. and Gasko R., “Light extraction enhancement of 265 nm deep-ultraviolet light-emitting diodes with over 90 mW output power via an AlN hybrid nanostructure”, *Appl. Phys. Lett.*, 96, 061102 (2010).
- [30] Hirayama H., Fujikawa S., Noguchi N., Norimatsu J., Takano, T., Tsubaki K. and Kamata N., “Efficiency droop in nitride based light emitting diodes”, *Phys. Status Solidi A*, 206, 1176 (2009).
- [31] Shen Y. C., Mueller G. O., Watanabe S., Gardner N. F., Muncholm A. and Krames M. R., “Efficiency droop in nitride-based light emitting diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 141101 (2007).
- [32] Kim M. H., Schubert M. F., Dai Q., Kim J. K., Schubert E. F., Piprek J. and Park Y., “Efficiency droop in nitride-based light emitting diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 183507 (2007).
- [33] Piprek J., *Semiconductor Optoelectronic Devices: Introduction to Physics and Simulation*. Academic Press, San Diego (2003).
- [34] Can N., “InGaN/GaN Işık Yayan Diyotların Kuantum Verimlerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir (2016).
- [35] *How MOCVD Works. Deposition Technology for Beginners*, Aixtron, May (2011).
- [36] *MOCVD Basics and Applications*, Samsung Advanced Institute of Technology, (2004).
- [37] Manasreh O., *III Nitrides Semiconductors: Electrical, Structural and Defects Properties*. Elsevier Science B.V. Amsterdam (2000).
- [38] Arslan E., Öztürk M. K., Teke A., Özcelik S. and Özbay E., “Buffer optimization for crack-free GaN epitaxial layers grown on Si (111) substrate by MOCVD”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 41, 258 (2008).
- [39] Teisseyre H., et al., “Temperature Dependence of the Fundamental Bandgap of InN”, *J. Appl. Phys.*, 76, 2429 (1994).