

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



**$Al_xGa_{1-x}N/GaN$  ÇOKLU KUANTUM KUYULARININ  
OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ZEKİYE ŞİT**

**BALIKESİR, MART - 2014**

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



**$Al_xGa_{1-x}N/GaN$  ÇOKLU KUANTUM KUYULARININ  
OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ZEKİYE ŞİT**

**BALIKESİR, MART - 2014**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

ZEKİYE ŞİT tarafından hazırlanan " $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  ÇOKLU KUANTUM KUYULARININ OPTİKSEL ÖZELLİKLERİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 21.03.2014 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

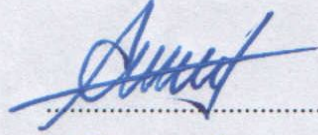


Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Ali TEKE

Üye  
Prof. Dr. Seydi DOĞAN

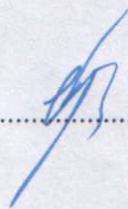
Üye  
Yrd. Doç. Dr. Remziye TÜLEK

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

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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Cihan ÖZGÜR

  
.....

## ÖZET

**Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN ÇOKLU KUANTUM KUYULARININ OPTİKSEL  
ÖZELLİKLERİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ZEKİYE ŞİT  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ TEKE)**

**BALIKESİR, MART - 2014**

Bu çalışmada, c- doğrultuda safir alt taş üzerine Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) tekniği ile büyütülen Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN çoklu kuantum kuyulu yapılar incelenmiştir. Yapıların optik özelliklerini incelemek için Kararlı-Hal Fotolüminesans tekniği kullanılmıştır. Numunelerin fotolüminesans (PL) spektrumlarında gözlenen Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişlerin pik enerjilerinin, şiddetlerinin ve çizgi genişliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri ampirik fit denklemleri yardımıyla detaylı olarak analiz edilmiştir. Dolayısıyla, farklı alüminyum alaşım oranının çoklu kuantum kuyulu yapıların optik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak, incelenen örneklerin sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumları benzer özellikler göstermiş olup, literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** MOCVD, fotolüminesans, çoklu kuantum kuyusu, AlGa<sub>x</sub>N, GaN

## **ABSTRACT**

### **OPTICAL PROPERTIES OF $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MULTIPLE QUANTUM WELLS**

**MSC THESIS**

**ZEKİYE ŞİT**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**PHYSICS**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ TEKE )**

**BALIKESİR, MARCH 2014**

In this work, the optical properties of the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  Multiple Quantum Wells (MQW) grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) on sapphire substrates have been investigated. Steady-State Photoluminescence (PL) technique was used to characterize the optical properties of the structures. To investigate the emission mechanisms of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  MQW structures, the temperature dependent PL measurements was carried out between 8 K and 300 K. The temperature dependent PL peak energy, full width at half maximum (FWHM) and peak intensity were analyzed. Also, the effect of Al content is investigated for these parameters. The temperature behaviors of PL peak energy, FWHM and peak intensity were analyzed by fitting equations. Fit parameters obtained from fitting equations were compared with literature.

**KEYWORDS:** MOCVD, photoluminescence, multiple quantum well, AlGa<sub>x</sub>N, GaN

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ÖZET.....  | i         |
| ABSTRACT .....   | ii        |
| İÇİNDEKİLER .....  | iii       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | iv        |
| TABLO LİSTESİ .....  | v         |
| SEMBOL LİSTESİ .....   | vi        |
| ÖNSÖZ.....   | vii       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. DENEYSEL YÖNTEMLER .....</b>   | <b>9</b>  |
| 2.1 Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama ( MOCVD ) Tekniği.....                         | 9         |
| 2.2 Kararlı-Hal Fotolüminesans Tekniği.....  | 10        |
| <b>3. DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>   | <b>13</b> |
| 3.1 Numunelerin Yapısı .....   | 13        |
| 3.2 Fotolüminesans Ölçümler.....   | 14        |
| 3.2.1 B2237 Numunesi .....   | 14        |
| 3.2.2 B2238 Numunesi .....   | 16        |
| 3.2.3 B2240 Numunesi .....   | 18        |
| 3.3 Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümler ve Analizleri .....                          | 21        |
| 3.3.1 Enerji Pik Pozisyonlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimleri.....                        | 21        |
| 3.3.2 Gözlenen Geçişlerin Yarı Genişlik Değerlerinin Sıcaklığa Bağlı<br>Değişimleri..... | 25        |
| 3.3.3 Pik Şiddetlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri .....                                | 27        |
| <b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>  | <b>29</b> |
| <b>5. KAYNAKLAR.....</b>   | <b>31</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| <b>Şekil 1.1:</b> a) Wurtzite, (b) Zincblende, (c) NaCl (kaya tuzu) yapıların şematik gösterimi .....                                | 1  |
| <b>Şekil 1.2:</b> Wurtzite GaN'ün enerji bant diyagramı .....  | 5  |
| <b>Şekil 1.3:</b> Yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitleri ve enerji bant aralıkları [28] .....       | 6  |
| <b>Şekil 1.4:</b> (a) AlGaN/GaN çoklu kuantum kuyusunun şematik gösterimi, (b) bant diyagramı .....                                  | 6  |
| <b>Şekil 1.5:</b> 10 K sıcaklıkta ki 2, 3 ve 4 nm kalınlığında ki 10 periyotlu kuantum kuyularının FL spektrumu [34] .....           | 8  |
| <b>Şekil 2.1:</b> MOCVD sisteminin şematik gösterimi .....   | 9  |
| <b>Şekil 2.2:</b> Fotolüminesans deney düzeneği şematik gösterimi .....  | 11 |
| <b>Şekil 3.1:</b> a) B2237, b) B2238, c) B2240 .....   | 13 |
| <b>Şekil 3.2:</b> B2237 numunesinin 8 K sıcaklıkta PL spektrumları.....  | 15 |
| <b>Şekil 3.3:</b> B2237 numunesine ait 8-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları.....   | 16 |
| <b>Şekil 3.4:</b> B2238 numunesinin 8 K sıcaklıkta PL spektrumları.....  | 17 |
| <b>Şekil 3.5:</b> B2238 numunesine ait 8-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları.....   | 18 |
| <b>Şekil 3.6:</b> B2240 numunesinin 8 K sıcaklıkta PL spektrumları.....  | 19 |
| <b>Şekil 3.7:</b> B2240 numunesine ait 8-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları.....   | 20 |
| <b>Şekil 3.8:</b> B2237, B2238 ve B2240 numunelerine ait çoklu kuantum kuyuları için pik pozisyonunun sıcaklığa bağlı değişimi ..... | 22 |
| <b>Şekil 3.9:</b> Kuantum kuyularına ait pik pozisyonlarının Al oranlarına göre değişimi .....                                       | 23 |
| <b>Şekil 3.10:</b> $\beta$ değerinin Al oranına göre değişimleri.....  | 24 |
| <b>Şekil 3.11:</b> $\sigma$ değerinin Al oranına göre değişimi.....  | 24 |
| <b>Şekil 3.12:</b> B2237, B2238 ve B2240 numunelerine ait çoklu kuantum kuyularına ait FWHM değişimi.....                            | 26 |
| <b>Şekil 3.13:</b> B2237, B2238 ve B2250 numuneleri için kuantum kuyusuna ait PL şiddeti değişimi.....                               | 28 |

## TABLO LİSTESİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <b>Tablo 2.1:</b> Metal-organik ve hidrür kaynakları .....  | 10           |
| <b>Tablo 3.1:</b> B2237, B2238 ve B2240 numuneleri için PL spektrumunda<br>(325nm lazer) gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonu,<br>FWHM ve pik şiddetleri değerleri ..... | 20           |
| <b>Tablo 3.2:</b> B2237, B2238 ve B2250 numuneleri elde edilen FWHM fit<br>parametre değerleri.....   | 26           |



## SEMBOL LİSTESİ

|          |  |
|----------|--|
| $P_P$    | : Piezoelektrik kutuplanma                               |
| $P_K$    | : Kendiliğinden kutuplanma                               |
| $k_B$    | : Boltzman sabiti  |
| $E_g$    | : Enerji Bant aralığı                                    |
| $E_{LO}$ | : Boyuna optik fonon enerjisi                            |
| $\alpha$ | : Enerjinin sıcaklıkla değişimi                          |
| $\beta$  | : Debye sıcaklığı  |
| $\sigma$ | : Potansiyel dalgalanmalardan kaynaklanan standart sapma |

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında ilgisini ve desteğini esirgemeyen, engin bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Ali TEKE'ye çok teşekkür ederim.

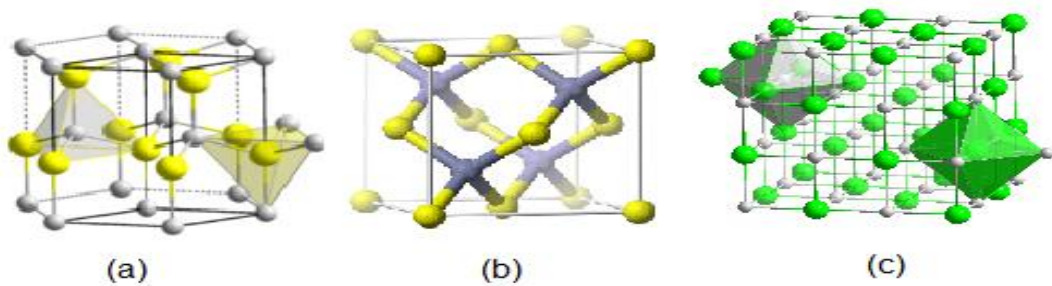
Çalışmamızda kullandığımız yapıların Bilkent Üniversitesi NANATOM araştırma laboratuvarında büyütülmesinde ve fotoluminesans ölçümlerinin alınmasında yardımcı olan Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY ve çalışma grubuna teşekkür ederim. Yoğun çalışma günlerimde bana gösterdikleri ilgi ve anlayışları için başta Yard. Doç. Dr. Remziye Tülek olmak üzere bölümümüzdeki değerli hocalarıma, arkadaşlarıma, Nuri CAN ve Celili SEFER'e teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her aşamasında bana yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

## 1. GİRİŞ

III-nitrür alanındaki çalışmaların ivme kazanmaya başlaması ile elektronik ve optoelektronik uygulamalar için bu yarıiletkenler oldukça gelecek vadeden bir materyal grubu oluşturmaya başlamıştır [1, 2]. Bu yarıiletken nitrürlerin en önemli özelliklerinden biri AlGaIn, InGaIn, AlInN ve AlGaInN gibi üçlü ve dörtlü alaşımlarının enerji bant aralıkları 0.7 eV'den (InN) 3.4 eV (GaN) ve 6.2 eV'ye (AlN) kadar elektromagnetik spektrumun yakın kızılötesi bölgesinden morötesi bölgeye kadar olan çok geniş bir enerji aralığını taramasıdır [3]. Bu özelliği sayesinde III-V nitrürler, ışık yayan diyot (LED), lazer diyot ve morötesi (UV) fotodetektörler gibi birçok optoelektronik aygıtların üretilmesinde ve geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadırlar.

III-Nitrür grubu yarıiletkenler hekzagonal (wurtzite), çinkosülfür (zincblende) ve kayatuzu (NaCl) yapılarında kristalleşirler. Daha yüksek kristal kalitesi ve daha kararlı özellikler gösterdiği için elektriksel ve optik uygulamalarda wurtzite GaN kullanılır. Hekzagonal yapı, iki sıkı paketli altıgen yapının (hcp) iç içe geçmesi ile oluşur. Her bir hücrede dört atom bulunur ve birim hücresi altıgen yapıdadır. Hekzagonal birim hücresi iki örgü sabiti ile tanımlanır. Bu sabitler "a" ve "c" olarak adlandırılırlar. İdeal bir wurtzite yapı için  $c/a = 1.633$  değerini alır.



**Şekil 1.1:** a) Wurtzite, (b) Zincblende, (c) NaCl (kaya tuzu) yapıların şematik gösterimi

III-nitrürlerin diğer bir özelliği, [0001] c-doğrultusunda yüksek bir makroskopik kutuplanmanın olmasıdır. Bu kutuplanma, kendiliğinden kutuplanma

( $P_K$ ) kutuplanma ve gerilme kaynaklı piezoelektrik kutuplanmanın ( $P_P$ ) toplamıdır ve kristaldeki, gerilme ve kompozisyona bağlıdır [4]. [0001] doğrultusu boyunca büyüyen III-nitrür tabanlı çoklu yapı ara yüzeylerde kutuplanmanın süreksizliği yapının tamamının özellikleri üstünde önemli bir etkiye sahip olan güçlü bir elektrik alan üretir [5]. Bu elektrik alan bir bant bükülmesine ve kuantum kuyusu içindeki elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının örtüşmesinde bir azalmaya neden olur. Optiksel geçişlerde bir kıvrıma kayma ve kuyu kalınlığının artması ile osilatör gücündeki azalma InGaN/GaN [6, 7] ve GaN/AlGaN [8, 9] yapılarının her ikisinde de görülmüştür. Filmlerde ışınal tekrarbirleşme yarıömrü, ışınal olmayan tekrarbirleşme olasılığının yükselmesi ve iç kuantum veriminin azalması ile artar [10]. Güçlü elektrik alanın etkisinin üstesinden gelmek için önerilen yaklaşımlardan biri de polar c-eksenine dik doğrultularda olan a [1 1 -2 0] ve m [1 -1 0 0] (polar olmayan) doğrultularında yapılar büyütür. Polar olmayan GaN/AlGaN çoklu kuantum kuyularda rapor edilmiştir ve büyüme doğrultusu boyunca polarizasyon alanının olmadığı gösterilmiştir [11-14].

GaN tabanlı yarıiletken materyallerin büyütülmesinde karşılaşılan sorunlardan birtanesi kullanılan alttaşların sınırlı olmasıdır. Bu yüzden nitrürler genelde yabancı alt taşlar üzerine Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama (MOCVD) ve Hybrid Buhar Faz Epitaksi (HVPE) gibi epitaksiyel teknikler kullanılarak büyütülmektedir [15, 16]. GaN ve diğer nitrür yarıiletken büyütmelede en çok kullanılan alt taşlar; silikon (Si), silikon karbür (SiC) ve safir ( $Al_2O_3$ ) olarak sıralanabilir. Bir malzemenin alttaş olup olmayacağını belirlemedeki en önemli parametre örgü uyumudur. Ayrıca kristal yapı, yüzey sonlanması, kompozisyon, reaktivite, kimyasal, ısıl ve elektriksel özelliklerde önemlidir. Çünkü bunlar büyütülen filmi önemli ölçüde etkiler. Büyütülen filmin kristal yönelimi, polaritesi, çok tipliliği, yüzey morfolojisi, gerilmesi ve kusur yoğunluğu alttaş tarafından belirlenir. Bu yüzden alttaş seçiminde hem malzemenin fiziksel özellikleri hem de yukarıda ifade edilen ölçütler dikkate alınmalıdır [17].

Bir yarıiletkenin optik özellikleri; yarıiletkenin bant yapısı, safsızlık seviyeleri, yapısında kusur varsa bunların ne tür kusurlar olduğunu ve hangi mertebede olduğu hakkında öncü bilgiler verdiği için optoelektronik aygıtların üretilmesinde ve geliştirilmesinde büyük öneme sahiptir. Buradaki temel amaç yarıiletkenin optik özelliklerine bakılarak uygun kaliteye sahip olup olmadığıdır.

Optiksel özelliklerin belirlenmesinde en önemli yöntemlerden biri ise fotolüminesans tekniğidir. Fotolüminesans olayı uyarılma, termalizasyon ve yeniden birleşme olmak üzere üç temel süreçten meydana gelir. *Uyarılma*: Yarıiletken, enerjisi kendi bant aralığından daha yüksek değere sahip ( $\hbar\omega > E_{gap}$ ) foton salınımı yapan bir lazer ile uyarıldığı zaman valans bandındaki bir elektron iletim bandının minimumuna ya da daha yüksek enerji seviyelerine uyarılır ve gerisinde deşikler bırakır ve elektron-deşik çiftleri oluşur. *Termalizasyon*: Elektron-deşik çiftleri ilk anda çok yüksek bir kinetik enerjiye sahiptirler. Bu fazla enerjilerini uygun enerji ve momentumda, akustik ve optik fonon yayılımı yoluyla hızlı bir şekilde bırakarak elektronlar iletim bandının minimumuna doğru, deşikler ise valans bandının maksimumuna doğru hareket ederek termal denge dağılımlarına ulaşırlar. *Yeniden birleşme*: Elektron-deşik çiftleri yeniden birleşirler ve elektronlar valans bandına geri döner ve fazlalık enerji ışımali veya ışımazsız olarak salınır.

Yüksek parlaklığa sahip nitrür temelli LED'ler, gelişmiş ülkelerde şimdiden birçok pratik uygulama alanı bulmuştur. Reklam panolarında, trafik lamba ve işaretlerinde, dekoratif aydınlatma sistemlerinde, stadyumlarda, alışveriş merkezleri 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 kullanılabilir. Görünür ve morötesi bölgede yayılım yapan LED'lerin kullanım alanlarını ziraatta görülen hastalıkların teşhis ve tedavisinde, fotosentezin hızlandırılması gibi tarımsal amaçlı uygulamalardan spektroskopik ölçüm sistemlerine kadar genişletmek mümkündür.

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. Örneğin CD'lerde kızıl ötesi (dalgaboyu 780nm), DVD'lerde kırmızı lazer (dalgaboyu 650nm) kullanılmaktadır. Bu gelişim kısaca *Blue-Ray Disk* olarak adlandırılan yeni nesil CD'lerde mavi lazere (dalga boyu 405nm) doğru ilerledi. Böylece mavi lazerin kullanılması ile lazerin disk üzerinde okuduğu alan küçüldü ve birim alana daha fazla iz yerleştirilmiş oldu.

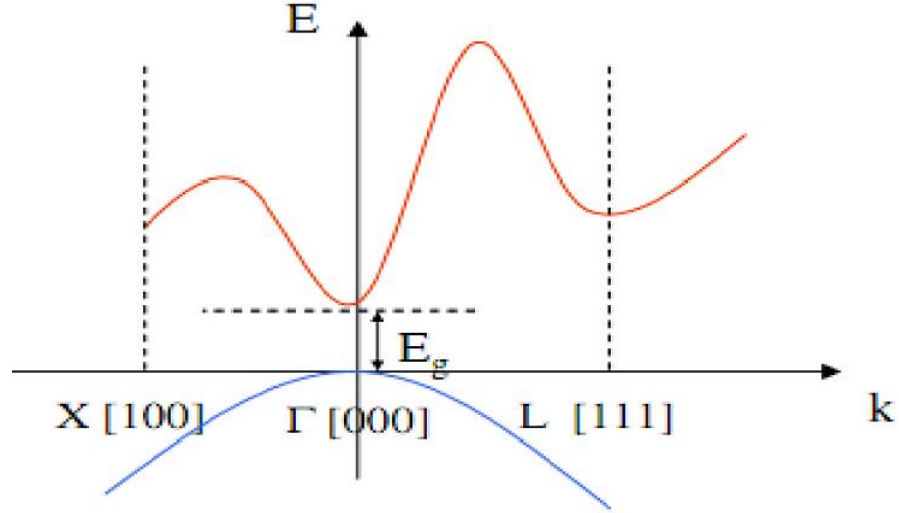
Böylelikle bugün 4 Gb olan hafıza tek katmanlı yapılarda 25 Gb'a ve dört katmanlı yapılarda ise 100 Gb'a kadar çıkarılabilmektedir.

Endüstriyel fırınlarda (buhar kazanı), otomobillerde, jet mühendisliğinde UV detektörler kullanılmaktadır. Atmosferin 15-20 km'lik yükselti bölgesindeki ozon tabakası güneşten gelen ışınların morötesi bölgesini büyük oranda soğurmasından dolayı yeryüzündeki UV ışınsal gürültü düzeyi son derece düşüktür. Dolayısıyla 250-280 nm dalga boyu aralığında üretilecek olan UV sensörlerin optiksel algılama özelliği oldukça yüksek olacaktır. Bu nedenle detektörler uçakların, balistik füzelerin vs. fark edilmesinde erken uyarı sağlayarak tehdidin önlenmesinde önemli rol oynar. Bunun yanı sıra, görünür-kör ve solar-kör foto-detektörler, UV astronomi çalışmalarında, uzaydan-uzaya güvenli iletişimde ve biyolojik etkilerin incelenmesinde de kullanım alanlarına sahiptirler.

GaN'ün incefilm olarak büyütülme tarihçesine bakıldığında belki de en önemli adım 1960'lı yılların sonunda Manasevit ve arkadaşlarının [18-20], metal organik Ga ve Al kaynaklar kullanarak GaN ve Alüminyum nitrür (AlN) büyütme başarımları olmuştur. Bu çalışma, günümüzde de GaN-temelli büyütmenin çoğunun yapıldığı Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisinin (MOVPE) III-nitrürlere ilk defa uygulandığı çalışmadır. GaN araştırmalarına bu çalışmanın getirdiği ivme kadar çok az sayıda makale ivme getirebilmiştir. Bunlardan biri Amano ve arkadaşlarının 1986'da safir üzerine düşük sıcaklıklarda AlN, daha sonrasında ise yüksek sıcaklıklarda GaN büyütme tek kristal kalitesini arttırdıklarını bildirdikleri makedir [21]. Günümüzde bu büyütme reçetesi "iki adımlı büyütme yöntemi" olarak bilinmektedir. Daha sonra 1988'de Amano'nun p-tipi GaN büyütmesi ile optoelektronik cihazlar yapımına yol açması önemli bir adım olarak görülmektedir [22, 23]. Gerçekten de bir yıl sonrasında ilk GaN ışık yayan diyotların (LED) yapılmış olması bu yayının önemini göstermektedir. 1991 yılında Nakamura ve arkadaşları [24] ve Wickenden'in [25] birbirlerinden bağımsız olarak olarak geliştirdikleri düşük sıcaklık GaN büyütmesi, kristal kalitesini geliştirmede önemli diğer bir adım olmuştur. 1994'de ise Nakamura ve arkadaşları tarafından ticari değere sahip ilk LED üretilmiştir [26].

*GaN Yapının Özellikleri:* GaN direkt geçişli geniş bant enerji aralığına sahiptir ve kimyasal olarak kararlıdır. Bu özellikler onun mavi ve morötesi ışık yayan

diyotlar ve detektörlerin fabrikasyonu için yıpratıcı ortamlara uygun materyal olmasını sağlamaktadır [27].



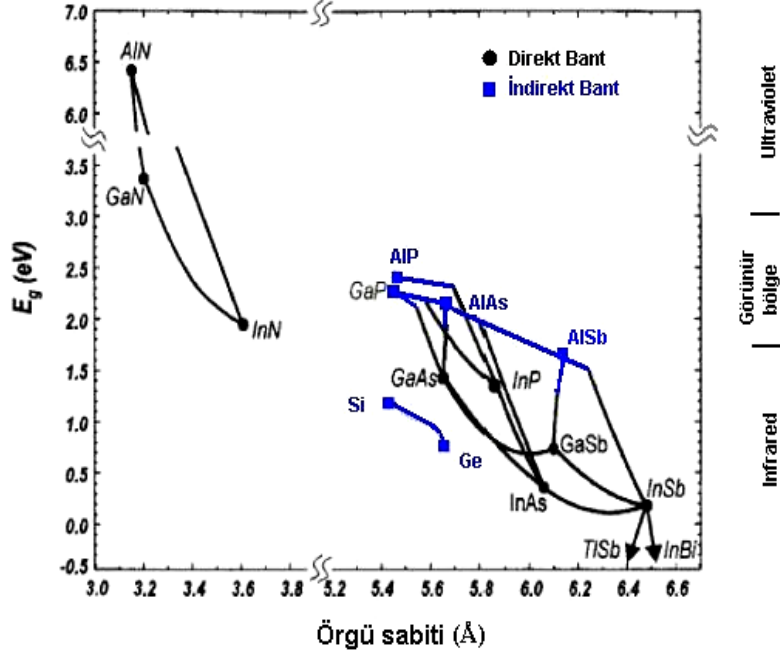
### Direk Bant aralığı

Şekil 1.2: Wurtzite GaN'ün enerji bant diyagramı

*AlGaN alaşımının özellikleri:*  $Al_xGa_{1-x}N$  bant aralığı enerjisi 3,4 eV'dan ( $x=0$ , GaN) 6,2eV'a ( $x=1$ , AlN) değişir. Bu enerji değişimi 200–365 nm dalga uzunlukları arasında UV bölgesi ile uyumludur. Güçlü iç kimyasal bağlarından dolayı AlGaN kristaller, fiziksel ve kimyasal olarak diğer yarıiletkenlerden daha sağlamdır. Bu, özellikle zorlu şartlarda cihazların yıpranmasını azaltan önemli bir özelliktir.  $Al_xGa_{1-x}N$  materyali AlN ve GaN'ın kompozisyonu gibi düşünülebilir. Bu iki materyalin oluşturduğu bileşiğin yapısı ise kullanılan materyallerin yüzdeleri ile belirlenir.  $Al_xGa_{1-x}N$  enerji bant aralığı (1.1) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

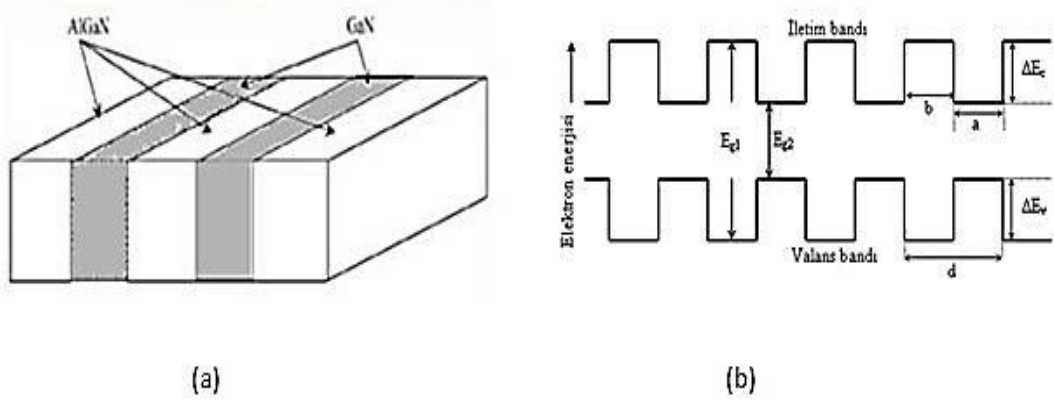
$$E_g(x)(AlGaN) = xE(AlN) + (1-x)E(GaN) - bx(1-x) \quad (1.1)$$

Burada  $E_g(GaN) = 3,4eV$  ,  $E_g(AlN) = 6,2 eV$  ve  $x$  , AlN'ün molar kesridir.  $b$  ise tartışılabilir değerlere sahip eğilme (bowing) parametresidir.



**Şekil 1.3:** Yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitleri ve enerji bant aralıkları [28]

*Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN çoklu kuantum kuyusu:* AlGa<sub>x</sub>N ve GaN yarıiletkenleri farklı bant aralıklarına sahiptirler. Bu yarıiletken materyallerden oluşturulan Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN çokluyapısı kuantum kuyusunun oluşabilmesi için yeterli bant devamsızlığına sahiptir. Bant devamsızlıklarının aynı momentum değerinde olması sebebiyle bu iki yarıiletken arasında kuantum kuyusu ve dolayısıyla 2DEG oluşumuna imkan tanır [29, 30]. Şekil 1.4'te Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN çoklu kuantum kuyusunun şematik gösterimi ve iletim ve valans bant diyagramı gösterilmektedir.



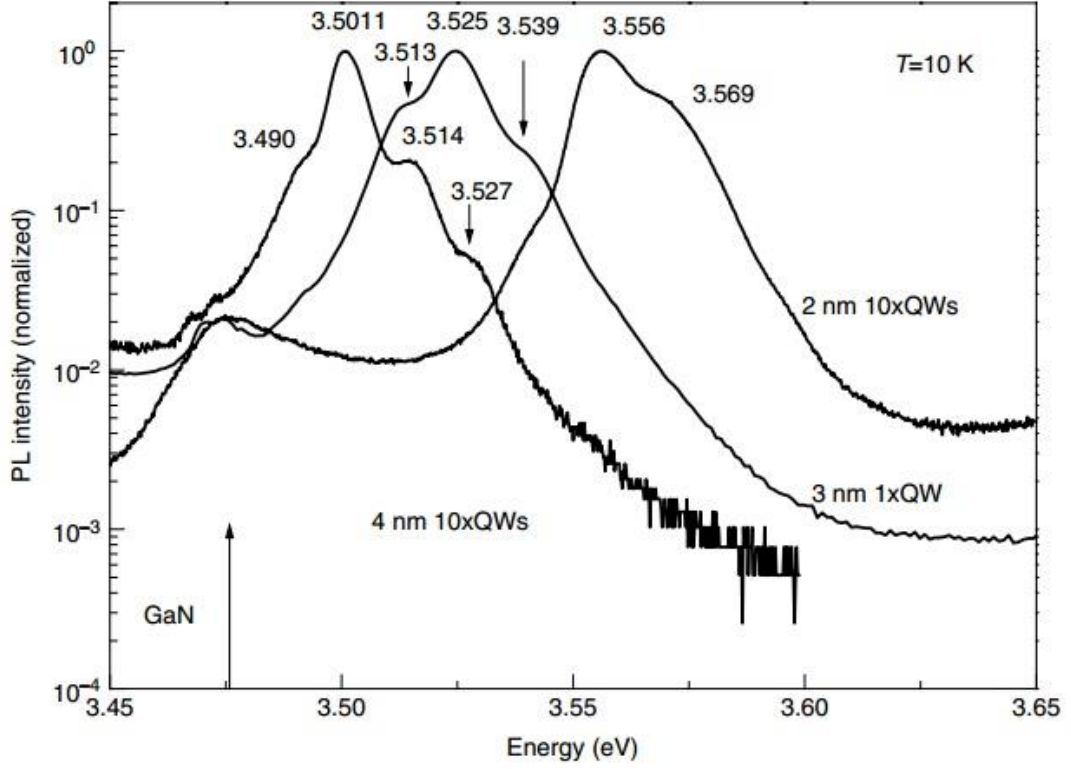
**Şekil 1.4:** a) AlGa<sub>x</sub>N/GaN çoklu kuantum kuyusunun şematik gösterimi, b) bant diyagramı



$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  çokluyapısı, hekzagonal GaN üzerine hekzagonal AlGaN büyümesiyle oluşur. Bu iki hekzagonal materyal temas halinde olduğunda, birbirlerine göre farklı seviyelerde bulunan Fermi enerjileri aynı seviyeye gelir. Bunun için AlGaN ve GaN katmanlarının iletkenlik ve değerlik bandlarının Fermi seviyelerinin aynı seviyeye gelene kadar bükülmeleri gerekir. Bu bükülme esnasında GaN'ın iletkenlik bandı, tüm iletimin gerçekleştiği Fermi seviyesinin altına iner [31].

Heteroyapılarda kullanılan bileşenlerin modülasyon kontrolünün daha kolay olması nedeniyle moleküler ışın epitaksi tekniği ile büyütülen kuantum kuyulu yapılar araştırılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda MOCVD tekniği ile büyütülen yapılar, MBE tekniği ile büyütülen yapılarla karşılaştırılmıştır. Nitrür yarıiletkenler arasında homojensizliği en az olması nedeniyle, GaN tabanlı kuantum kuyulu yapılarda en çok araştırılan  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  kuantum kuyusudur [32]. MBE tekniği ile büyütülmüş  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  çoklu kuantum kuyuları 10 K ile 300 K sıcaklıkları arasında fotoluminesans tekniği ile incelenmiştir [33]. Ayrıca bu sonuçlar emisyon enerjisinde ki kaymayı belirlemek için GaN tabakalarla karşılaştırılmıştır. GaN tabakalarda 10 K sıcaklığında ki baskın geçiş Donor-Bound-Exciton (DBE) rekombinasyonuna atfedilir. Çoklu kuantum kuyulu yapılarda; polarizasyon tarafından uyarılan kırmızıya kayma oranını aşmak için kuyu boyutunun yeterince küçük olması şartıyla, elektron ve hollerin kuantum sınırlaması nedeniyle eksitonik geçiş pik pozisyonunda maviye kayma görülür. Ayrıca, çoklu kuantum kuyularda düşük sıcaklıklarda eksiton lokalizasyonu arayüz pürüzlülüğünden ve kuyu genişliğindeki dalgalanmalardan kaynaklanıyor olabilir. Diğer anlamda lokalize eksitonlar hapsolmuş ve termal olmayan bir dağılıma sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda, lokalizasyon potansiyelinin derinliğine bağlı olarak serbest kalırlar ve termal olarak dağılırlar [34].

Şekil 1.5'te GaN tabakalar ile  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  kuantum kuyusu arasındaki enerji değerlerini kıyaslamak için farklı kalınlıklarda kuantum kuyularına ait 10 K sıcaklıkta ki PL spektrumu gösterilmektedir. Bütün kuantum kuyuları GaN tabakasından daha büyük enerjiye sahiptir. Bunun sebebi ise kuantum sınırlandırılmasından kaynaklanan maviye kayma ve Stark Etkisinin olmamasındandır.



**Şekil 1.5:** 10 K sıcaklıkta ki 2, 3 ve 4 nm kalınlığında ki 10 periyotlu kuantum kuyularının FL spektrumu [34]

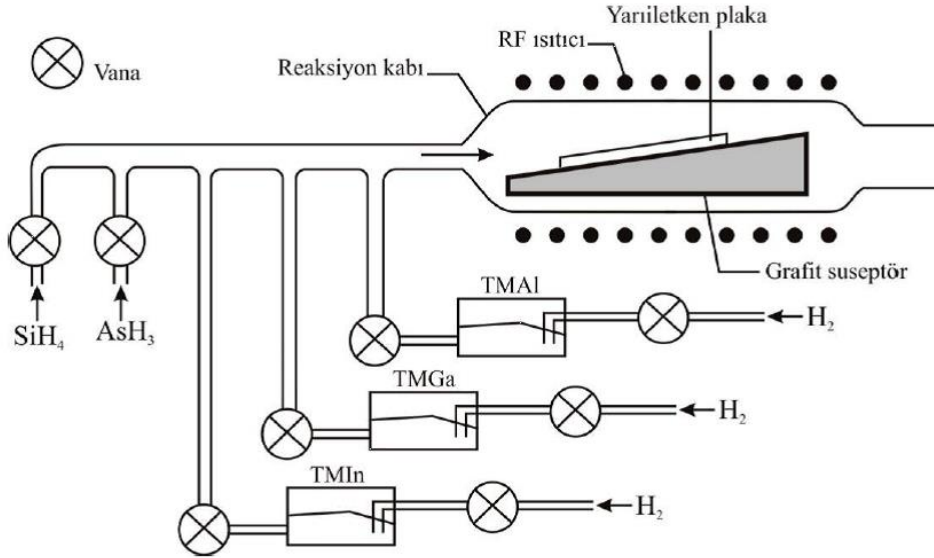
Bu tez çalışmasında, MOCVD tekniği ile safir alttaşı üzerine büyütülmüş üç farklı  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  çoklu kuantum kuyusunun optik özellikleri 8-300 K sıcaklık aralığında Kararlı-Hal Fotoluminesans (*Steady-State Photoluminescence*) tekniği kullanılarak incelendi. Büyütme ve deneysel ölçümler Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (NANATOM) gerçekleştirildi.

## 2. DENEYSEL YÖNTEMLER

### 2.1 Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama ( MOCVD ) Tekniği

Metalorganik kimyasal buhar depolama (MOCVD), uzmanlaşmış kimyasal buhar depolama (CVD) alanıdır. Bu teknik ilk olarak 1960'larda InP ve InSb büyütülmesi için kullanılmıştır. Bu deneyler termal kimyasal buhar depolama (CVD) yönteminden daha düşük sıcaklıklarda büyötmeye imkan sağladığını göstermiştir. Ekipmanın kalitesi ve karmaşıklığı, ilk öncü kimyasalların saflığı ve çeşitliliği o günden itibaren durmadan bir gelişme içerisinde olup MOCVD řu an özellikle elektronik ve optoelektronik uygulamalarda geniş bir ölçekte kullanılmaktadır [35].

Bu sistemde büyütülmesi istenilen yarıiletken için gerekli kimyasallar, grafit suseptör üzerine yerleştirilmiş alttaşın bulunduğu reaktör odasına  $H_2$  ve  $N_2$  gaz taşıyıcı balonları ile iletilir. Büyütme sıcaklığında (600-1100K) organik moleküller ile metal atomları arasındaki bağlar kırılarak istenilen yarıiletken, kimyasal süreçlerin gerçekteşmesi ile alttaş üzerinde tabakalar halinde kristalleşir. şekil 2.1'de MOCVD sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.



şekil 2.1: MOCVD sisteminin şematik gösterimi

Ayrıca bu sistem piroliz reaksiyonları sonucu oluşan zararlı gazları ortamdan uzaklaştırmak için gelişmiş bir dış atım sistemine sahiptir. MOCVD tekniğinin diğer büyütme tekniklerine kıyasla avantajı istenilen hızda (saniyede birkaç tabaka) ve hassasiyette büyütme imkânı sağlamasının yanı sıra yılda 1000 adet büyütme yapabilecek kapasiteye sahip olmasıdır.

Yarıiletkenlerin büyütülmesinde en çok kullanılan metal-organik ve hidrür kaynakları Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.1:** Metal-organik ve hidrür kaynakları

| <b>Molekül Adı</b>      | <b>Simge</b>     |
|-------------------------|------------------|
| <b>Metal-Organikler</b> |                  |
| Trimetil-Galyum         | TMGa             |
| Trietil-Galyum          | TEGa             |
| Trimetil-Alüminyum      | TMAI             |
| Trietil-Alüminyum       | TEAI             |
| Trimetil-İndiyum        | TMIIn            |
| Trietil-İndiyum         | TEIn             |
| <b>Hidrürler</b>        |                  |
| Arsin                   | AsH <sub>3</sub> |
| Fosfin                  | PH <sub>3</sub>  |
| Stibin                  | SbH <sub>3</sub> |
| Amonyak                 | NH <sub>3</sub>  |

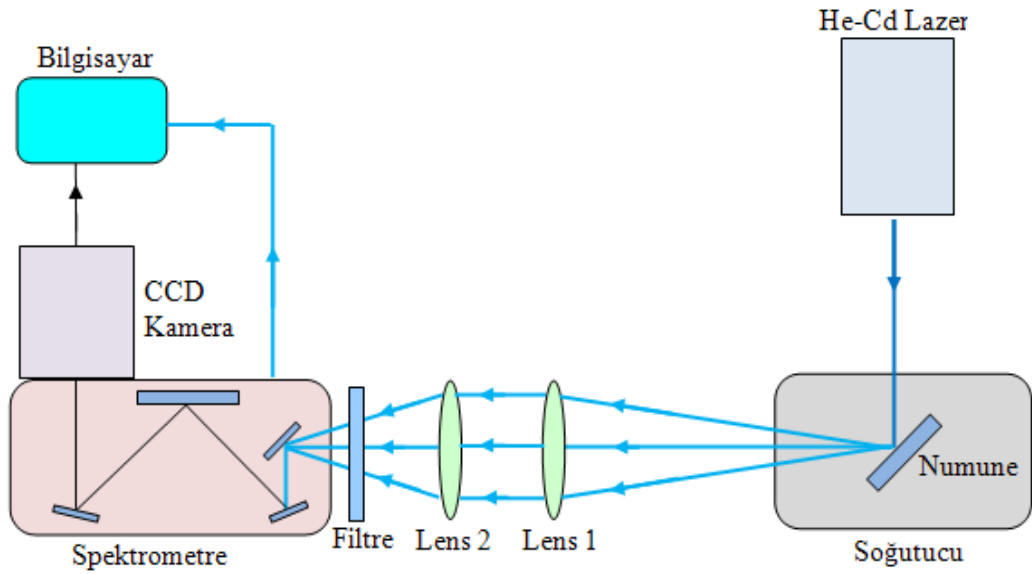
Bu tez çalışmasında kullandığımız numuneler, Bilkent Üniversitesi Nanatom Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki bulunan yatay reaktör geometrisine sahip AIX 200/4 RF-S modeli MOCVD tekniği ile büyütülmüştür.

## **2.2 Kararlı-Hal Fotoluminesans Tekniği**

Fotoluminesans optik uyarma altında bir materyalden ışığın kendi kendine doğal yayılmasıdır [36]. Yarıiletken, enerjisi kendi bant aralığından daha yüksek değere sahip foton salınımı yapan bir lazer ile uyarıldığı zaman valans bandındaki bir elektron iletim bandının enerji seviyelerine uyarılır ve fotonların soğurulması ile oluşan elektron-deşik çiftleri yüksek enerjiye sahiptirler. Yarıiletken malzemelerde

optik uyarılma ile oluşan elektron-deşik çiftleri temel enerji durumlarına dönerken kaybettikleri bu enerjiyi ışına olarak yayarlar.

Bu teknik, yarıiletkenlerin optik özelliklerini belirlemek için kullanılan kullanışlı ve numuneye zarar vermeyen bir deneysel tekniktir ve yarıiletken malzemelerin kalitesi, yasak enerji bant aralığı, malzemenin yapısında görülen doğal kusurlar ve safsızlıkların orijinleri ve yoğunlukları hakkında bilgiler verir. Şekil 2.2’de yaptığımız çalışmada kullandığımız fotolüminesans deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 2.2:** Fotolüminesans deney düzeneği şematik gösterimi

Çalışmalarımızda kullandığımız numunelerimizin optik özelliklerini karakterize etmek için, Bilkent Üniversitesi Nanateknoloji Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Horiba Jobin Yvon Triax 550 CCD modeli fotolüminesans ölçüm sistemi kullanılmıştır.

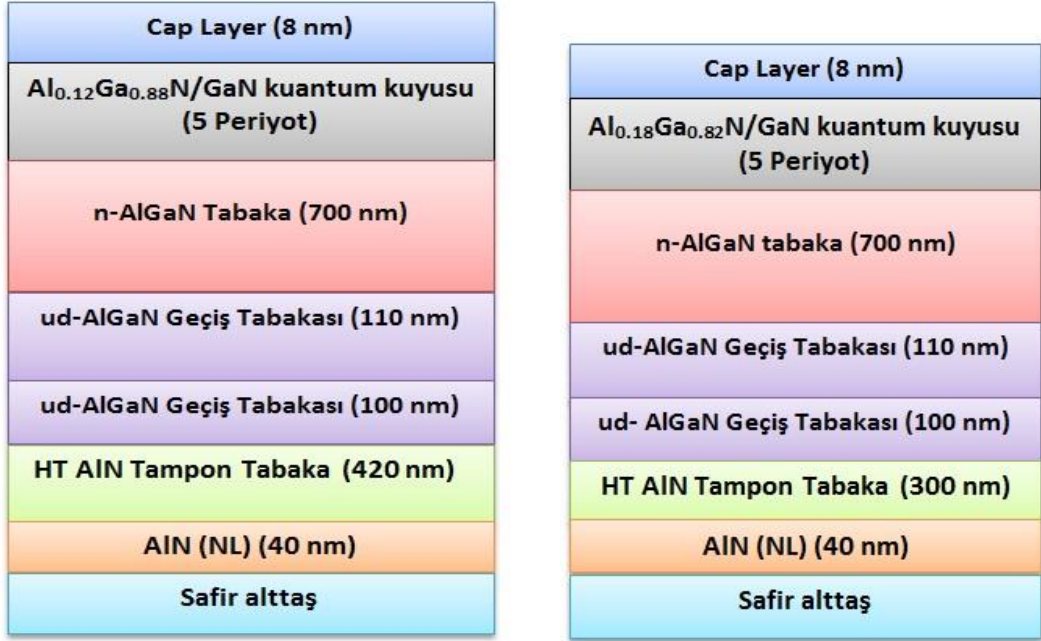
8-300 K sıcaklık aralığında ölçüm alınabilmesi için numuneler kapalı-devirli bir soğutucuya yüklenir. Ölçümler 20 K ve 30 K sıcaklık aralıklarıyla alınmıştır. Fotolüminesans ölçümlerinde, numuneyi uyararak için kullanılan lazer 30 mW optiksel uyarma gücüne ve 325 nm dalga boyuna sahip bir He-Cd lazerdir. Bu lazer örneğin üzerine düşürülür. Yüksek uyarım yoğunluğundan kaçınmak için, uyarım yoğunluğu yaklaşık olarak  $1 \text{ W/cm}^2$  değerinde sabit tutulmuştur. Ayrıca 8 K

sıcaklıkta, numuneyi uyarmak için sinyal genişliği 10 ps olan 0.5 W optiksel uyarma gücüne ve 266 nm dalga boyuna sahip Nd:YAG farklı bir lazer kaynağı daha kullanılmıştır.

Yarıiletkenin uyarıldıktan sonra numuneden salınan lüminesans mercekle ve aynalar yardımıyla spektrometrenin girişine odaklanır. Numunenin yüzeyinden yansıyan ve saçılan lazerin spektrometreye girmesini engellemek için 330 nm ve ikincil harmonikleri engellemek için ise 410 nm kesim dalga boylarına sahip filtreler kullanılmıştır. Spektrometrenin içine giren fotolüminesans milimetredeki çizgi sayısı 2400 groove/mm olan yüksek dağıtım özelliğine sahip grating ile dağıtılan ışınım CCD detektörün üzerine düşürülür. Detektöre gelen fotolüminesans şiddeti giriş ve çıkış yarığını 0-2000 mm arasında ve ışık toplama zamanını da 20-2000 ms aralığında değiştirilerek 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 yazılım ile kontrol edilmektedir. Detektör yardımı ile elde edilen bu optik sinyal elektriksel sinyale dönüştürülür. Malzemenin lüminesans ışımaya karşılık gelen bu sinyalin, şiddet-dalgaboyu (veya şiddet-enerji) grafiği çizilerek fotolüminesans spektrumu elde edilir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

#### 3.1 Numunelerin Yapısı



a) B2237

b) B2238



c) B2240

Şekil 3.1: a) B2237, b) B2238, c) B2240

İncelenen  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  numunelerinin yapıları Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Büyütülen üç numune safir ( $Al_2O_3$ ) alttabakanın c-(0001) düzlemi üzerine MOCVD yöntemi ile büyütüldü. Trimetilgalyum (TMGa), trimetilalüminyum (TMAI) ve amonyum ( $NH_3$ ) sırasıyla Ga, Al ve N kaynağı olarak kullanıldı. Epitaksiyel büyütmeden önce yüzeydeki oksitleri temizlemek için alt tabaka  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  de 4 dakika boyunca ısı işleme tabi tutuldu. Büyütülen üç numunenin tabaka yapıları birbirine benzemektedir. B2237, B2238 ve B2240 numunelerine ait kuantum kuyularındaki AlGaN bariyer tabakalarının sırasıyla Al oranları %12, %17 ve %22 değerinde, kalınlıkları 10 nm, 9 nm ve 8 nm değerindedir. GaN kuantum kuyusu ise bütün örneklerde 3 nm kalınlığındadır.

## 3.2 Fotoluminesans Ölçümler

B2237, B2238 ve B2240 örneklerinin optik özelliklerini belirlemek için 8-300 K sıcaklık aralığında Kararlı-Hal Fotoluminesans tekniği kullanılmıştır. İlk olarak numunelerin düşük sıcaklıkta ki PL spektrumları ve gözlenen optiksel geçişleri incelendi.

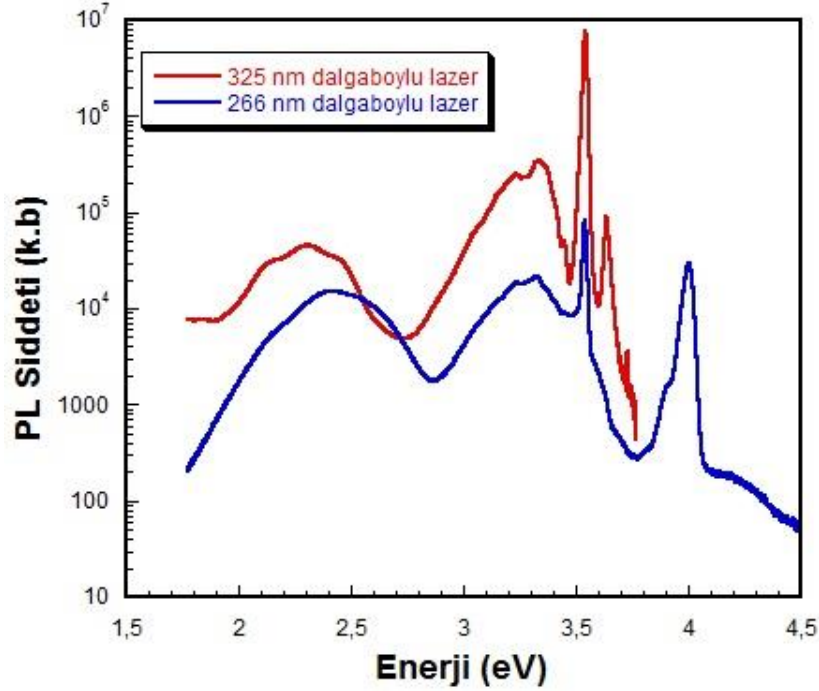
### 3.2.1 B2237 Numunesi

Şekil 3.2’de  $Al_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusuna sahip B2237 kodlu numunenin 325 ve 266 nm lazerle uyarılmış 8 K sıcaklıktaki PL spektrumları gösterilmektedir.

Her iki spektrumda merkezi 3.54 eV’de en yüksek şiddete sahip olan ana pik (bu sıcaklıkta bulk GaN yapılarında eksiton bağlanma enerjisi dahil genelde gözlenen pikin yaklaşık 3.47 eV da olduğu dikkate alındığında)  $Al_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusunun iletim ve valans bantlarının taban durum enerjisi seviyeleri arasındaki geçiştir. Bu geçişin yarı genişlik değeri yaklaşık 16 meV’dir. Bu ana pikin düşük ve yüksek enerji bölgelerinde gözlenen pikler ise AlGaN tampon tabakadan ve kusurlardan kaynaklanmaktadır. 266 nm lazer uyarma kaynağı ile alınan spektrumun 4.00 eV tepe değerinde gözlenen ışınal geçiş Vegard yasasına göre yapılan hesaplamada % 30 Al konsantrasyonuna sahip  $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$  tampon tabakadan



gelmektedir. Bu pikin yaklaşık 90 meV düşük enerji tarafında gözlenen omuzun ise bu ana geçişin fonon replikası olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan 325 nm lazer ile alınan spektrumda net olarak, 266 nm ile alınan spektrumda ise bir omuz olarak görülen ve yaklaşık 3.64 eV merkezli geçişin tam olarak nereden kaynaklandığı kesin olmamakla birlikte kuantum kuyusunun 1. uyarılmış durumlarından veya farklı Al konsantrasyonuna sahip tabakadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

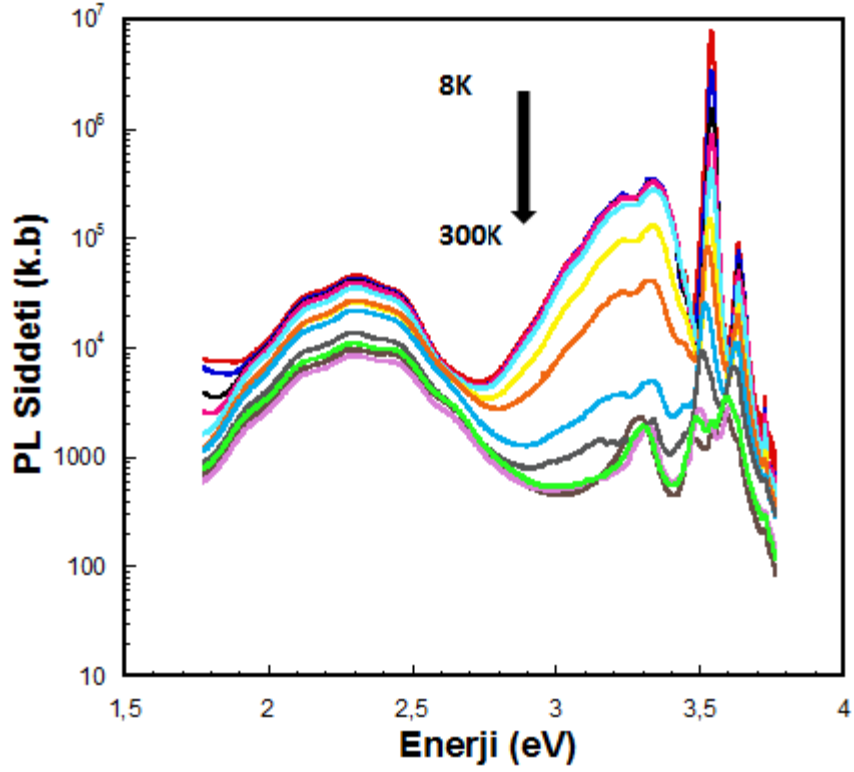


Şekil 3.2: B2237 numunesinin 8 K sıcaklıkta PL spektrumları

325 nm lazer ile sıcaklığa bağlı alınan spektrumlarda (Şekil 3.3) bu pikin 300K sıcaklığına kadar gözlenebilmesi bu geçişin kaynağı olarak ikinci öngörünün daha doğru olduğu düşünülmektedir. Bu örneğin her iki PL spektrumunda da yaklaşık 3.24 eV ve 2.4 eV pik enerji değerlerlerinde gözlenen geniş geçişler ise GaN tabanlı örneklerde sıkça gözlenen sırasıyla mavi ve sarı lüminesans olarak adlandırılan kusur merkezli geçişlerdir.

B2237 numunesinin 8-300 K aralığında sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere düşük sıcaklıkta belirlenen (3.64, 3.54, 3.34 ve 2.4 eV) ana pikler oda sıcaklığına kadar gözlenmektedir. Sıcaklık arttıkça kuantum kuyusundan kaynaklanan ana pikin şiddetinin hızlı bir biçimde azaldığı görülmektedir. 300 K sıcaklıkta ise kusurlardan

kaynaklanan sarı lüminesansın şiddetinin ana geçişe göre daha yüksek olması büyütülen yapının optiksel kalitesinin düşük olduğunun bir göstergesidir. Bu ana geçişin şiddetinin, yarı genişliğinin, pik enerjisinin sıcaklığa bağlı gibi daha nicel analizi sonraki alt bölümlerde yapılacaktır.



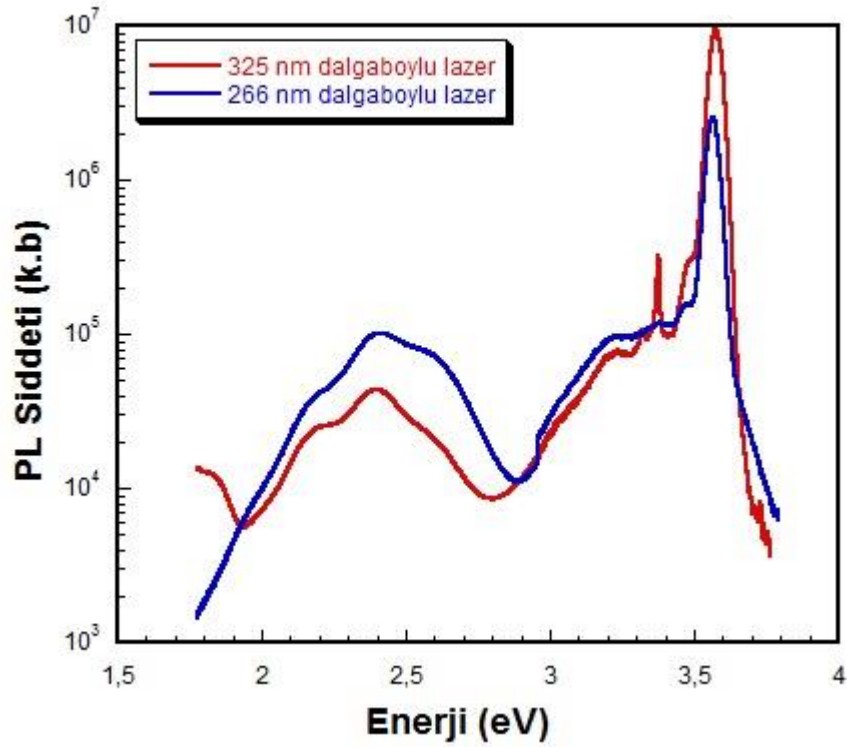
**Şekil 3.3:** B2237 numunesine ait 8-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları

### 3.2.2 B2238 Numunesi

Şekil 3.4'te  $Al_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusuna sahip B2238 kodlu numunenin 325 ve 266 nm lazerle uyarılmış 8 K sıcaklıktaki PL spektrumları gösterilmektedir.

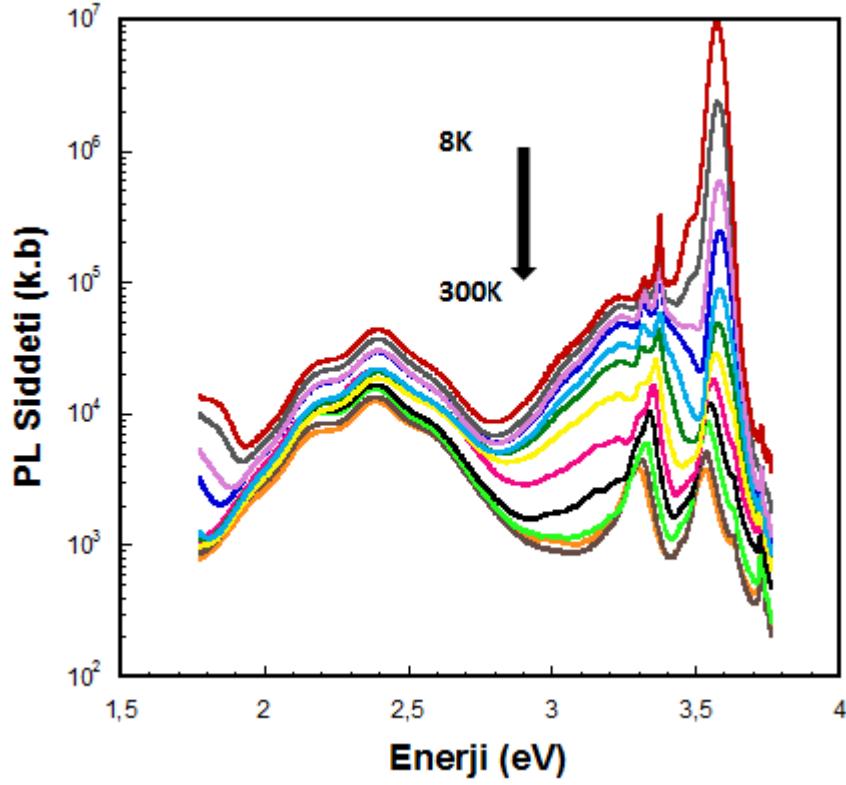
Her iki spektrumda merkezi 3.57 eV'de en yüksek şiddete sahip olan ana pik B2237 numunesine benzer şekilde  $Al_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusunun iletim ve valans bantlarının taban durum enerji seviyeleri arasındaki geçiştir. Bu geçişin yarı genişlik değeri yaklaşık 51 meV'dir. 325 nm lazer ile alınan spektrumda bu pikin yaklaşık 90 meV düşük enerji tarafında gözlenen omuzun ise bu ana geçişin

fonon replikası olduğu düşünülmektedir. Bu ana pikin düşük bölgelerinde gözlenen pikler ise kusurlardan kaynaklanmaktadır. 325 nm lazer ile alınan spektrumda yaklaşık 3.38 eV enerji değerinde gözlenen pikin ise ne olduğuyla ilgili herhangi bir öngöründe bulunulmamaktadır. Bu örneğin her iki PL spektrumunda da yaklaşık 2.4 eV pik enerji değerlerinde gözlenen geniş geçiş ise sarı lüminesans olarak adlandırılan kusur merkezli geçiştir.



Şekil 3.4: B2238 numunesinin 8 K sıcaklıkta PL spektrumları

B2238 numunesinin 8-300 K aralığında sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumları Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere düşük sıcaklıkta 3.57 eV, 3.38 eV ve 2.4 eV enerji değerlerinde görülen ana pikler oda sıcaklığına kadar gözlenmektedir. Sıcaklık arttıkça kuantum kuyusundan kaynaklanan ana pikin şiddetinin hızlı bir biçimde azaldığı görülmektedir. 300 K sıcaklıkta ise kusurlardan kaynaklanan sarı lüminesansın şiddetinin ana geçişe göre daha yüksek olması büyütülen yapının optiksel kalitesinin düşük olduğunu göstermektedir.



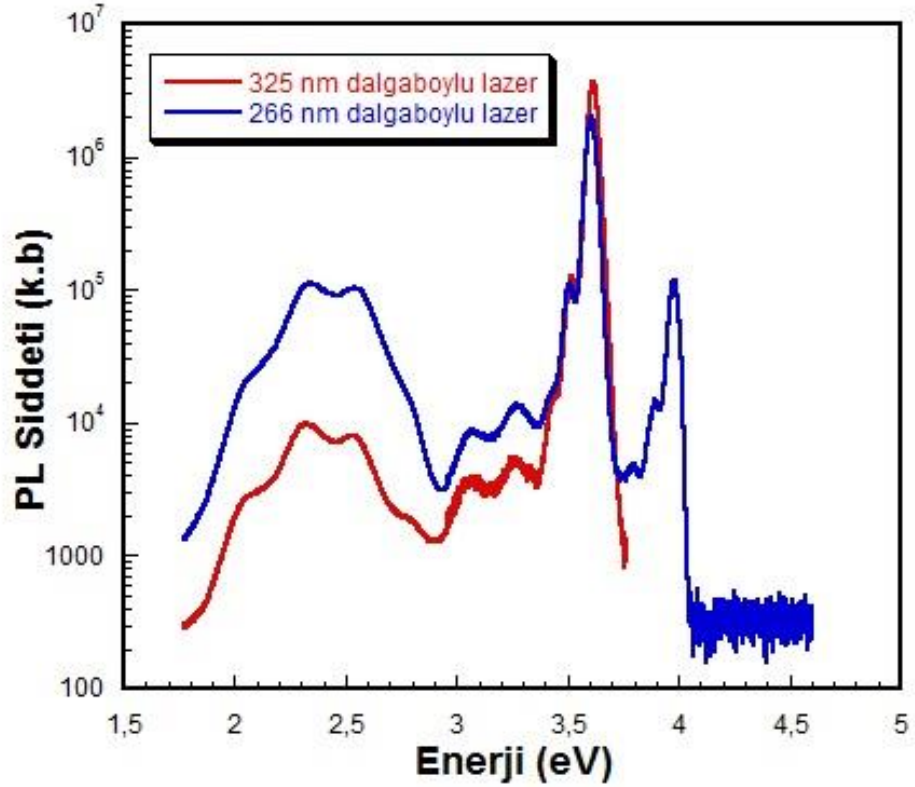
Şekil 3.5: B2238 numunesine ait 8-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları

### 3.2.3 B2240 Numunesi

Şekil 3.6'da  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$  çoklu kuantum kuyusuna sahip B2240 kodlu numunenin 325 ve 266 nm lazerle uyarılmış 8 K sıcaklıktaki PL spektrumları gösterilmektedir.

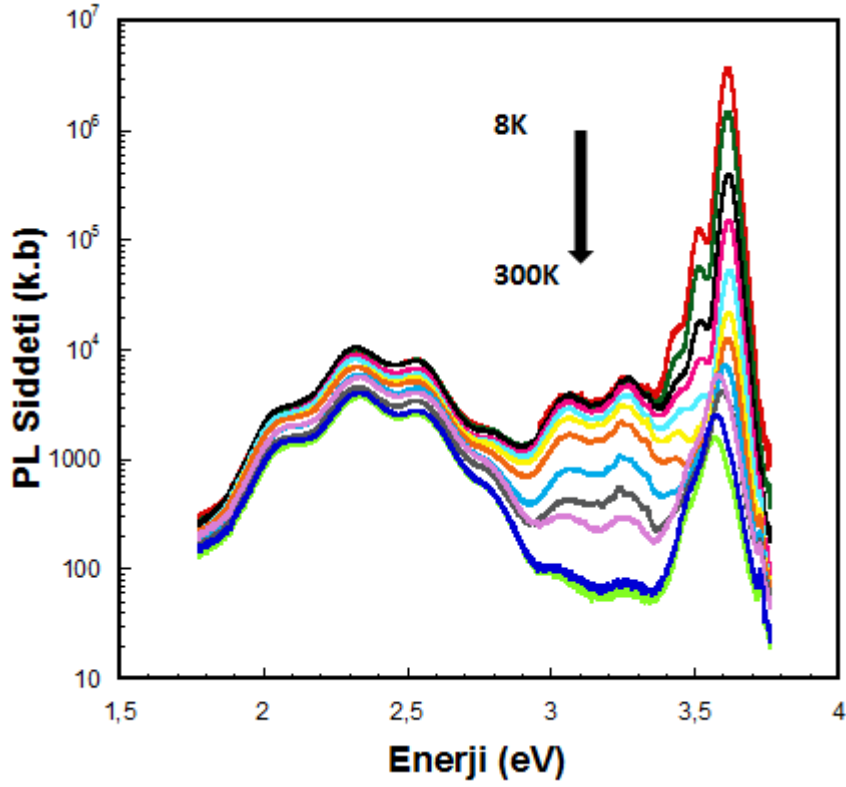
266 nm lazer uyarma kaynağı ile alınan spektrumda 3.61 eV'de, 325 nm lazer uyarma kaynağı ile alınan lazerde 3.66 eV'de en yüksek şiddete sahip olan ana pik  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}/\text{GaN}$  çoklu kuantum kuyusunun iletim ve valans bantlarının taban durum enerji seviyeleri arasındaki geçiştir. Bu geçişin yarı genişlik değeri yaklaşık 41 meV'dir. 266 nm lazer uyarma kaynağı ile alınan ana pikin yaklaşık 100 meV düşük enerji seviyesinde gözlenen omuzun ise ana pikin fonon replikası olduğu düşünülmektedir. Bu ana pikin düşük ve yüksek enerji bölgelerinde gözlenen pikler ise AlGaN tampon tabakadan ve kusurlardan kaynaklanmaktadır. 266 nm lazer uyarma kaynağı ile alınan spektrumun 3.98 eV tepe değerinde gözlenen ışımsal geçiş Vegard yasasına göre yapılan hesaplamada % 30 Al konsantrasyonuna sahip

$Al_{0.30}Ga_{0.70}N$  tampon tabakadan gelmektedir. Bu pikin yaklaşık 80 meV düşük enerji tarafında gözlenen omuzun ise bu ana geçişin fonon replikası olduğu düşünülmektedir. Bu örneğin her iki PL spektrumunda da yaklaşık 2.41 eV pik enerji değerlerlerinde gözlenen geniş geçiş ise GaN tabanlı örneklerde sıkça gözlenen sarı lüminesans olarak adlandırılan kusur merkezli geçişlerdir.



**Şekil 3.6:** B2240 numunesinin 8 K sıcaklıkta PL spektrumları

B2240 numunesinin 8-300 K aralığında sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumları Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Şekil 3.7’de görüldüğü üzere 325 nm lazer ile alınan spektrumda düşük sıcaklıkta belirlenen 3.66 eV ve 2.41 eV ana pikler oda sıcaklığına kadar gözlenmektedir. Sıcaklık arttıkça kuantum kuyusundan kaynaklanan ana pikin şiddetinin hızlı bir biçimde azaldığı görülmektedir. 300 K sıcaklıkta ise kusurlardan kaynaklanan sarı lüminesansın şiddetinin ana geçişe göre daha yüksek olması büyütülen yapının optiksel kalitesinin düşük olduğunun bir göstergesidir.



**Şekil 3.7:** B2240 numunesine ait 8-300K sıcaklık aralığında PL spektrumları

Numunelerin PL spektrumunda gözlenen kuantum kuyusuna ait optiksel geçişlerin pik pozisyonları, yarı genişlik değerleri ve pik şiddetleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.1:** B2237, B2238 ve B2240 numuneleri için PL spektrumunda (325nm lazer) gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonu, FWHM ve pik şiddetleri değerleri

| Numune Kodu | Kuantum Kuyusundan Kaynaklanan Geçişin Pik Pozisyonu (eV) |      | FWHM (meV) (8K) | Pik Şiddeti ( k.b. ) (8K) |
|-------------|---|------|-----------------|---------------------------|
|             | 8K  | 300K |                 |                           |
| B2237       | 3.54  | 3.48 | 16              | $1.05 \times 10^6$        |
| B2238       | 3.57  | 3.53 | 51              | $8.38 \times 10^6$        |
| B2240       | 3.61  | 3.57 | 41              | $3.02 \times 10^6$        |

### 3.3 Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümler ve Analizleri

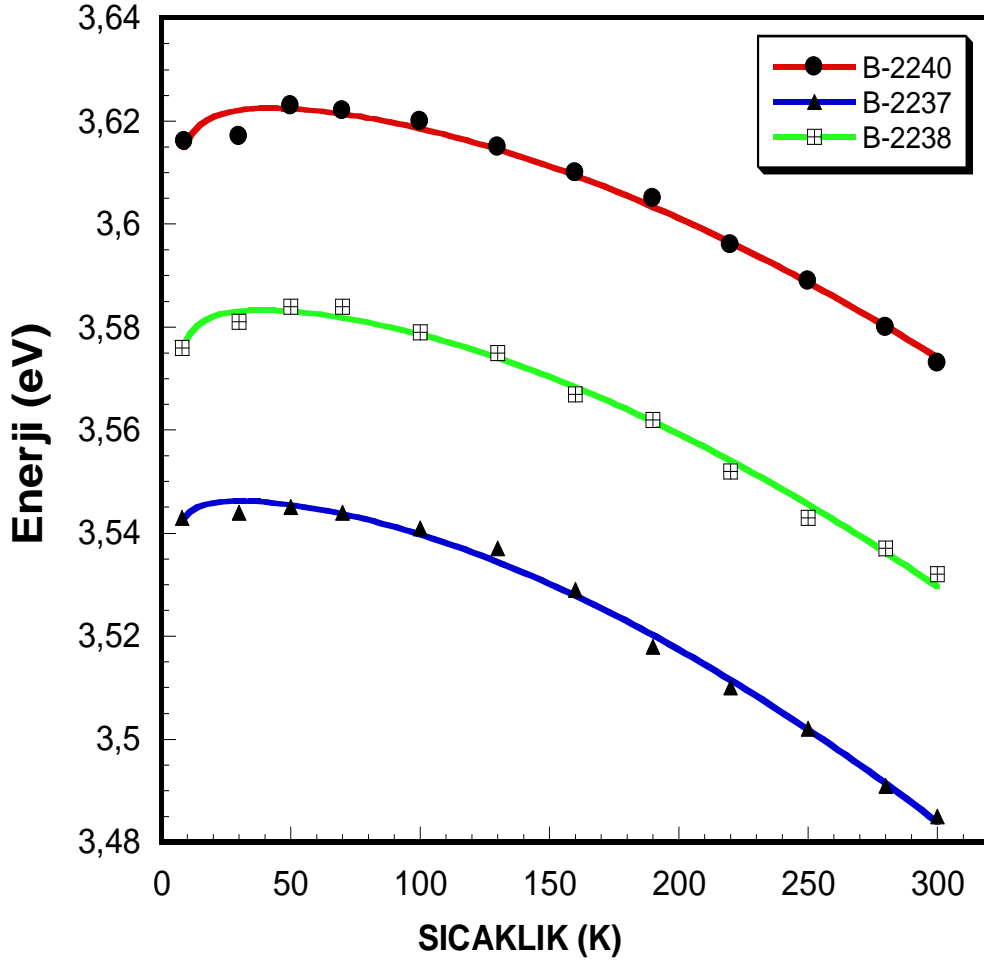
Bu bölümde PL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlerden kuantum kuyularına ait ana pikin tepe enerji değerlerinin, bunların şiddetlerinin ve yarı genişliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri detaylı olarak incelenecektir.

#### 3.3.1 Enerji Pik Pozisyonlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Sıcaklık arttığı zaman atomların hareketliliği artar ve genleşmelerine yol açar. Bu etki materyalin genleşme katsayısı ile ilgilidir. Harmonik etkilere ek olarak artık harmonik olmayan etkilerde örgüdeki atomu etkilemeye başlar ve denge konumundan sapmalara sebep olur. Bunun sonucunda atomlar birbirinden uzaklaşır ve elektronların gördüğü potansiyel azalır. Bu durum bant aralığında bir azalmaya sebep olur ve bunun göstergesi olarak optiksel geçişlerin pik pozisyonlarında bir kıvrıma kayma gözlenir [37]. Yani herhangi bir tuzanın ve yerleşmiş durumların olmadığı ideal çoklu kuantum kuyulu yapılarda PL pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi Varshni denkleminin uygun hareket eder [38]. Fakat bu çalışmada incelediğimiz  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyulu yapıların literatürde enerji pik pozisyonlarının sıcaklığa bağlı değişimleri incelendiğinde Varshni denkleminin uygun olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla kuantum kuyusuna ait pik emisyon enerjisi sıcaklığa bağımlı olarak S-tipi diye adlandırılan davranış sergiler. Bu etki, nicel olarak bariyer tabakasındaki alaşım düzensizliğinin neden olduğu bant kuyruğu ve/veya eksiton popülasyon dağılımından kaynaklanmaktadır [34]. Bant kuyruğu durumları literatürde çoğu zaman yerleşme olarak da değerlendirilmektedir [39]. Bu mekanizmaların enerji pik pozisyonlarına olan etkileri, Varshni denkleminin üçüncü bir terimin eklenmesiyle elde edilen ampirik denklemle karakterize edilir.

$$E(T) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} - \frac{\sigma^2}{k_B T} \quad (3.1)$$

$E(0)$ ,  $T=0K$ 'de geçiş enerjisidir.  $\alpha \rightarrow dE/dT$  ( $T \rightarrow \infty$ ) olup, enerjinin sıcaklıkla değişimidir ve  $\beta \rightarrow \Theta$  Debye sıcaklığıdır. Denklemdaki üçüncü terim ise  $\sigma$  potansiyel dalgalanmalarda ki standart sapmadır ve alüminyum konsantrasyonuna bağlı yerleşme etkisinin bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir. Fit denkleminde  $E(0)$ ,  $\beta$  ve  $\sigma$  serbest parametre olarak seçilmiştir.  $\alpha$  değeri ise sabit 0.97 meV/K olarak alınmıştır.



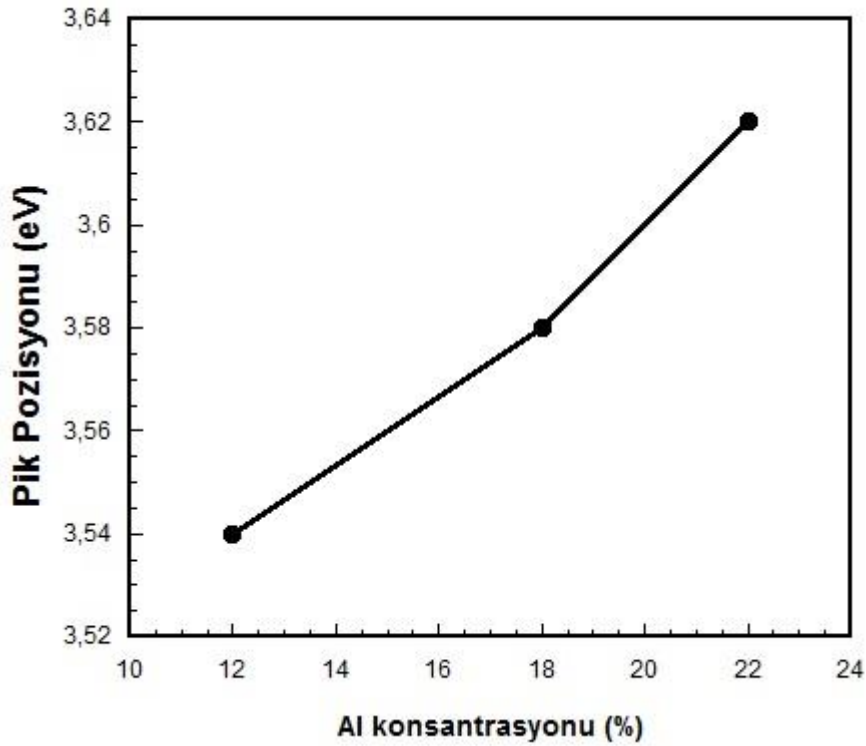
**Şekil 3.8:** B2237, B2238 ve B2240 numunelerine ait çoklu kuantum kuyuları için pik pozisyonunun sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 3.8'de B2237, B2238, ve B2240 numunelerinde  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyularına ait optiksel geçişin pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi numunelere ait yayılım için gözlenen kayma düşük sıcaklıklarda Varshni denkleminde göre beklenen enerji aralığının



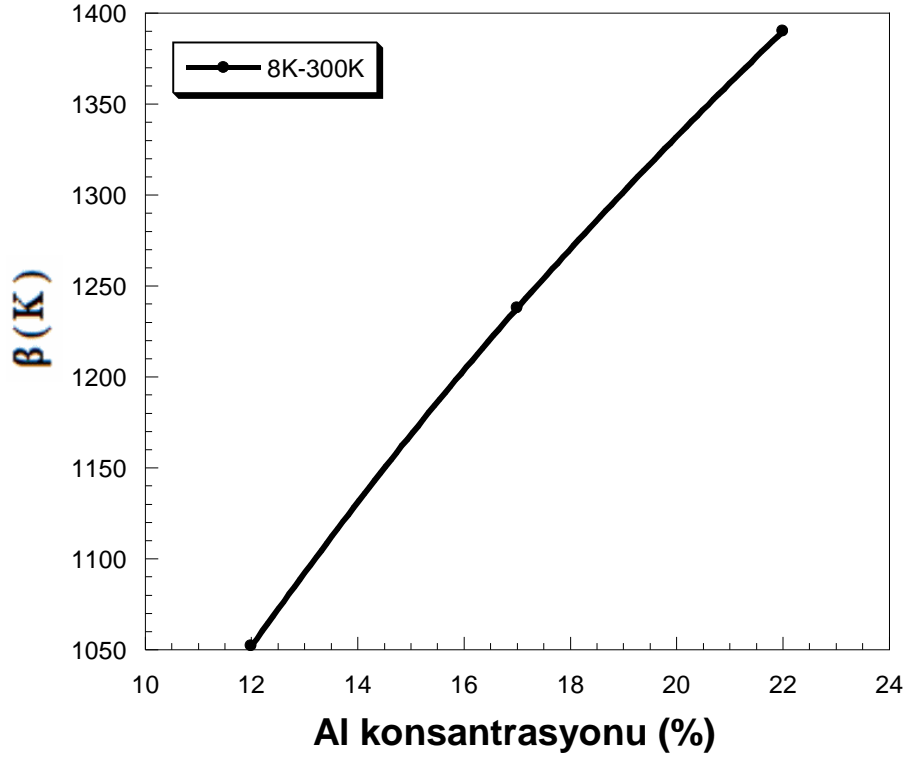
sıcaklığa bağı olarak daralması ile uyumlu değildir. Alaşım bozukluğunun neden olduğu potensiyel dalgalanmalardan dolayı, B2237 numunesinde 8-70 K sıcaklıkları arasında 2 meV, B2238 numunesinde 8 meV ve B2240 numunesinde ise 7 meV değerlerinde çok küçük maviye kaymalar gözlenmektedir. InGaN tabanlı yapılarda bu değerler çok daha büyük olmaktadır. 70 K sıcaklıktan itibaren sıcaklığın artması ile örgü genişlemesinden ve elektron-fonon etkileşiminden dolayı beklenildiği gibi bant aralığında B2237 numunesinde 60 meV, B2238 numunesinde 52 meV, B2240 numunesinde ise 50 meV değerinde kızıla kayma gözlenmiştir.

Şekil 3.9'da kuantum kuyularına ait pik pozisyonlarının Al oranlarına göre değişimi gösterilmektedir. Al oranı arttıkça beklenildiği gibi kuantum kuyusu enerji seviyelerinin yükselmesi sonucu daha yüksek enerjili geçişler gözlenmiştir.

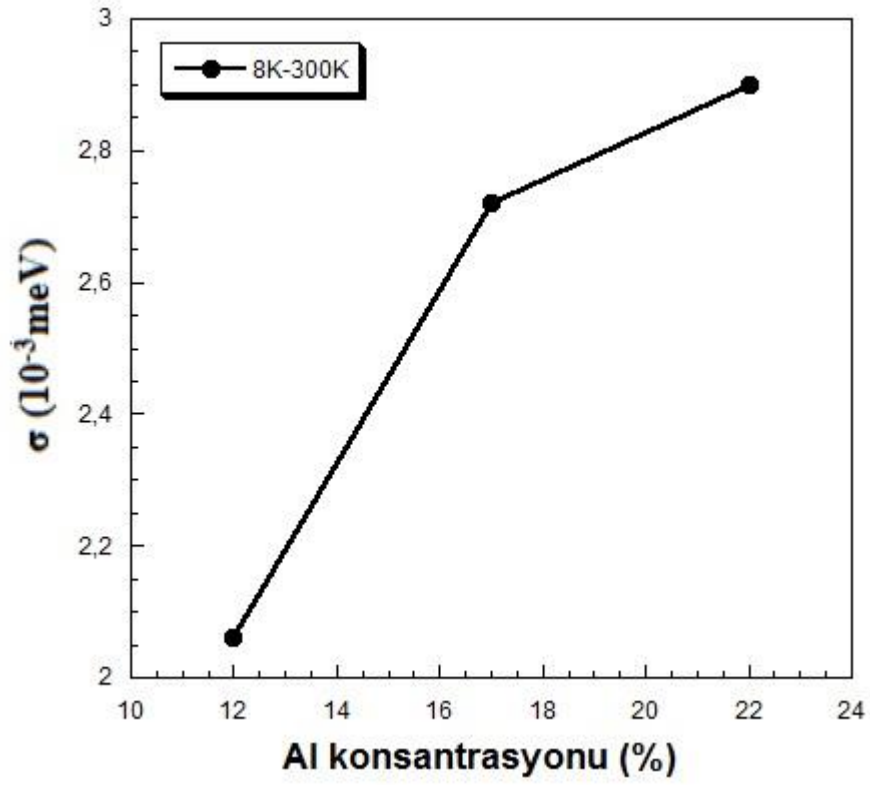


**Şekil 3.9:** Kuantum kuyularına ait pik pozisyonlarının Al oranlarına göre değişimi

Şekil 3.10'da kuantum kuyularına ait  $\beta$  değerinin Al oranlarına göre değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Debye sıcaklığı bariyer tabakasında Al oranı arttıkça artmaktadır.



Şekil 3.10:  $\beta$  değerinin Al oranına göre değişimleri



Şekil 3.11:  $\sigma$  değerinin Al oranına göre değişimi

Şekil 3.11’de kuantum kuyularına ait  $\sigma$  değerinin Al oranlarına göre değişimi gösterilmektedir. Al oranı arttıkça bant kuyruğu durumlarının veya başka bir deyişle yerelleşme etkisinin artmasından dolayı beklendiği gibi  $\sigma$  değeri alaşım oranı ile artmaktadır.

### 3.3.2 Gözlenen Geçişlerin Yarı Genişlik Değerlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Optiksel geçişlere ait yarı genişlik değerlerinin sıcaklıkla değişimini karakterize etmek için (3.2) numaralı denklem kullanılmıştır.

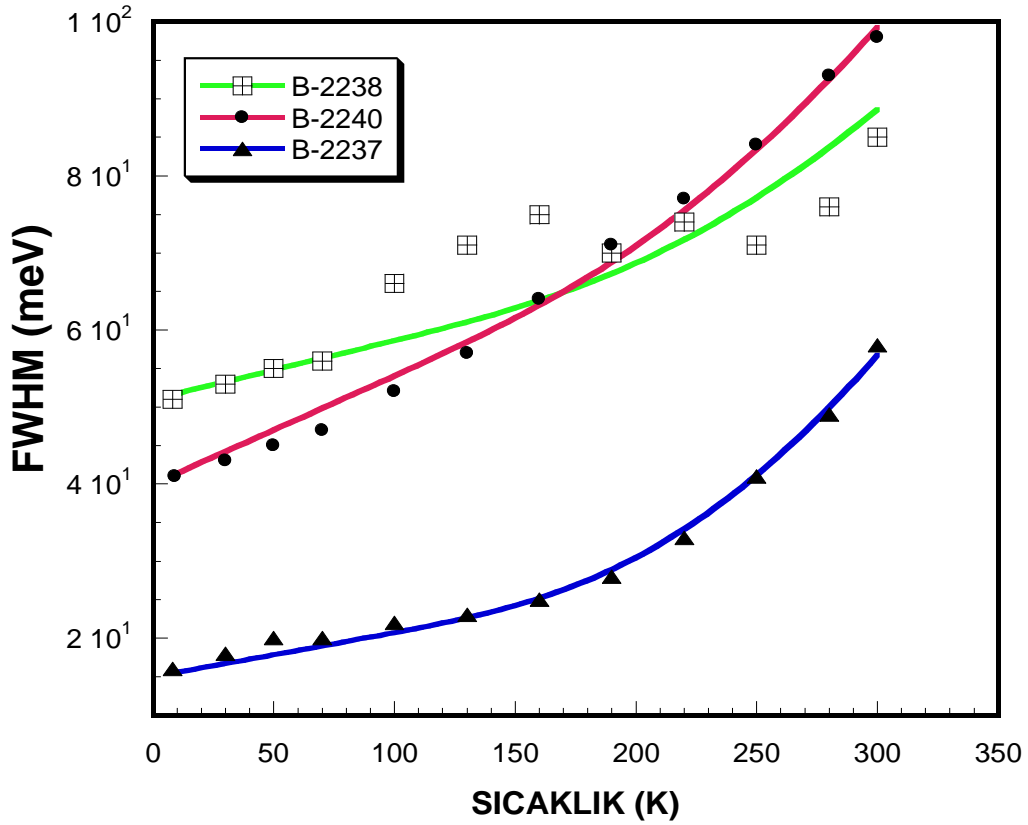
$$\Gamma(T) = \Gamma(0) + \gamma_{fon}T + \frac{\Gamma_{LO}}{\exp(E_{LO}/k_B T) - 1} \quad (3.2)$$

$\Gamma(0)$ , safsızlık, dislokasyon, yüzey saçılmaları, elektron-elektron etkileşimleri gibi sıcaklıktan bağımsız mekanizmaların sebep olduğu genişlemeyi göstermektedir. Çok düşük sıcaklıklarda fononlar aktif değildir ve çizgi genişliğine katkı esasen homojen olmayan genişlemedendir.  $\gamma_{fon}T$  homojen genişlemedir ve akustik fonon saçılmasından kaynaklanır.  $\gamma_{fon}$  eksiton-akustik fonon örtüşme gücüdür.  $\Gamma_{LO}$  da homojen genişlemedir, boyuna optik (LO) fonon saçılmalarından kaynaklanır ve eksiton-LO fonon örtüşme gücünü gösterir.  $E_{LO}$  ise boyuna optik fononların enerjisidir.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında akustik fononların 120 K sıcaklığına kadar etkisi gözlenirken LO fononlardan gelen katkı oda sıcaklığına kadar devam etmektedir. 120-140 K sıcaklığından sonra LO fononlar çizgi genişliğinde keskin bir şekilde artmaya sebep olur. 200 K den sonra ise LO fononlar akustik fononlara göre daha baskın olurlar [40].

Şekil 3.12’de B2237, B2238 ve B2240 numunelerinde  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyularına ait geçişte çizgi genişliğinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Grafiklerde gözlenen genişleme sıcaklıktan bağımsız genişleme ve eksitonların optik ve akustik fononlar ile etkileşmelerinden kaynaklanan genişlemedir. B2237, B2238 ve B2240 numuneleri için fit grafiklerine bakıldığında B2237 numunesinde yaklaşık 130 K sıcaklığa kadar lineer artış ve daha sonraki

sıcaklıklarda üstel bir artış, B2238 numunesinde yaklaşık 70 K sıcaklığa kadar lineer artış ve daha sonraki sıcaklıklarda üstel bir artış, B2240 numunesinde 100 K'e kadar lineer artış ve daha sonraki sıcaklıklarda üstel bir artış gözlenmektedir. Düşük sıcaklıklarda gözlenen durum akustik fonon etkileşimi yüksek sıcaklıklarda ise optik fonon etkileşimi göstermektedir. Çoklu kuantum kuyularına ait optiksel geçişlerin yarı genişlik değişimini incelemek için (3.2) fit denklemi kullanılmıştır.



Şekil 3.12: B2237, B2238 ve B2240 numunelerine ait çoklu kuantum kuyularına ait FWHM değişimi

Tablo 3.2: B2237, B2238 ve B2250 numuneleri elde edilen FWHM fit parametre değerleri

| Numune Kodu | $\gamma_{fon}(meV K^{-1})$ | $\Gamma_{LO}(meV)$ |
|-------------|----------------------------|--------------------|
| B2237       | 0.056                      | 833                |
| B2238       | 0.076                      | 500                |
| B2250       | 0.140                      | 579                |

Numunelerin (3.2) numaralı denklem kullanılarak elde edilen fit parametre değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu çalışmada  $E_{LO}$  değeri sabit 91.7 meV olarak alınmıştır.

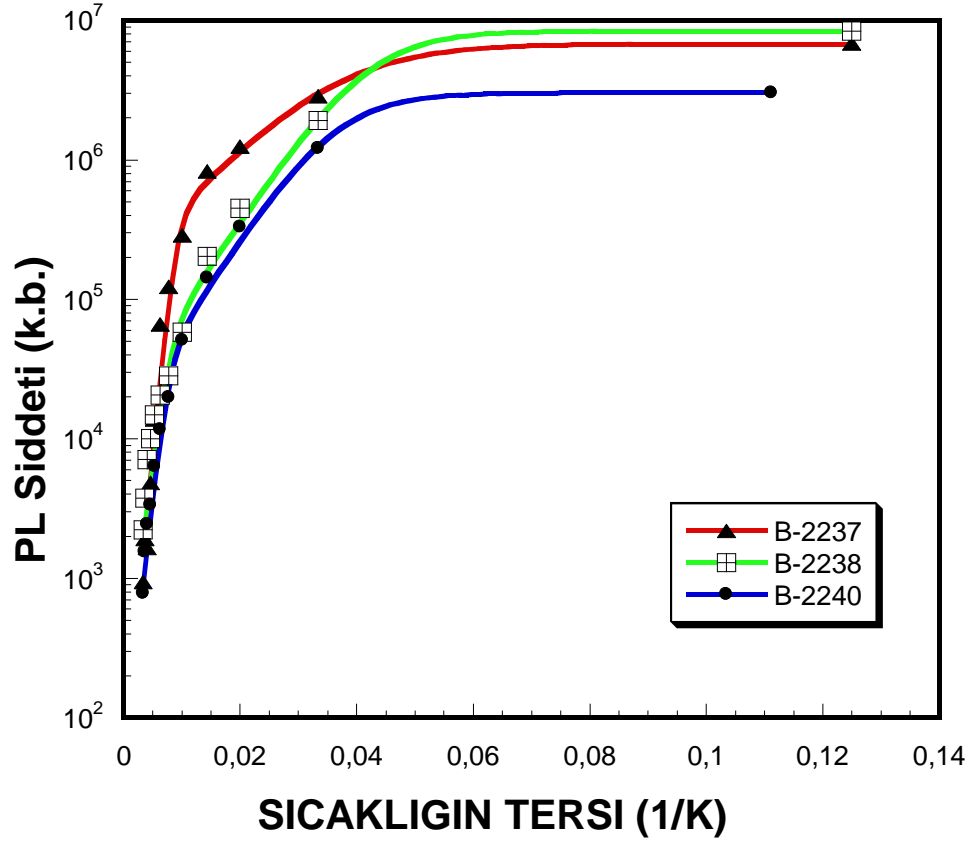
### 3.3.3 Pik Şiddetlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Kuantum kuyusundan kaynaklanan geçişlere ait olan piklerin şiddetlerinin sıcaklıkla değişimini incelemek için kullandığımız fit denklemi aşağıdaki (3.3) numaralı çift-üstel fonksiyona sahip denklemdir.

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{k_B T}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{k_B T}\right)} \quad (3.3)$$

$I(T)$  ve  $I(0)$  sırasıyla  $T$  ve  $0$  K’deki emisyon şiddetleridir. Sıcaklık arttığı zaman, elektronlar rekombine oldukları bölgelerden farklı aktivasyon enerjileri ile ayrılarak ışımsal olmayan geçişlere katılırlar ve ışımsal geçişlerin verimliliği azalır. Buradaki  $E_1$  ve  $E_2$  ışımsal olmayan geçiş merkezlerini temsil eden aktivasyon enerjisidir. Kuantum kuyusunun termal sönümü ışımsal olmayan iki farklı süreç halinde açıklanmaktadır.  $E_1$  düşük sıcaklıklarda etkin olan potansiyel dalgalanmalardan kaynaklanan eksitonların termal delokalizasyonlarını açıklar, kuyu genişliği arttıkça azalır;  $E_2$  ise yüksek sıcaklıklarda etkin olan eksitonların sınırlı durumlardan serbest durumlara geçmesini sağlayan termal uyarılma olarak açıklanır, kuyu genişliği arttıkça artar [34].  $A_1$  ve  $A_2$  sabiti ise ışımsal olmayan merkezlerin sayısı gibi düşünülebilir ve  $k_B$  Boltzman sabitidir.

Şekil 3.13’te B2237, B2238 ve B2240 numunelerinde  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyularına ait geçişte gözlenen kuantum kuyusundan kaynaklanan PL şiddetindeki değişim gösterilmektedir. Düşük sıcaklıklarda etkin olan  $E_1$  B2237, B2238 ve B2240 numunelerinde sırasıyla yaklaşık olarak 8.61 meV, 12.39 meV ve 12.90 meV civarında, yüksek sıcaklıklarda etkin olan  $E_2$  ise B2237, B2238 ve B2240 numunelerinde sırasıyla yaklaşık 84.4 meV, 68.9 meV ve 77.5 meV değerindedir.



Şekil 3.13: B2237, B2238 ve B2250 numuneleri için kuantum kuyusuna ait PL şiddeti değişimi

## 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, metal-organik buhar depolama tekniği ile safir alttaşın üzerine büyütülen,  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyulu yapılar incelenmiştir. B2237, B2238 ve B2240 olarak adlandırdığımız örneklerin optik özelliklerini incelemek için kararlı-hal (*steady-state*) fotoluminesans ölçüm tekniği kullanılmıştır.

İlk olarak numunelerin 8 K sıcaklığında 266 nm ve 325 nm dalgaboylu lazer ile uyarılarak alınan PL spektrumlarında gözlenen piklerin orijinleri belirlendi. Daha sonra 8-300 K sıcaklıkları arasında PL spektrumların sıcaklık davranışları incelendi.

Numunelerin PL spektrumlarında gözlenen  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin, çizgi genişliğinin ve şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelendi.

Numunelerin sıcaklığa bağlı PL ölçümleri alındığında  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin, literatürdeki ölçüm sonuçlarına benzer şekilde InGaN örneklerde çok daha belirgin olan S-tipi bir davranış gösterdiği görüldü. Bu davranış, nicel olarak bariyer tabakasındaki alaşım düzensizliğinin neden olduğu bant kuyruğu ve/veya eksiton popülasyon dağılımından kaynaklanmaktadır.

Fit denkleminde kullanılan  $\alpha$  değeri sabit tutularak (incelenen örneklerin Al oranları 0.12-0.22 arasında olduğundan) bariyer tabakasının Al oranının  $E(0)$ ,  $\beta$  ve  $\sigma$  parametreleri üzerine olan etkileri araştırıldı. Bu parametreler Al atomlarının AlGaN alaşımına katılma oranı ile yakından ilişkilidir. Al oranı arttıkça bu parametrelerin artması beklenir. Bu çalışmada beklenildiği gibi Al oranı arttıkça  $E(0)$ ,  $\beta$  ve  $\sigma$  değerlerinin arttığı gözlemlendi.

Benzer şekilde  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  kuantum kuyularından kaynaklanan PL piklerinin şiddetleri sıcaklık değişimi çift aktivasyon enerjili ampirik denklem kullanılarak incelendi ve her üç örneğinde farklı sıcaklık aralıklarında etkin olan iki farklı ışınal olmayan geçiş merkezine sahip olduğu gözlenmiştir. Düşük sıcaklık aktivasyon enerji aralığı 8-13 meV arasında ile yüksek sıcaklık aktivasyon enerjileri 70-85 meV civarında bulunmuştur. Burada düşük sıcaklık aralığındaki aktivasyon

enerjisi alaşım oranı ile artarken yüksek sıcaklık aktivasyon enerjisinde herhangi bir korelasyon gözlenmemiştir.

Ana geçişe ait pikin yarı genişlik (FWHM) değerlerinin sıcaklıkla değişimi homojen ve homojen olmayan genişleme mekanizmaları ile değerlendirildiğinde her üç örnek içinde düşük sıcaklıklarda akustik fonon, yüksek sıcaklıklar da ise optik fonon saçılmalarının baskın olduğu gözlenmiştir. Fakat bariyerdeki Al alaşım oranına bağlı bir korelasyon belirlenememiştir.

Sonuç olarak, incelenen numunelerin optiksel kalitesinin yeterli düzeyde olmaması nedeniyle  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik şiddetleri, pik enerjileri ve yarı genişlikleri ile ilgili bulunan parametrelerin bir kısmı literatür değerlerinden farklılık göstermektedir. Daha sağlıklı ve literatür ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için büyütölen örneklerin kalitesinin arttırılması gerekmektedir. Ayrıca, ileriki çalışmalarda benzer örneklerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonları yapılarak örneklerin bu özelliklerinin optiksel süreçler ile karşılaştırılması ve varsa bir korelasyonun bulunması mümkün olacaktır. Sonuç olarak yapılan bu çalışma ile teknoloji önemi büyük olan nitrür ailesinden  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyulu yapılarda Al oranının optiksel özellikler üzerine olan etkisini kararlı-hal fotoluminesans tekniği ile literatür ışığı altında incelenmiştir.



## 5. KAYNAKLAR

- [1] Sendill Gnanaeswaran, B.E, “Study of energy band diagrams of group III nitride Heterostructures”, Master Thesis, *Texas Tech University*, Texas, (2003).
- [2] Lai, C.Y., Hsu, T.M., Chang, W.-H. and Tseng, K.U., “Direct measurement of piezoelectric field in  $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}/\text{GaN}$  multiple quantum electrotransmission spectroscopy”, *J. Appl.Phys.*, 91, 531, (2002).
- [3] Teke, A., and Morkoç, H., “Group III Nitrides”, in *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, ed. Kasap, S., and Capper, P., Springer Science+Business Media,Inc., Part D Materials for Optoelectronic and Photonics, 753, (2006).
- [4] Bernardi, F. and Fiorentini, V., “Macroscopic polarization and band offsets at nitride heterojunctions”, *Phys. Rev. B*, 57, R9427, (1998).
- [5] Craven, M.D., Waltereit, P., Wu, F., Speck, J.S., DenBaars S.P., ‘Characterization of a-plane  $\text{GaN}/(\text{Al,Ga})\text{N}$  multiple quantum wells grown via metal organic vapor deposition’, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, L235, (2003).
- [6] Chakraborty, A., Keller, S., Meier, C., Haskell B.A., Keller S., Waltereit, P., DenBaars S.P., Nakamura, S., Speck J.S., and Mishra U.K., ‘ Properties of nonpolar a-plane  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  multiple quantum wells grown on lateral epitaxially overgrown a-plane  $\text{GaN}$ ’ *Appl. Phys. Lett.*, 86, 031901, (2005).
- [7] Chen, C., Shatalov, M., Kuokstis, E., Adivarahan, V., Gaevski, M., Rai, S., Asif Khan, M., ‘Optically Pumped Lasing at 335 nm Using Non-polar a-plane  $\text{AlGaIn}$  Multiple Quantum Wells over r-plane Sapphire’, *Jpn. J Appl. Phys.*, 43, 1099, (2004).

- [8] Chen, Z., Lu, D.C., Wang, X., Han, P., Wang, D., Yuan, H., Wang, Z., Li, G., and Fang, Z., ‘‘Luminescence study of (11-20) GaN film grown by metalorganic chemical-vapor deposition’’, *J. Appl. Phys.* 93, 316, (2003).
- [9] Yu, H.B., Chen, H., Li, D., Han, Y.J., Zheng, X.H., Huang, Q., Zhou, J.M., ‘‘Photoluminescence study of Si-doped (11-20) a-plane GaN grown on (1-102) r-plane sapphire by metalorganic chemical vapor deposition’’, *J. Cryst. Growth*, 263, 94, (2004).
- [10] Paskova, T., ‘‘Nitrides with nonpolar surfaces: Growth, Properties and Devices’’, *Wiley-VCH*, 33, (2008).
- [11] Waltereit, P., Brandt, O., Trampert, A., Grahn, H.T., Menniger, J., Ramsteiner, M., Reiche, M., Ploog, K.H., ‘‘ Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes’’, *Nature*, 406, 865, (2000).
- [12] Ng, H.M., ‘‘Molecular-beam epitaxy of GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N multiple quantum wells on R-plane (10-12) sapphire substrates’’, *Appl. Phys. Lett.*, 80, 4369, (2000).
- [13] Kuokstis, E., Chen, C.Q, Gaevski, M.E., Sun, W.H., Yang, J.W., Simin, G., Khan, M.A., Maruska, H.P., Hill, D.W., Chou, M.C., Gallagher, J.J., Chai, B., ‘‘Polarization effects in photoluminescence of C- and M-plane GaN/AlGa<sub>N</sub> multiple quantum wells’’, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 4130, (2002).
- [14] Craven, M.D., Waltereit, P., Speck, J.S., DenBaars, S.P., ‘‘Well-width dependence of photoluminescence emission from a-plane GaN/AlGa<sub>N</sub> multiple quantum wells’’, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 496, (2004).
- [15] Zilko, J.L., ‘‘Metallo-Organic CVD Technology and Equipment,’’ in *Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques*, edited by Shuegraf, K.K., Noyes Publications, Park Ridge, NJ (1988).
- [16] Burgraaf, P., ‘‘The Status of MOCVD Technology’’, *Semiconductor International*, 80, 83, (1993).

- [17] Kocan, M., “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MBE 2DEG Heterostructures: Interplay between Surface, Interface-, and Device-Properties”, Ph.D. Thesis, *Pondicherry University*, Pondicherry, (2003).
- [18] Manasevit, H., “Single-Crystal Gallium Arsenide on Insulating Substrates”, *Appl. Phys. Lett.*, 12 (4), 156-159, (1968).
- [19] Manasevit, H. And Simpson, W. I., “The Use of Metalorganics in the Preparation of Semiconductor Materials: I. Epitaxial Gallium-V Compounds”, *J. Electrochem. Soc.*, 116 (12), 1725-1732, (1969).
- [20] Manasevit, H., Erdmann, F. M. And Simpson, W. I., “The Use of Metalorganics in the Preparation of Semiconductor Materials: IV. The Nitrides of Aluminum and Gallium”, *J. Electrochem. Soc.*, 118 (11), 1864-1868, (1971).
- [21] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. And Toyoda, Y., “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality Ga<sub>N</sub> film using an AlN buffer layer”, *Appl. Phys. Lett.*, 48 (5), 353-355, (1986).
- [22] Amano, H., Akasaki, I., Kozawa, T., Hiramatsu, K., Sawaki, N., Ikeda, K. And Ishii, Y., “Electron beam effects on blue luminescence of zinc-doped Ga<sub>N</sub>”, *J.Lum.*, 40-41, 121-122, (1988).
- [23] Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K. And Akasaki, I., “P-Type Conduction in Mg-Doped Ga<sub>N</sub> Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28 (12), L2112-L2114 (1989).
- [24] Nakamura, S., “Ga<sub>N</sub> Growth Using Ga<sub>N</sub> Buffer Layer”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30 (10A), L1705-L1707, (1991).
- [25] Wickenden, D., Kistenmacher, T., Bryden, W., Morgan, J. And Wickenden, A. E., “The Effect of Self-nucleation Layers on the MOCVD Growth of Ga<sub>N</sub> on Sapphire”, *Heteroepitaxy of Dissimilar Materials Symposium*, Anaheim - California, 167–172, (1991).

- [26] Nakamura, S., Mukai, T. And Senoh, M., “Candela-class high-brightness InGaN/AlGa<sub>N</sub> double-heterostructure blue-light-emitting diodes”, *Appl. Phys.Lett.*, 64 (13), 1687-1689, (1994).
- [27] Cebe S., “Ga<sub>N</sub> yarıiletken ince filmlerin optik özelliklerinin fotoluminesans tekniği ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2004).
- [28] Razeghi, M., “Optoelectronic devices based on III–V compound semiconductors which have made a major scientific and technological impact in the past 20 years”, *IEEE J.Select. Topics Quant. Electron.*, 6, 1344-1354, (2000).
- [29] Stengel, F., Mohammad, S. N. And Morkoç, H., “Theoretical investigation of electrical characteristics of Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> modulation doped field-effect transistors”, *J. Appl. Phys.*, 80 (5), 3031-3042, (1996).
- [30] Khan, M. A., Bhattarai, A., Kuznia, J. N. And Olson, D. T., “High electron mobility transistor based on a Ga<sub>N</sub>-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterojunction”, *Appl. Phys. Lett.*, 63 (9), 1214-1215, (1993).
- [31] Lişesivdin, S. B., “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> temelli yüksek elektron hareketlilikli transistörlerin (hemt) elektron ve manyeto iletim özellikleri”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2008).
- [32] 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 low-dimensional systems”, *Localization versus quantum-confined stark effect*, *Physica Status Solidi b: Basic Research*, 228(1), 65–72, (2001).
- [33] Smith, M., Chen, G.D., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Salvador, A., Sverdlov, B.N., Botchkarev, A., Morkoç, H. and Goldenberg, B. (1996), *Applied Physics Letters*, 68, (1883).

- [34] Morkoç, H., ‘*Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*’, Vol. 2: Electronic and Optical Processes in Nitrides, Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, (2008).
- [35] Burgraaf, P., “The Status of MOCVD Technology”, *Semiconductor International*, 80–83, (1993).
- [36] Gfroerer Timothy H. “Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces”, *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 9209–9231, (2000).
- [37] Can, N., “GaN Temelli Heteroeklem ve Kuantum Yapıların Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2011).
- [38] Bayrak, T.S., ‘*AlInGaN Tabanlı Yüksek Verimli Mor Ötesi Işık Saçan Diyotlar*’, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2010).
- [39] Bell A., Srinivasan S., Plumlee C., Omiya H., Ponce F. A. “Exciton freeze-out and thermally activated relaxation at local potential fluctuations in thick  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  layers” *J. Appl. Phys.* 95, 4670, (2004).
- [40] N. Nepal, J. Li, M. L. Nakarmi, J. Y. Lin, and H. X. Jiang “Temperature and compositional dependence of the energy band gap of AlGaN alloys” Department of Physics, *Kansas State University*, Manhattan, Kansas 66506-2601, (2005).
- [41] Viswanath, A.K., Lee, J.I., Kim, D., Lee, C.R and Leem, J.Y, ‘*Exciton-phonon interactions, exciton binding energy, and their importance in the realization of room-temperature semiconductor lasers based on GaN*’, *Phys. Rev. B*, 58, 16334, (1998).