

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

**POLAR VE POLAR OLMAYAN DOĞRULTULARDA BÜYÜTÜLEN GaN  
TABAKALARIN OPTİK ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nuri CAN**

**Balıkesir, Temmuz-2011**

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

**POLAR VE POLAR OLMAYAN DOĞRULTULARDA BÜYÜTÜLEN GaN  
TABAKALARIN OPTİK ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nuri CAN**

**Balıkesir, Temmuz-2011**

T.C  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI

POLAR VE POLAR OLMAYAN DOĞRULTULARDA BÜYÜTÜLEN GaN  
TABAKALARIN OPTİK ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nuri CAN


Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali TEKE

Sınav Tarihi : 11.07.2011

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali TEKE

Prof. Dr. Rifat ÇAPAN

Doç. Dr. Neşet DEMİRCİ



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

Balıkesir, Temmuz-2011

## ÖZET

### **POLAR VE POLAR OLMAYAN DOĞRULTULARDA BÜYÜTÜLEN GaN TABAKALARIN OPTİK ÖZELLİKLERİ**

**Nuri CAN**

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

**(Yüksek Lisans / Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali TEKE)**

**Balıkesir, 2011**

Bu çalışmada, biri polar diğeri ise polar olmayan doğrultularda büyütülen GaN tabakaların optik özellikleri incelenmiştir. GaN tabakalar Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama tekniği ile safirin c- ve a- düzlemleri üzerine büyütülmüştür. Yapıların optik özelliklerini incelemek için Kararlı-Hal Fotoluminesans tekniği kullanılmıştır. Her iki örneğin 8 K fotoluminesans (FL) spektrumlarında eksitonik geçişlere ek olarak safsızlıklara ve yerel kusurlara bağlı geçişlerde gözlenmiştir. Ayrıca, GaN ve alt taş arasındaki termal genişleme katsayısı ve örgü uyumsuzluğunun sebep olduğu GaN filmlerdeki yerel zorlamalardan dolayı enerji pozisyonlarında maviye kayma gözlenmiştir. Düşük sıcaklık spektrumlarında gözlenen farklı emisyon bantlarının doğasını netleştirmek için fotoluminesans ölçümleri 8-300 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. Gözlenen optik geçişlerin pik enerjileri, şiddetleri ve çizgi genişlikleri sıcaklığın fonksiyonu olan ampirik fit denklemleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen fit parametreleri literatürde kabul görmüş mevcut çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, incelenen her iki örneğin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumları benzer özellikler göstermiş olup, literatürde yapılan çalışmalar ile uyum içinde oldukları tespit edilmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** GaN, fotoluminesans, eksiton, optoelektronik, LED, fotodetektör, güneş pili.

## **ABSTRACT**

### **OPTICAL PROPERTIES OF GaN LAYERS GROWN ON POLAR AND NONPOLAR DIRECTIONS**

**Nuri CAN**

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

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

**Balıkesir, 2011**

In this work, GaN layers grown on polar and nonpolar directions are investigated. The layers were grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition on c- and a-plane sapphire substrates. Steady-State Photoluminescence technique was used to characterize optical properties of the structures. In both samples, similar emission lines related to impurities and native defects in addition to excitonic transitions were observed in 8 K Photoluminescence (PL) spectra. Moreover, blue-shift in energy position were observed due to residual strain in GaN films induced by the mismatch of lattice constants and thermal expansion between GaN epitaxial layers and substrates. In order to clarify the nature of the different emission bands in the whole spectra, temperature dependence of PL measurements was carried out between 8 and 300 K. The temperature behavior of PL peak energy, peak intensity and full width at half maximum were analysed with fit equations. Fit parameters obtained from fit equations were compared with literature and confirmed that fit values are in a good agreement with those studies.

**KEYWORDS:** GaN, Photoluminescence, exciton, optoelectronics, LED, photodetector, solar cell.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SEMBOL LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GALYUM NİTRÜR ( GaN ) .....</b>	<b>5</b>
2.1 Kristal Yapısı .....	5
2.2 Polarizasyon .....	8
2.3 Alt Taşlar .....	11
2.3.1 Safir ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	11
2.4 Stark Etki .....	14
<b>3. OPTİKSEL ÖZELLİKLER .....</b>	<b>16</b>
3.1 Fotolüminesans .....	16
3.2 Optiksel Geçişler .....	18
3.3 GaN Yarıiletkeninde Gözlenen Optiksel Geçişler .....	19
3.3.1 Serbest Eksiton Geçişleri ( FE ) .....	19
3.3.2 Bağlı Eksiton Geçişleri ( DBE ve ABE ) .....	23
3.3.3 Alıcı-Verici Çifti Geçişler ( DAP ) .....	27
3.3.4 Kusurlara Bağlı Geçişler .....	28
3.3.4.1 Mavi Lüminesans Bandı .....	30
3.3.4.2 Sarı Lüminesans Bandı .....	30
<b>4. DENEYSEL YÖNTEMLER .....</b>	<b>35</b>
4.1 Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama ( MOCVD ) Tekniği .....	35
4.2 Kararlı-Hal Fotolüminesans Tekniği .....	37

<b>5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR</b> .....	<b>40</b>
5.1 Numunelerin Yapısı .....	40
5.2 Fotolüminesans Ölçümler.....	41
5.2.1 A Numunesi.....	41
5.2.2 B Numunesi.....	45
5.3 Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümler ve Analizleri .....	48
5.3.1 Enerji Pik Pozisyonlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimleri .....	48
5.3.2 Gözlenen Geçişlerin Yarı Genişlik Değerlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri .	52
5.3.3 Pik Şiddetlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri.....	57
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>66</b>
<b>KAYNAKÇA</b> .....	<b>68</b>

## SEMBOL LİSTESİ

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Adı</u></b>	<b><u>Tanımı/Değeri</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
$\epsilon$	Dielektrik sabiti		$\text{Fm}^{-1}$
$\mu$	Mobilite		$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
$e$	Elektron yükü	$1,6 \times 10^{-19}$	C
$k_B$	Boltzman sabiti	$1,38 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
$E_g$	Enerji bant aralığı		eV
$k$	Elektron dalga vektörü		$\text{m}^{-1}$
$m^*$	Elektronun etkin kütlesi		kg
$\hbar$	İndirgenmiş Planck sabiti	$1,054 \times 10^{-34}$	J s
$\kappa$	Isıl iletkenlik		$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$
$R_H$	Hidrojen Rydberg sabiti	$1,097 \times 10^7$	$\text{m}^{-1}$
$\tau$	Yaşam ömrü		s
$P_{KP}$	Kendiliğinden polarizasyon		$\text{C m}^{-2}$
$P_{PE}$	Piezoelektrik polarizasyon		$\text{C m}^{-2}$



## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>	<u>Şekil Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.1	(a) Wurtzite, (b) Zincblende ve (c) NaCl ( kaya tuzu ) yapıların şematik gösterimi	5
Şekil 2.1.2	(a) [0001] (b) [11-21] (c) [10-10] doğrultularına sahip Wz GaN	6
Şekil 2.1.3	Wurtzite GaN yapısının şematik gösterimi ( $a$ , $c$ ve $u$ örgü parametreleri, $b$ ( = $uc$ ) en yakın komşu uzaklığı, $b'_1$ , $b'_2$ , $b'_3$ üç tip ikinci yakın komşu uzaklığı , $\alpha$ ve $\beta$ atomlar arası açığı ifade etmektedir)	7
Şekil 2.2.1	Ga-yüzlü ve N-yüzlü GaN wurtzite kristal yapısının şematik gösterimi	8
Şekil 2.2.2	Düzlem içinde homojen polarizasyona sahip Ga- ve N- polar tetrahedron GaN'ın top ve çubuk gösterimi. Ga-polar için net polarizasyon [0 0 0 1] yönünde iken N-polar için [0 0 0 -1] doğrultusundadır [16]	9
Şekil 2.2.3	GaN tabakaların şematik gösterimi ve birim alandaki dipol momentler	10
Şekil 2.3.1	Safirin [0001] doğrultusu boyunca (a) rhombohedral ve (b) hekzagonal biri hücre gösterimi	12
Şekil 2.3.2	Termal genleşme katsayıları ve örgü sabitleri farkından kaynaklanan zorlama	12
Şekil 2.3.3	<b>(a)</b> Bazal düzlemdeki iki $O^{-2}$ iyon (büyük beyaz küreler) tabakaları arasındaki boşluklar (küçük beyaz küreler) ve $Al^{+3}$ iyonlarının siyah küreler) dizilimi. $A_1$ , $A_2$ , $A_3$ bazal düzlem için hekzagonal safirin (1 1 -2 0) öteleme vektörleri. (En üst $O^{-2}$ iyon tabakası gösterilmemekte) <b>(b)</b> $Al^{+3}$ ve $O^{-2}$ iyonlarının $c$ düzlemi doğrultusunda istiflenme şeması	13
Şekil 2.4.1	Elektrik alan varlığı ve yokluğunda kuantum kuyusunda ki soğurma	14
Şekil 2.4.2	Polar (c) ve polar olmayan (m ve a) düzlemler	15
Şekil 3.1.1	Yarı iletkenin uyarılması sonucu soğurma ve rahatlama süreci	16
Şekil 3.1.2	Işınsal (R) ve ışınsal olmayan (NR) süreçler	17
Şekil 3.2.1	Yarıiletkenin doğasında ve dış etkilerin sebep olduğu optiksel geçişler	18

Şekil 3.3.1.1	Doğrudan bir uyarılmada yaratılan eksiton (Coulomb kuvveti ile birbirine bağlanmış elektron-deşik çifti) enerji düzeyleri	19
Şekil 3.3.1.2	GaN'ın bant diyagramı ve A, B ve C Serbest Eksitonların şematik gösterimi	21
Şekil 3.3.1.3	A, B, C taban durumları ve A (n=2) eksiton pikleri	22
Şekil 3.3.2.1	Bağlı eksitonların elektronik yapısı. Nötr vericiler, nötr alıcılar ve izoelektronik kusurlar için bağlı eksiton seviyeleri ve karşılık gelen kusurun temel durumları gözükmemektedir	23
Şekil 3.3.2.2	HVPE tekniği ile büyütülmüş GaN tabakaya ait Fotolüminesans Spektrumu	24
Şekil 3.3.2.3	MOVPE ile büyütülen homoepitaksiyel GaN yapının FL spektrumu [40]. 3.466 eV'a yakın dominant ABE çizgisi ve 3.471 eV'a yakın güçlü DBE çizgisi	25
Şekil 3.3.2.4	Baskın alıcı bağlı eksitonlar ve boyuna optik (LO) fonon örtüşümü [55]	26
Şekil 3.3.4.1	GaN'da safsızlıklar ile ilişkili olan ışımsal geçişler ve istem dışı olarak tanıtılan kusurlar[63]	29
Şekil 3.3.4.2	GaN'da yerel kusurlar için (a) geçiş seviyeleri ve (b) fermi seviyesinin bir fonksiyonu olarak oluşum enerjileri [64]	29
Şekil 3.3.5.1	(a) c eksen ve (b) a eksen (düzlem) boyunca zorlamaya karşı safir ve SiC alt taşlar üzerine büyütülen GaN filmlerinde serbest eksiton enerji değişimleri [77]	34
Şekil 4.1.1	Hidrür taşıma modülü, alkali taşıma modülü ve atık hattının gösterildiği bir MOCVD reaktör iletim sisteminin şematik gösterimi [81]	35
Şekil 4.1.2	(a) Dikey ve (b) yatay olmak üzere iki farklı reaktör geometrisi	36
Şekil 4.2.1	Fotolüminesans deney düzeneği şematik gösterimi	38
Şekil 4.2.2	Spektrometre ve soğutucu ( <i>cryostat</i> )	39
Şekil 5.1.1	MOCVD tekniği ile safir alt taşın (a) c- ve (b) a- düzlemleri üzerine büyütülen GaN tabakalar	40
Şekil 5.2.1.1	A numunesi için 8 K sıcaklıkta FL spektrumu	41
Şekil 5.2.1.2	8-300 K Sıcaklık aralığında FL ölçümler	42
Şekil 5.2.2.1	B numunesi için 8 Kelvin sıcaklıkta FL spektrumu	45
Şekil 5.2.2.2	8-300 K Sıcaklık aralığında FL Ölçümler	46

Şekil 5.3.1.1	(a) A ve (b) B numunelerinde gözlenen eksitonik geçişleri için pik pozisyonu değişimi	49
Şekil 5.3.1.2	Yapısal, DAP ve mavi lüminesans geçişleri için pik pozisyonu değişimi	50
Şekil 5.3.1.3	A ve B numunesinde gözlenen sarı lüminesans bant geçişi için pik pozisyonu değişimi	51
Şekil 5.3.2.1	A numunesi için eksitonik geçişlere ait FWHM değişimi	53
Şekil 5.3.2.2	A numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FWHM değişimi	54
Şekil 5.3.2.3	B numunesi için eksitonik geçişlere ait FWHM değişimi	55
Şekil 5.3.2.4	B numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FWHM değişimi	56
Şekil 5.3.3.1	A numunesi için eksitonik geçişlere ait FL şiddeti değişimi	58
Şekil 5.3.3.2	A numunesinde gözlenen B eksiton pik şiddeti değişimi	59
Şekil 5.3.3.3	A numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FL pik şiddeti değişimi	60
Şekil 5.3.3.4	B numunesi için eksitonik geçişlere ait pik şiddeti değişimi	62
Şekil 5.3.3.5	B numunesinde gözlenen serbest B eksiton pik şiddeti değişimi	63
Şekil 5.3.3.6	B numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FL pik şiddeti değişimi	64

## TABLO LİSTESİ

<b><u>Tablo No</u></b>	<b><u>Tablo Adı</u></b>	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 2.1	GaN için deneysel gözlenen yapısal parametreler [14]	7
Tablo 2.2	Wz GaN kendiliğinden polarizasyon, piezoelektrik, elastik ve dielektrik sabitler	10
Tablo 2.3	Safir, Si, SiC ve ZnO için örgü parametreleri, ısıl genleşme katsayıları ve ısıl iletkenlik katsayısı	11
Tablo 3.1	Farklı deneysel teknikler kullanılarak rapor edilen GaN eksiton enerjileri	22
Tablo 4.1	Metal-organik ve hidrür kaynakları	37
Tablo 5.2.1	A numunesi için 8K FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonu, FWHM değerleri ve pik şiddetleri	44
Tablo 5.2.2	B numunesi için 8K FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonu, FWHM değerleri ve pik şiddetleri	48
Tablo 5.3.1	A ve B numunesi ve literatürdeki bazı çalışmalar için fit parametreleri.	51
Tablo 5.3.2	A ve B örneklerine ait optiksel geçişler ve literatürde yapılan bazı çalışmalar için elde edilen FWHM fit parametre değerleri.	57
Tablo 5.3.3	A numunesindeki eksitonik geçişler için aktivasyon enerji değerleri	60
Tablo 5.3.4	A numunesindeki kusurlara bağlı geçişler için aktivasyon enerji değerleri	61
Tablo 5.3.5	B numunesindeki eksitonik geçişler için aktivasyon enerji değerleri	63
Tablo 5.3.6	B numunesindeki kusurlara bağlı geçişler için aktivasyon enerji değerleri	65

## ÖNSÖZ

Bu çalışma esnasında ilgisini ve desteğini esirgemeyen, 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 Doç. Dr. Sibel GÖKDEN olmak üzere bölümümüzdeki değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her saniyesinde parmağı olan canım anneme gösterdiği sabır ve tarif edilemez desteği için çok teşekkür ederim.

Balıkesir, 2011

Nuri CAN

## 1. GİRİŞ

AlN, GaN ve InN gibi yarıiletken materyal sistemleri üzerine yapılan çalışmalar 1990'lerden itibaren önemli bir ivme kazanmış olup günümüzde optoelektronik ve elektronik teknolojisinde birçok kullanım alanları bulmuştur [1]. Bu yarıiletken nitrürlerin en önemli özelliklerinden biri AlGaIn, InGaIn, AlIn ve AlGaIn gibi üçlü ve dördü alaşımlarının enerji bant aralıkları 0.7 eV'den (InN) 3.4 (GaN) ve 6.2 eV'ye (AlN) kadar elektromagnetik spektrumun yakın kızılötesi bölgesinden morötesi bölgeye kadar olan çok geniş bir enerji aralığını taramasıdır [1]. Bu özellik III-V nitrürleri, ışık yayan diyot (LED), lazer diyot ve morötesi (UV) fotodetektörler gibi optoelektronik aygıtların üretilmesi ve geliştirilmesinde çok önemli bir yere koymaktadır.

Yüksek parlaklığa sahip nitrür temelli LED'ler, reklam panolarında, trafik lamba ve işaretlerinde, dekoratif aydınlatma sistemlerinde, stadyumlar, 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 yayınım yapan LED'lerin kullanım alanlarını ziraatta görülen hastalıkların teşhis ve tedavisinde, fotosentezin hızlandırılması gibi tarımsal amaçlı uygulamalardan spektroskopik ölçüm sistemlerine kadar genişletmek mümkündür. Belki de nitrürlerden üretilen LED'lerin toplumsal etkisi, bunların ev, işyeri ve sokak aydınlatmalarında beyaz ışık kaynağı olarak günümüzde kullanılan mevcut aydınlatma sistemlerinin yerine geçtiğinde çok daha büyük olacaktır.

Yüksek yoğunluktaki optiksel okuma ve yazma teknolojisinde yarıiletken lazerler önemli bir yere sahiptir. Çünkü çok sayıda dijital verilerin depolanabilme kapasitesi kullanılan diskin kapasitesine bağlıdır. Bu kapasiteyi belirleyen en önemli faktör veri yazmak ve okumak için kullanılan lazerin dalga boyudur. Küçük dalga boylarında yansımalar ve kırılmalar azalır ve optiksel depolama yoğunluğu yaklaşık dalga boyunun karesinin tersi ile orantılı olarak artar. Örneğin, mevcut CD ve DVD'lerde kullanılan lazerin dalgaboyları sırasıyla 780 ve 650 nm'dir. Kısaca *Blue-*

*Ray Disk* olarak adlandırılan yeni nesil CD'lerde 405 nm dalgaboylu mavi lazerler kullanıldığında 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 ışımsal gürültü düzeyi son derece düşüktür. Dolayısıyla 25-280 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.

III-V Nitrür ailesinden olan GaN ve diğer bileşenleri için birçok ilginin kazanıldığı diğer bir alan ise, iyi mobilite ve yüksek doyum sürüklenme hızını içeren mükemmel elektron iletim özelliklerinden dolayı kablosuz baz istasyonları için düşük maliyetli yükselticilerin yanı sıra uydular, füzeler ve radarlar gibi yüksek güç/sıcaklık elektronik uygulamalarıdır. Fakat bu alandaki mevcut teknolojinin rekabetinden dolayı GaN tabanlı elektronik aygıtların gelişimi, optoelektronik uygulamalar kadar hızlı gerçekleşmemektedir. Buna rağmen son zamanlardaki gelişmeler oldukça etkileyicidir. GaN ve alaşımlarının en güçlü özelliklerinden biri de heteroyapı teknolojisidir. Elektronik aygıtlar için yeni çalışma yöntemleri ve optiksel aygıtlar için yeni spektral bölgelere erişimi sağlayan kuantum kuyuları, modülasyon katkılı heteroarayüzeler ve heteroeklem yapıların hepsi yapılabilir. GaN'ın diğer çekici özellikleri yüksek mekaniksel ve termal kararlılığı ve büyük piezoelektrik sabitleri içermesidir.

GaN ve diğer nitrür temelli yarıiletken materyalin büyütülmesinde karşılaşılan problemlerin başında üzerine aktif epitabakaların büyütüleceği yüksek kalitede ve büyük boyutta kendi alt taşlarının bulunmaması gösterilebilir. Diğer yarıiletken tek kristal materyallerin büyütülmesinde kullanılan standart tekniklerden olan Czochralski (CZ) ve Bridgman teknikleri nitrürlerin büyütülmesinde yeterli

olmamaktadır. Bu yüzden nitrürler genelde yabancı alt taşlar üzerine Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama (MOCVD) ve Hibrit Buhar Faz Epitaksi (HVPE) gibi epitaksiyel teknikler kullanılarak büyütülmektedir [2-3]. GaN ve diğer nitrürlerin üzerine büyütüldükleri en çok tercih edilen alt taşlar safir ( $Al_2O_3$ ), silikon (Si) ve silikon karbür (SiC) dür. Bir malzemenin alt taş olup olmayacağını belirlemede en önemli parametre örgü uyumsuzluğudur. Bunun yanı sıra kristal yapı, yüzey sonlanması, kompozisyon, reaktivite, kimyasal, ısıl ve elektriksel özellikler de önemlidir. Çünkü bunlar büyütülen filmi önemli ölçüde etkiler. Büyütülen filmin kristal yönelimi, polaritesi, çok tipliliği, yüzey morfolojisi, gerilmesi ve kusur yoğunluğu alt taş tarafından belirlenir. Bu yüzden alt taş seçiminde hem malzemenin fiziksel özellikleri hem de yukarıda ifade edilen ölçütler dikkate alınmalıdır [4].

III-Nitrürlerin dikkat çekici bir özelliği [0001] c-doğrultusunda yüksek bir makroskopik polarizasyona sahip oluşudur. Bu polarizasyon kendiliğinden polarizasyon ve gerilme kaynaklı piezoelektrik polarizasyonun toplamıdır ve kristaldeki gerilme ve alaşım oranına bağlıdır [5]. [0001] doğrultusu boyunca büyüyen III-Nitrür tabanlı heteroeklem ara yüzeylerde polarizasyonun süreksizliği yapının özellikleri üstünde önemli bir etkiye sahip olan güçlü bir elektrik alan üretir [6]. Bu elektrik alan Stark Etki'ye yol açmaktadır. 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 [7,8] ve GaN/AlGaN [9,10] yapılarının her ikisinde de görülmüştür. Filmlerde ışınal tekrarbirleşme yarıömrü, ışınal olmayan tekrarbirleşme olasılığının yükselmesi ve iç kuantum veriminin azalması ile artar [11]. Güçlü elektrik alanının 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 büyütmeektir.

Bu tez çalışmasında, MOCVD tekniği ile biri safirin c-düzlemi diğeri ise a-düzlemi üzerine benzer büyütme şartları altında büyütülen yaklaşık 800 nm kalınlığa sahip iki GaN epitaksiyel filmin optik özellikleri 8-300 K sıcaklık aralığında Kararlı-



Hal Fotolüminesans (*Steady-State Photoluminescence*) tekniği kullanılarak incelendi. Büyütme ve deneysel ölçümler Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde (NANATOM ) gerçekleştirildi.

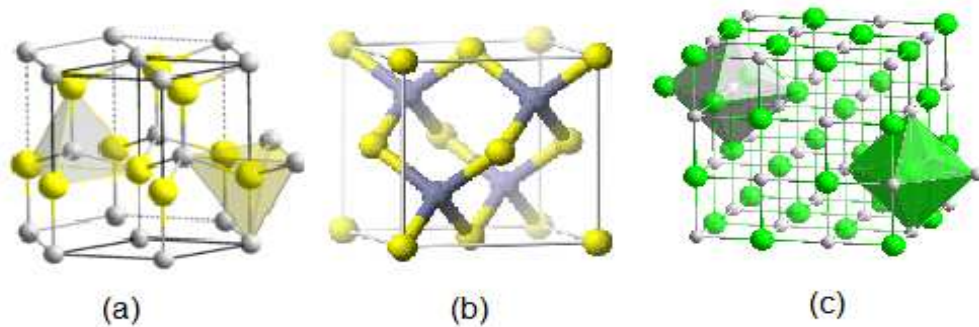
## 2. GALYUM NİTRÜR ( GaN )

Geniş bant aralığına sahip GaN tabanlı yarıiletkenler elektromanyetik spektrumun özellikle görünür bölgesinde çalışan optoelektronik uygulamalarda sağladığı verim nedeniyle büyük ilgi çekmektedir. 20 yılı aşkın süredir çalışılan III-V Nitrürlerin fiziksel özelliklerinin birçoğuna ilişkin literatürde ki bilgiler bazı durumlarda halen gelişim sürecindedir ve doğal olarak tartışmalara açıktır.

GaN temelli aygıtların performansının artırılması ve buna bağlı olarak da tasarım parametrelerinin en uygun değerlerinin ortaya çıkarılması için GaN yarıiletkeninin temel fiziksel özelliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Bu bölümde, GaN'ın özellikle bu tez çalışmasıyla ilgili bazı yapısal ve optik özellikleri detaylı olarak verilecektir.

### 2.1 Kristal Yapısı

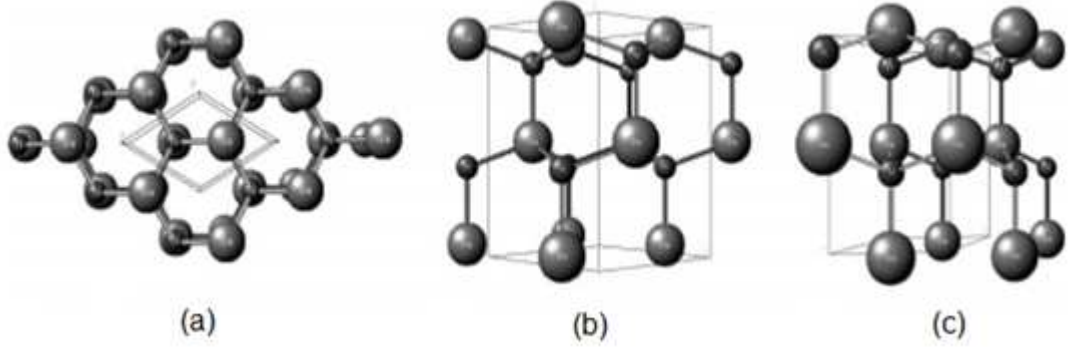
III-Nitrür yapılar tarafından paylaşılan üç farklı kristal yapı vardır. Bunlar; Wurtzite (Wz), zincblende (ZB) ve kaya tuzu (NaCl) kristal yapılarıdır (Şekil 2.1). GaN yapıların NaCl yapıda kristalleşebilmeleri için oldukça yüksek dış basınç gerekmektedir. GaN zincblende yapı ise sadece Si, SiC, MgO ve GaAs gibi kübik alt tabakalar üzerine heteroepitaksiyel büyütme ile kararlı olabilir. Normal şartlar altında GaN için termodinamik olarak kararlı yapı hegzagonal yapı olan wurtzite kristal yapısıdır.



Şekil 2.1.1 (a) Wurtzite, (b) Zincblende, (c) NaCl (kaya tuzu) yapıların şematik gösterimi.

Wurtzite yapının uzay grubu *Hermann-Mauguin* notasyonunda  $P6_3mc$  ve *Schoenflies* notasyonunda  $C_{6v}^4$ , nokta grubu simetrisi ise *Hermann-Mauguin* notasyonunda  $6mm$  ve *Schoenflies* notasyonunda  $C_{6v}$ 'dir [12].

Wurtzite yapı iki tane iç içe girmiş altıgen yapıda (hcp) üçgensel olarak düzenlenmiş birbirini izleyen ABABAB... dizisinde kümelenmiş Ga ve N atomlarının sıkı paketli düzleminden oluşmaktadır. Şekil 2.2’de farklı yönelimler boyunca wurtzite GaN’ın perspektif görünüşü verilmektedir [13]. Burada küçük daireler N atomlarını, büyük olan daireler ise Ga atomlarını simgelemektedir.

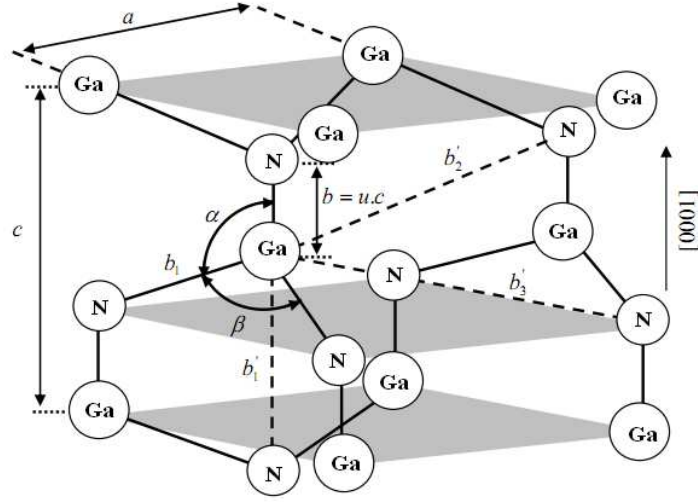


**Şekil 2.1.2** (a) [ 0 0 0 1 ] (b) [ 1 1 -2 1 ] (c) [ 1 0 -1 0 ] doğrultularına sahip Wz GaN

Wurtzite yapı,  $c/a = \sqrt{8/3} = 1.633$  oranında a ve c örgü parametreleri ile hegzagonal birim hücreye sahiptir. Her birim hücrede 4 tane atom vardır. Tetrahedral bağ yapısına sahip wurtzite yapıda atomlar arasındaki açı 109 derecedir. Wurtzite yapıda en yakın komşu sayısı 4 ikinci en yakın komşu sayısı ise 12’dir.

Bu yapı için diğer bir parametre anyon ve katyon arasındaki bağ uzunluğu b’nin (veya en yakın komşular arası bağ uzunluğu) c’ye oranı olan u parametresi olup ideal bir wurtzite yapı için  $u = 0.375$  değerini alır. Şekil 2.1.3’de wurtzite yapı için örgü parametreleri, birinci ve ikinci yakın komşuluklar ve atomlar arası açılar gösterilmiştir.

Kristal örgü parametreleri genellikle oda sıcaklığında yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım (HRXRD) tekniği ile belirlenir. Örgü parametresi, serbest elektron yoğunluğu, yabancı atom ve kusurların yoğunluğu, alt taşın sebep olduğu dış zorlamalar ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Tablo 2.1’de GaN için deneysel olarak gözlenen örgü parametreleri, en yakın ve ikinci en yakın komşuluk uzaklıkları ve bağ açıları verilmiştir [14].



**Şekil 2.1.3** Wurtzite GaN yapısının şematik gösterimi ( $a, c$  ve  $u$  örgü parametreleri,  $b (= uc)$  en yakın komşu uzaklığı,  $b_1, b_2, b_3$  üç tip ikinci yakın komşu uzaklığı,  $\alpha$  ve  $\beta$  atomlar arası açiyı ifade etmektedir).

$c/a$  oranı, bileşenlerin elektronegatiflik farkı ile ilişkili olduğundan en büyük farka sahip bileşenlerde  $c/a$  oranının ideal değerinden daha büyük sapma gözlenmektedir. Tablo 2.1' de görüldüğü gibi GaN için  $c/a$  oranı ve  $u$  değeri 1.634 ve 0.377 olarak ölçülmüş olup ideal değere yakındır.

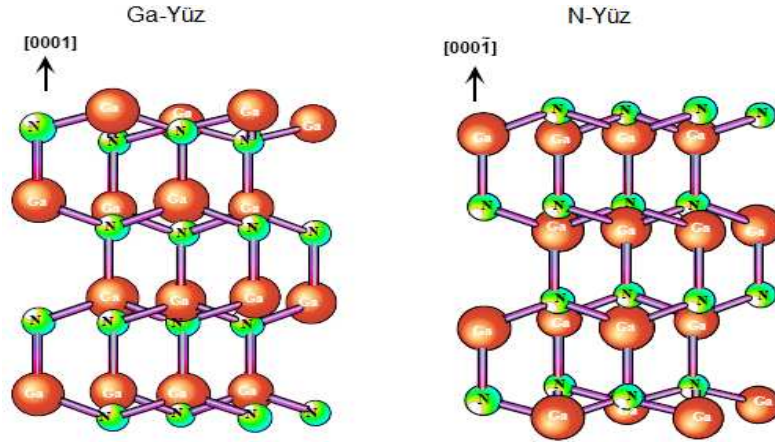
**Tablo 2.1** GaN için deneysel gözlenen yapısal parametreler [14].

Örgü Parametreleri	GaN
$a$ (Å)	3.199
$c$ (Å)	5.185
$c/a$	1.634
$u$	0.377
$b$ (Å)	1.971
$b_1$ (Å)	1.955
$b_1'$ (Å)	3.255
$b_2'$ (Å)	3.757
$b_3'$ (Å)	3.749
$\alpha$	109.17
$\beta$	109.18

## 2.2 Polarizasyon

Katılarda atomik seviyede üç çeşit polarizasyon söz konusudur. Birincisi, polar moleküllerin elektrik alan ile kısmi ya da tamamen düzenlenmesi sonucu oluşan polarizasyon; ikincisi, tamamen veya kısmi iyonik kristallerde pozitif ve negatif iyonların elektrik alan altında göreceli hareketleri sonucu oluşan dipolün indüklediği iyonik polarizasyon; üçüncüsü ise tüm dielektrikde mevcut olan elektronik polarizasyondur.

GaN terslenme simetrisine sahip olmadığı için belli kristaliografik eksenlere paralel iki zıt doğrultuda atomik tabakaların iki farklı düzenlenişini içerir [15]. GaN wurtzite hcc yapıda Ga ve N elementlerinin atomik tabakalarının dizilimi  $[0001]$  doğrultusu boyunca ABAB.. şeklinde ya da  $[000\bar{1}]$  doğrultusunda BABA.. şeklinde olup bir birinin tersidir.  $(0001)$  ve  $(000\bar{1})$  yüzeyleri sırasıyla Ga-yüzlü ve N-yüzlü olarak adlandırılır (şekil 2.2.1).

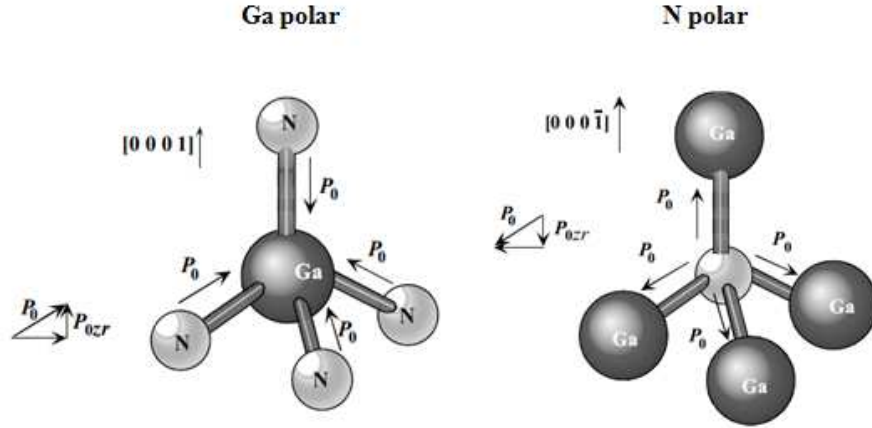


Şekil 2.2.1 Ga-yüzlü ve N-yüzlü GaN wurtzite kristal yapısının şematik gösterimi.

Dış bir elektrik alan yokken GaN yapıda toplam makroskopik polarizasyon kendiliğinden  $\mathbf{P}_{KP}$  ve piezoelektrik  $\mathbf{P}_{PE}$  polarizasyonların toplamına eşittir. Kendiliğinden polarizasyon Ga ve N atomlarının elektronegatiflik farkından kaynaklanır ve yapısal parametrelere hassas bir şekilde bağlıdır. Bunun sebebi  $(0001)$  eksen boyunca anyon ve katyon bağ uzunluklarının farklı olmasıdır. Piezoelektrik polarizasyon ise Si, SiC, safir gibi yabancı alt taşlar üzerine büyütülen GaN'ın bu alt taşlar ile olan örgü parametrelerinin ve termal genleşme katsayılarının

farklılıklarından dolayı yapıda oluşan zorlamaların sebep olduğu bir polarizasyondur. Bu nedenle GaN [0 0 0 1] doğrultusu polar doğrultu olarak adlandırılır.

Polarizasyonun yönünün, dolayısıyla kristalin polarlığını şekil 2.2.2’de görüldüğü gibi c-doğrultusundaki bağların katyondan anyona mı yoksa anyondan katyona mı olduğu belirler. Nitrojen ( N ) yüzlü düzlemden galyum ( Ga ) yüzlü düzleme doğru <0001> eksenindeki noktalar pozitif z- yönü kabul edilir. Başka bir deyişle, c- doğrultusundaki bağların Ga (katyon) atomundan N (anyon) atomuna doğru olduğu kabul edilirse polarlık, Ga polarlığı olarak adlandırılır ve z- yönündeki bu yönelim genelde pozitif kabul edilir. Benzer şekilde ters durumu düşündüğümüzde c- doğrultusundaki bağların anyon N atomundan katyon Ga atomuna doğru olduğunu kabul edilirse polarlık, N polarlığı olarak kabul edilir ve z- yönündeki bu yönelim genelde negatif olarak kabul edilir.



**Şekil 2.2.2** Düzlem içinde homojen polarizasyona sahip Ga- ve N- polar tetrahedron GaN’in top ve çubuk gösterimi. Ga-polar için net polarizasyon [0 0 0 1] yönünde iken N-polar için [0 0 0 -1] doğrultusundadır [16].

Wurtzite kristalin c eksenini boyunca kendiliğinden kutuplanma  $\vec{P}_{KP} = P_{KP}\hat{z}$  iken, piezoelektrik kutuplanma  $e_{13}$  ve  $e_{33}$  piezoelektrik katsayılar olmak üzere

$$P_{PE} = e_{33}\epsilon_z + e_{31}(\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (2.2)$$

denklemini ile hesaplanır.  $\epsilon_z = (c - c_0)/c_0$ , c eksenini boyunca gerilmedir. Düzlemdeki gerilme izotropik olup  $\epsilon_x = \epsilon_y = (a - a_0)/a_0$  şeklindedir. Burada  $a_0$  ve  $c_0$  kullanılan alt taşların örgü sabitlerinin dengedeki değerleridir. Hegzagonal GaN’in örgü sabitleri arasındaki ilişki;

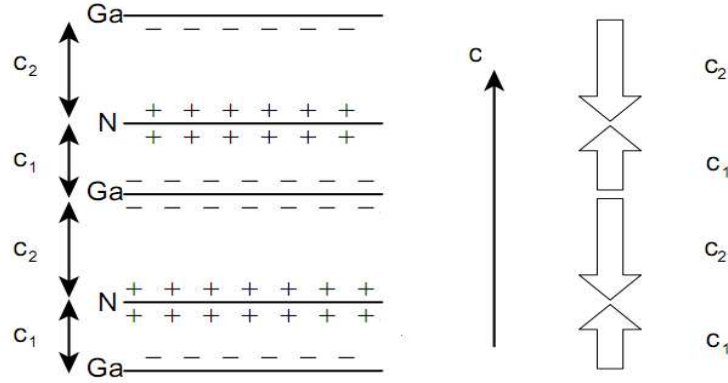
$$\frac{c-c_0}{c_0} = -2 \frac{C_{13}}{C_{33}} \left( \frac{a-a_0}{a_0} \right) \quad (2.3)$$

ile verilir. Burada  $C_{13}$  ve  $C_{33}$  elastik sabitlerdir. Denklem 2.2 ve 2.3 kullanılarak c-ekseni boyunca piezoelektrik polarizasyon

$$P_{PE} = 2 \frac{a-a_0}{a_0} \left( e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (2.4)$$

eşitliği ile belirlenebilir [17]. GaN yarıiletkenin kendiliğinden polarizasyon büyüklüğü, piezoelektrik ve dielektrik sabitleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Şekil 2.2.3’de GaN tabakaların şematik gösterimi ve her birim alandaki dipol moment gösterilmektedir. Böylece piezoelektrik polarizasyonun büyüklüğü ve yönü zorlamanın çeşidine göre (2.4) eşitliği ile bulunurken, yapısal parametrelere bağlı olan kendiliğinden polarizasyon ise bulk GaN yapı için  $-0.029 \text{ C/m}^2$  dir [17].



**Şekil 2.2.3** GaN tabakaların şematik gösterimi ve birim alandaki dipol momentler.

**Tablo 2.2** Wz GaN kendiliğinden polarizasyon, piezoelektrik, elastik ve dielektrik sabitler.

Wurtzite	$e_{33}(\text{C/m}^2)$	$e_{31}(\text{C/m}^2)$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{33}$	$P_{KP}(\text{C/m}^2)$	$C_{13}$	$C_{33}$
GaN	0.73	-0.49	9.5	10.4	-0.029	103	405

Wurtzite GaN’ın bu tez çalışmasında direkt ilişkili olmayan mekanik, elektrik vb. diğer fiziksel özellikleri Morkoç tarafından detaylandırılmıştır [18].

## 2.3 Alt Taşlar

GaN büyütmelemede karşılaşılan temel zorluklardan bir tanesi örgü ve ısı uyumlu alt tabakaların eksikliğidir. Kullanılan alt tabaka epitaksiyel filmlerin kristal yönelimini, polaritesini, yüzey morfolojisini, gerilme ( strain ) ve kusur yoğunluğunu belirler. GaN tek kristallerin büyütülmesindeki zorluklardan dolayı yapılar genellikle Si, SiC, Safir (  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ), NaCl, GaP, InP, ZnO,  $\text{MgAl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  ve MgO gibi tek kristallerin üzerine büyütülürler. Tablo 2.4'te en çok kullanılan alt taş materyallerine ait bazı parametrelerin sayısal değerleri GaN ile karşılaştırılmalı olarak verilmektedir [19].

**Tablo 2.3** Safir, Si, SiC ve ZnO için örgü parametreleri, ısı genleşme katsayıları ve ısı iletkenlik katsayısı.

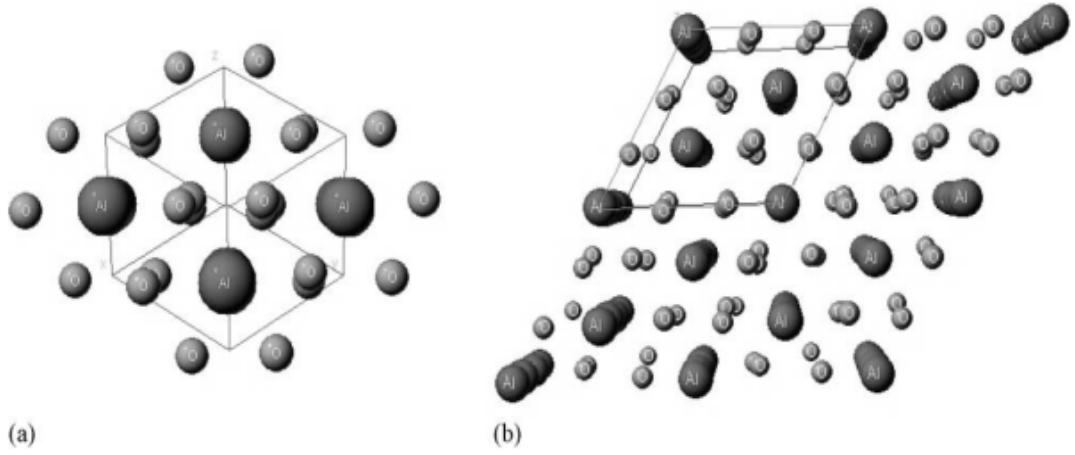
Alt Tabaka	a ( Å )	c ( Å )	$\Delta_a / a$ ( $\text{K}^{-1}$ ) ( $\times 10^{-6}$ )	$\Delta_c / c$ ( $\text{K}^{-1}$ ) ( $\times 10^{-6}$ )	$\kappa$ ( W/cmK )
Safir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	4.765	10.298	7.5	8.5	0.3-0.5
Si ( Kübik )	5.4301	-	3.99	-	1.56
6H-SiC	3.0806	15.1173	4.46	4.16	3.8
ZnO (Hekzagonal)	3.2426	5.194	4.8	2.9	0.3-0.4
GaN	3.199	5.185	5.59	3.17	2.3

Hekzagonal simetrisi, kolay işlenebilirliği, maliyetinin ucuz olması gibi nedenlerden dolayı safir GaN büyütmelemede için kullanılan alt taşlar içinde daha çok tercih edilmektedir. Safirin yapısını biraz daha yakından inceleyelim.

### 2.3.1 Safir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

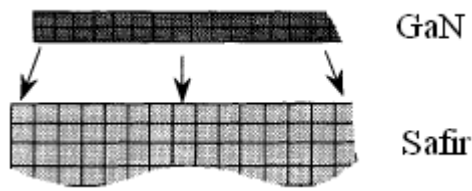
Tek alüminyum oksit kristali olan safir GaN epitaksi için en çok çalışılan alt taşdır. Şekil 2.3.1'te safirin [0001] doğrultusunda hekzagonal ve rhombohedral birim hücreleri gösterilmektedir. Rhombohedral birim hücrede toplamda 10 iyon olmak üzere 4  $\text{Al}^{+3}$  iyonu ve 6  $\text{O}^{-2}$  iyonu vardır. Hekzagonal birim hücrede toplamda 30 iyon olmak üzere 12  $\text{Al}^{+3}$  iyonu ve 18  $\text{O}^{-2}$  iyonu bulunmaktadır.





**Şekil 2.3.1** Safirin [0001] doğrultusu boyunca (a) rhombohedral ve (b) hekzagonal bir hücre gösterimi.

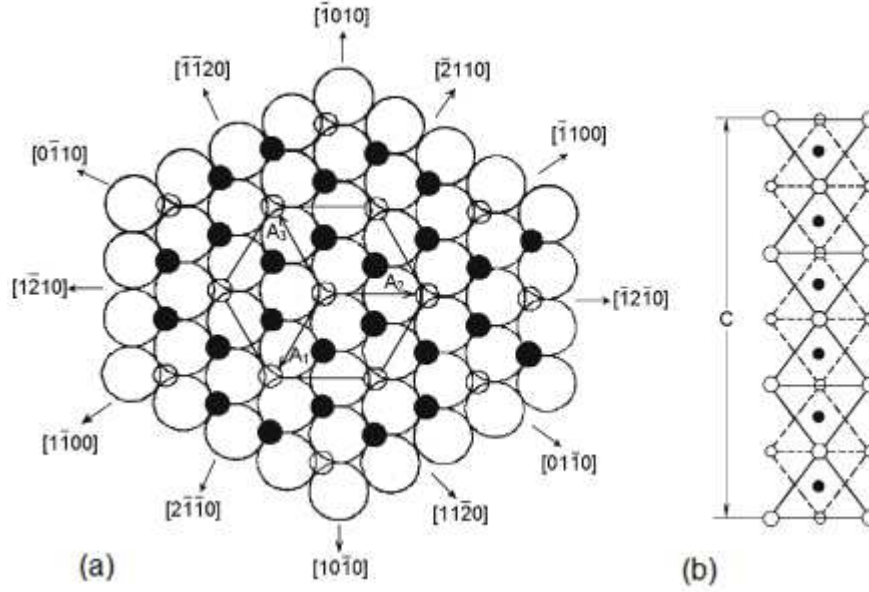
Safir ile GaN arasında %14-16 değerinde örgü uyumsuzluğu vardır ve bu sebepten dolayı dislokasyon yoğunluğu  $10^8$ - $10^{10}$   $\text{cm}^2$  mertebesindedir. Safir ile GaN arasındaki termal genişleme katsayıları arasındaki uyumsuzluk ise %34 değerindedir. Bu yüksek kusur yoğunlukları taşıyıcı mobilitesini, termal iletimi ve taşıyıcı yaşam ömrünü azaltarak elektronik ve optoelektronik aygıtların performansı etkiler. Safirin termal genişleme katsayısı GaN termal genişleme katsayısından daha büyüktür, bundan dolayı büyütme sıcaklıklarından soğumaya başlanıldığı zaman üst tabakaları sıkıştırıcı (*compressive*) bir zorlama oluşturur (Şekil 2.3.2).



**Şekil 2.3.2** Termal genişleme katsayıları ve örgü sabitleri farkından kaynaklanan zorlama.

Epitaksiyel filmler alt taşların çeşitli yönelimleri üzerine büyütülmüşlerdir ve GaN için en çok tercih edilen (0001) düzlemi olan safirin c- düzlemidir. C düzlemi safir üzerine büyütülen GaN epitaksiyel filmler c- düzlemine yönelmiş olarak büyürler. Safir ile GaN arasındaki örgü uyumsuzluğu (0001) GaN düzleminin safir (0001) düzlemine göre  $30^\circ$  derece döndürülmesi ile daha da azaltılabilir. Safir alt taş üstüne GaN ve AlN tampon tabakaların depolanması ile daha yumuşak GaN filmler

elde edilebilir. Boston Üniversitesi'nde bir çalışma grubu başlangıçta nitridasyon ve düşük sıcaklıkta GaN tampon tabakalar ile a- düzlem safir üzerine büyütülen GaN filmlerin c- düzlemi safir üzerine büyütülen filmlerden daha çok pürüzsüzlüğe sahip olduklarını göstermişlerdir [20]. Safir kristalinin farklı doğrultulardaki yönelimleri Şekil 2.3.3'te gösterilmektedir [21].



**Şekil 2.3.3** (a) Bazal düzlemdeki iki O<sup>2-</sup> iyon (büyük beyaz küreler) tabakaları arasındaki boşluklar (küçük beyaz küreler) ve Al<sup>3+</sup> iyonlarının (siyah küreler) dizilimi. A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> bazal düzlem için hegzagonal safirin (1 1 -2 0) öteleme vektörleri. (En üst O<sup>2-</sup> iyon tabakası gösterilmemekte) (b) Al<sup>3+</sup> ve O<sup>2-</sup> iyonlarının c düzlemi doğrultusunda istiflenme şeması.

Safirin a- düzlem üzerine büyütmelerde gözlenen örgü uyumsuzluğunun yaklaşık %2 değerlerine düştüğü görülmüştür [22]. Örgü uyumsuzluğunda farklılık olmasına rağmen, iki alt taş yönelimi arasında rapor edilen çalışmalarda GaN filmlerin kalitesinde önemli bir farklılık gözlenmemiştir.

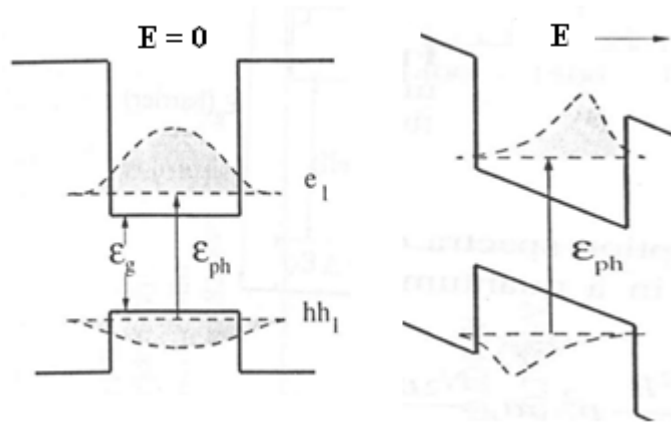
GaN filmlerin polarite kontrolü epitakside önemlidir, çünkü yüzey morfolojisini, katkılama karakterini ve hepsinden çok piezoelektrik alanın yönünü kontrol eder. Son söylenen aygıt performansı için önemlidir. Genellikle, MOCVD tekniği ile safirin c- düzlemi üzerine büyütülen GaN için pürüzsüz yüksek kaliteli filmler Ga-polariteye sahiptirler [23]. Bunun yanısıra, birçok araştırmacının aksine *Sumiya* MOCVD tekniği ile N-polariteye sahip kaliteli filmler üretebilmiştir [24].

Safir polar olmayan bir kristaldir. Terslenme bölge (*inversion domain*) kusurları GaN/Safir ara yüzeydeki homojensizlikten dolayı meydana gelir. Bu ters çevrilmiş polarite alanları bu homojen olmayan alanlardaki lüminesans karakteristiğini baskısı altına almış olabilir [25]. Yapıların lüminesans özellikleri önemli şekilde etkileyen diğer bir kavram ise Stark Etki olarak bilinir.

## 2.4 Stark Etki

Hekzagonal simetriden dolayı wurtzite GaN'ın dikkat çekici bir özelliği [0001] doğrultusunda yüksek bir makroskopik polarizasyona sahip olduğunu söylemiştik. Bu polarizasyon, kendiliğinden polarizasyon ve zorlama (*strain*) kaynaklı piezoelektrik polarizasyon toplamıdır ve kristalin kompozisyonuna ve zorlama durumlarına bağlıdır. [0001] polar doğrultu (c- düzlemi) üzerine büyütülen heteroeklem yapılarda ara yüzeylerde polarizasyonun süreksizliği yapının tamamı üzerinde önemli bir etkiye sahip iç bir elektrik alan oluşturur [26].

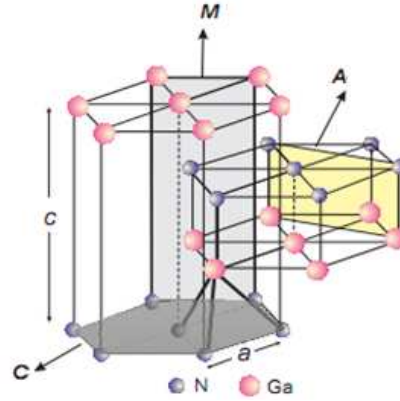
Polarizasyonun varlığı, yüksek elektron mobiliteli transistörlerde iki boyutlu elektron gazı oluşumu için hayati bir mekanizma olmasına rağmen, polarizasyonun sebep olduğu elektrik alan kuantum kuyulu ışık yayan aygıtlar için istenilmeyen bir etki oluşturur. Polarizasyondan kaynaklanan bu büyük elektrik alan kuantum kuyusunda Kuantum-Sınırlanmış Stark Etkisi (*Quantum-Confined Stark Effect*) olarak adlandırılan bant bükülmelerine yol açar. Polarizasyon alanının kuantum kuyusunda meydana getirdiği etki Şekil 2.4.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4.1 Elektrik alan varlığı ve yokluğunda kuantum kuyusunda ki soğurma.

Şekilde görüleceği üzere Stark etkisi, kuantum kuyusu içindeki taşıyıcıların uzaysal dağılımları bozmakta olup elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının örtüşmesinde azalmalara yol açarak emisyon verimini azaltan bir rol oynamaktadır. Ayrıca etkin bant aralığını azaltarak optiksel geçişlerde bir kızıla kaymaya da sebep olmaktadır.

Kuantum kuyulu yapılarda polarizasyonu ortadan kaldırmak için önerilen yaklaşımlardan birisi de safirin c [0001] doğrultusuna dik polar olmayan m [1-100] ve a [11-20] doğrultularında büyütme yapılmasıdır.



**Şekil 2.4.2** Polar ( c ) ve polar olmayan ( m ve a ) düzlemler.

Polar olmayan tabakaların büyütülmesi son dönemlerde dikkate değer bir ilgi çekmiştir. Örneğin, m düzleminde GaN filmler MOCVD tekniği ile  $\gamma$ -LiAlO<sub>2</sub> alt taş üzerine büyütülürken, a düzleminde GaN filmler r (1-2 0 2) düzleminde safir alt taş üzerine büyütülmüşlerdir [27]. Polar olmayan GaN/AlGaIn çoklu kuantum kuyularda rapor edilmiştir ve büyüme doğrultusu boyunca polarizasyon alanının olmadığı gösterilmiştir [28-31].

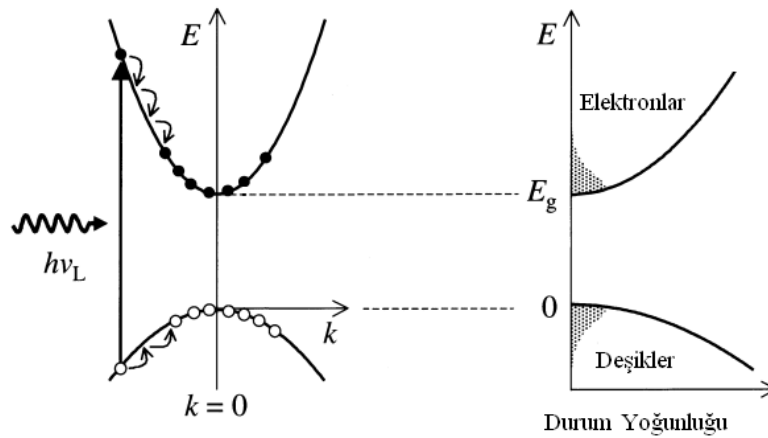
Elektrik alanın ortadan kaldırılmasına rağmen, yapısal kusurların yüksek yoğunluğu polar olmayan doğrultularda halen önemli bir problem olarak durmaktadır. Yapısal çalışmalar polar olmayan doğrultular boyunca büyütülen heteroepitaksiyel GaN tabakalar için tipik vida kusurları ile beraber  $10^5$ - $10^6$  cm<sup>-1</sup> arasında yoğunluklara sahip istiflenme hataları (*stacking faults*) içermektedir [32-34]. a- ve m- düzlemlerinin her ikisinin yapısal ve morfolojik karakteristikleri geniş ölçüde çalışılmasına rağmen, polar olmayan GaN'ın emisyon özellikleri için yapılan çalışmalar fazla değildir.

### 3. OPTİKSEL ÖZELLİKLER

Bir yarıiletkenin optik özellikleri, yarıiletkenin bant yapısı, safsızlık seviyeleri, yapısında kusur varsa bunların ne tür kusurlar olduğunu ve hangi mertebede olduğu hakkında öncü bilgiler vererek başlıca optoelektronik aygıtlar olan LED, lazer, fotodetektör ve güneş pilleri gibi yapıların elde edilmesinde ve geliştirilmesinde büyük öneme sahiptirler. Buradaki temel amaç kullanılan yarıiletkenin optik özelliklerine bakılarak uygun bir kaliteye sahip olup olmadığı ve oda sıcaklığındaki davranışının incelenmesidir. Bu süreçte bilinmesi gereken en önemli mekanizmalardan bir tanesi fotolüminesans kavramıdır.

#### 3.1 Fotolüminesans

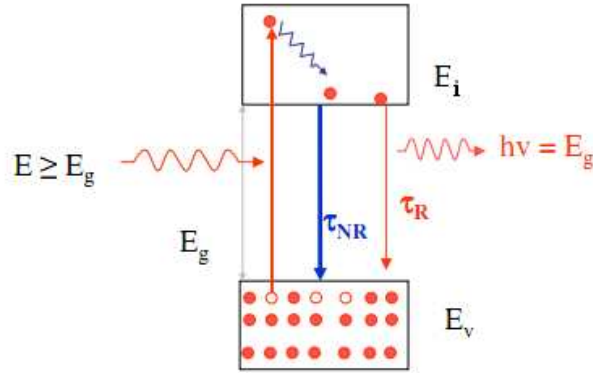
Yarıiletkenler dış bir etki ile uyarıldığı zaman yapıda soğurma ve emisyon olmak üzere iki farklı süreç gerçekleşir [35]. Soğurma ve emisyon ters süreçler olarak gözükse de pratikte farklılıklar gösterir. Yarıiletken, enerjisi kendi bant aralığından daha yüksek değere sahip ( $\hbar\omega > E_{gap}$ ) foton salınımı yapan bir lazer ile uyarıldığı zaman valans bandındaki bir elektron iletim bandının minimumuna ya da daha yüksek enerji seviyelerine uyarılır ve gerisinde elektron yokluğu olarak bilinen deşikler bırakır. Örgüde bağlanmaya göre bu durum bir kovalent bağın kırılmasına eşittir. Oluşan bu elektron ve deşik çiftleri birbirinden tamamen bağımsız değildir. Zıt olarak yüklenen taşıyıcılar birbirlerine elektrostatik *Coulomb* etkileşmesi ile birbirlerine bağlanırlar ve oluşan bu bağ çifti eksiton olarak adlandırılır.



Şekil 3.1.1 Yarı iletkenin uyarılması sonucu soğurma ve rahatlama süreci.

Örneğin üzerine düşen fotonların soğurulması ile oluşan elektron-deşik çiftleri ilk anda çok yüksek kinetik enerjilere sahiplerdir. Yüksek enerji seviyelerinde bulunan elektron ve deşik çiftleri bu fazla enerjilerini atmak için basamak geçişleri ile gösterilen korunum kuralları içerisinde uygun enerjide ve momentumda optik ve akustik fonon salınımı yoluyla hızlı bir şekilde yaparlar. Elektronlar iletim bandının minimumuna doğru, deşikler ise valans bandının maksimumuna doğru hareket ederek termal dengeye ulaşırlar. Termalizasyon olarak bilinen bu süreç  $10^{-13}$  s zaman aralığında gerçekleşir.

Termalizasyon mekanizmaları ile bant kenarlarına doğru yerleşen elektron-deşik çiftleri fazla enerjilerini bırakmak için Şekil 3.1.2 şematik olarak gösterildiği gibi iki tür tekrar birleşme sürecine girerler. Bunlar ışımsal (*radiative*) ve ışımsal olmayan (*nonradiative*) tekrar birleşme süreçleridir.

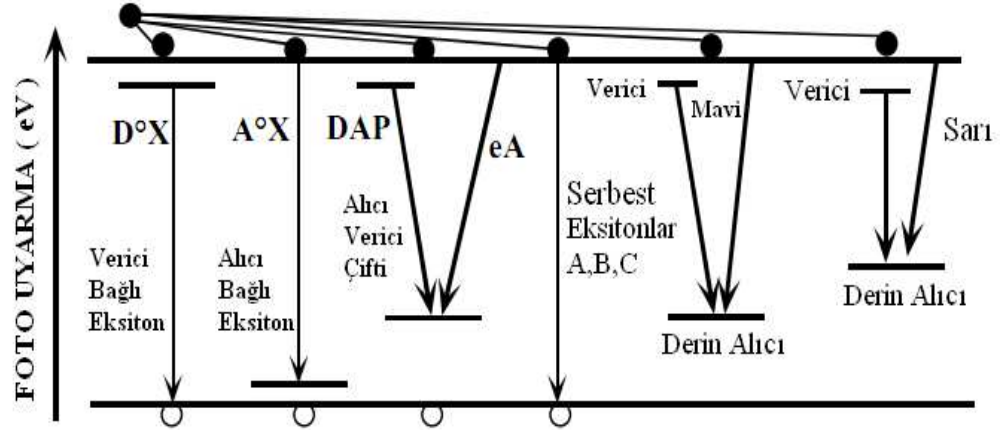


**Şekil 3.1.2** Işımsal (R) ve ışımsal olmayan (NR) süreçler.

Işımsal süreçte, elektronlar uyarılma sonucu kazandığı enerjileri yarıiletkenin bant aralığını karakterize eden foton emisyonu yoluyla bırakırlar. Bu durumda eş zamanlı olarak iletim bandındaki elektronların ve valans bandındaki deşiklerin sayısı azalır. Bundan dolayı fotoluminesans elektron-deşik çiftlerinin yok oluşlarına karşılık gelir. Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerde bu optiksel geçişlerde enerji ve momentum korunur. Bu süreç geçiş mekanizmasına bağlı olarak genelde mikro ve nanosaniye mertebesinde gerçekleşir. Işımsal olmayan süreçte ise elektronlar sahip oldukları fazla enerjisini emisyon olarak bırakmazlar, enerjilerini örgüye aktararak örgüde ısınmaya sebep olurlar. Bu süreç  $10^{-12}$  s mertebesinde gerçekleşir.

### 3.2 Optiksel Geçişler

Bir yarıiletkendeki optiksel geçişler, kendi doğasında olan içsel (*intrinsic*) ve dış etkileri bağlı olan dışsal (*extrinsic*) geçişler olmak üzere iki kategoride gruplanabilir [18]. Şekil 3.2.1’de bir yarıiletkende olası optiksel geçişler gösterilmektedir.



Şekil 3.2.1 Yarıiletkenin doğasında ve dış etkilerin sebep olduğu optiksel geçişler.

Yarıiletkenin kendi doğasında olan geçişler, safsızlıkların ve kusurların sebep olmadığı serbest eksiton geçişleri ve eğer varsa bunların fonon kopyalarıdır (*replica*). Dış etkilere bağlı geçişler, eksitonların genellikle yapıda isteyerek ya da istenmeden bulunan alıcı-verici atomların veya kusurların sahip oldukları potansiyellerinin bant aralığında oluşturmuş olduğu ayrı elektronik seviyelerin neden olduğu geçişlerdir. Alıcı-verici çifti geçişleri, iletim bandından alıcılara veya vericilerden valans bandına geçişler kristalde bulunan safsızlık atomlarının seviyelerine bağlıdır. Bu safsızlıkların oluşturmuş olduğu enerji seviyelerine tuzaklanan elektron ve deşiklerin tekrar birleşme sürecine girmesi ile gerçekleşir. Büyütülen yapılarda yerel kusurlar ve dislokasyonların sebep olduğu derin seviyeler, optiksel spektrumda gözlenen sarı lüminesans ve mavi lüminesans gibi geçişlerine yol açmaktadır.

GaN yarıiletken materyalde tekrar birleşme sürecinde görülen optiksel geçiş mekanizmalarının anlaşılması için ne tür etkilerin sebep olduğuna ve bu alanda yapılan bazı çalışmaları inceleyelim.

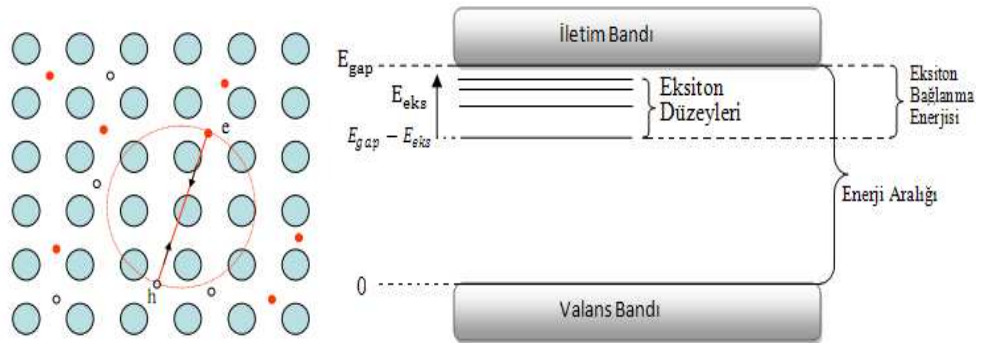
### 3.3 GaN Yarıiletkeninde Gözlenen Optiksel Geçişler

#### 3.3.1 Serbest Eksiton Geçişleri (FE)

GaN yarıiletkeni bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip bir lazer ile uyardığımız zaman valans bandındaki bir elektron iletim bandına geçer ve gerisinde elektron yokluğu olarak deşik (hole) bırakır. Elektron yokluğunu pozitif bir yük gibi düşünürsek oluşan bu zıt yüklü parçacıklar *Coulomb* etkileşimi nedeniyle tıpkı hidrojen atomundaki elektron ve proton gibi bağlı duruma geçebilirler. Elektron ve deşik arasındaki Coulomb çekim potansiyeli

$$U_r = -e^2/\epsilon r \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada  $r$  parçacıklar arası uzaklık ve  $\epsilon$  ortamın dielektrik sabitidir. Şekil 3.3.1.1. de görülen bağlı elektron-deşik çiftine eksiton adı verilir. Bir serbest eksitonda, elektron ve deşiklerin arasındaki mesafe atomik mertebeden çok daha büyüktür ve kristal boyunca serbestçe hareket edebilen lokalize olmayan durumlara sahiptir. Bir eksitonda elektron ve deşikler birbirleri etrafında dönebilirler ve kristal içinde dolaşıp enerji iletebilir. Ancak nötr oldukları için elektrik yükü iletemezler. Serbest eksitonlar büyük yörünge çaplarından ( $r$ ) dolayı küçük bağlanma enerjilerine sahiptir.



**Şekil 3.3.1.1** Doğrudan bir uyarılda yaratılan eksiton (Coulomb kuvveti ile birbirine bağlanmış elektron-deşik çifti) enerji düzeyleri.

Eksitonların sahip oldukları enerji seviyeleri iletim bandına çok yakın olup pozitronyuma benzer bir hidrojenik sistem gibi modelleyebiliriz [35]. Serbest eksitonlara Bohr modelini uygularken elektron ve deşiklerin yüksek  $\epsilon_r$  dielektrik katsayısına sahip bir ortamda hareket ettiğini hesaba katmalıyız.



Bohr modelinin sonuçlarına göre bağlı durumlar  $n$  kuantum sayısı ile gösterilmektedir.  $\mu = m_e^* m_d^* / m_e^* + m_d^*$  indirgenmiş etkin kütle olup iyonizasyon limitine göre  $n$ . seviyenin enerjisi;

$$E(n) = -\frac{\mu}{m_0} \frac{1}{\epsilon_r^2} \frac{R_H}{n^2} = -\frac{R_x}{n^2} \quad (3.2)$$

şeklindedir. Burada,  $m_0$  elektronun durgun-hal kütlesi,  $R_H$  hidrojen atomunun Rydberg sabiti (13.6 eV),  $R_x = (\mu/m_0 \epsilon_r^2) R_H$  ise eksitonun Rydberg sabitidir.

Elektron-deşik sistemin yörünge yarıçapı ise

$$r_n = \frac{m_0}{\mu} \epsilon_r n^2 a_H = n^2 a_x \quad (3.3)$$

ile verilir. Burada,  $a_H$  hidrojen atomunun Bohr yarıçapıdır (  $5.29 \times 10^{-11}$  m ) ve  $a_x = (m_0 \epsilon_r / \mu) a_H$  ise eksitonun Bohr yarıçapıdır.

Işınal tekrarbirleşme sürecinde serbest eksitonların sebep olduğu geçişlerde salınan ışınımın enerjisi

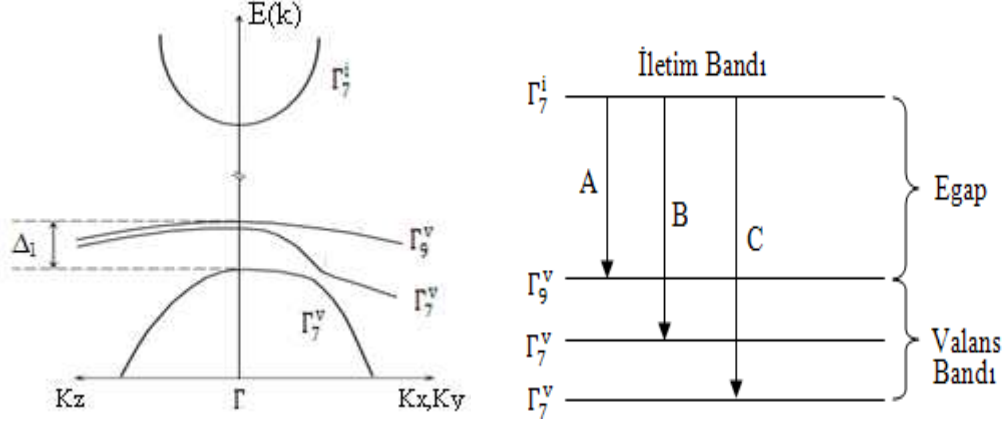
$$\hbar\omega = E_{\text{gap}} - E_{\text{eks}} \quad (3.4)$$

ile verilir ve eksitonun bağlanma enerjisi;

$$E_{\text{eks}} = \frac{\mu q^4}{2 \hbar^2 \epsilon^2} \quad (3.5)$$

ile verilir. Şekil 3.3.1.2 GaN'ın bant diyagramını göstermektedir. Wurtzite GaN direkt bant aralığına sahip olup iletim bandı minimumu ile valans bandı maksimumu aynı  $k$  değerinde ( $\Gamma$  yüksek simetri noktasında) bulunmaktadır. GaN'ın iletim bandı galyumun s orbitalinden oluşurken, valans bandı nitrojenin p orbitalinden oluşur [1]. GaN bant yapısında valans bandı spin-orbit ve kristal alan etkileşmelerinden dolayı yaklaşık olarak  $\Delta_1 \cong 30$  meV enerji aralığında dejenere olmayan 3-katlı bir bant yapısına sahiptir. Bantlar sırasıyla ağır-deşik ( $\Gamma_9$ ), hafif-deşik ( $\Gamma_7$ ) ve split-off bandı ( $\Gamma_7$ ) olarak adlandırılır. Bundan dolayı yarıiletkenin yapısında olan içsel soğurma ve emisyon spektrumunda bu üç valans bantta gerçekleşen geçişlerin baskın olması beklenir. Bu geçişlerin adlandırılması ise iletim bandından ağır deşik bandına geçiş

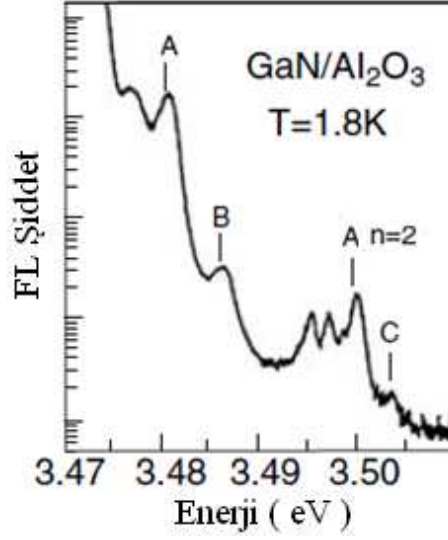
A  $\equiv \Gamma_7^i \rightarrow \Gamma_9^v$  serbest eksiton, hafif deşik bandına geçiş B  $\equiv \Gamma_7^i \rightarrow \Gamma_7^v$  serbest eksitonu ve split-off bandına geçiş C  $\equiv \Gamma_7^i \rightarrow \Gamma_7^v$  serbest eksitonu olarak adlandırılır.



Şekil 3.3.1.2 GaN'ın bant diyagramı ve A, B ve C Serbest Eksitonların şematik gösterimi.

GaN'ın sahip olduğu kristal yapısını ve simetrisini yansıtan ve A, B ve C olarak adlandırılan eksitonik geçişler, düşük sıcaklık yansıma, soğurma ve fotoluminesans yöntemler ile belirlenir. Bu ölçümler eksitonun bağlanma enerjisi, Bohr yarıçapı, dielektrik sabitlerin belirlenmesine yardımcı olur.

Monemar [36], yapmış olduğu çalışmada  $\pm 2$  meV'luk bir kesinlikte GaN'da A, B ve C eksiton çizgilerini sırasıyla 3.478, 3.484 ve 3.502 eV değerlerinde gözlemiştir. Chen, A, B ve C serbest eksitonlarının bağlanma enerjilerini  $\Delta E_b^A = \Delta E_b^B = 20$  meV ve  $\Delta E_b^C = 18$  meV olarak bulmuştur [37]. Rodina [38], yapmış olduğu çalışmada ise C eksitonunu daha az bir şiddete sahip olduğu ve A ve B eksiton çizgilerinin n=1 temel durumlarını aynı zamanda A eksitonunun n=2 durumunu da açık bir şekilde gözlemiştir. A, B ve C eksitonları arasındaki ayrımlar  $\Delta_{AB}$  ve  $\Delta_{AC}$  sırasıyla  $(5.5 \pm 0.1)$  ve  $(22.0 \pm 0.1)$  meV değerlerinde bulmuştur (Şekil 3.3.1.4). Eksiton enerjilerinin değerleri, farklı alt taşlar üzerine büyütülen GaN yapılarında sıklıkla gözlenen yerleşik zorlamaya (*strain*) güçlü bir şekilde hassasiyet gösterir. Safir alt taşın üstüne büyütülen GaN yapılarında oluşan zorlama (*compressive*) bant aralığını artırır ve bundan dolayı zorlama olmayan GaN yapılara göre A, B ve C eksiton enerjileri ve ayrımları artar. A ve B eksiton çizgileri 20 meV'a kadar, C eksitonu için 50 meV'a kadar yüksek enerji bölgesine kaymalar gözlenmiştir [39].



Şekil 3.3.1.3 A, B, C taban durumları ve A (n=2) eksiton pikleri

Diğer yandan farklı bir durum, SiC alt taş üzerine büyütülen GaN tabakalarda gözlenen zorlama (*tensile*) bant aralığına azaltan bir etkiye sebep olur. Bu yüzden A, B ve C eksiton enerjilerini ve ayrımlarını azaltır ve pik pozisyonlarında düşük enerji tarafına kaymalar gözlenir. Özet olarak, farklı alt taş üzerine büyütülen GaN tabakalar için elde edilen serbest eksiton enerjilerini Tablo 3.1’de verilmektedir.

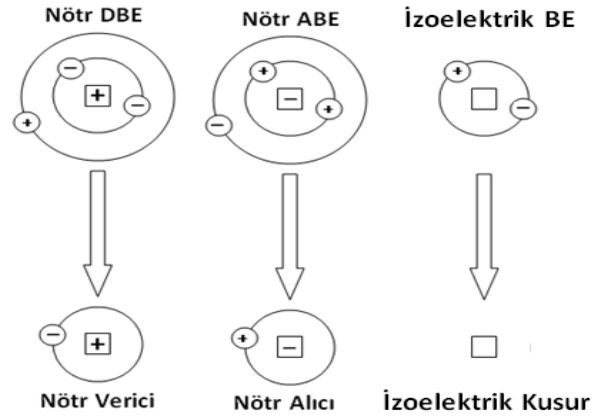
**Tablo 3.1** Farklı deneysel teknikler kullanılarak rapor edilen GaN eksiton enerjileri.

A	B	C	Alt Taş	Zorlama	Ref.
3.4771	3.4818	3.4988	GaN	-	[40]
3.4776	3.4827	3.5015	GaN	-	[41]
3.478	3.484	3.502	GaN	-	[42]
3.480	3.486	3.503	Safir	<i>Sıkıştırıcı</i>	[38]
3.4770	3.4865	3.5062	Safir	<i>Sıkıştırıcı</i>	[43]
3.485	3.493	3.518	Safir	<i>Sıkıştırıcı</i>	[44]
3.488	3.496	-	Safir	<i>Sıkıştırıcı</i>	[45]
3.4903	3.4996	3.525	Safir	<i>Sıkıştırıcı</i>	[46]
3.470	3.474	3.491	6H-SiC	<i>Gerici</i>	[47]
3.470	-	3.486	6H-SiC	<i>Gerici</i>	[48]

### 3.3.2 Bağlı Eksiton Geçişleri ( DBE ve ABE )

Bağlı eksitonların (BE) elektronik seviyeleri yarıiletken materyallerin bant yapısına bağlıdır. Yapıda alıcı merkezler bulunduğu zaman eksitonlar nötr ( $A^0$ ) bir vericiye bağlanabilir ve uygun fotoluminesans çizgisi ABE ya da  $I_1$  şeklinde adlandırılır. Eksitonlar yapıda bulunan nötr (D) veya iyonize ( $D^+$ ) olan verici atomlarına da bağlanabilirler. Bu durum sırasıyla DBE ve  $D^+BE$  şeklinde ya da  $I_2$  ve  $I_3$  şeklinde adlandırılır [49].

Nötr alıcılar ve vericiler için bağlı eksiton seviyelerinin açıklanmasında temel yaklaşım bağlı eksiton seviyelerinde parçacıkların bağlaşımıdır [50]. Örneğin, nötr sığ verici bağlı eksiton (DBE) için bağlı eksiton seviyesinde iki elektronun sıfır spinli iki-elektron seviyesinde eşleşmiş olduğu varsayılır. Değişin ise bu bağlı iki-elektron sistemine deşik-çekici Coulomb potansiyelinde zayıf bağ ile bağlı olduğu düşünülür. Benzer şekilde nötr sığ alıcı bağlı eksitonların (ABE) valans bandında iki-deşik seviyesi ve bir elektron etkileşmesine sahip olması beklenir (Şekil 3.2.2). Aynı durum izoelektronik durumlar için de geçerlidir.



**Şekil 3.3.2.1** Bağlı eksitonların elektronik yapısı. Nötr vericiler, nötr alıcılar ve izoelektronik kusurlar için bağlı eksiton seviyeleri ve karşılık gelen kusurun temel durumları gözükmemektedir.

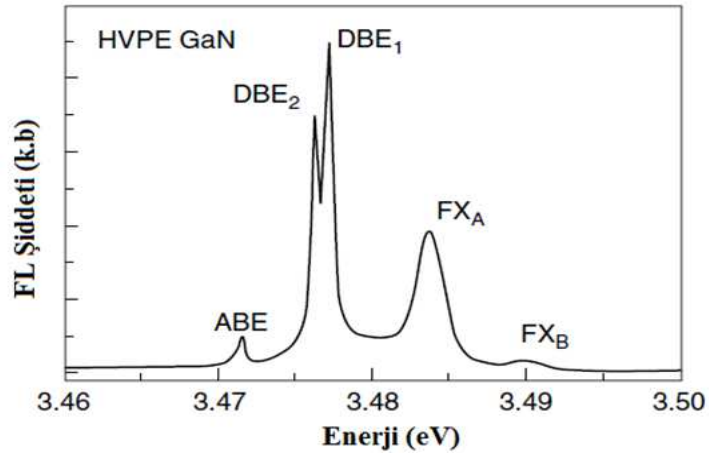
Bağlı eksitonların enerjisi eksitonun bağlı olduğu merkez tarafından düşürüldüğünden serbest eksitonun enerjisinden düşüktür ( $E_{BE} < E_{FE}$ ). Bağlı eksitonlar bir kusur ya da safsızlık merkezine bağlı olduklarından herhangi bir kinetik enerjiye sahip değildirler. Çizgi genişliği doğal çizgi genişliğidir ve  $\Delta E = \hbar/\tau$  belirsizlik ilkesi ile belirlenir. Burada  $\tau$ ; eksitonun doğal yaşam süresidir. Fakat pratikte düzensizlik ve sıcaklıktan dolayı çizgi genişlikleri malzemenin

kalitesine göre daha büyük değerler göstermektedir [18]. Bağlı eksiton rekombinasyonu sürecinde yayılan fotonun enerjisi

$$\hbar\omega = E_g - E_{eks} - E_{bx} \quad (3.6)$$

denklemleri ile verilir.  $E_{bx}$  serbest eksitonun bir safsızlık merkezine bağlanma enerjisidir. Eksitonlar nötr alıcılara ve vericilere bağlandıklarında parçacıklar çoğunlukla örtüşürler. Zıt işaretli parçacıklar iki örtüşen parçacığın çekici Coulomb potansiyeli ile zayıf bir şekilde bağlanırlar. GaN'da nötr verici bağlı eksitonlar, verici atomlarının istenmeyen sebeplerden dolayı yapıda bulunması yüzünden çoğu zaman özellikle düşük sıcaklıklarda baskın geçişlerdir. Örgü ve kusurlara bağlı titreşim modlarının her ikisini de içeren karakteristik fonon kuplajlarında (*coupling*) spektrumda gözlenebilir.

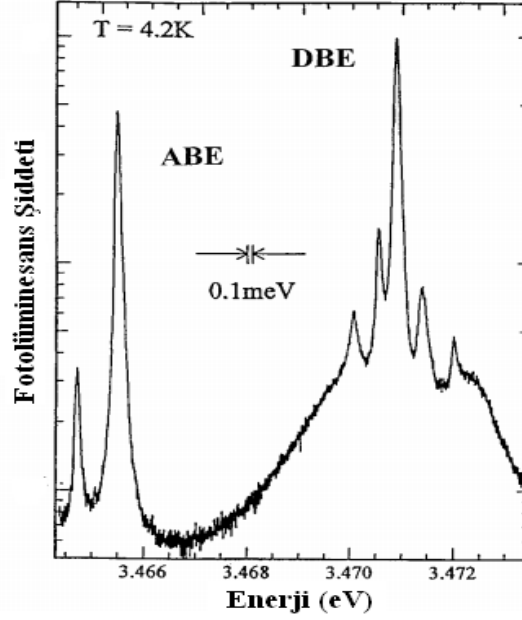
Monemar'ın yapmış olduğu çalışmada [52], HVPE tekniği ile büyütülen heteroepitaksiyel GaN'da 2 Kelvin sıcaklığında alınan fotoluminesans spektrumu şekil 3.3.2.2'de gösterilmektedir. Optiksel spektrumda 1 meV enerji aralığında iki tane verici bağlı eksiton piki gözlemiştir. Bu iki verici bağlı eksiton homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel GaN tabakalarda genelde görülen silikon ve oksijen safsızlıklarının sebep olduğu bağlı eksitonlardır.



Şekil 3.3.2.2 HVPE tekniği ile büyütülmüş GaN tabakaya ait Fotoluminesans Spektrumu.

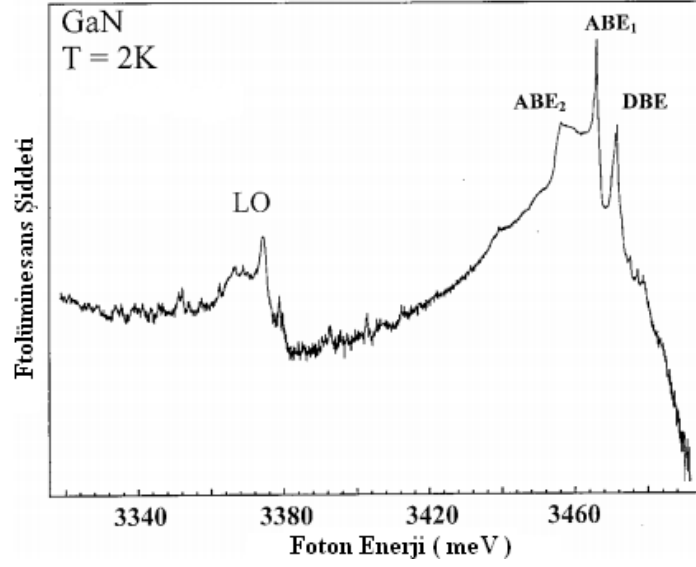
Kornitzer tarafından rapor edilen çalışmada [40], MOCVD ile GaN tek kristalli üzerine büyütülen GaN homoepitaksiyel örneklerde 0.1 meV'dan daha düşük spektral çizgi genişliğine sahip verici bağlı eksiton için pik pozisyonu 3.4709 eV'da gözlenmiştir.

Şekil 3.3.2.3’de görüldüğü gibi baskın bir DBE çizgisinin her iki tarafında bulunan tanımlanmamış keskin uydu pikleri bulunmaktadır. Daha zayıf bağlı eksiton çizgileri muhtemelen verici seviyelerinin dağılımından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 3.3.2.3** MOVPE ile büyütülen homoepitaksiyel GaN yapının FL spektrumu [40]. 3.466 eV’a yakın dominant ABE çizgisi ve 3.471 eV’a yakın güçlü DBE çizgisi.

Bu vericilere ait 3.44-3.46 eV enerji aralığında bulunan iki-elektron uydularının dikkatli bir çalışması, dominant verici bağlı eksiton için bağlanma enerjilerinin hemen hemen Si vericisinin bağlanma enerjisi ile aynı olduğu sonucuna götürmüştür [53]. Bu nedenle, bu zayıf geçişlerin silikon (Si) vericilerinin az oranda yapıyı tedirge etmesine bağlanmıştır [52,54]. 3.4718 eV’da ikinci bağlı eksitonik geçiş ise, muhtemelen tüm teknikler ile büyütülen GaN’da tipik bir kirlilik olarak kabul edilen oksijen (O) atomundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Verici bağlı eksitonik geçişlerin altındaki düşük enerji bölgelerinde genellikle alıcılara bağlı olduğu varsayılan zengin bir bağlı eksiton spektrumu mevcuttur.



Şekil 3.3.2.4 Alıcı bağlı eksitonlar ve boyuna optik (LO) fonon örtüşümü [55].

Şekil 3.3.2.4 ve aynı zamanda Şekil 3.3.2.3'de görüldüğü gibi zorlama olmayan GaN yapılarında en çok karşılaşılan nötr alıcı bağlı eksiton geçişi 3.466 eV civarındadır [55]. Bu geçişin düşük oranda Mg katkılı GaN örneklerde baskın olduğu gözlenmiştir [56]. Aynı zamanda spektrumda alıcı bağlı eksitonların karakteristik göstergelerinden olan düşük enerjili akustik fonon kanadı (*wing*) ve güçlü boyuna optik (LO) fonon kuplajını gözlenmektedir.

3.466 eV ABE'nun kimyasal orijini hakkında belirsizlik halen devam etmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi, birçok araştırmacı bu alıcı bağlı eksitonu  $Mg_{Ga}$  ile ilişkilendirmiştir. ABE tipi geçişlerin pik pozisyonlarının yapıda bulunan zorlamaya son derece bağlı olduklarında bunların orijinlerinin belirlenmesinde genelde bir zorluk vardır. Zorlamaya sahip tabakalarda verici bağlı eksitonlar serbest A eksitonunun pozisyonuna göre hemen hemen sabit bir mesafede kalırken, daha derin olan alıcı bağlı eksitonlar bu davranışı izlemezler. Örneğin, Mg-katkılı yapılarında 2 K sıcaklıkta serbest A eksiton piki 3.499 eV'da gözlenirken, Mg alıcı bağlı eksiton 19 meV bağlanma enerjisi ile 3.480 eV'da gözlenir [57]. Zorlama bulunmayan yapılar da aynı mesafe ise 11-12 meV olarak bulunmuştur [58].

Gerçek şu ki, literatürdeki hemen hemen bütün GaN FL spektrumunda gözlenen 3.466 eV ABE çizgisi, GaN'da genel bir kirlilik olan Mg atomuna atıfta bulunarak açıklanmaktadır.

3.466 eV ABE çizgisi şekil 3.3.2.2’de yüksek çözünürlüklü spektrumda bir tanesi 3.4655 eV civarı diğeri ise 3.4647 eV civarında olmak iki ayrı çizgi gibi gözlenmiştir. Bu iki çizginin pozisyonu yerel zorlamadan dolayı örnekten örneğe farklılık gösterir. Bu iki bağlı eksiton iki farklı alıcıdan kaynaklanmaktadır ki bu durum Ga ve N polarite ile büyüyen epitabakalarda iki çizginin çok farklı yoğunluklarının bulunması ile desteklenmektedir [59]. Temelde bu iki ABE çizgi aynı alıcı için mümkündür, çünkü wurtzite yarıiletkenlerde iki ayrı alıcı temel durum var olabilir.

Bant kenarı eksitonik geçişleri ayırt etmek için, sıcaklığa bağlı lüminesans deneyleri serbest eksitonlar ile verici veya alıcı bağlı eksitonlar arasındaki farklılıkları göstermeye imkân vermektedir. Sıcaklığın artması ile bağlı eksitonlara dair bütün pikler termal delokalizasyondan dolayı sönüme uğramalarına karşın, serbest eksitonların sönümü 50 K’e kadar önemsenebilir. Verici atomlarına bağlanan eksitonlar alıcılara bağlanan eksitonlardan daha çabuk sönüme uğrarlar ki bu durum bağlanma enerjileri ile ilgilidir [60].

### 3.3.3 Alıcı-Verici Çifti Geçişler ( DAP )

Yarıiletkende ki dengelemeden (*compensation*) dolayı iyonize olan alıcı ve vericiler materyalde bulunabilirler. Optiksel uyarma ile üretilen dengede olmayan taşıyıcılar, nötr olmalarına neden olan alıcı ve verici örgü noktalarında tuzaklanabilirler. Dengeye ulaşırken, nötr verici örgü noktaları üstündeki bazı elektronlar nötr alıcı örgü noktaları üstündeki deşikler ile tekrar birleşebilir.

GaN’da DAP geçişleri spektrumu ışınal rekombinasyonun en genel örnekleridir. DAP FL çizgileri düşük sıcaklıklarda daha düşük enerji bölgelerinde iyi çözümlenmiş LO fonon kopyaları olmak üzere 3.26 eV civarında bulunmaktadır. DAP geçiş enerjisi

$$\hbar\omega = E_g - E_V - E_A + q^2/\epsilon R \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilir.  $E_V$  ve  $E_A$  verici ve alıcıların bağlanma enerjisidir ve en sağdaki terim iyonize olan verici ve alıcıların etkileşiminden kaynaklanan *Coulomb*



potansiyelidir. R alıcı ve vericiler arasındaki mesafedir ve örgü sabitinden daha büyük bir değere sahiptir.

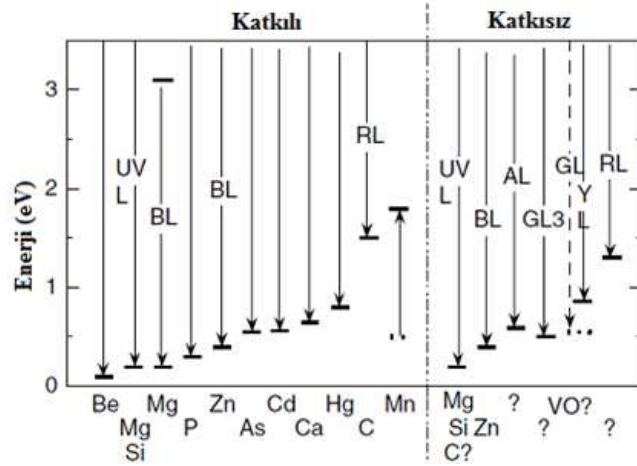
GaN'ın sıcaklığa bağlı spektrumunda iletim bandı içindeki sığ vericilerin termal iyonizasyonundan ( $E_D \sim 29$  meV) dolayı düşük sıcaklıktaki DAP geçişinin verici durumları yüksek sıcaklıklarda iletim bandının içine doğru girerek 3.273 eV'da pik pozisyonuna sahip serbest iletim bandından alıcıların oluşturmuş olduğu durumlara geçişler gözlenir. Orta sıcaklıklarda her iki durumda birlikte gözlenebilir. Bu ölçümlerden alıcının bağlanma enerjisi yaklaşık 230 meV olarak hesaplanmıştır. Bu alıcının kimliği açık değildir, fakat karbon (C) alıcısının nitrojen ile yer değiştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [61]. Bazı araştırmacılar ise alıcının orijini Ga örgü noktasına yerleşmiş Mg alıcısına bağlı olduğunu iddia etmişlerdir. Mg-katkılı wurtzite GaN'ın fotoluminesansı çalışılmıştır ve LO fonon kopyaları ile beraber 4.2 K sıcaklığında 3.26 eV'da DAP geçişi göstermiştir [61].

DAP geçişi için ışımsal yaşam ömrü davranışına bakarsak, bir alıcı ve valans bandını içeren yüksek derecede katkılı n-tipi GaN tabakalara kıyasla ağır olarak Mg-katkılı p-tipi GaN epitabakalarda 3.21 eV ve 2.95 eV emisyonlarının taşıyıcı dinamikleri nanosaniye altındaki zamanlarda eksponansiyel olmayan yaşam ömürleri göstermişlerdir [62].

### 3.3.4 Kusurlara Bağlı Geçişler

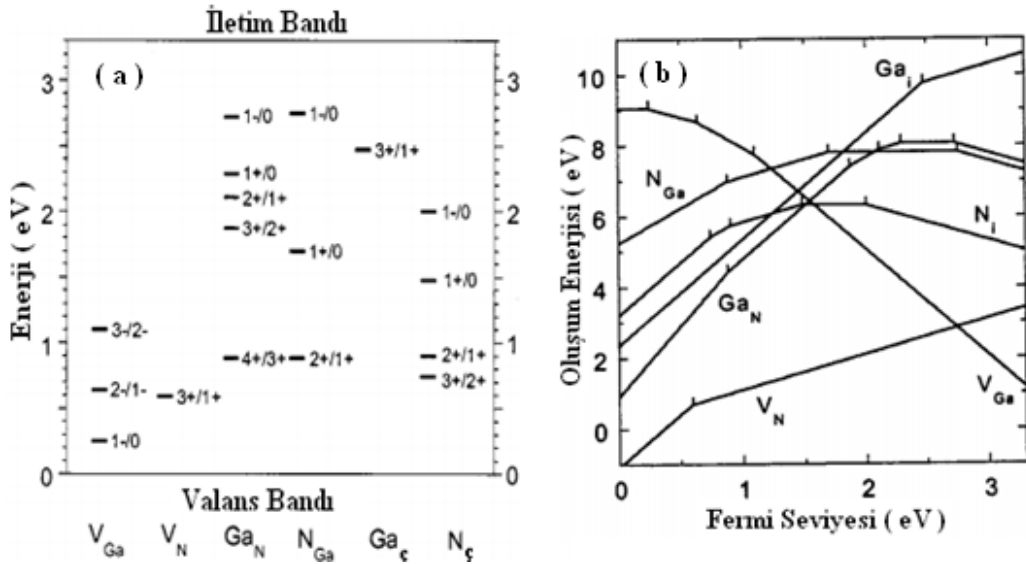
GaN'ın fotoluminesans spektrumun 3.45-1.20 eV aralığında, büyütülen numunelerin kalitesine ve/veya katkılı olup olmamasına bağlı olarak yukarıda bahsedilen eksitonik geçişlerin yanı sıra yoğun bir şekilde farklı kusur merkezli geçişlerde gözlenmektedir. Şekil 3.3.4'de bant aralığındaki kusur seviyelerinin enerji pozisyonları ve geçişlere bağlı şematik tanımlaması gösterilmektedir [63].

GaN'da oluşan yerel noktasal kusurlar boşluklar ( $V_{Ga}$  ve  $V_N$ ), çatlaklar ( $Ga_\chi$  ve  $N_\chi$ ) ve zıt yerleşmeler ( $Ga_N$  ve  $N_{Ga}$ ) olarak sıralanabilir. Yapıda bulunan safsızlık atomlarının sebep olduğu Ga ve N atomlarının yerini alma ( $X_{Ga}$ ,  $Y_N$ ) gibi kusurlar da gözlenebilmektedir ve diğer noktasal kusurlar ile kompleks yapılar oluşturabilirler.



**Şekil 3.3.4.1** GaN'da safsızlıklar ile ilişkili olan ışımsal geçişler ve istem dışı olarak tanımlanan kusurlar [63].

Şekil 3.3.4.2'de GaN'da gözlenebilen yerel kusurlar, bazı safsızlıkların sebep olduğu kusurlar ve farklı şekillerde oluşturdukları komplekslerin oluşum enerjileri ve bant aralığındaki enerji pozisyonları gösterilmektedir. GaN yarıiletkeninde oluşabilen yerel kusurlar ile ilgili daha detaylı bilgiye [63,64] numaralı referanslardan ulaşılabilir.



**Şekil 3.3.4.2** GaN'da yerel kusurlar için (a) geçiş seviyeleri ve (b) fermi seviyesinin bir fonksiyonu olarak oluşum enerjileri [64].

### 3.3.4.1 Mavi Lüminesans Bandı

GaN'ın FL spektrumun 2.9 eV civarında gözlenen ve mavi lüminesans (ML) olarak adlandırılan bandı yıllar boyunca araştırmacıların dikkatlerini çekmiştir. ML bandı çoğu zaman katkısız GaN'ın yanı sıra Mg ve Zn katkılı GaN'da da benzer şekillerde ve enerji konumlarında gözlenmektedir. ML bandının rapor edilen enerji pik değerleri 2.7 eV ile 3.0 eV aralığındadır. Katkısız GaN'da ML bandı sığ vericilerden (düşük sıcaklıkta) veya iletim bandından (yüksek sıcaklıklarda) göreceli olarak daha derin seviyelerde bulunan (0.34-0.40 eV civarında iyonizasyon enerjilerine sahip) vericilere olan geçişlerden kaynaklanabileceği ifade edilmiştir [65]. Katkısız GaN'da ML bandı bir alıcı olarak yerel Mg safsızlığını ve derin bir verici olarak  $V_N$ -Mg kompleksini içeren derin seviye DAP geçişi ile de ilişkilendirilmiştir [66]. Alıcının termal aktivasyon enerjisi 0.34 eV olarak hesaplanmıştır. Yerel Mg safsızlığı bu pik için sorumlu görülmesine rağmen, ML bandı aynı zamanda  $V_{Ga}$ 'na bağlı komplekslerin özellikle de  $V_{Ga}O_N$  [67] ve  $V_{Ga}H_n$  [68] komplekslerine atıfta bulunulmuştur. Daha sonraki raporlarda, düşük sıcaklıklarda katkısız ve Zn katkılı örnekler üzerinde iki grubun yaptığı çalışmada ML bandı için Zn alıcısına bağlı olduğunu düşünmüşlerdir [69]. Katkısız GaN'da ML bandı için en mantıklı açıklamanın Zn kirlenmesi olması çok muhtemeldir. ML bandı çoğu zaman  $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  veya daha az Zn konsantrasyonlu GaN örneklerinde görülmektedir [69].

### 3.3.4.2 Sarı Lüminesans Bandı

Herhangi bir metotla büyüyen ve hemen hemen bütün katkısız veya isteyerek ya da istem dışı katkılı olan n-tipi GaN örneklerin fotolüminesans spektrumlarında sistematik olarak  $2.2 \pm 0.1$  eV civarında büyük çizgi genişliğine sahip ve sarı lüminesans (SL) olarak adlandırılan bir ışınal geçiş gözlenmektedir. Bu geçişin orijini hakkında birçok farklı görüş ortaya sürülmüş olup literatürde yüzlerce yayının konusu olmuştur.

GaN'da SL bandı her zaman geniştir ve yaklaşık olarak 350-450 meV civarında çizgi genişliği ile *Gaussian* bir piktir ve en düşük sıcaklıklarda bile

yapısızdır. Ancak SL bandının kesin pozisyonu ve şekli çoğu zaman örneğe bağlılık gösterir.

İlk çalışmalarda GaN'da ki SL bandı derin bir vericiden sığ bir alıcıya geçiş olarak açıklanmasına rağmen [70], birçok araştırmacı SL'nin kaynağı olarak iletim bandından veya sığ bir vericiden derin bir alıcıya olan geçişleri göstermişlerdir. [71-74]. Bu bandı güçlü elektron-fonon kuplajına bağlı noktasal kusur gibi tanıtmak içinde çeşitli girişimler yapılmıştır. SL bandının şekli ve konumunda incelenen örnekler arasında farklılık olması çeşitli noktasal kusurların bu emisyonu katkıda bulunabileceğini şeklinde değerlendirilmiştir.

SL bandının bir noktasal kusura mı yoksa bant aralığındaki enerji durumlarının dağılımına mı bağlı olduğu halen açık bir sorudur. SL bandına yapısal olarak bakarsak, genelde  $V_{Ga}$ 'na atıfta bulunulmuştur [71]. Bunlara ek olarak, ilk temel hesaplamalarda çeşitli  $V_{Ga}$ -bağlı kusurların katkısız GaN'da SL için sorumlu olabileceğini tahmin edilmiştir. Teori aynı zamanda düşük oluşum enerjisini, izole olmuş  $V_{Ga}$  için derin seviyeleri,  $V_{GaSi_{Ga}}$  ve  $V_{GaO_N}$  gibi sığ vericiler ile komplekslerinin de katkıda bulunabileceğine de öngörmektedir.

SL-bağlı kusurun kimliği aynı zamanda da SL bant için sorumlu olan geçişin tipi ve bağlı kusurun GaN'ın yüzeyinde mi yoksa iç yapısına mı lokalize olduğu sorusu yıllar boyunca yayılan tartışmaların konusu olmuştur. SL bandının daha önceki detaylı çalışmalarında [75], sığ bir vericiden derin bir alıcıya (çok muhtemelen  $V_{GaC_N}$ ) bir ışımsal geçişe bağlanmıştır.

Sıcaklıkla SL bandının pozisyonu ve şeklinin değişimi çeşitli yayınlara konu olmuştur [76]. Sıcaklık 10-30 K'den 300 ve 380 K'e kadar değiştiği zaman SL bandının pozisyonu 20-40 meV menziline değişim göstermiştir. SL bandının yarı genişlik (FWHM) değeri sıcaklıkla beraber artmaktadır ve güçlü elektron-fonon kuplajları söz konusudur.

### 3.3.5 Eksitonik Geçişlerde Zorlama (*Strain*) Etkisi

Farklı alt taşlar üzerine büyütülen GaN tabakalarda örgü parametreleri arasındaki uyumsuzluk olmasından dolayı yapıda sıkıştırma (*compressive*) ve germe (*tensile*) gibi zorlamalar gözlenebilir. Safirin göreceli olarak daha büyük termal genişleme katsayısından dolayı, bu alt taş üstüne büyüyen GaN filmler düzlemde ve büyüme doğrultusu boyunca sıkıştırıcı bir zorlama ile karşılaşır. SiC üzerine büyüyen GaN tabakalarda ise bu durum yapıda germe meydana getirir.

Yapılarda oluşan bu zorlamalar yarıiletkenin optik özellikleri üstünde önemli etkilere sahiptir. Fotoluminesans spektrumunda gözlenen A, B ve C serbest eksitonik geçişlerin enerjileri safir ve SiC alt taşları üzerine büyüyen GaN filmler için farklılık göstermektedir. SiC üzerine büyüyen filmlerde eksitonik enerji değerleri safir üzerine büyüyen filmlere kıyasla daha düşük enerji değerlerine sahiptir [77].

Eksitonik geçiş enerjilerinde böyle sistematik olarak gözlenen geçişler GaN ve alt taş materyalleri arasındaki termal genişleme katsayıları ve örgü parametreleri uyumsuzluğundan dolayı yerel zorlamaların etkisine atıfta bulunulmuştur [77].

Eksitonik geçişlerde gözlenen zorlamalara bağlı enerji kaymaları, wurtzite GaN için hidrostatik ve tek eksenli bileşenlerin her ikisini de içeren deformasyon potansiyelinin hesaplanmasına izin verir. Eksitonik enerjilerde zorlamaya bağlı kaymalar wurtzite yapıya sahip bir materyalin zorlama hamiltonyeni ile elde edilebilir [78]. Zorlamadan bağımsız ve izotropik spin-orbit etkileşim yaklaşımı altında A, B ve C serbest eksitonlarının enerjileri

$$\begin{aligned} E_A &= E_A(0) + a_z \epsilon_{zz} + a_{xy}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + b_z \epsilon_{zz} + b_{xy}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \\ E_B &= E_B(0) + a_z \epsilon_{zz} + a_{xy}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + \Delta_+ [b_z \epsilon_{zz} + b_{xy}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})] \\ E_C &= E_C(0) + a_z \epsilon_{zz} + a_{xy}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + \Delta_- [b_z \epsilon_{zz} + b_{xy}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})] \end{aligned} \quad (3.8)$$

gibi tanımlanır.  $E_{i0}$  ( $i=A,B,C$ ) zorlama-serbest eksitonik enerjiler,  $a_{ij}$  ve  $b_{ij}$  ( $i,j=x,y,z$ ) hidrostatik ve tek eksenli deformasyon potansiyelleri ve  $\epsilon_{ij}$  ( $i,j=x,y,z$ ) GaN için zorlama tensör bileşenleridir.

Zorlama bileşenleri

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{\parallel} = \frac{a_s - a_0}{a_0} \quad (3.9a)$$

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_{\perp} = \frac{c_s - c_0}{c_0} \quad (3.9b)$$

şeklinde verilir. Burada  $a_s$  ve  $c_s$  GaN filmlerin  $a_0$  ve  $c_0$  ise alt taşın örgü parametreleridir. Çift eksenli zorlama şartları altında  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  ve  $\epsilon_{zz}$  bileşenleri elastik sabitler ile

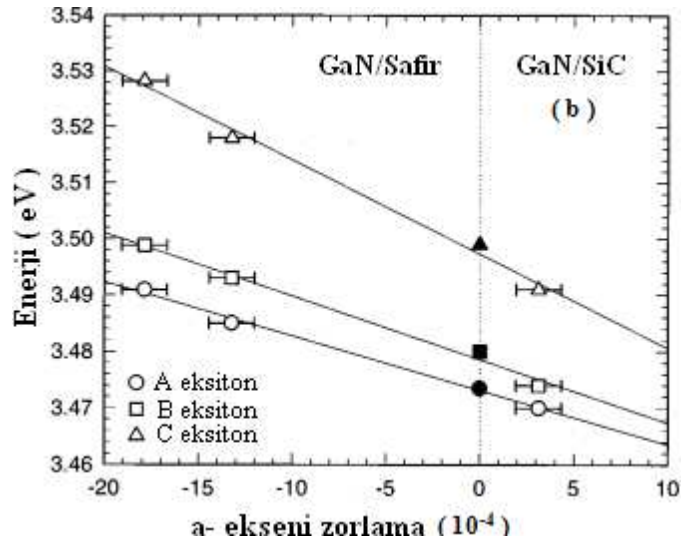
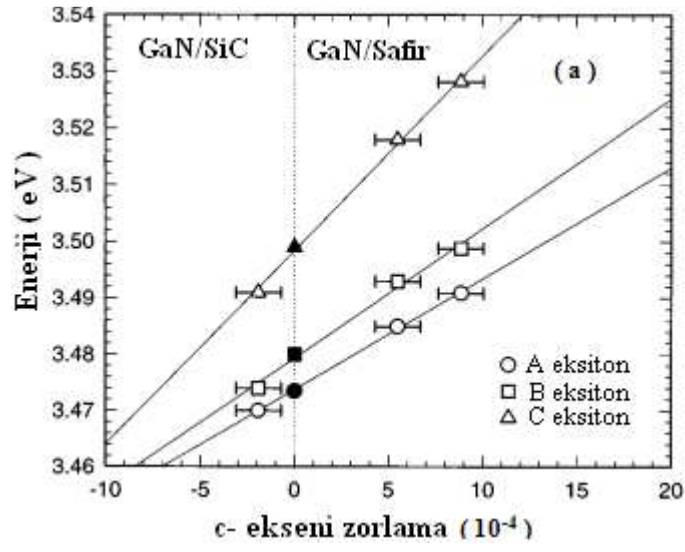
$$\epsilon_{\perp} = -\frac{2C_{13}}{C_{33}} \epsilon_{\parallel} \quad (3.10)$$

şeklinde bir birlerine bağlıdır.  $\Delta_+$  ve  $\Delta_-$  katsayıları spin-orbit etkileşmelerinden dolayı valans bant orbital seviyelerinin karışımını temsil eder ve

$$\Delta_{\pm} = \frac{1}{2} \left\{ 1 \pm \left[ 1 + 8 \left( \frac{\Delta_3}{\Delta_1} - \Delta_2 \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.11)$$

olarak verilir.  $\Delta_1$ ,  $\Gamma_9$  ve  $\Gamma_7$  orbital durumlarının kristal alan ayırımıdır.  $\Delta_2$  ve  $\Delta_3$  parametreleri spin orbit etkileşmesini tanımlar. *Gil, B.*, X-ışını kırınımı (XRD) ile örgü parametrelerini, fotoluminesans ve yansıma ölçümleri ile serbest eksitonik enerjileri elde ederek  $(\Delta_3/\Delta_1 - \Delta_2) \approx 0.531$  değerini bulmuştur [70]. *Shan*, yapmış olduğu çalışmada safir ve SiC üzerine büyütülen GaN tabakalar için zorlamalara karşı eksitonik enerjilerin değişimini göstermiştir [77].

Şekil 3.3.5.1'de GaN'da c- eksenini (büyüme doğrultusu) ve a- eksenini (düzlem) örgü sabitlerine karşı ölçümü alınmış serbest eksiton enerjileri ve zorlamanın serbest olduğu GaN'da eksitonik geçiş enerjileri de referans için şekilde gösterilmiştir.



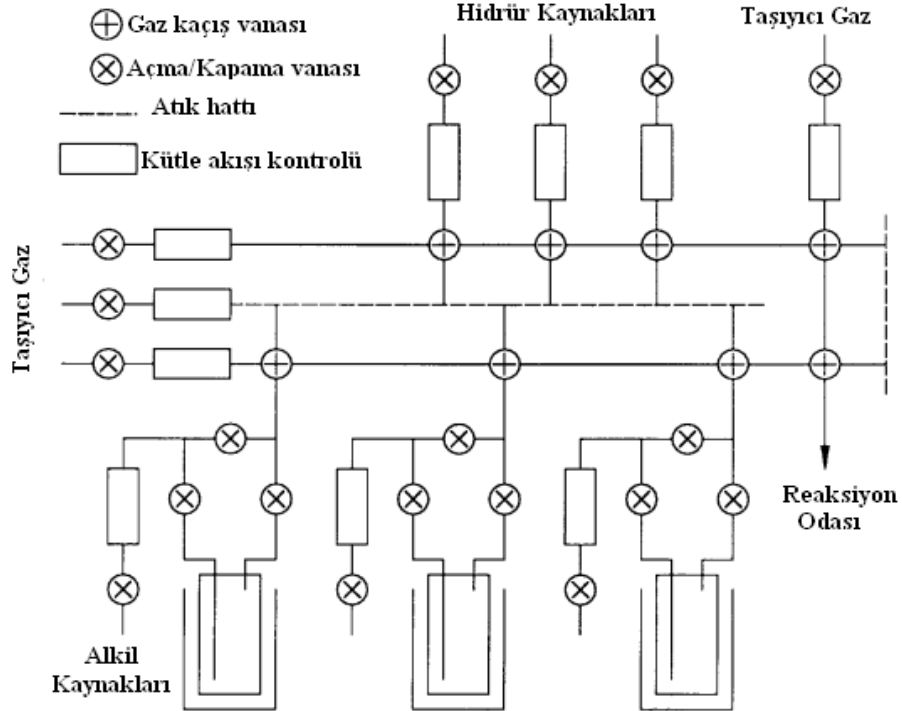
**Şekil 3.3.5.1** (a) c eksen ve (b) a eksen (düzlem) boyunca zorlamaya karşı safir ve SiC alt taşlar üzerine büyütülen GaN filmlerinde serbest eksiton enerji değişimleri [77].

## 4. DENEYSEL YÖNTEMLER

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

Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama (MOCVD) tekniği aynı zamanda Organo-Metalik Kimyasal Buhar Depolama (OMCVD), Metal-Organik Buhar Faz Epitaksi (MOVPE) gibi farklı isimler alabilmektedir. İlk olarak 1960'larda InP büyütülmesi için kullanılan bu teknik, bu ilk deneylerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda termal kimyasal buhar depolama (CVD) yönteminden daha düşük sıcaklıklarda büyütmeye imkân sağlamıştır. O günden itibaren, ekipmanın kalitesi ve karmaşıklığı, ilk öncü kimyasalların saflığı ve çeşitliliği durmadan bir gelişme içerisinde olup MOCVD şu an özellikle elektronik ve optoelektronik uygulamalarda geniş bir ölçekte kullanılmaktadır [80].

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.

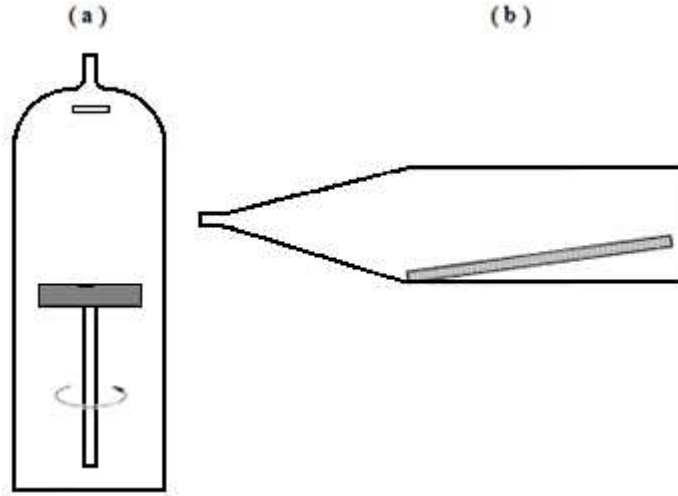


Şekil 4.1.1 Hidrojen taşıma modülü, alkali taşıma modülü ve atık hattının gösterildiği bir MOCVD reaktör iletim sisteminin şematik gösterimi [81].



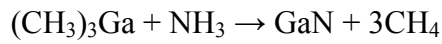
Şekil 4.1.1 de bir MOCVD sisteminde hidrür, alkali ve taşıyıcı gazlarının büyümenin yapıldığı reaktöre giden iletim sistemi gösterilmektedir. Büyütülmesi istenilen yarıiletken için gerekli kimyasallar, grafit suseptör üzerine yerleştirilmiş alt taşın bulunduğu reaktör odasına H<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> gaz taşıyıcı balonları ile iletilir.

Gaz akışının büyük yüzey alanlarda ve çoklu tabaka tasarımlarında daha düzgün olması için farklı reaktörler geliştirilmiştir. Gaz girişi ve pozisyonuna göre yatay ve dikey olmak üzere iki tip reaktör vardır (şekil 4.1.2).



Şekil 4.1.2 (a) Dikey ve (b) yatay olmak üzere iki farklı reaktör geometrisi.

Şekil 4.1.1 de gösterilen iletim yoluyla büyüme sıcaklığında bulunan ( 600-1100 K ) reaktöre gelen öncüller farklı kimyasal süreçler ile yarıiletken tabakaları oluştururlar. Örneğin, GaN için söz konusu olan durum Ga kaynağı olarak metal-organik molekül olan trimetilgalyum (TMGa) ve N kaynağı olarak kullanılan amonyak gazı (NH<sub>3</sub>)



şeklinde bir piroliz ( ısı bozunma ) reaksiyonuna girerek GaN ve zehirli bir gaz olan metan (CH<sub>4</sub>) gazı oluşur. MOCVD, bu şekildeki piroliz reaksiyonları sonucu oluşan zararlı gazları ortamdaki uzaklaştırmak için gelişmiş bir dış atım sistemine sahiptir. Yarıiletkenlerin büyütülmesinde en çok kullanılan metal-organik ve hidrür kaynakları Tablo 4.1 de gösterilmektedir.

**Tablo 4.1** 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>

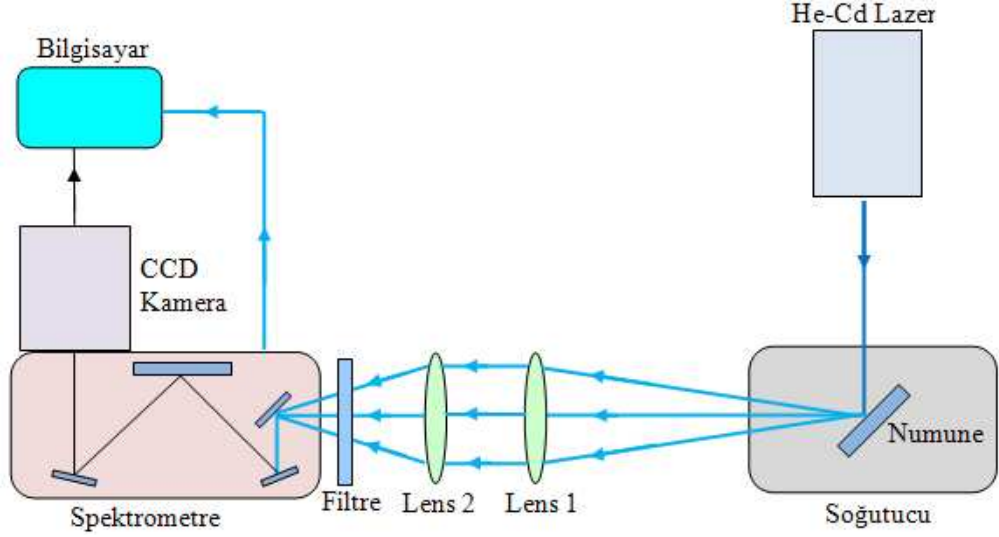
Bu tez çalışmasında kullandığımız GaN numuneler, Bilkent Üniversitesi Nanatom Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki bulunan yatay reaktör geometrisine sahip AIX 200/4 RF-S modelli MOCVD tekniği ile büyütülmüştür. Bu sistem, firmanın sıcaklık kontrolü, büyütme sırasında görüntüleme, büyütülen materyalin yüzey düzgünlüğünün sağlanması konularında yaptığı bütün geliştirmelere, yenileştirme ve iyileştirmelere sahiptir.

#### **4.2 Kararlı-Hal Fotoluminesans Tekniği**

Fotoluminesans ölçümünün temeli, malzemesinin yüksek enerjili UV foton yayan bir lazer ile uyarılıp iletim bandından valans bandına düşen elektronların saldığı fotonun karakterize edilmesidir. Salınan bu fotonun dalga boyu doğrudan malzemenin yasak bant aralığı ( $E_{gap}$ ) enerjisi ile ilişkilidir. Şekil 4.2.1'de fotoluminesans deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmektedir.

Fotoluminesans ölçümlerinde, numuneyi uyarmak 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.

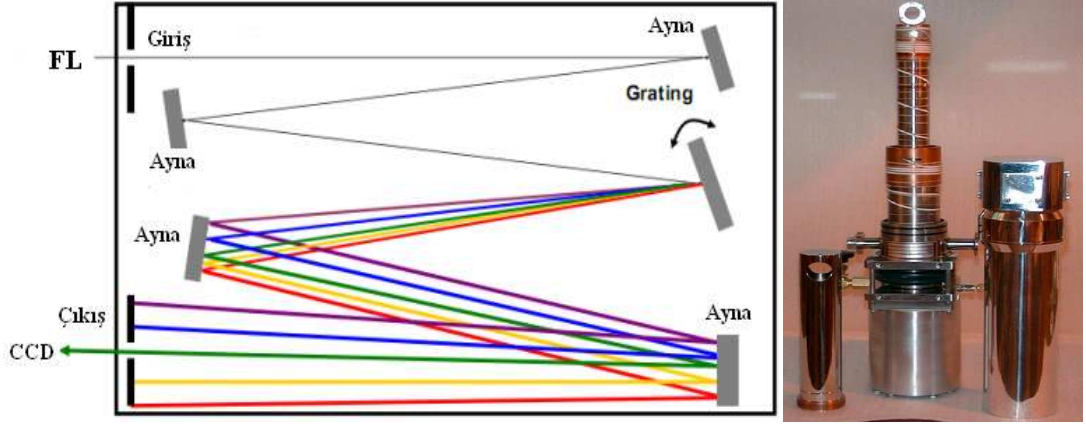
8-300 K sıcaklık aralığında ölçüm alınabilmesi için numuneler kapalı-devirli bir soğutucuya yüklenir. Sistem düşük sıcaklık mertebesine ( 8K ) ulaşıncaya kadar soğumayı sağlayan sürekli He gazı iletimi devam etmektedir.



**Şekil 4.2.1** Fotolüminesans deney düzeneği şematik gösterimi

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 dağıtma 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 ışımasına karşılık gelen bu sinyalin; şiddet-dalgaboyu (veya şiddet-enerji) grafiği çizilerek fotolüminesans spektrumu elde edilir.



Şekil 4.2.2 Spektrometre ve soğutucu (*cryostat*).

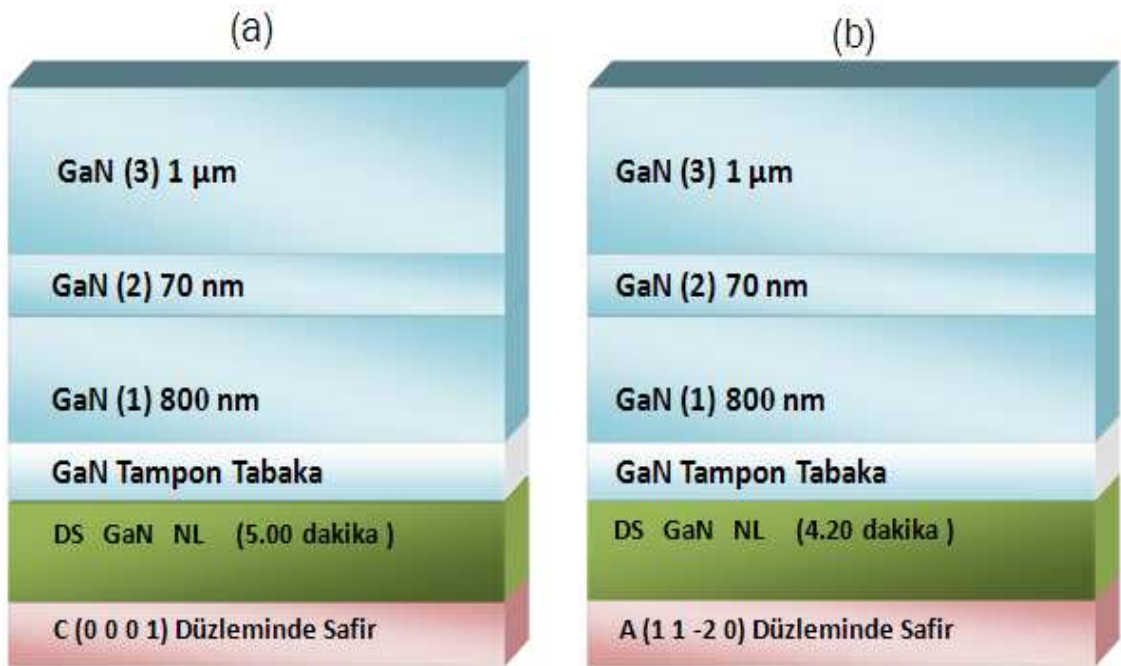
Bu teknik, yarıiletkenlerin optik özelliklerini belirlemek için kullanılan çok duyarlı, kullanışlı ve numuneye zarar vermeyen bir deneysel tekniktir ve yarıiletken malzemelerin kalitesi, yasak enerji bant aralığı, malzemenin yapısında görülen doğal kusurlar ve safsızlıkların orijinleri ve yoğunlukları hakkında bilgiler verir.

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

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

### 5.1 Numunelerin Yapısı

Metal-Organik Kimyasal Buhar Depolama Tekniği ile safir alt taşın c (0 0 0 1) ve a (1 1 -2 0) düzlemleri üzerine büyütülen GaN tabakalar tez çalışmamızda kullandığımız iki farklı yapıdır. Galyum kaynağı olarak trimetil-galyum (TMGa) ve nitrojen kaynağı olarak ise amonyak (NH<sub>3</sub>) kullanılmıştır. Bu iki örneğin şematik yapısı şekil 5.1.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 5.1.1** MOCVD tekniği ile safir alt taşın (a) c- ve (b) a- düzlemleri üzerine büyütülen GaN tabakalar.

Yapılar arasında temel farklılık safir alt taşın düzlemlerinin farklı olmasıdır. Epitaksiyel büyütmeden önce yüzeydeki oksitleri temizlemek için alt tabaka 1100 °C de 5 ve 4,2 dakika boyunca nitrojen ortamında ısıl işleme tabi tutuldu. Büyütülen filmlerin tabaka yapıları birbirine benzemektedir ve kalınlıkları aynıdır. Her iki örnek için de tampon tabaka olarak GaN kullanılmıştır ve katkılama yapılmamıştır.

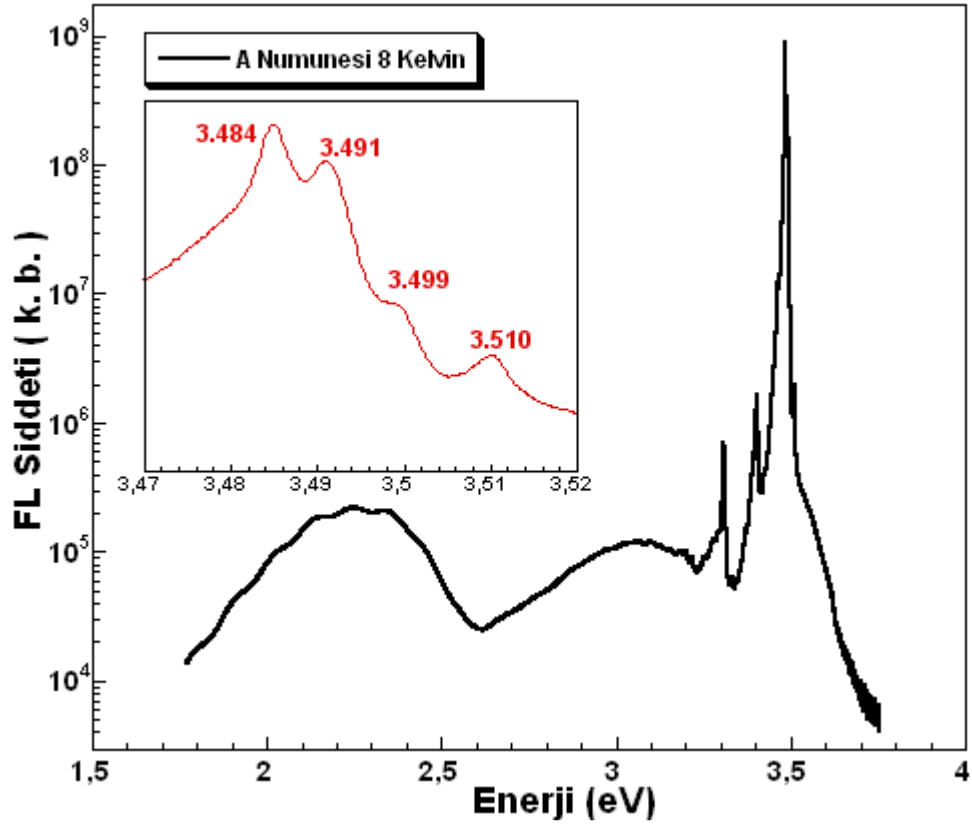
Örnekleri isimlendirmedeki basitlik açısından safirin c- ve a- düzlemleri üstüne büyütülen GaN numuneler sırasıyla A ve B örneği olarak adlandırılmıştır.

## 5.2 Fotolüminesans Ölçümler

A ve B örneklerinin optik özelliklerini belirlemek için 8-300 K sıcaklık aralığında Kararlı-Hal Fotolüminesans tekniği kullanılmıştır. İlk olarak her iki numune için düşük sıcaklık FL spektrumlarını ve gözlenen optiksel geçişleri inceleyelim.

### 5.2.1 A Numunesi

Safir alt taşın polar c- düzlemi (0001) üzerine büyütülen GaN filmlerin 8 K sıcaklıkta alınan FL spektrumu şekil 5.2.1.1'de gösterilmektedir.

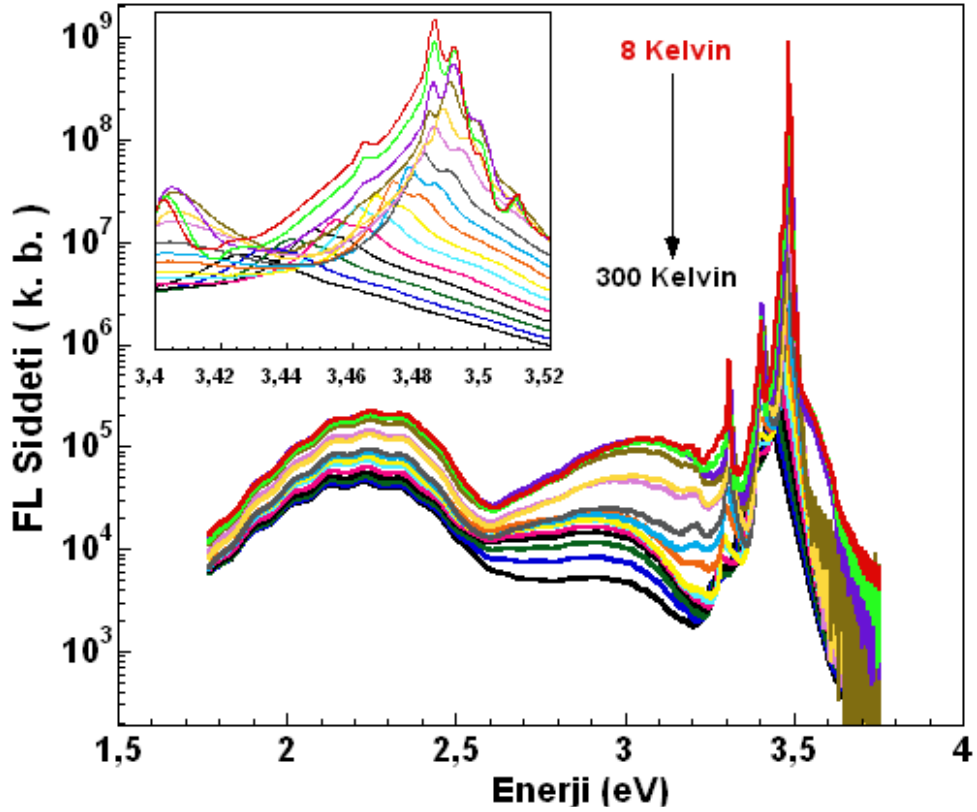


Şekil 5.2.1.1 A numunesi için 8 K sıcaklıkta FL spektrumu

FL spektrumundan görüldüğü gibi bant kenarı civarında ve daha düşük enerji bölgesinde çeşitli optiksel geçişlere ait pikler bulunmaktadır. Bant kenarı bölgesinde ki optiksel geçişler şekil 5.2.1.1'de küçük grafikte daha ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

GaN'ın valans bandı, kristal alan ve spin-yörünge etkileşmelerinden dolayı farklı enerji bantlarına yarılmış ve kaynaklanan A ve B serbest eksiton geçişleri, FL spektrumunda sırasıyla 3.499 ve 3.491 eV pik pozisyonlarında bulunmaktadır. C serbest eksitonuna ait herhangi bir pik gözlenmemiştir. Bu piklerin 8 K'de yarı genişlik değerleri ise sırasıyla 3.288 ve 2.935 meV olarak ölçülmüştür. Literatürde A ve B serbest eksitonlar arasındaki enerji farkı yaklaşık olarak  $\sim 9$  meV mertebesindedir [82-84]. Bizim sonuçlarda gözlenen A ve B eksitonları arasındaki enerji farkı yaklaşık  $\sim 8$  meV değerindedir ve literatürdeki çalışmalar ile uyum içerisindedir.

8-300 K sıcaklık aralığında her 20 K de bir alınan ölçümlerin fotoluminesans spektrumları şekil 5.2.1.2'de gösterilmektedir. A ve B serbest eksitonları 300 K sıcaklığına kadar FL spektrumunda gözlenmektedirler.



Şekil 5.2.1.2 8-300 K Sıcaklık aralığında FL ölçümler.

8 K sıcaklığında alınan spektrumun 3.484 eV'da gözlenen pikin sıcaklık davranışı A serbest eksitona göre farklılık göstermektedir. Bu pikin FL şiddeti A serbest eksitona göre daha hızlı bir azalış göstermekte olup 160 K civarında alınan

spektrumda gözlenmemektedir. Bu geçişin yarı genişlik değeri 2.412 meV olup A serbest eksitonundan daha dardır. Bağlı eksitonların kinetik enerjileri serbest eksitonlara göre daha yavaş olduğu için genellikle spektral çizgi genişlikleri serbest eksitonlara göre daha düşüktür [63]. Bütün bu davranışlar bu çizginin bağlı eksiton ait bir geçiş olduğunu göstermektedir. Ayrıca bağlı eksitonların A serbest eksitonuna göre pik pozisyonu sıcaklığın değişmesiyle hemen hemen sabittir. 3.484 eV bağlı eksitonu, A serbest eksitonundan yaklaşık olarak 7 meV daha düşük enerji bölgesindedir ve bu enerji bağlı eksitonun lokalizasyon enerjisi olarak düşünülebilir.

FL spektrumunda 3.510 eV yüksek enerji bölgesinde gözlenen pik sıcaklığa bağlı davranışı bağlı eksitona benzer bir davranış sergilemektedir. 80 K sıcaklıktan sonra FL spektrumunda kaybolmaktadır ve yarı genişlik değeri 3.2 meV olarak ölçülmüştür. Bu düşük şiddetli geçiş 3.484 eV bağlı eksitona göre yaklaşık 35 meV kadar bir enerji farkı ile spektrumun yüksek enerji bölgesinde bulunmaktadır. Bu değer, Si<sub>Ga</sub>, O<sub>N</sub> gibi vericilerin bağlanma enerjilerine (30.18 ve 33.2 meV) yakındır [83]. Bu yüzden 3.484 eV çizgisi nötr verici (*donor*) bağlı eksiton (DBE) geçişinin taban durumuna, 3.510 eV deki geçiş ise bu nötr DBE'nun 1. uyarılmış durumuna ait olduğunu göstermektedir. Bu bağlanma enerjisi [85] numaralı referans ile uyum içerisindedir.

Literatürde bir çok çalışmada polar ve polar olmayan doğrultularda büyütülen GaN filmlerde 3.4-3.44 eV civarında gözlenen pikin kaynağı olarak düzlemsel kusurlara atıfta bulunulmuştur. Bu pikin tam konumu örneğe göre değişiklik göstermektedir [78]. Özellikle, bu emisyonun şiddeti taban-düzlemi istiflenme hatalarının (*basal-plane stacking faults*) yoğunluğu ile orantılı olduğu bulunmuştur. İstiflenme hataları epitaksiyel III-V Nitrürlerde görülen başlıca kusurlardan bir tanesidir. Wurtzite yapıda [0001] doğrultusu boyunca, atomlar ..AaBbAaBb.. istiflenme dizisini takip ederken, zinc-blend (ZB) yapıda [111] doğrultusu boyunca atomlar ..AaBbCcAaBbCc.. istiflenme dizisini takip ederler. Bu emisyon pikine sebep olan kusur ise ..AaBbAaBbCcAaBb.. şeklinde wurtzite yapının içine küçük bir zinc-blende yapının girmesi ile oluşan istiflenme hatalarından kaynaklanmaktadır ve genelde I<sub>1</sub> tipi istiflenme hatası olarak adlandırılır [86]. Polar ve polar olmayan doğrultularda büyütülen örneklerin her ikisinde de gözlenebilir.



A kodlu örneğin 8 K örgü sıcaklığında alınan FL spektrumunda gözlenen 3.402 eV pik değerine sahip geçiş I<sub>1</sub> tipi yapısal kusurlardan kaynaklanmakta olup yaklaşık yarı genişliği 5.043 meV olarak ölçülmüştür. 300 K sıcaklığına kadar FL spektrumunda gözlenmektedir.

A örneğinin FL spektrumunda 3.308 eV enerji çizgisinde gözlenen pik, genelde GaN tabakalarda 3.3 eV civarında karşılaşılan kusurlara bağlı en baskın piklerden bir tanesidir [63]. 8 Kelvin sıcaklıkta yarı genişlik değeri 4.793 meV olarak ölçülen pik alıcı-verici geçişi (DAP) olarak adlandırılmaktadır.

Alıcı-verici geçişinin hemen altında daha düşük enerji bölgesinde, daha geniş olan pik derin seviye kusurlarının sebep olduğu piktir. 8 K sıcaklıkta 3.089 eV pik pozisyonunda ve 330 meV yarı genişlik değerine sahip optiksel geçiş mavi lüminesans bandı olarak adlandırılmaktadır [63].

Son olarak, FL spektrumunda 2.238 eV'da pik pozisyonuna sahip ve yarı genişlik değeri 420 meV olan pik, her hangi bir yöntemle büyütülen katkı ya da katkısız hemen hemen tüm GaN filmlerde karşılaşılan sarı lüminesans bandı olarak adlandırılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi bu geçişin kaynağı olarak komplekslerin sebep olduğu derin seviye kusurları gösterilmektedir [63].

A numunesi için 8 K sıcaklıkta FL spektrumunda gözlenen yukarıda bahsettiğimiz optiksel geçişlerin pik pozisyonları, yarı genişlik değerleri ve pik şiddetleri Tablo 5.2.1 de özetlenmiştir.

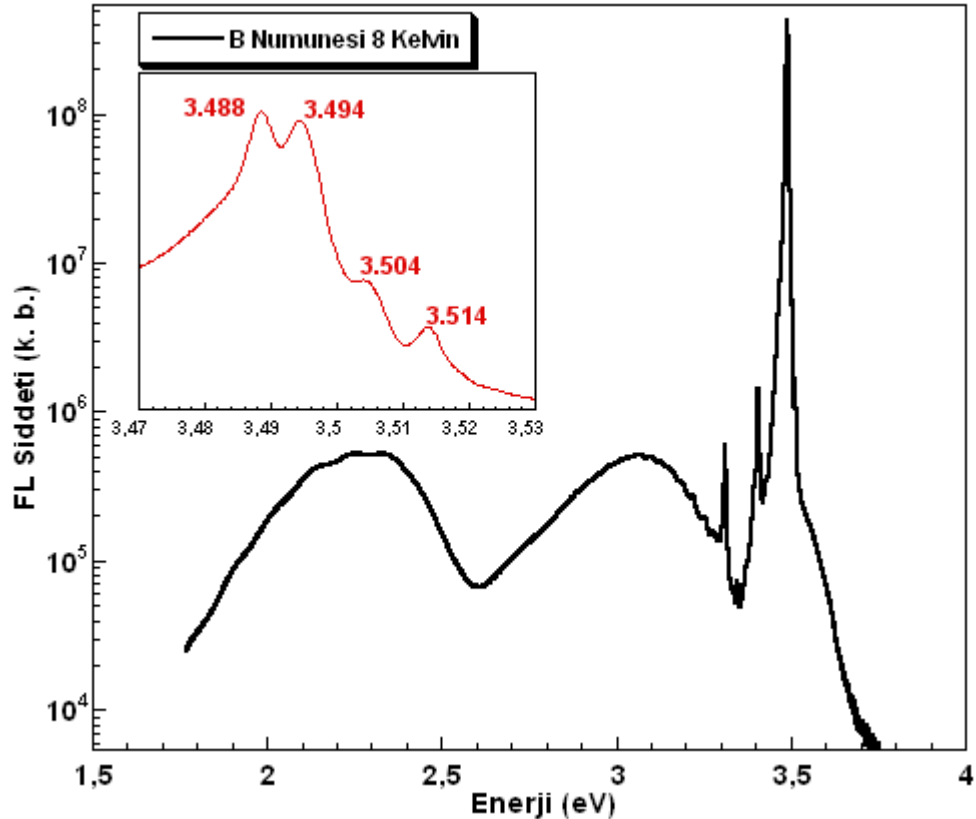
**Tablo 5.2.1** A numunesi için 8K FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonu, FWHM değerleri ve pik şiddetleri.

Optiksel Geçişler	Pik Pozisyonu (eV)	FWHM (meV)	Pik Şiddeti ( k.b. )
A Eksiton	3.491	3.288	$2.37 \times 10^8$
B Eksiton	3.499	2.935	$4.13 \times 10^6$
DBE	3.484	2.412	$6.52 \times 10^8$
DBE (n=1)	4.510	3.184	$1.12 \times 10^6$
Düzlemsel Kusur	3.402	5.043	$1.13 \times 10^6$
DAP	3.308	4.793	$6,1 \times 10^5$
Mavi Lüminesans	3.089	330	$1.16 \times 10^5$
Sarı Lüminesans	2.238	420	$2.07 \times 10^5$

A örneğinde FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlerin pik pozisyonları, safir alt taş ve GaN tabakalar arasındaki örgü uyumsuzluğu ve termal genişleme katsayıları farkından kaynaklanan yaklaşık olarak  $8 \times 10^{-4}$  değerinde tek eksenli (c-yönü) zorlamanın sebep olduğu bir yüksek enerji bölgesine kayma söz konusudur. Bu kayma miktarı yaklaşık olarak 15 meV hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda [77] numaralı referans kullanılmıştır.

### 5.2.2 B Numunesi

Safir alt taşın polar olmayan a- düzlemi (1 1 -2 0) üzerine büyütülen GaN filmlere ait 8 K sıcaklıktaki FL spektrumu şekil 5.2.2.1’de gösterilmektedir. B numunesi için FL spektrumu, A numunesine ait FL spektrumuna büyük benzerlik göstermektedir.

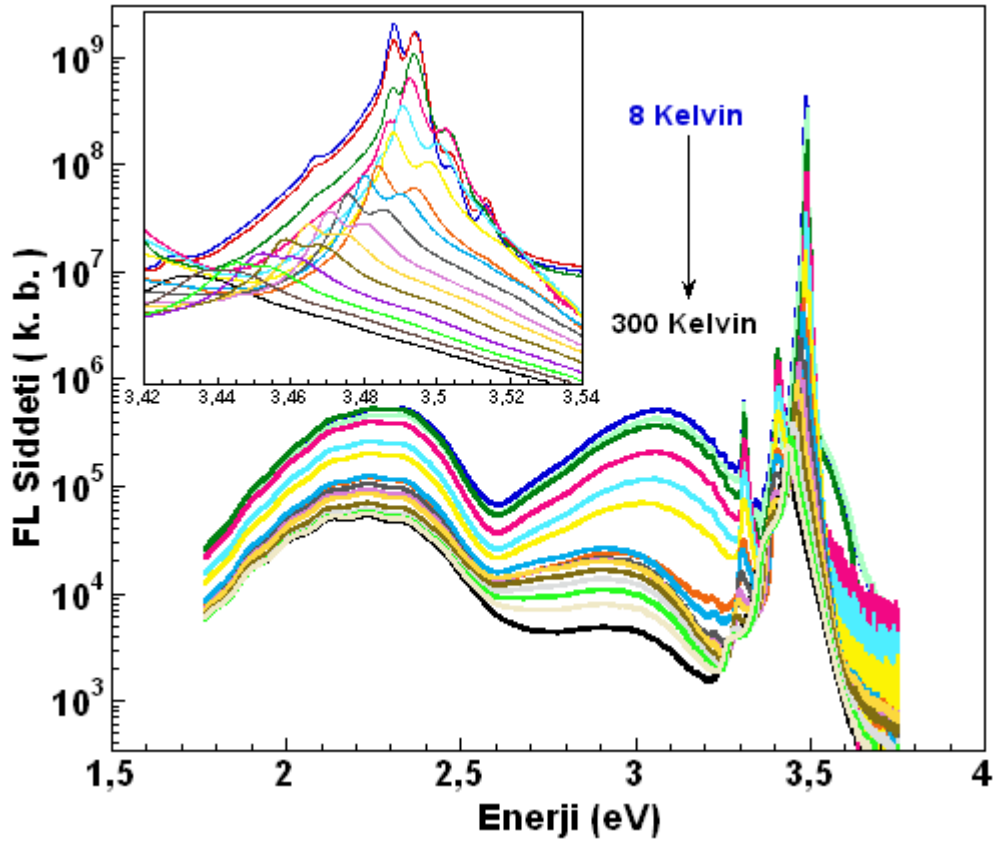


Şekil 5.2.2.1 B numunesi için 8 K sıcaklıkta FL spektrumu.

FL Spektrumunda görüldüğü gibi bant kenarı civarında ve daha düşük enerji bölgelerinde farklı optiksel geçişlere ait pikler görülmektedir. 3.5 eV civarındaki farklı pikler küçük grafikte daha iyi çözümlenmiştir.

Valans bant ayrımlarından kaynaklanan A ve B serbest eksitonlarına ait geçişler sırasıyla 3.494 ve 3.504 eV enerji çizgilerinde gözlenmiştir. Serbest eksitonlara ait pik pozisyonları arasındaki enerji farkı yaklaşık olarak  $\sim 10$  meV değerindedir. Bu değer literatürdeki yapılan birçok çalışma ile uyum içerisindedir [82-84]. Bu geçişlere ait yarı genişlik değerleri ise 3.1 ve 3.2 meV olarak ölçülmüştür. A örneğine benzer olarak B örneğinde de A serbest eksitonundan yaklaşık olarak 6 meV daha düşük olan 3.488 eV enerji çizgisinde gözlenen pikin, 8K sıcaklıkta A eksitonundan daha yüksek bir şiddete sahiptir. 160 K sıcaklığına kadar FL spektrumunda gözlenmektedir. Sıcaklığın artmasıyla A serbest eksitonuna göre daha hızlı sönüm göstermesi ve mesafesini koruması bu pikin bağlı eksitona ait bir geçiş olduğunu göstermektedir. Serbest eksitonlara göre kinetik enerjisi daha düşük olmasından dolayı, bu geçişleri karakterize eden pik serbest eksiton piklerine göre daha dardır [63]. 3.488 eV bağlı eksiton pikinin yarı genişlik değeri 2.646 meV olup A serbest eksitonun yarı genişlik değerinden daha düşüktür.

8-300 K sıcaklık aralığında her 20 K de bir alınan ölçümler ile elde edilen fotoluminesans spektrumu şekil 5.2.2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2.2.2 8-300 K Sıcaklık aralığında FL Ölçümler

3.514 eV yüksek enerji bölgesindeki pik, sıcaklık davranışı 3.488 eV bağlı eksitona benzemekte ve 40 K sıcaklığına kadar FL spektrumunda gözlenmektedir ve yarı genişlik değeri 3.514 meV olarak ölçülmüştür. A örneğindeki durum burada da geçerlidir. 3.514 eV pikinin sıcaklık davranışı ve 3.488 eV pikine yaklaşık olarak 35.3 meV olması bu optiksel geçişe ait pikin yapıda safsızlık olarak bulunan Si safsızlığının sebep olduğu düşünülmektedir.

Bundan dolayı, 3.488 eV piki nötr DBE ve 3.514 eV piki ise DBE'nun uyarılmış durumu olarak adlandırdık. Bulduğumuz sonuçlar [85] çalışması ile uyum içindedir ve bu çalışmada farklı yapılarda Si safsızlıklarına ait bağlanma enerjileri gösterilmektedir.

Polar yapıların yanı sıra polar olmayan yapılarda da istiflenme hatası gibi yapısal kusurlarda gözlenebilir. A örneğine benzer şekilde, B örneğinde de 3.406 eV enerji çizgisinde gözlenen pik I<sub>1</sub> tipi istiflenme hatalarından kaynaklanmaktadır ve yaklaşık olarak 5.7 meV yarı genişlik değeri ölçülmüştür.

FL spektrumunda 3.312 eV enerji çizgisinde gözlenen pikin, çoğunlukla GaN tabakalarda 3.3 eV civarında karşılaşılan kusurlara bağlı piklerden bir tanesi olduğunu söylemiştik [63]. 8 Kelvin sıcaklıkta yarı genişlik değeri 5.207 meV olarak ölçülen pik alıcı-verici çifti geçişi (DAP) olarak adlandırılmaktadır.

A örneğinde karşılaşılan mavi ve sarı lüminesans pikleri B örneğinde de benzer pozisyonlarda ve benzer genişliklerde görülmüştür. 3.070 ve 2.246'eV da gözlenen mavi ve sarı bant geçişleri kompleks kusurların oluşturduğu derin seviye geçişleridir. yarı genişlik değerleri sırasıyla 292 ve 426 meV olarak ölçülmüştür.

B numunesi için 8 K sıcaklıkta FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlerin pik pozisyonları, yarı genişlik değerli ve pik şiddetleri Tablo 5.2.2 de özetlenmiştir.

B örneğinde FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlerin pik pozisyonları, polar olmayan doğrultudaki safir alt taş ile GaN tabakalar arasındaki örgü uyumsuzluğu ve termal genleşme katsayıları farkından kaynaklanan yaklaşık olarak düzlemde (a- yönü)  $-16 \times 10^{-4}$  değerinde zorlamanın sebep olduğu yüksek enerji bölgesine kayma söz konusudur. Bu kayma miktarı yaklaşık 20 meV olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar [77] numaralı çalışma dikkate alınarak yapılmıştır.

**Tablo 5.2.2** B numunesi için 8 K FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonu, FWHM değerleri ve pik şiddetleri.

Optiksel Geçişler	Pik Pozisyonu (eV)	FWHM (meV)	Pik Şiddeti ( k.b. )
A Eksiton	3.494	3.126	$2.35 \times 10^8$
B Eksiton	3.504	3.170	$1.45 \times 10^6$
DBE	3.488	2.646	$2.649 \times 10^8$
DBE (n=1)	3.514	3.514	$9.73 \times 10^5$
Düzlemsel Kusur	3.406	5.649	$1.3 \times 10^6$
DAP	3.312	5.207	$4.99 \times 10^5$
Mavi Lüminesans	3.070	292	$5.06 \times 10^5$
Sarı Lüminesans	2.246	426	$5.24 \times 10^5$

İki örneği karşılaştırsak, B örneğinde A örneğine kıyasla daha çok zorlama bulunmakta ve FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlere ait pik pozisyonlarında yüksek enerji bölgelerine daha çok kaymalar mevcuttur. Bu durum B örneğinde örgü uyumsuzluğunun daha yüksek olduğunu göstermektedir. Fakat iki örneğinde temel olarak benzer optiksel kaliteye sahip olduğunu söylenebilir. İki örnek içinde FL spektrumunda gözlenen optiksel geçişlerin pik pozisyonlarının, yarı genişlik değerlerinin ve pik şiddetlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini karakterize eden fit denklemlerimizi inceleyelim.

### 5.3 Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümler ve Analizleri

FL spektrumunda gözlenen optiksek geçişlerin pik pozisyonlarının, yarı genişlik değerlerinin ve şiddetlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği incelemek için 3 farklı ampirik fit denklemi kullandık.

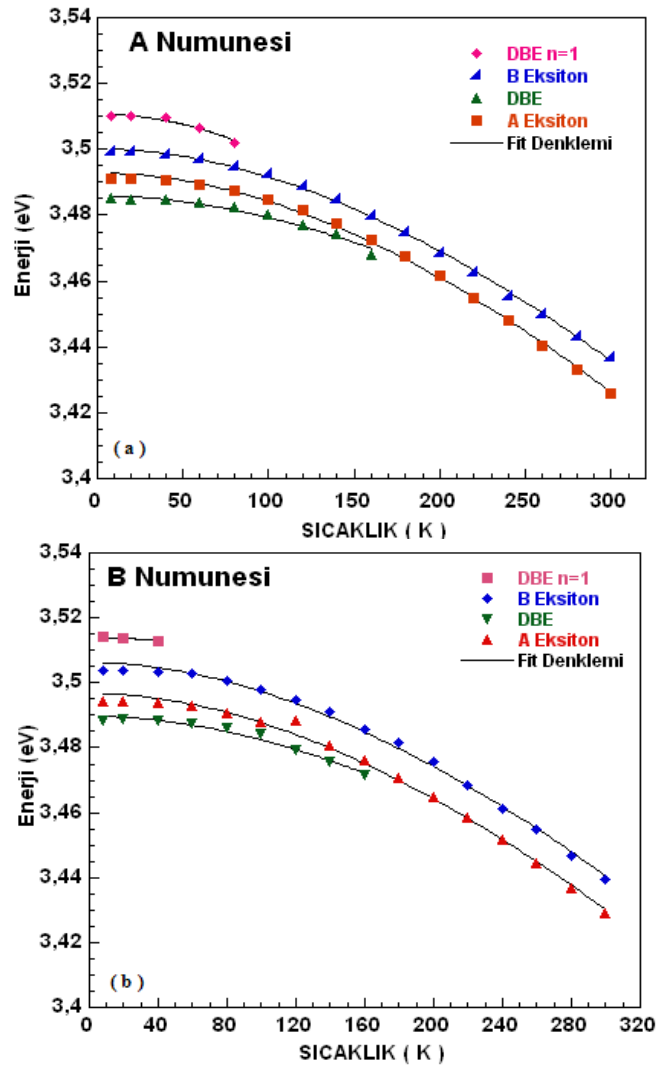
#### 5.3.1 Enerji Pik Pozisyonlarının Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

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 bir birinden uzaklaşır ve elektronların gördüğü potansiyel azalır. Bu durum bant aralığında bir azalmaya

sebeplendir ve bunun göstergesi olarak optiksel geçişlerin pik pozisyonlarında bir kıvrımla kayma gözlenir. İçsel geçişlerin enerji pik pozisyonlarının sıcaklığa bağımlılığı Varshni denklemi olarak bilinen

$$E(T) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (5.1)$$

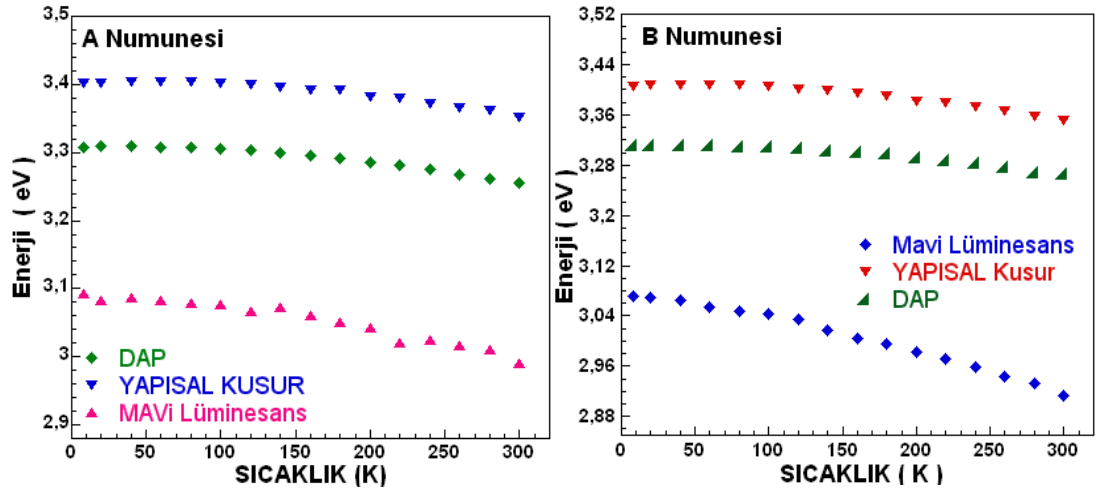
bir ampirik denklemi ile karakterize edilir.  $E(0)$ ,  $T=0K$ 'de geçiş enerjisidir.  $\alpha \rightarrow dE/dT$  ( $T \rightarrow \infty$ ) olup  $\beta \rightarrow \Theta$  Debye sıcaklığıdır.  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri tabakalardaki yerel zorlamalara, büyüme ve ölçüm parametrelerine bağlı olup örnekten örneğe farklılık gösterir. 8 K sıcaklığından oda sıcaklığına kadar alınan ölçümlerde A ve B numunesi için sıcaklıkla pik pozisyonlarındaki değişimi açıklayan fit grafiği şekil 5.3.1.1'de gösterilmektedir. Kullanılan fit denklemi (5.1) numaralı denklemdir.



Şekil 5.3.1.1 (a) A ve (b) B numunelerinde gözlenen eksitonik geçişleri için pik pozisyonu değişimi.

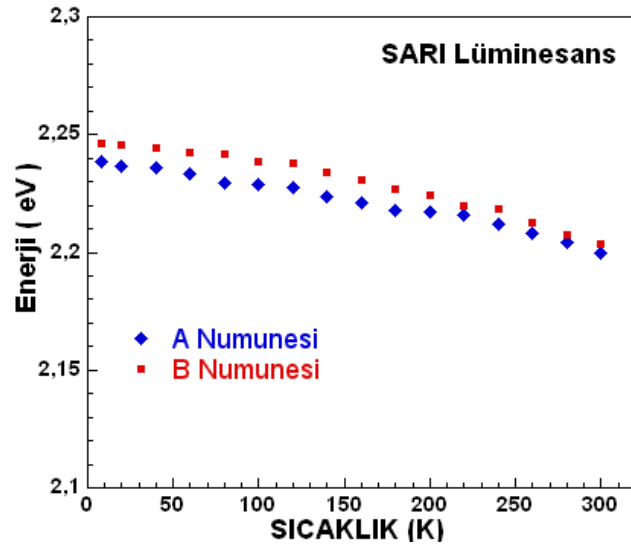
Sıcaklığın artması ile örgü genişlemesinden ve elektron-fonon etkileşiminden dolayı bant aralığında meydana gelen azalmayı takip ederek sonucunda bütün eksitonik geçişlerin pik pozisyonlarında kıvrıla kayma gözlenmiştir. Her iki örnekte de bağılı eksiton piki 160 K sıcaklıktan sonra görünmezken, A ve B serbest eksitonlar oda sıcaklığında gözlenmektedir ve serbest eksitonlar arasındaki enerji farkı oda sıcaklığına kadar aynı değerlerini korumaktadırlar.

Alıcı verici çifti (DAP), mavi lüminesans, sarı lüminesans ve istiflenme hatasından kaynaklanan geçişlerde sıcaklığın artmasıyla eksitonik geçişlerdeki gibi pik pozisyonunda büyük değerlerde azalmalar gözlenmez. Kusurlara bağılı bu pikler derin seviye geçişleri oldukları için bant aralığındaki büzülme takip etmezler. Bundan dolayı (5.1) denklemi bu optiksel geçişlere fit yapılmamıştır. Şekil 5.3.1.2’de A ve B numunelerinde gözlenen yapısal kusur, alıcı-verici çifti (DAP) ve mavi lüminesans geçişlerinin sıcaklığın artması ile pik pozisyonundaki değişim gösterilmektedir.



Şekil 5.3.1.2 Yapısal, DAP ve mavi lüminesans geçişleri için pik pozisyonu değişimi.

Genelde DAP geçişlerinde sıcaklığın artması ile verici durumlarında tuzaklanan elektronlar termal enerji ile iletim bandının kenarlarına ya da iletim bandına iyonize olurlar. Bu durumda ilk olarak 100 K sıcaklık civarında pik pozisyonunda bir maviye kayma olması beklenirdi ve daha sonra sıcaklığın artması ile karakteristik kıvrıla kayma gerçekleşir [87]. A ve B numunesinde gözlenen sarı lüminesans bant geçişi için sıcaklığın artması ile pik pozisyonu değişimi Şekil 5.3.1.3’de gösterilmektedir.



**Şekil 5.3.1.3** A ve B numunesinde gözlenen sarı lüminesans bant geçişi için pik pozisyonu değişimi.

Fit grafiklerinden ve literatürdeki bazı çalışmalardan elde edilen fit parametreleri ve kızıla kayma miktarları Tablo 5.3.1 özetlenmiştir.

**Tablo 5.3.1** A ve B numunesi ve literatürdeki bazı çalışmalar için fit parametreleri.

Örnekler	Optiksel Geçişler	$\alpha$ ( $10^{-4}$ eVK $^{-1}$ )	$\beta$ (K)	Kızıla Kayma (meV)
<b>A</b>	<b>A Eksiton</b>	10.39	1100	65.5
	<b>B Eksiton</b>	9.064	965	62.5
	<b>DBE</b>	6.66	900	16.8
	<b>DBE n=1</b>	10.87	800	8
<b>B</b>	<b>A Eksiton</b>	9.63	1000	65.4
	<b>B Eksiton</b>	8.76	900	64.5
	<b>DBE</b>	7.3	900	17.1
	<b>DBE n=1</b>	5.53	800	11
				<b>Referanslar</b>
<b>Literatür</b>	<b>A Eksiton</b>	$10.4 \pm 0.8$	$1100 \pm 100$	<b>[88]</b>
	<b>B Eksiton</b>	$10.5 \pm 0.8$	$1100 \pm 100$	
	<b>A Eksiton</b>	8.32	835.6	<b>[89]</b>
	<b>B Eksiton</b>	10.9	1194.4	
	<b>A Eksiton</b>	7	1300	<b>[90]</b>



Deneysel sonuçlarımızın sıcaklığa bağlı pik pozisyonundaki değişim literatürde ki birçok çalışma ile uyum içerisindedir. Yukarda birkaç çalışma için serbest eksiton fit parametreleri verilmiştir. Fit parametreleri büyüme ve ölçüm tekniklerinin yanı sıra örnekten örneğe farklılık gösterir ve kusurlar, yerel zorlamalar ve dislokasyonlar geçiş enerjilerinin ve diğer parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

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

Optiksel geçişlere ait yarı genişlik değerlerinin sıcaklıkla değişimini karakterize etmek için

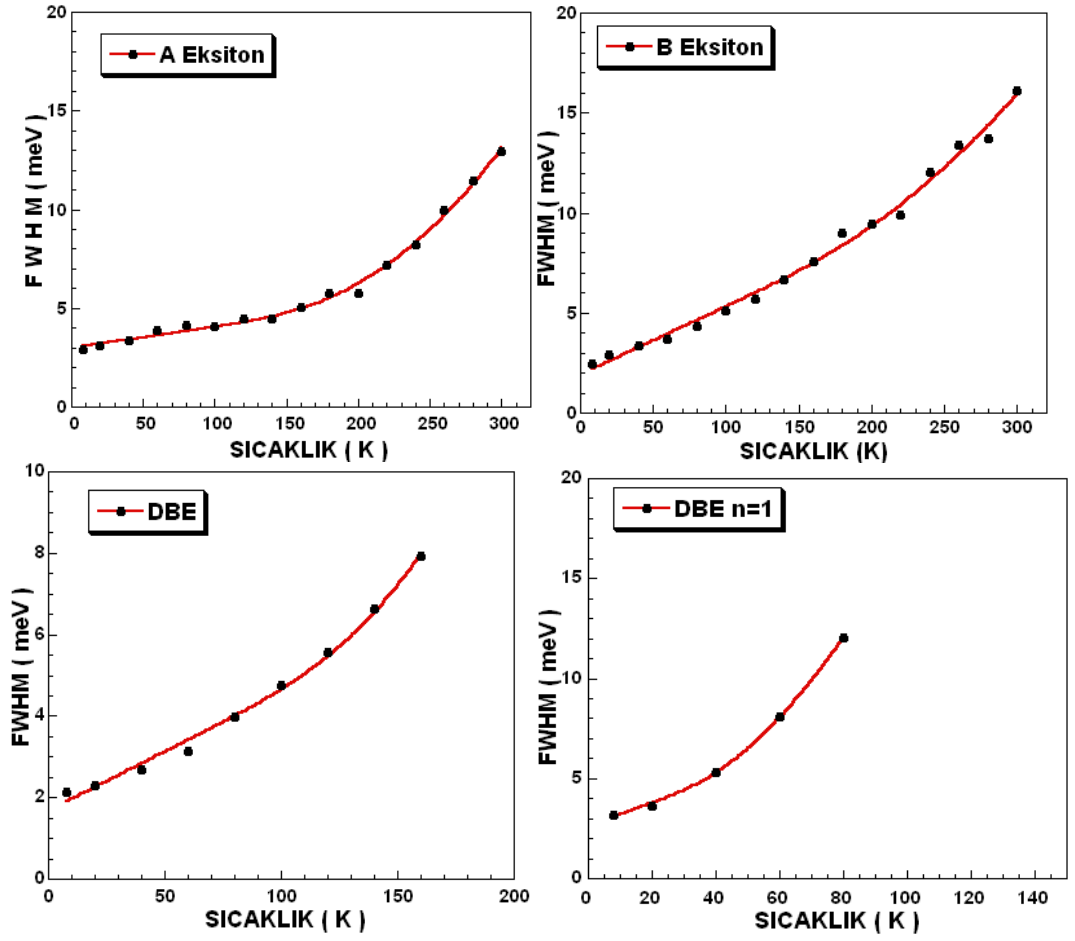
$$\Gamma(T) = \Gamma(0) + \gamma_{fon}T + \frac{\Gamma_{LO}}{\exp(E_{LO}/k_B T) - 1} \quad (5.2)$$

denklemini kullanılmaktadır.  $\Gamma(0)$ , 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.

Sağ taraftaki ikinci ve üçüncü terimler homojen genişlemedir ve sırasıyla akustik fonon ve boyuna optik (LO) fonon saçılmalarından kaynaklanır. Akustik fononları içeren süreç sadece eksitonların bant içi saçılmalarıdır. Akustik fononlardan dolayı olan katkı T sıcaklığının artması ile lineer olarak artar ve  $\gamma_{fon}T$  şeklinde gösterilir. Burada  $\gamma_{fon}$  eksiton-akustik fonon örtüşme gücüdür. Son terim ise boyuna optik (LO) fononlar ile etkileşmenin sonucudur ve  $E_{LO}$ , GaN'da boyuna optik fononların enerjisidir.  $\Gamma_{LO}$  terimi ise eksiton-LO fonon örtüşme gücünü gösterir. Eksitonların LO fononlar ile etkileşimi *Fröhlich* etkileşimi olarak tanımlanır.

A örneği için eksitonik geçişlerde çizgi genişliğinin sıcaklıkla değişimi gösteren deneysel grafikler şekil 5.3.2.1 de gösterilmektedir. Grafiklerde gözlenen genişleme sıcaklıktan bağımsız genişleme ve eksitonların optik ve akustik fononlar ile etkileşmelerinden kaynaklanan genişlemedir.

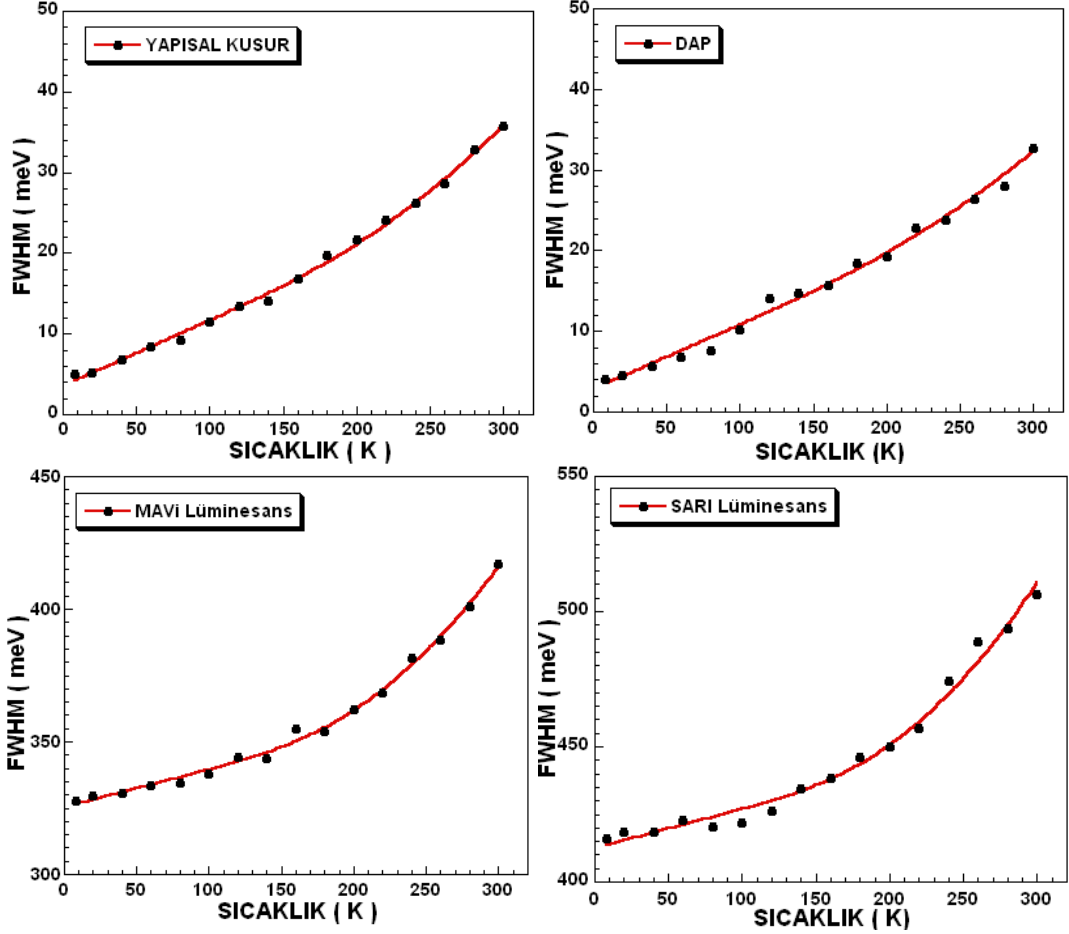
Akustik fononların 120 K sıcaklığına kadar kayda değerdir fakat LO fononlardan gelen katkı oda sıcaklığına kadar devam eder. 120-140 K sıcaklığından sonra LO fononlar çizgi genişliğinde keskin bir şekilde artmaya sebep olur. 200 K civarında LO fononlar akustik fononlar üzerinde baskın olurlar [84].



Şekil 5.3.2.1 A numunesi için eksitonik geçişlere ait FWHM değişimi.

A ve B serbest eksitonlar için fit grafiklerine bakıldığında yaklaşık 150 K sıcaklığa kadar lineer artış ve daha sonraki sıcaklıklarda eksponansiyel bir artış fark edilebilir. İlk durum akustik fonon etkileşimi ikinci durum optik fonon etkileşimi göstermektedir. DBE geçişi 160 K sıcaklıktan sonra optiksel spektrumda ortadan kaybolduğu için boyuna optik (LO) fonon etkileşiminin etkisi A ve B serbest eksiton kadar büyük değildir. DBE (n=1) durumunda ise 80 K sıcaklığına kadar akustik fononların etkisi söz konusudur.

A numunesinde gözlenen kusurlara bağlı geçişler için sıcaklığın artması yarı genişlik değişim grafikleri şekil 5.3.2.2’de gösterilmektedir.



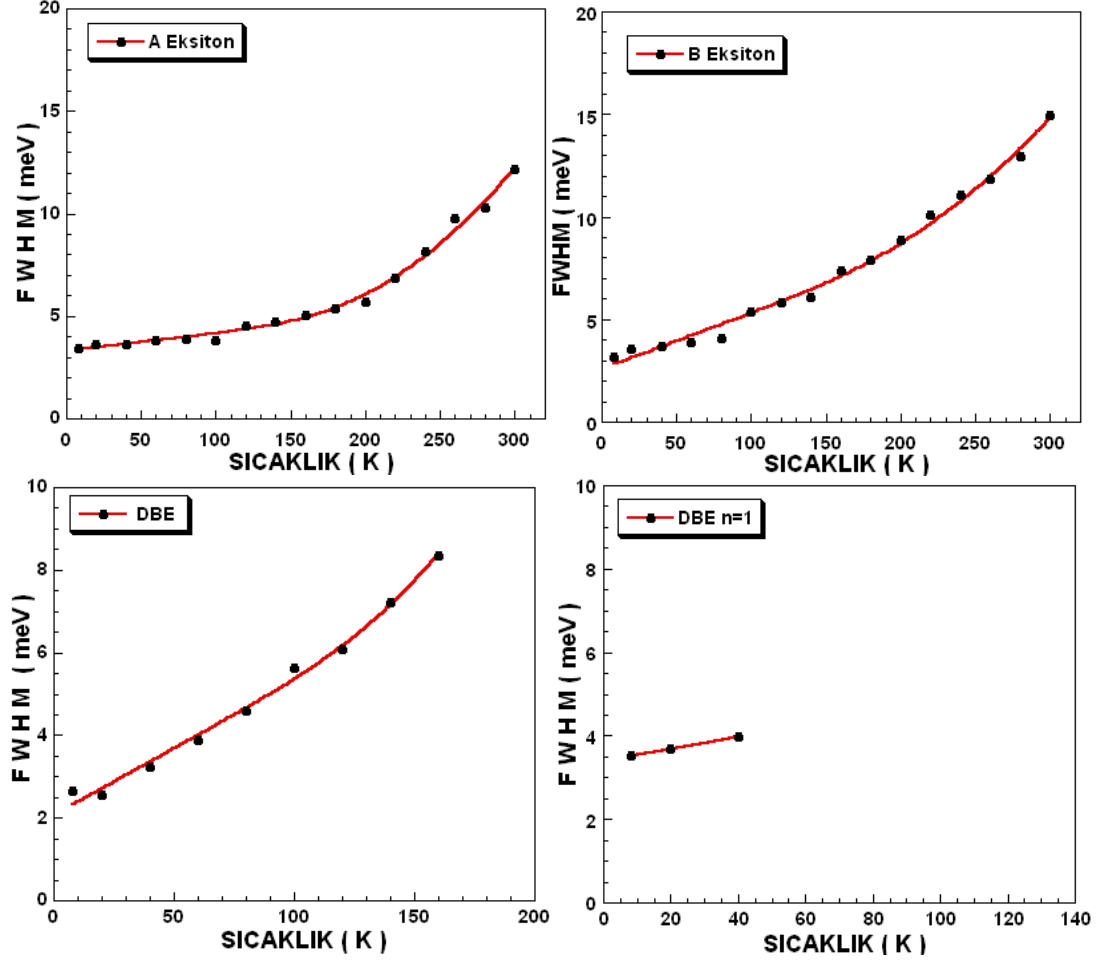
Şekil 5.3.2.2 A numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FWHM değişimi.

Eksitonik geçişlere kıyasla DAP ve istiflenme hataları gibi kusurlara bağlı ve daha derin seviye geçişleri olan mavi sarı lüminesans geçişlerinde eksitonların optik ve akustik fononlar ile etkileşim güçleri daha büyüktür.

B numunesinde gözlenen eksitonik geçişler için yarı genişlik değişimi şekil 5.3.2.3’de gösterilmektedir. A örneğine benzer olarak eksitonik geçişlerde gözlenen genişleme düşük sıcaklıklarda akustik fonon ve yüksek sıcaklıklara gidildikçe daha baskın hale gelen boyuna optik (LO) fonon etkileşmelerinden kaynaklanmaktadır.

A örneğinde gözlenildiği gibi B örneğinde de serbest eksitonlar 160 K sıcaklığına kadar lineer olarak değişen akustik fonon etkisi ve daha sonraki

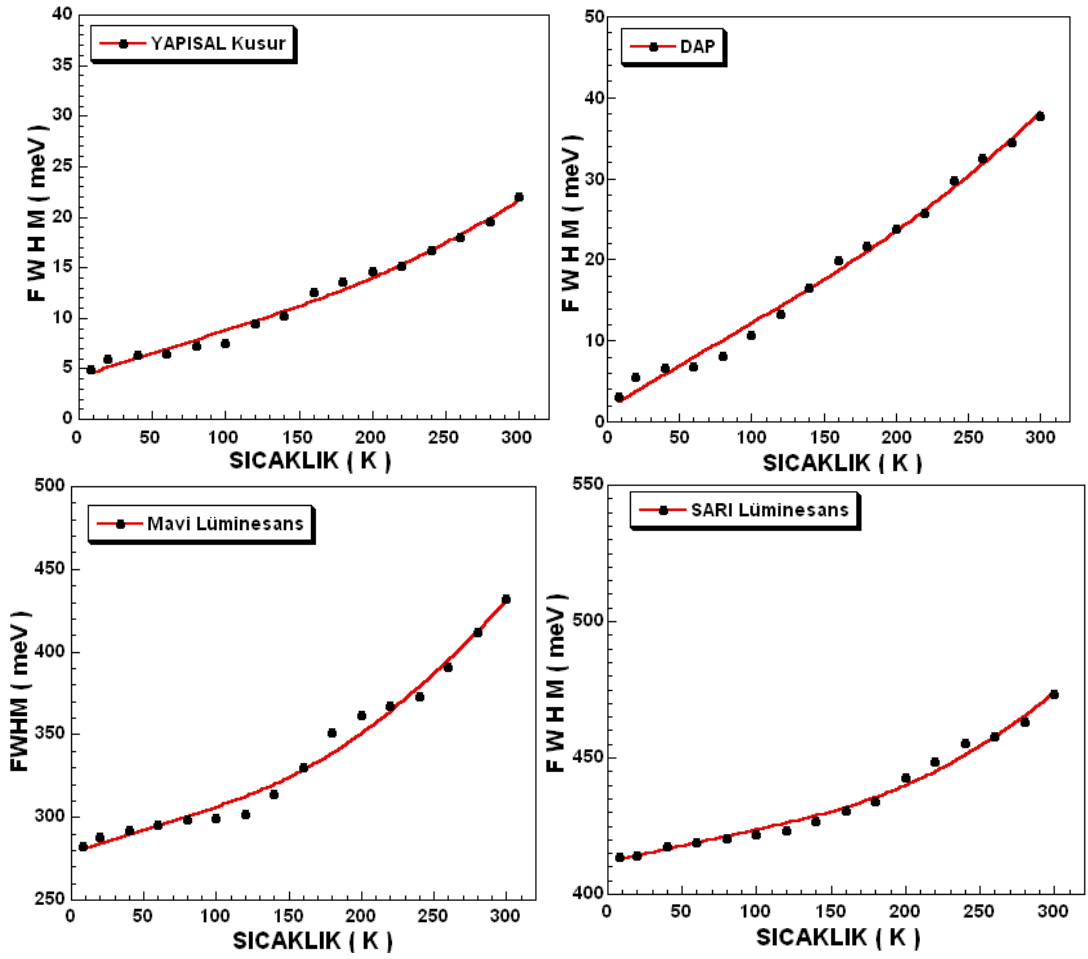
sıcaklıklar eksponansiyel olarak değişen boyuna optik (LO) fonon etkisi gözlenmektedir. DBE ve DBE (n=1) durumları içinde aynı durum söz konusudur.



Şekil 5.3.2.3 B numunesi için eksitonik geçişlere ait FWHM değişimi.

B numunesinde gözlenen kusurlara bağlı derin seviye optiksel geçişlere ait yarı genişlik değişimi Şekil 5.3.2.4'de gösterilmektedir.

A ve B örneği için sıcaklığın artması ile tüm optiksel geçişlere ait piklerin yarı genişlik değişimini incelemek için (5.2) fit denklemi kullanılmıştır. Grafiklerde kırmızı çizgi fit denklemi olup siyah noktalar alınan dataları göstermektedir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen fit parametre değerleri ve literatürdeki bazı çalışmalara ait fit parametre değerleri Tablo 5.3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3.2.4 B numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FWHM değişimi.

Literatürdeki yapılan çalışmalarda genelde serbest eksiton geçişleri dikkate alınıp safsızlıklara ve kusurlara bağlı geçişler için elde edilen fit parametre değerleri bulunmamaktadır. Bizim elde ettiğimiz sonuçlardan eksitonik geçişlere kıyasla mavi ve sarı lüminesans geçişlerinin yanı sıra safsızlıklara bağlı geçişler için elde edilen değerlerin büyük olduğu görülebilir.

**Tablo 5.3.2** A ve B örneklerine ait optiksel geçişler ve literatürde yapılan bazı çalışmalar için elde edilen FWHM fit parametre değerleri.

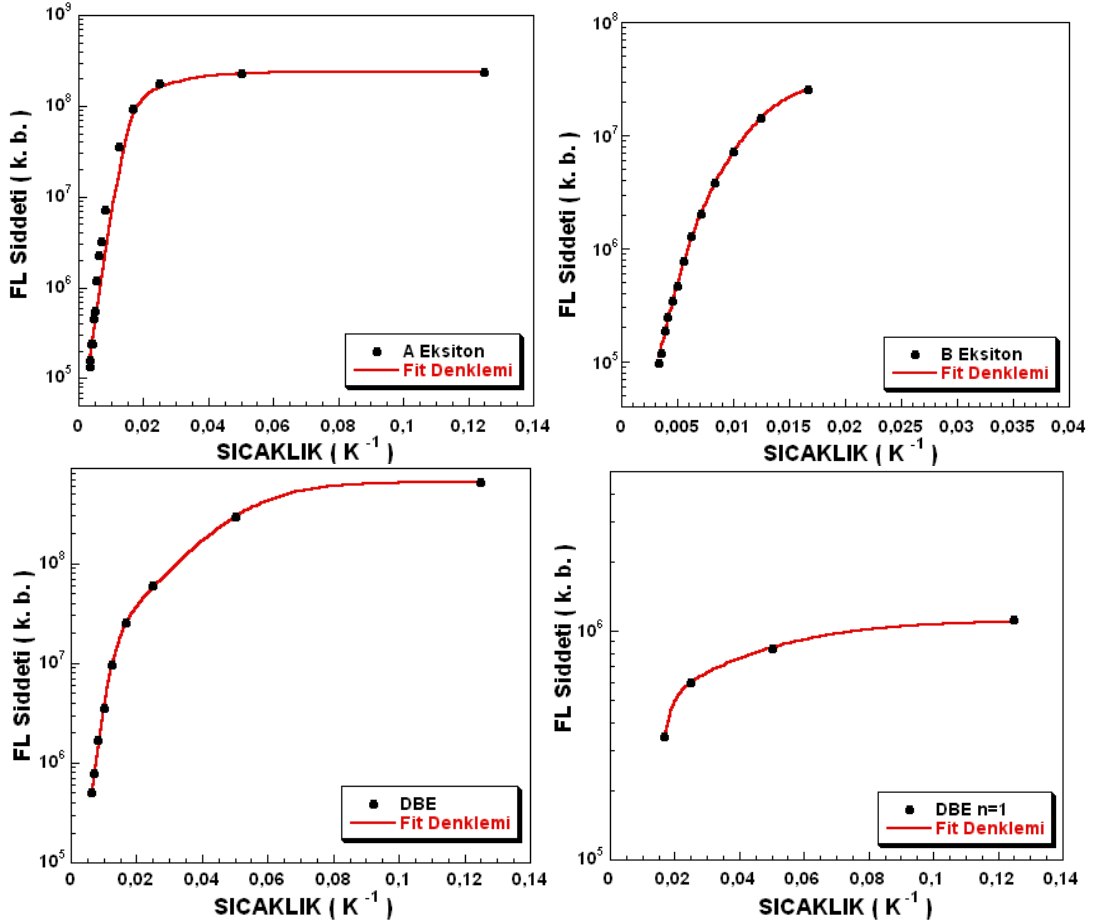
Örnekler	Optiksel Geçişler	$\Upsilon_{fon}(meVK^{-1})$	$\Gamma_{LO}(meV)$	Referanslar
A	<b>A Eksiton</b>	10.5	230	<b>Bizim Çalışmamız</b>
	<b>B Eksiton</b>	33	130	
	<b>DBE</b>	28	182	
	<b>DBE (n=1)</b>	57	53	
	<b>Yap. Kusur</b>	81	265	
	<b>DAP</b>	79	183	
	<b>Mavi Lüm.</b>	141	1572	
	<b>Sarı Lüm.</b>	143	1762	
B	<b>A Eksiton</b>	8	212	<b>Bizim Çalışmamız</b>
	<b>B Eksiton</b>	27	135	
	<b>DBE</b>	32	168	
	<b>DBE (n=1)</b>	14	-	
	<b>Yap. Kusur</b>	45	124	
	<b>DAP</b>	104	167	
	<b>Mavi Lüm.</b>	271	945	
	<b>Sarı Lüm.</b>	118	880	
Literatür	<b>A Eksiton</b>	15.3	208	<b>[84]</b>
	<b>B Eksiton</b>	22	495	<b>[84]</b>
	<b>A Eksiton</b>	15	200±20	<b>[91]</b>
	<b>B Eksiton</b>	15	170±20	<b>[91]</b>

### 5.3.3 Pik Şiddetlerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Optiksel geçişlere ait olan piklerin şiddetlerinin sıcaklıkla değişimini incelemek için kullandığımız fit denklemi

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + \sum_i C_i \exp(-\Delta E_i / k_B T)} \quad (5.3)$$

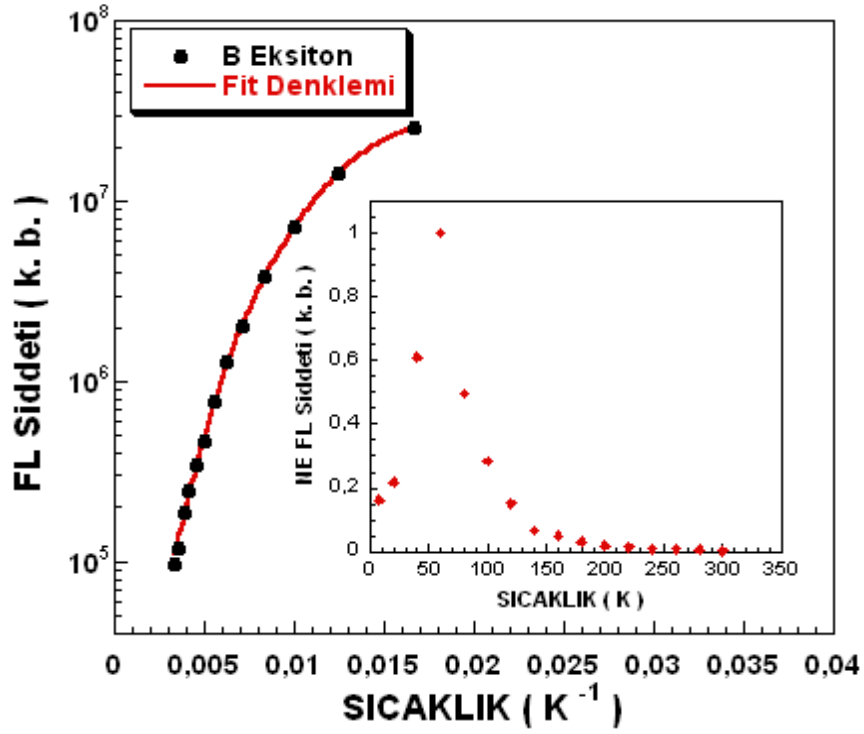
şeklinde.  $I(T)$  ve  $I(0)$  sırasıyla  $T$  ve  $0$  K'deki emisyon şiddetleridir. Sıcaklık arttığı zaman, elektronlar rekombine oldukları bölgelerden farklı aktivasyon enerjileri ile ayrılarak ışımsal olmayan geçişlere katılırlar ve ışımsal geçişlerin verimliliği azalır.  $\Delta E_i$  aktivasyon enerjileri ve  $k_B$  Boltzman sabitidir.  $C_i$  sabiti ise ışımsal olmayan merkezlerin sayısı gibi düşünülebilir. Deneysel sonuçlarda gözlenen optiksel geçişler için ampirik fit denklemlerini uygulayarak fit grafikleri ve fit parametreleri incelenmiştir. Elde ettiğimiz sonuçları bu alanda yapılan bazı çalışmalar ile karşılaştıralım. Sıcaklığın artması ile A numunesinde gözlenen eksitonik geçişler için FL şiddetinde ki değişim Şekil 5.3.3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3.3.1 A numunesi için eksitonik geçişlere ait FL şiddeti değişimi.

A eksitonun termal sönümü uygun bir şekilde 8.2 ve 30.2 meV aktivasyon enerjileri ile iki farklı ışımsal olmayan süreç halinde fit edilmiştir. İlk süreç, A eksitonun düşük kolundan B eksitonun koluna eksiton değişimine bağlanır. B kolundaki popülasyonun artışı aynı zamanda 60 Kelvin'den daha düşük sıcaklık menziline B eksiton şiddetindeki çoğalma ile açıklanmıştır [92]. 40 K'den daha

yüksek sıcaklıklarda A ve B serbest eksitonu hemen hemen aynı aktivasyon enerjisi (30.2 meV) ile sönmeye uğrar. A ve B serbest eksitonun bağlanma enerjileri ise yakın değerlere sahiptir ve c- düzlemi üzerine büyüyen GaN'ın eksiton bağlanma enerjileri zorlama olmayan yapılara göre (~26-27 meV) çok az daha fazladır. Biraz önce de bahsettiğimiz gibi, B eksitonun FL şiddeti 60 K sıcaklığına kadar artar ve daha sonra ışımsal olmayan süreçten dolayı azalmaya başlar. 60 K sıcaklığa kadar ölçülen data lar fit grafiğinden çıkartılmıştır. Şiddetteki ilk artışın gözlenmesi A eksitonundan daha yüksek bir enerjide olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.3.3.2'de B eksiton için tüm verilerin yer aldığı fit grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.3.3.2 A numunesinde gözlenen B eksiton pik şiddeti değişimi.

Verici bağlı eksiton şiddetinin sönmü de aynı zamanda iki farklı ışımsal olmayan süreçte açıklanmaktadır. İlk süreç, 7.3 meV aktivasyon enerjisi ile sığ verici bağlı eksitonun termal yıkımı olarak belirtilmektedir. Bu aktivasyon enerjisi bağlı eksiton ve A serbest eksiton arasında ki enerji ayrımı ile iyi bir uyumdur. 40.3 meV aktivasyon enerjili ikinci süreç, vericilerin iyonizasyonuna veya eş zamanlı bir eksiton delokalizasyonuna ve eksiton ayrılmasına bağlanılabilir. Bu değer verici bağlı eksiton ve birinci uyarılmış durumu arasındaki enerji farkına (~35 meV) yakın bir değer olup daha önce de bahsedildiği gibi Si<sub>Ga</sub> veya O<sub>N</sub> gibi

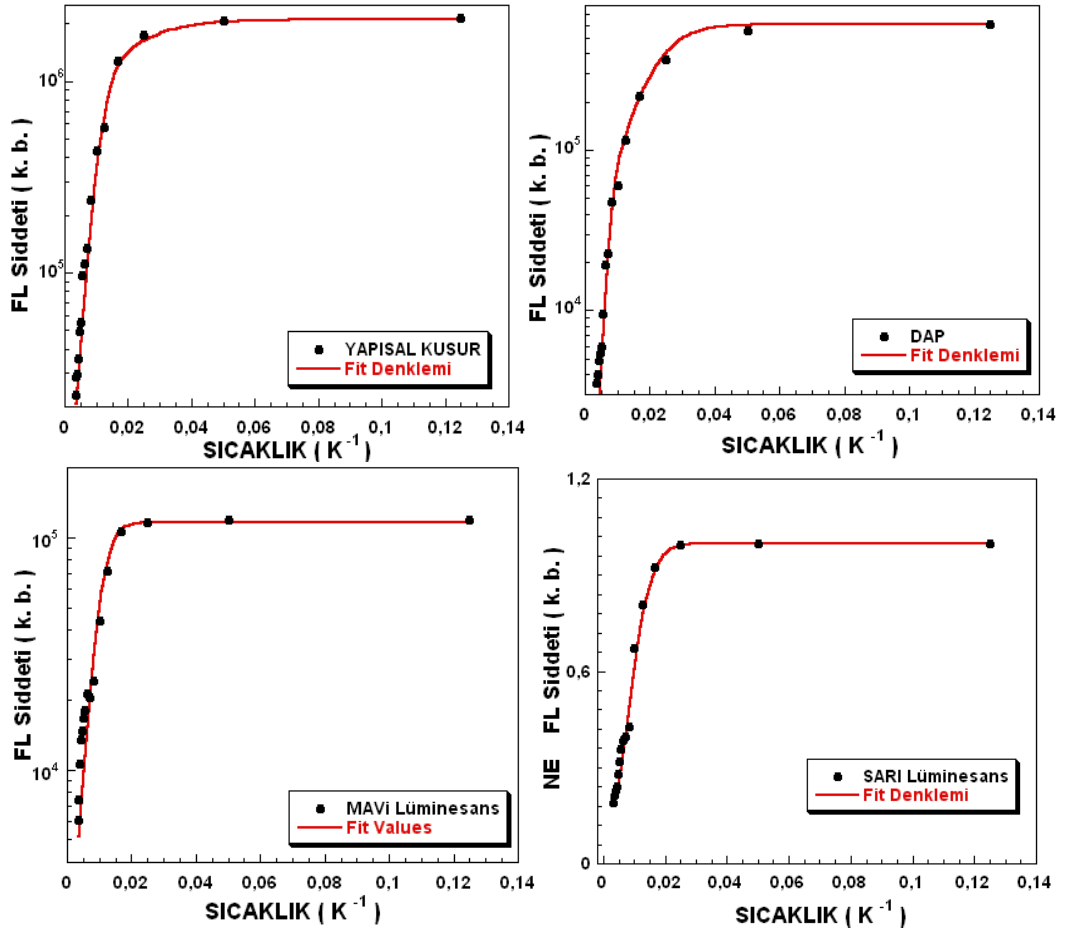


vericilerin bağlanma enerjilerine (30.18 ve 33.2 meV) yakın bir değere sahiptir [83]. A numunesi için eksitonik geçişlere ait FL şiddeti değişiminde fit grafiklerinden elde edilen aktivasyon enerji değerleri Tablo 5.3.3’de özetlenmiştir.

**Tablo 5.3.3** A numunesindeki eksitonik geçişler için aktivasyon enerji değerleri.

Optiksel Geçişler	$\Delta E_1$ (meV)	$\Delta E_2$ (meV)
A Eksiton	8.2	30.2
B Eksiton	-	29.8
DBE	7.3	40.3
DBE n=1	4.82	-

A numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FL pik şiddeti değişimi Şekil 5.3.3.3’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.3.3.3** A numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FL pik şiddeti değişimi.

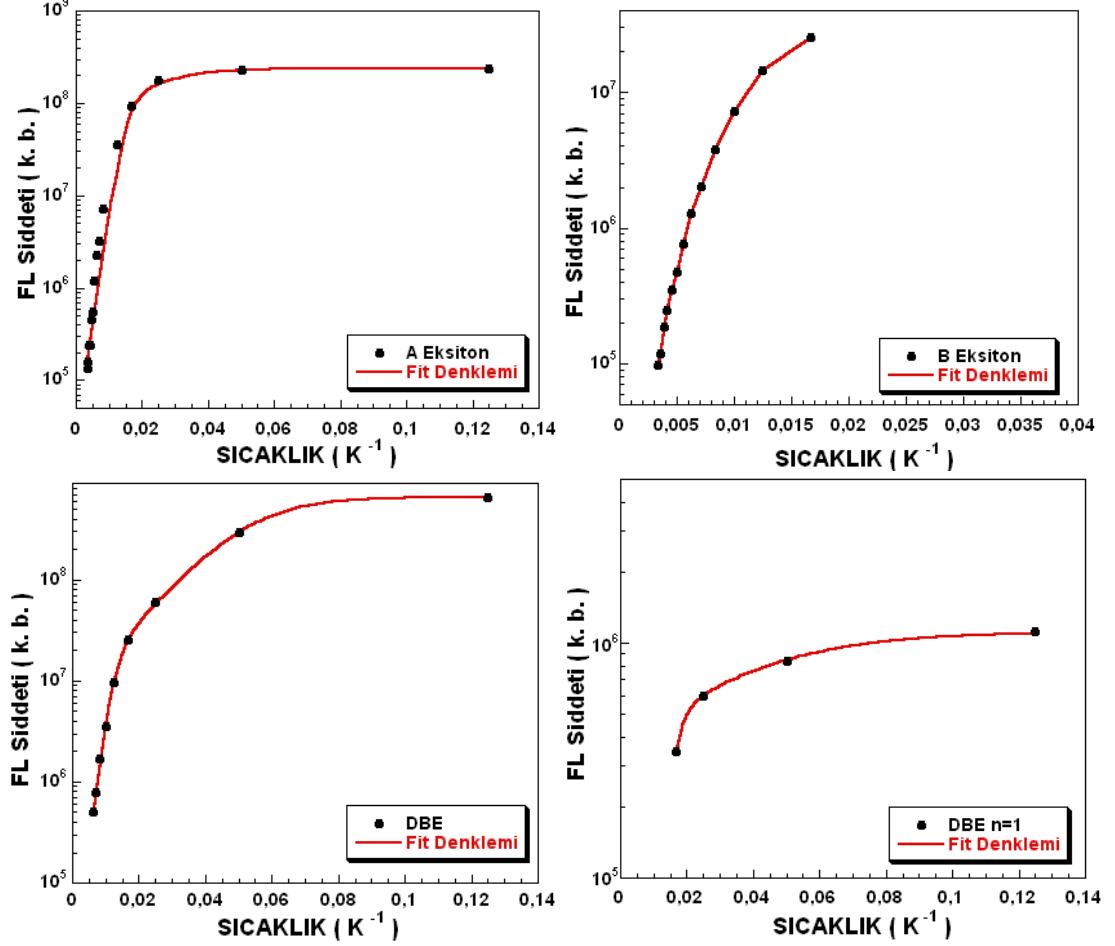
İstiflenme hatalarının sebep olduğu yapısal kusurunda en iyi fiti elde etmek için de düşük ve yüksek sıcaklıklarda iki ışımsal olmayan süreç incelenmiştir. 7.79 meV termal aktivasyon enerjisi ile ilk ışımsal olmayan süreç düşük sıcaklık menziline (T < 50 K) ve deşik delokalizasyonu olarak belirtilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda 41.05 meV termal aktivasyon enerjili ikinci ışımsal olmayan süreç önemli olmaya başlar. Bu aktivasyon enerjisi 3.42 eV çizgisinin optiksel derinliğinden (80 meV, wurtzite GaN'ın bant aralığından ölçülmüş) daha düşüktür ve bu durum ikinci ışımsal olmayan kanalın elektron delokalizasyonundan kaynaklandığını önermektedir [90]. Düzlemdeki istiflenmeden kaynaklanan kusur wurtzite yapı içerisinde küçük boyutlu bir zinc-blende tipi kuantum kuyusu oluşturmaktadır. Bu aktivasyon enerjisi bu kuantum kuyusunda lokalize olan elektronların kaçmaları için gerekli aktivasyon enerjisi olarak düşünülebilir [90].

A numunesinde gözlenen DAP geçişi oda sıcaklığına kadar gözlenen dominant piklerden bir tanesidir. Sıcaklığın artması ile 13.95 ve 75.05 meV değerlerinde iki farklı ışımsal olmayan süreci temsil eden aktivasyon enerjileri elde edilmiştir. Mavi lüminesans ve sarı lüminesans emisyon şiddetlerinin sıcaklığa bağımlılığı yüksek aktivasyon enerjileri göstermiştir. Yüksek sıcaklıklarda 345 ve 691 meV aktivasyon enerjileri bu emisyonlara sebep olan derin seviye kusurlarının bağlanma enerjileri olarak düşünülebilir. Sarı lüminesans için rapor edilen yüksek sıcaklıklardaki aktivasyon enerjisi 58-1040 meV aralığında değişim göstermektedir. Aynı zamanda rapor edilen bir çalışmada, karbon katkılı GaN yapılarında yarı genişlik değeri ve yüksek sıcaklıktaki aktivasyon enerjileri hemen hemen bu çalışmada ki örnek ile aynı değerlere sahip olması bu geçişin yapıda kontaminant olarak bulunan karbon kaynaklı bir kompleksin oluşturduğu fikrini uyandırmıştır [63]. Kusurlara bağlı geçişlerde elde edilen aktivasyon enerjileri Tablo 5.3.4'de gösterilmektedir.

**Tablo 5.3.4** A numunesindeki kusurlara bağlı geçişler için aktivasyon enerji değerleri.

<b>Optiksel Geçişler</b>	<b><math>\Delta E_1</math>(meV)</b>	<b><math>\Delta E_2</math>(meV)</b>
<b>Yapısal Kusur</b>	7.79	41.05
<b>DAP</b>	13.95	75.05
<b>Mavi Lüminesans</b>	47.4	345
<b>Sarı Lüminesans</b>	51.75	691

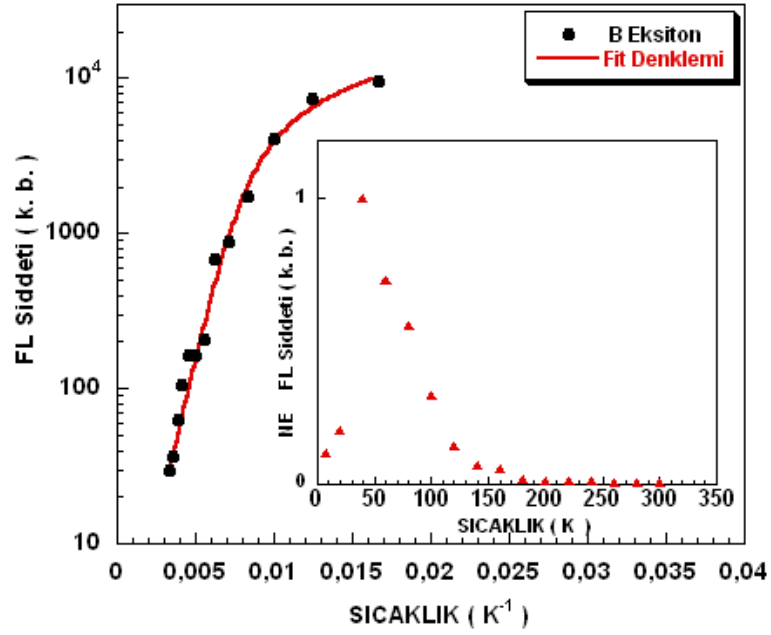
A numunesi benzer olarak, sıcaklığın artması ile B numunesinde eksitonik geçişlere ait pik şiddetlerindeki değişim şekil 5.3.3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3.3.4 B numunesi için eksitonik geçişlere ait pik şiddeti değişimi.

B numunesinde gözlenen A serbest eksitonu için, A numunesinde daha öncede bahsettiğimiz gibi 6.91 ve 28.6 meV aktivasyon enerjileri ile iki farklı ışımsal olmayan süreç içinde emisyon şiddetinde azalma gözlenmiştir. İlk süreç A eksitonun düşük kolundan B eksitonun eksiton değişimini göstermektedir. Bu durum B eksitonun ilk sıcaklıklardaki şiddetindeki artmaya atfedilebilir. 28.6 meV aktivasyon enerjisi A serbest eksitonunun bağlanma enerjisi olarak düşünülebilir ve A ve B eksitonunu bağlanma enerjileri hemen hemen aynıdır.

A örneğinde gözleendiği gibi, B eksitonun 40 K sıcaklığına kadar şiddetinde bir artış gözlenmiştir ve daha sonra sıcaklığın artması ile 30.11 meV aktivasyon enerjisi ile sönüme uğrar. Şekil 5.3.3.5'de 40 K sıcaklığına kadar B eksitonun şiddetindeki artma ve sonraki sıcaklıklarda sönüme uğraması görülmektedir.



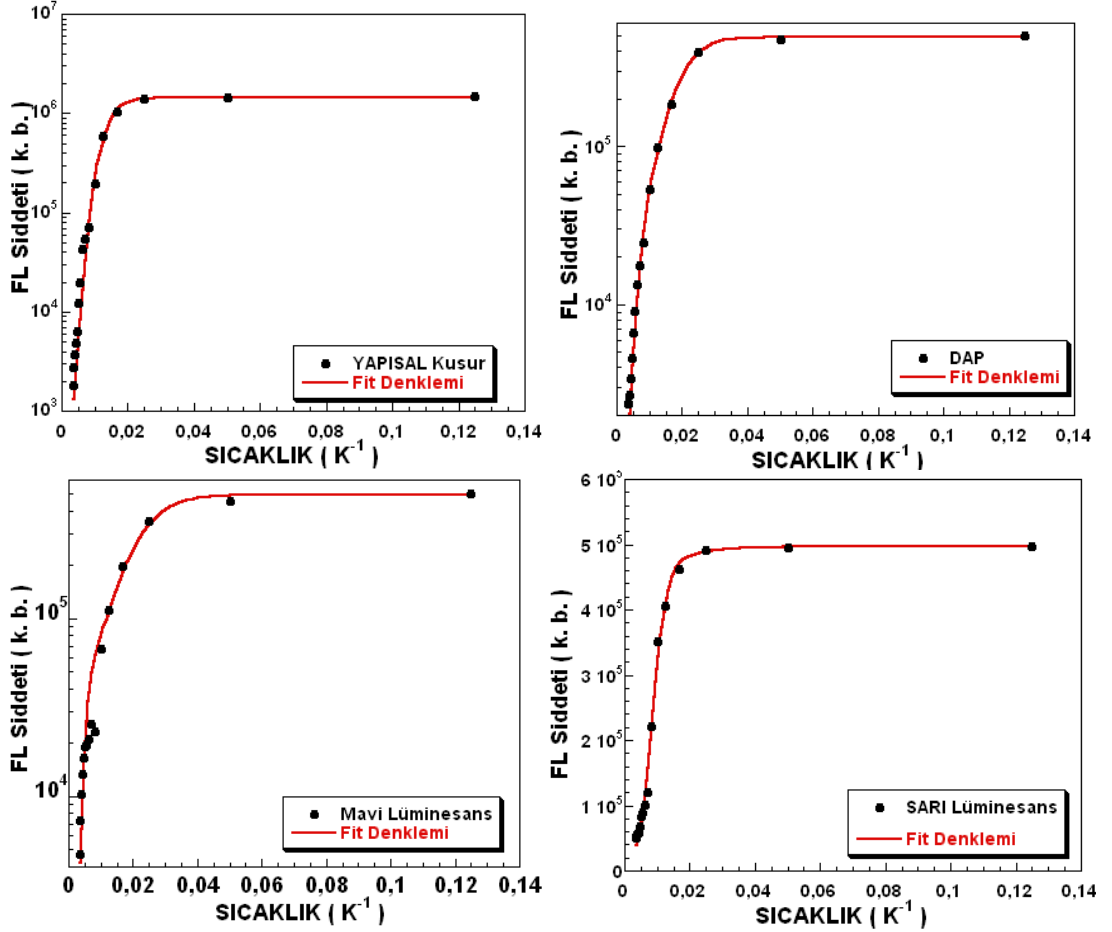
**Şekil 5.3.3.5** B numunesinde gözlenen serbest B eksiton pik şiddeti değişimi.

Sıcaklığın artması ile verici bağlı eksiton şiddetinin sönümü iki farklı ışımsal olmayan süreçte açıklanmaktadır. İlk süreç, 5.04 meV aktivasyon enerjisi ile iletim bandına yakın olan sığ verici bağlı eksitonun termal çözülmesi olarak belirtilmektedir. Bu aktivasyon enerjisi bağlı eksiton ve A serbest eksiton arasında ki enerji ayrımı ( $\sim 6$  meV) ile iyi bir uyumdadır. 38.3 meV aktivasyon enerjili ikinci süreç, vericilerin iyonizasyonuna veya eş zamanlı bir eksiton delokalizasyonuna ve eksiton ayrılmasına bağlanılabilir [83]. Bu aktivasyon enerji değeri, B numunesindeki verici bağlı eksiton ve birinci uyarılmış durumu arasındaki enerji farkına ( $\sim 35$  meV) yakın bir değer olup daha önce de bahsedilen  $\text{Si}_{\text{Ga}}$  veya  $\text{O}_{\text{N}}$  gibi vericilerin bağlanma enerjilerine (30.18 ve 33.2 meV) yaklaşık olarak iyi bir değere sahiptir [83]. B numunesi için eksitonik geçişlere ait FL şiddeti değişiminde fit grafiklerinden elde edilen aktivasyon enerji değerleri Tablo 5.3.5’de özetlenmiştir.

**Tablo 5.3.5** B numunesindeki eksitonik geçişler için aktivasyon enerji değerleri.

Optiksel Geçişler	$\Delta E_1(\text{meV})$	$\Delta E_2(\text{meV})$
<b>A Eksiton</b>	6.91	28.6
<b>B Eksiton</b>	-	30.11
<b>DBE</b>	5.04	38.3
<b>DBE n=1</b>	11.64	-

B numunesinde gözlenen kusurlara bağlı optiksel geçişler için sıcaklığın artması ile pik şiddetindeki değişim grafikleri şekil 5.3.3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.3.3.6 B numunesi için kusurlara bağlı optiksel geçişlere ait FL pik şiddeti değişimi.

İstiflenme hataları polar doğrultularda büyüyen yapıların (A numunesi) yanı sıra polar olmayan doğrultularda da büyütülen yapılarda (B numunesi) gözlenebileceğinden bahsetmiştik [92]. İstiflenme hatalarından kaynaklanan yapısal kusurlardan en iyi fiti elde etmek için düşük ve yüksek sıcaklıklarda iki ışımsal olmayan süreç incelenmiştir.

7.22 meV termal aktivasyon enerjisi ile ilk ışımsal olmayan süreç düşük sıcaklık menzindedir ( $T < 50$  K) ve deşik delokalizasyonu olarak açıklanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda 38.9 meV termal aktivasyon enerjili ikinci ışımsal olmayan süreç önemli olmaya başlar. Bu aktivasyon enerjisi 3.42 eV emisyon çizgisinin optiksel derinliğinden (80 meV, wurtzite GaN'ın bant aralığından ölçülmüş) düşüktür ve bu durum ikinci ışımsal olmayan kanalın elektron delokalizasyonundan

kaynaklanmaktadır [90]. Küçük bir zinc-blende tipi kuyunun oluşmasına sebep olan yapısal kusurda yüksek sıcaklıklarda elde edilen bu aktivasyon enerjisi kuantum kuyusunda saklı olan elektronların kurtulması için gerekli aktivasyon enerjisidir [90]. B numunesinde gözlenen alıcı ve verici atomlarının sebep olduğu DAP geçişine ait emisyon şiddetinin sıcaklığın artması ile iki ışımsal olmayan süreçte olmak üzere 19.57 ve 68.22 meV değerlerinde aktivasyon enerjileri ölçülmüştür.

B numunesine ait sarı ve mavi lüminesans bantlarına ait aktivasyon enerjileri A numunesine benzer olarak diğer eksitonik ve kusurlara bağlı geçişlerden elde edilen aktivasyon enerjilerine kıyasla daha büyük değerler elde edilmiştir. Çünkü, bu geçişlere sebep olan kompleksler derin seviye kusurlarıdır ve bu aktivasyon enerjileri bu komplekslerin bağlanma enerjileri olarak düşünülebilir. Kusurlara bağlı geçişlere ait aktivasyon enerjileri Tablo 5.3.6'da gösterilmektedir.

**Tablo 5.3.6** B numunesindeki kusurlara bağlı geçişler için aktivasyon enerji değerleri.

<b>Optiksel Geçişler</b>	<b><math>\Delta E_1</math>(meV)</b>	<b><math>\Delta E_2</math>(meV)</b>
<b>Yapısal Kusur</b>	7.22	38.9
<b>DAP</b>	19.57	68.22
<b>Mavi Lüminesans</b>	16.56	132.2
<b>Sarı Lüminesans</b>	36.57	163

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, metal-organik buhar depolama tekniği ile safir alt taşın c- (polar) ve a- (polar olmayan) doğrultuları üzerine büyütülen GaN tabakalar incelenmiştir. A ve B numunesi olarak adlandırdığımız iki farklı örneğin optik özellikleri incelemek için kararlı-hal (*steady-state*) fotoluminesans ölçüm tekniği kullanılmıştır.

Numunelerin her ikisinde, 8K sıcaklıkta alınan fotoluminesans ölçümleri sonucunda benzer enerji bölgelerinde yapının doğasında ve dış etkilere bağlı olan optiksel geçişler gözlenmiştir. A ve B serbest eksitonlarına ait enerji çizgilerinin yüksek sıcaklıklarda gözlenmesi, oda sıcaklığında çalışan fotonik aygıtlar için önemlidir ve aranan özelliklerin başında gelmektedir. Bu durum eksitonların bağlanma enerjilerine ve LO-fonon etkileşim parametresine bağlıdır. LO fonon etkileşiminin şiddeti ışınımın çizgi genişliğinin artmasına sebep olmakta ve yüksek sıcaklıklarda bu pikin tamamen kaybolmasını yol açmaktadır. Eksiton bağlanma enerjisinin güçlü olması LO-fonon etkileşmesini sınırlar ve oda sıcaklığında serbest eksitonların gözlenmesine imkân kılar. Bu durum A ve B örneğinin uygun kaliteye sahip olduğunu göstermektedir.

Oda sıcaklığına uygun aygıtlar elde etmek için, serbest eksitonların daha yüksek bağlanma enerjisi ve daha düşük LO-fonon etkileşimine sahip GaN'ın kuantum-saklı sistemleri ile çalışmanın daha iyi olacağını önerebiliriz.

Büyüme esnasında kirlilik olarak veya alt taştan kaynaklanan safsızlık atomlarının yapı içinde bulunması, eksitonik geçişlerin dışında her iki örnekte de gözlenen verici bağlı eksiton (DBE), alıcı-verici çifti (DAP), mavi ve sarı lüminesans bant geçişlerine neden olmuştur. Ayrıca polar ve polar olmayan yapılarda oluşabilen ve istiflenme (dizi) hatasından kaynaklanan I<sub>1</sub> tipi hata kümelerinin sebep olduğu enerji çizgisi gözlenmiştir. Aynı zamanda, büyüme doğrultusunda (A örneği) ve düzlemde ki (B örneği) zorlamalardan kaynaklanan pik pozisyonlarında yüksek enerji bölgelerine kaymalar her iki örnekte de karşılaşılmıştır. Bu etkileri indirgemek için yapılması gereken büyütme şartları ve parametrelerinin optimum değerleri araştırılmalıdır.

Her iki örnekte gözlenen bütün optiksel geçişler için pik pozisyonu, yarı genişlik değerleri ve pik şiddetlerinin sıcaklıkla nasıl değiştiği incelenmiştir ve elde edilen parametreler literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılarak uygun değerlere sahip olduğu gösterilmiştir. Pik şiddetlerinin sıcaklıkla değişimi incelenerek, her iki örnek içinde elde edilen aktivasyon enerjileri ile bu geçişlere sebep olan olası safsızlık atomları ve kompleksler ile ilgili bilgi verilmiştir.

Bu çalışmalar sonucunda A ve B numunesi için benzer yapısal ve optik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. A ve B numuneleri, üzerlerine olası aktif tabakaların büyütülmesi sonucu elde edilen ve başlıca optoelektronik aygıtlar olan ışık yayan diyotlar (LED), fotodetektörler ve güneş pilleri gibi aygıtlar için uygun olduğu düşünülmüştür.

Bu iki yapı arasındaki farklılık ise, aktif bölgelerin büyütülmesi sonucunda oluşan kuantum kuyulu ve heteroeklem sistemlerde Kuantum-Sınırlandırılmış (*Quantum-Confined*) Stark Etki araştırılarak polar ve polar olmayan yapılar için kuantum verimliliği incelenebilir.



## KAYNAKÇA

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] Burgraaf, P., “The Status of MOCVD Technology”, *Semiconductor International*, **80**, 83, (1993).
- [4] Kočan, M., “AlGaIn/GaN MBE 2DEG Heterostructures: Interplay between Surface-, Interface-, and Device-Properties”, Phd. Thesis, Pondicherry University, Pondicherry, (2003).
- [5] Bernardi, F., Fiorentini, V., “Macroscopic polarization and band offsets at nitride heterojunctions”, *Phys. Rev. B*, **57**, R9427, (1998).
- [6] Craven, M.D., Waltereit, P., Wu, F., Speck, J.S., DenBaars S.P., “Characterization of a-plane GaN/(Al,Ga)N multiple quantum wells grown via metal organic vapor deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, L235, (2003).
- [7] 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 InGaIn/GaN multiple quantum wells grown on lateral epitaxially overgrown a-plane GaN” *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 031901, (2005).
- [8] 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 AlGaIn Multiple Quantum Wells over r-plane Sapphire”, *Jpn. J Appl. Phys.*, **43**, 1099, (2004).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] “Nitrides with nonpolar surfaces: Growth, Properties and Devices”, Edited by Paskova, T., Wiley-VCH, pp. 33, (2008).
- [12] Tülek, R., “Yüksek Performanslı Al(In)GaIn/AlIn/(In)GaIn Heteroeklem Yapıların İletim Özellikleri”, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2010).

- [13] Liu, L., and Edgar, J.H., "Substrates for gallium nitride epitaxy" *Materials Science and Engineering*, **R37**, 61–127, (2002).
- [14] Ambacher, O., Majewski, J., Miskys, C., Link, A., Hermann, M., Eickhoff, M., Stutzmann, M., Bernardini, F., Fiorentini, V., Tilak, V., Schaff, B., and Eastman, L. F. "Pyroelectric properties of Al(In)GaN/GaN hetero- and quantum well structures" *J. Phys: Condens. Matter*, **14**, 3399, (2002).
- [15] Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J.R., Weimann, N.G., Chu, K., Murphy, M., Schaff, W.J., Eastman, L.F., Dimitrov, R., Wittmer, L., Stutzmann, M., Rieger, W., and Hilsenbeck, J., "Two dimensional electron gas", *J.Appl.Phys.*, **85**, 3222, (1999).
- [16] Bayrak, T.S., " AlInGaN Tabanlı Yüksek Verimli Mor Ötesi Işık Saçan Diyotlar", Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Balıkesir, (2010).
- [17] Bernardi, F., Fiorentini, V., and Vanderbilt, D., "Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides", *Phys.Rev.B*, **56**, 10024, (1997).
- [18] Morkoç, H., "Handbook of Nitride Semiconductors and Devices", Vol. 2: Electronic and Optical Processes in Nitrides, Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 491, (2008).
- [19] Liu, L., and Edgar, J.H., "Substrates for gallium nitride epitaxy", *Materials Science & Engineering R: Reports*, **37**, 61, (2002).
- [20] Moustakas, T.D., Lei, T., and Molnar, R.J., "Growth of GaN by ECR-assisted MBE", *Physica B*, **185**, 36, (1993).
- [21] Dobrovinskaya, E.R., Lytvynov, L.A., Pishchik, V., " Safir: Material, Manufacturing, Applications", published by Springer Science+Business Media, pp. 55, (2009).
- [22] Matuoka, T., Sasaki, T., and Katsui, A., *Optoelectron. Devices Technol.*, **5**, 53, (1990).
- [23] Seelmann-Eggebert, M., Weyher, J.L., Obloh, H., Zimmermann, H., Rar, A., Porowski, S., "Polarity of (00.1) GaN epilayers grown on (00.1) sapphire", *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2635, (1997).
- [24] Sumiya, M., Yoshimura, K., Ito, T., Ohtsuka, K., Fuke, S., Mizuno, K., Yoshimoto, M., Koinuma, H., Ohtomo, A., Kawasaki, M., "Growth mode and Surface morphology of a GaN film deposited along N-face polar direction on c-plane sapphire substrate", *J. Appl. Phys.*, **88**, 1158, (2000).
- [25] Kim, C., Yang, M., Lee, W., Yi, J., Kim, S., Choi, Y., Yoo, T., Kim, S.T., "Formation and characterization of inversion domain in GaN grown by hydride vapor-phase epitaxy", *J. Cryst. Growth*, **213**, 235, (2000).

- [26] Fiorentini, V., Bernardini, F., Della Sala, F., Di Carlo, A., Lugli, P., "Effects of macroscopic polarization in III-V nitride quantum wells", *Phys. Rev. B*, **60**, 8849, (1999).
- [27] Xu, K., Xu, J., Deng, P.Z., Qui, R.S., Fang, Z.J., "MOCVD growth of GaN on LiAlO<sub>2</sub>(100)", *Phys. Status Solidi A*, **176**, 589, (1999).
- [28] 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).
- [29] 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).
- [30] 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/AlGaN multiple quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4130, (2002).
- [31] Craven, M.D., Waltereit, P., Speck, J.S., DenBaars, S.P., "Well-width dependence of photoluminescence emission from a-plane GaN/AlGaN multiple quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 496, (2004).
- [32] Haskell, B.A., Chakraborty, A., Wu, F., Sasano, H., Fini, P.T., DenBaars, S.P., Speck, J.S., Nakamura, S., "Microstructure and enhanced morphology of planar nonpolar m-plane GaN grown by hydride vapor phase epitaxy", *J. Electronic Mater.*, **34**, 357, (2005).
- [33] Craven, M.D., Chakraborty, A., Imer, B., Wu, F., Keller, S., Mishra, U.K., Speck, J.S., DenBaars, S.P., *Phys. Status Solidi C*, **0**, 2132, (2003).
- [34] Craven, M.D., Lim, S.H., Wu, F., Speck, J.S., DenBaars, S.P., "Structural characterization of nonpolar (11-20) a-plane GaN thin films grown on (1-102) r-plane sapphire", *Appl. Phys. Lett.* **81**, 469, (2002).
- [35] Fox, M., "Optical Properties of Solids", Oxford University Press Inc. New York, pp. 78, (2001).
- [36] Monemar, B., Bergman, J.P. and Buyanova, I.A., in GaN and Related Materials Semiconductor Compounds, edited by Pearson, S.J., Gordon and Breach, New York pp. 85-139, (1998).
- [37] Smith, M., Chen, G.D., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Khan, M.A., Sun, C.J., Chen, Q. and Yang, J.W., "Free exciton transitions in GaN, grown by metal-organic chemical-vapor deposition", *J. Appl. Phys.*, **79**, 7001, (1996).
- [38] Rodina, A.V., Dietrich, M., Goldner, A., Eckey, L., Efros, A.L.L., Rosen, M., Hoffmann, A. and Meyer, B.K., "Exciton energy structure in wurtzite GaN", *Phys. Stat. Sol. (b)* **216**, 21, (1999).

- [39] Gil, B., Briot, O. and Aulombard, R.L., "Valence-band physics and the optical properties of GaN epilayers grown onto sapphire with wurtzite symmetry", *Phys. Rev. B*, **52**, R17028, (1995).
- [40] Kornitzer, K., Ebner, T., Grehl, M., Thonke, K., Sauer, K., Kirchner, R., Schwegler, V., Kamp, M., Leszczynski, M., Grzegory, I., and Porowski, S., "High-resolution photoluminescence and reflectance spectra of homoepitaxial GaN layers", *Phys. Stat. Sol. (b)*, 216, 5, (1999).
- [41] Korona, K.P., Wysmolek, A., Pakula, K., Stepniewski, R., Baranowski, J.M., Grzegory, I., Lucznik, B., Wroblewski, M., and Porowski, S., "Exciton region reflectance of homoepitaxial GaN layers", *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 788, (1996).
- [42] Pakula, K., Wysmolek, A., Korona, K.P., Baranowski, J.M., Stepniewski, R., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., Krukowski, S., Wroblewski, M., and Porowski, S., "Luminescence and reflectivity in the exciton region of homoepitaxial GaN layers grown on GaN substrates", *Solid State Commun.*, **97**, 919, (1996).
- [43] Tchounkeu, M., Briot, O., Gil, B., Alexis, J.P. and Aulombard, R.L., "Optical properties of GaN epilayers on sapphire", *J. Appl. Phys.* **80**, 5352, (1996).
- [44] Shan, W., Hauenstein, R.J., Fischer, A.J., Song, J.J., Perry, W.G., Bremser, M.D., Davis, R.F. and Goldenberg, B., "Temperature dependence of interband transitions in GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 985, (1995).
- [45] Chichibu, S., Azuhata, T., Sota, T. and Nakamura, S., "Exciton emissions from hexagonal GaN epitaxial layers", *J. Appl. Phys.*, **79**, 2784, (1996).
- [46] Smith, M., Chen, G.D., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Khan, M.A., Sun, C.J., Chen, Q. and Yang, J.W., "Free exciton transitions in GaN, grown by metal-organic chemical-vapor deposition", *J. Appl. Phys.*, **79**, 7001, (1996).
- [47] Shan, W., Fischer, A.J., Song, J.J., Bulman, G.E., Kong, H.S., Leonard, M.T., Perry, W.G., Bremser, M.D., Goldenberg, B., and Davis, R.F., "Optical studies of GaN and GaN/AlGaIn heterostructures on SiC substrates", *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 740, (1996).
- [48] Chichibu, S., Azuhata, T., Sota, T., Amano, H. and Akasaki, I., "Optical properties of tensile-strained wurtzite GaN epitaxial layers", *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 2085, (1997).
- [49] Reynolds, D.C., Look, D.C., Jogai, R., Phanse, V.M., and Vaudo, R.P., "Identification of an ionized-donor-bound-exciton transition in GaN", *Solid State Communications*, **103**, 533, (1997).
- [50] Monemar, B., Lindelfelt, U. and Chen, W.M., "Electronic structure of bound excitons in semiconductors" *Physica B*, **146**, 256, (1987).

- [51] Monemar, B., Bergman, J.P., and Buyanova, I.A., "Optical characterization of GaN and related materials" in *GaN and Related Material*, edited by Pearton, S.J., Golden and Breach, Amsterdam, p.85, (1997).
- [52] Monemar, B., "Bound excitons in GaN", *J. Phys.: Condens. Matter*, **13**, 7011-7026, (2001).
- [53] Wysmolek, A., Sapega, V.F., Ruf, T., Cardona, M., Potemski, M., Wyder, P., Epniewski, R., Pakula, K., Baranowski, J.M., Grzegory, I., and Porowski, S., *Proc. Int. Workshop on Nitride Semiconductors*, p. 579, (2000).
- [54] Neu, G., Teisseire, M., Frayssinet, E., Knap, W., Sadowski, M.L., Witowski, A.M., Pakula, K., Leszczynski, M., Prystawsko, P., "Far-infrared and selective photoluminescence studies of shallow donors in GaN hetero- and homoepitaxial layers", *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 1348, (2000).
- [55] Monemar, B., "Bound excitons in GaN", *J. Phys.: Condens. Matter*, **13**, 7011-7026, (2001).
- [56] Leroux, M., Grandjean, N., Beaumont, B., Nataf, G., Semond, F., Massies, J., and Gibart, P., "Temperature quenching of photoluminescence intensities in undoped and doped GaN", *J. Appl. Phys.*, **86**, 3721, (1999).
- [57] Kaufmann, U., Kunzer, M., Merz, C., Akasaki, I., and Amano, H., "Light generating carrier recombination and impurities in wurtzite GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grown by MOCVD", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **395**, 633, (1996).
- [60] Neu, G., Teisseire, M., Frayssinet, E., Knap, W., Sadowski, M.L., Witowski, A.M., Pakula, K., Leszczynski, M., and Prystawsko, P., "Far-infrared and selective photoluminescence studies of shallow donors in GaN hetero- and homoepitaxial layers" *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 1348, (2000).
- [60] Kirilyuk, V., Zauner, A.R.A., Christianen, P.C.M., Weyher, J.L., Hageman, P.R., and Larsen, P.K., "Exciton-related photoluminescence in homoepitaxial GaN of Ga and N polarities", *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2355, (2000).
- [60] Reshchikov, M., Huang, D., Yun, F., He, L., Morkoç, H., Reynolds, D.C., Park, S.S. Lee, K.Y., "Photoluminescence of GaN grown by molecular-beam epitaxy on a freestanding GaN template", *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 3779, (2001).
- [61] Fisher, S., Wetzel, C., Haller, E.E., and Meyer, B.K., "On p-type doping in GaN-acceptor binding energies", *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 1298 (1995).
- [62] Smith, M., Chen, G.D., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Salvador, A., Sverdlov, B.N., Botchkarev, A., Morkoc, H., and Goldenberg, B., "Mechanisms of band-edge emission in Mg-doped p-type GaN", *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1883, (1996).
- [63] Reshchikov, M.A., and Morkoç, H., "Defects in GaN: optical signature", *J. Appl. Phys. Rev.*, **97**, 061301-1-061301-95, (2005)

- [64] Limpijumng, S., and Van de Walle, C.G., ‘‘ Diffusivity of native defects in GaN’’, *Phys. Rev. B*, **69**, 035207 (2004).
- [65] Graf, T., Gjukic, M., Hermann, M., Brandt, M.S., Stutzmann, M., Görgens, L., Phillip, J.B., and Ambacher, O., ‘‘Growth and characterization of GaN:Mn epitaxial films’’, *J. Appl. Phys.*, **93**, 9697 (2003).
- [66] Korotkov, R.Y., Gregie, J.M. and Wessels, B.W., ‘‘ Mn-related absorption and PL bands in GaN grown by metal organic vapor phase epitaxy’’, *Physica B*, **308-310**, 30-33, (2001).
- [67] Graf, T., Gjukic, M., Brandt, M.S., Stutzmann, M., and Ambacher, O., ‘‘ The Mn<sup>3+/2+</sup> acceptor level in group III nitrides’’, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 5159 (2002).
- [68] Averkiev, N.S., Gutkin, A.A., Kolchanova, N.M., and Reshchikov, M.A., *Sov. Phys. Semicond.*, **18**, 1019, (1984).
- [69] Birkle, U., Fehrer, M., Kirchner, V., Einfeldt, S., Hommel, D., Strauf, S., Michler, P., and Gutowski, J., *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, 4S1, G5.6 (1999)
- [70] Glaser, E.R., Kennedy, T.A., Doverspike, K., Rowland, L.B., Gaskill, D.K., Freitas, J.A., Jr, Khan, M.A., Olson, D.T., Kuznia, J.N. and Wickenden, D.K., ‘‘Optically detected magnetic resonance of GaN films grown by organometallic chemical-vapor deposition’’, *Physical Review B: Condensed Matter*, **51**, 13326 (1995).
- [71] Ogino, T., and Aoki, M., ‘‘ Mechanism of Yellow Luminescence in GaN’’, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, 2395, (1980).
- [72] Saarinen, K., Laine, S., Kuisma, S., Nissila, J., Hautajarvi, P., Dobrzynski, L., Baranowski, J.M., Pakula, K., Stepniewski, R., Wojdak, M., Wyszomolek, A., Suski, T., Leszczynski, M., Grzegory, I., and Porowski, S., ‘‘ Observation of Native Ga Vacancies in GaN by Positron Annihilation’’, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 3030, (1997).
- [73] Neugebauer, J., Chris G. Van de Walle, ‘‘ Gallium vacancies and yellow luminescence in GaN’’, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 503, (1996).
- [74] Mattila, T., Nieminen, R.M., ‘‘ Point-defect complexes and broadband luminescence in GaN and AlN’’, *Phys. Rev. B: Condensed Matter*, **55**, 9571, (1997).
- [75] Saarinen, K., Ranki, V., Suski, T., Bockowski, M., Grzegory, I., ‘‘ Vacancies as compensating centers in bulk GaN: doping effects’’, *Journal of Crystal Growth*, **246**, 281, (2002).

- [76] Young, A.P., and Brillson, L.J., "Luminescence spectroscopy of GaN in high-temperature regime from room temperature to 900 °C", *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 699, (2000).
- [77] Shan, W., Hauenstein, R.J., Fischer, A.J., Song, J.J., Perry, W.G., Bremser, M.D. and Davis, R.F., Goldenberg, B., "Strain effects on excitonic transitions in GaN: Deformation potentials", *Phys. Rev. B.*, **54**, 13460 (1996).
- [78] Pikus, G., *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **41**, 1507, (1961), [*Sov. Phys. JETP* **14**, 1075, (1962)]
- [79] Gil, B., Hamdani, F., Morkoç, H., "Oscillator strengths for optical band-to-band processes in GaN epilayer", *Physical Review B: Condensed Matter*, **54**, 7678, (1996)
- [80] Burgraaf, P., "The Status of MOCVD Technology", *Semiconductor International*, pp. 80–83 (1993)
- [81] Coleman, J.J., "Metalorganic Chemical Vapor Deposition for Optoelectronic Devices", *Proceedings of the IEEE*, **85**, 11, (1997).
- [82] Tripathy, S., Soni, R.K., Asahi, H., Iwata, K., Kuroiwa, K., Asami, K., and Gonda, S., "Optical properties of GaN grown on C-, A-, R-, and M-plane sapphire substrates by gas source molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, **85**, 8386 (1999)
- [83] Luong Tien Tung, Lin, K.L., Chang, E.Y., Huang, W.C., Hsiao, Y.L. and Chiang C.H., "Photoluminescence and Raman studies of GaN films grown by MOCVD", *Journal of Physics: Conference Series*, **187**, 012021 (2009)
- [84] 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).
- [85] Viswanath, A.K., Lee, J.I., Lee, C.R., Leem, J.Y. Kim,D., "Optical properties of residual shallow donors in GaN epitaxial layers grown by horizontal LP-MOCVD", *Appl. Phys. A*, **67**, 551-556 (1998)
- [86] Stampfl, C. and Chris G. Van de Walle, "Energetics and electronic structure of stacking faults in AlN, GaN and InN", *Phys. Rev., B*, **57**, R15052 (1998).
- [87] Huang, Y.S., Pollak, F.H., Park, S.S., Lee, K.Y., Morkoç, H., "Contactless electroreflectance, in the range of 20 K < T < 300 K, of freestanding wurtzite GaN prepared by hydride-vapor-phase epitaxy", *J. Appl. Phys.* **94**, 899-903, (2003).

- [88] Shan, W., Schmidt, T.J., Yang, X.H., Hwang, S.J., Song, J.J. and Goldenberg, B., "Temperature dependence of interband transitions in GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 985 (1995).
- [89] Paskov, P.P., Schifano, R., Monemar, B., Paskova, T., Figge, S., and Hommel, D., "Emission properties of a-plane GaN grown by metal-organic chemical-vapor deposition" *J. Appl. Phys.*, **98**, 093519 (2005).
- [90] Paskov, P.P., Paskova, T., Holtz, P.O., Monemar, B., "Polarized Photoluminescence study of free and bound excitons in free-standing GaN", *Phys. Rev. B*, **70**, 035210, (2004).
- [91] Pollak, F.H., "Group III Nitride Semiconductor Compounds: Physics and Applications", ed. Gil, B., Clarendon Press, Oxford, **p.158** and references therein, (1998).
- [92] Lewis Z-Y Liu, Sridhara Rao, D.V., Kappers, M.J., Humphreys, C.J. and Geiger, D., "Basal-plane Stacking Faults in Non-polar GaN Studied by Off-axis Electron Holography", *Journal of Physics: Conference Series*, **209** (2010) 012012.