

**GaN TABANLI SICAK ELEKTRON IŞIN YAYICI
HETERO-YAPILAR**

Feyza SÖNMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Aralık, 2017

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1502F069 ve 1605F365 no.lu projeler kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Feyza SÖNMEZ'in "GaN Tabanlı Sıcak Elektron Işın Yayıcı Heteroyapılar" başlıklı tezi 21/12/2017 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	:Prof. Dr. Engin TIRAŞ	
Üye	:Prof. Dr. Ayşe EROL	
Üye	:Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN	

.....
Enstitü Müdürü

ÖZET

GaN TABANLI SICAK ELEKTRON IŞIN YAYICI HETERO-YAPILAR

Feyza SÖNMEZ

Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ARALIK, 2017

Danışman: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

Bu çalışmada, elektronik ve opto-elektronik aygıtların üretilmesinde kullanılan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapıların optik özellikleri incelenmiştir. Farklı kuantum kuyu sayısına ve In miktarına sahip olan örnekler safır alttaşı üzerine büyütülmüştür. Optiksel ölçümlerin ilk kısmında, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapıların yayılım mekanizmasını incelemek için sıcaklığa bağlı (3-300 K) fotoluminesans ölçümleri alındı. Numunelerin fotoluminesans spektrumlarında gözlenen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusuna ait ana geçişin pik enerjisinin ve GaN bariyer pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimleri temel Varshni ve Bant kuyruk modelleri ile desteklenerek incelendi. Kuantum kuyu sayısı ve In konsantrasyonunun bu parametreler üzerindeki etkisi araştırıldı. Çalışmanın ikinci kısmında ise sıcaklığa bağlı Raman ölçümleri alındı. Elde edilen spektrumlarda $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerin boyuna optik fonon enerjileri belirlendi. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildi.

Anahtar Sözcükler: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Çoklu Kuantum Kuyu, Fotoluminesans, Varshni Denklemleri, Bant Kuyruk Modeli, Raman Spektroskopisi.

ABSTRACT

GaN BASED HOT ELECTRON LIGHT EMITTING HETEROJUNCTION

Feyza SÖNMEZ

Department of Physics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, December, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Engin TIRAŞ

In this study, optical properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multiple quantum well structures which are used in the production of electronic and optoelectronic devices have been investigated. The samples with different quantum well numbers and indium concentration were grown on sapphire (Al_2O_3) substrate. In the first part of the optical measurements, to investigate emission mechanisms of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multi quantum well structures, the temperature dependence of photoluminescence measurements was carried out between 3 and 300K. The temperature dependence of emission peak energy and GaN barrier peak energy that observed in the photoluminescence spectra were analysed by supporting Varshni and Band Tail models. The effect of the quantum well number and In concentration on these parameters were investigated. In the second part of the study, the temperature dependence of Raman measurements were performed. In the obtained spectra, longitudinal optical phonon energies of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multiple quantum wells were determined. The obtained results were evaluated by comparing with the literature.

Keywords: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Multi Quantum Well, Photoluminescence, Varshni Equation, Band Tail Model, Raman Spectroscopy.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterip maddi manevi destek olan öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum değerli danışman hocam **Prof. Dr. Engin TIRAŞ**'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında hiçbir yardımını esirgemeyen kıymetli hocam **Uzm. Tülay TIRAŞ**'a teşekkürlerimi sunarım

Tez çalışmam sırasında beni destekleyen arkadaşlarım **Şükrü ARDALI**'ya ve **Hakan Asaf FIRAT**'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında olduğu gibi tez çalışmam sürecinde maddi manevi yanımda olan babam **Adem SÖNMEZ**'e, annem **Hatice SÖNMEZ**'e ve kardeşlerim **İrfan SÖNMEZ**'e ve **Tuğba SÖNMEZ BAYRAKTAR**'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen **1502F069** ve **1605F365** no.lu projeler kapsamında desteklenmiştir.

Saygılarımla
Feyza SÖNMEZ
ARALIK, 2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

.....
Feyza SÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLO DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. III-Nitrürlerin Temel Özellikleri.....	3
2.1.1. Kristal yapısı	3
2.1.2. Bant yapısı.....	4
2.2. Materyal Parametreleri.....	5
2.3. GaN Yarıiletken Bileşiği	6
2.4. InN Yarıiletken Bileşiği	8
2.4. In _x Ga _{1-x} N Yarıiletken Alaşımı	8
3. HELLISH	11
3.1. Sıcak Elektron Kavramı.....	11
3.2. HELLISH (Hot Electron Light emitting and Lasing In Semiconductor Heterojunction) Yapılar.....	11
3.2.1. Düşük elektrik alanlarda HELLISH yapılar.....	16
3.2.2. Yüksek elektrik alanlarda HELLISH yapılar	17
3.2.3. TOP-HAT HELLISH yapılar.....	18
4. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	20
4.1. Elektromanyetik Işıma	20
4.2. Spektroskopi	21
4.2.1. Fotolüminesans spektroskopisi	22

4.2.2. Raman spektroskopisi	26
5. NUMUNE HAZIRLANMASI VE DENEY DÜZENİĞİ.....	30
5.1. Numunelerin Yapısı.....	30
5.2. Deney Düzeniği.....	32
5.2.1. Işın kaynağı (UV Laser).....	33
5.2.2. Kryostat (cryostat).....	34
5.2.3. Optiksel bileşenler.....	34
5.2.4. Monokromatör	34
5.2.5. Dedektör.....	35
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	36
6.1. Örneklerin Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümleri	36
6.1.1. Örneklerin sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumları	37
6.1.2. Örneklerin fotolüminesans spektrumlarında gözlenen GaN pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri	41
6.1.3. Örneklerin fotolüminesans spektrumlarında gözlenen $In_xGa_{1-x}N$ çoklu kuantum kuyusuna ait emisyon pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri	44
6.1.4. Örneklerdeki In miktarının hesaplanması	48
6.2. Örneklerin Sıcaklığa Bağlı Raman Ölçümleri	49
7. SONUÇLAR.....	52
KAYNAKÇA.....	54
ÖZGEÇMİŞ	

TABLO DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. III-V Nitrür yarıiletkenlerine ait fiziksel parametreler	5
Tablo 2.2. GaN ile Si, GaAs, 4H-SiC yarıiletkenlerinin fiziksel özellikleri	7
Tablo 4.1. Elektromanyetik spektrum bölgelerinin frekansı ve bu bölgelere karşılık gelen spektroskopi türleri.....	22
Tablo 6.1. A, B, C kodlu örneklerin 3 K ve 300 K sıcaklıklardaki GaN piklerine ait E_g değerleri.....	40
Tablo 6.2. A, B, C kodlu örneklerin 3 K sıcaklıktaki $In_xGa_{1-x}N$ çoklu kuantum kuyu piklerine ait E_g ve FWHM değerleri	40
Tablo 6.3. $In_xGa_{1-x}N/GaN$ çoklu kuantum kuyu örnekleri için düşük sıcaklıktaki yasak enerji bant aralıkları ve In oranları	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Hekzagonal yapı	3
Şekil 2.2. Wurtzite ve Zinc Blende yapıda kristallenen III-V grubu yarıiletkenlerin örgü sabitine karşı bant aralığı enerjisi değişimi	4
Şekil 2.3. Ga-N polariteli hekzagonal yapının top-çubuk modeli	6
Şekil 2.4. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının indiyum kompozisyonun (x) fonksiyonu olarak yasak enerji aralığı	10
Şekil 3.1. HELLISH-1 aygıt yapısı ve fiziksel parametreleri	12
Şekil 3.2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ p-n eklemi kıtlık bölgesinin n tarafındaki QW ile HELLISH-1 aygıtının enerji bant profilinin şematik gösterimi	14
Şekil 3.3. UB-HELLISH aygıtının tabaka yapısı	15
Şekil 3.4. a) Oldukça karmaşık yapı ve üretim teknikleri ile tasarlanmış geleneksek VSCOA yapı b) DBR aynalardan geçmeden aktif tabakanın içine akım iletilmesi için yalnızca iki kontağın gerekli olduğu basit bir yol ile tasarlanıp üretilen basit bar HELLISH- VSCOA yapı	16
Şekil 3.5. İletim ve değerlik bantlarında yarı-düz bant bölgesi (noktalı çizgi) şematik gösterimi	17
Şekil 3.6. Yarı-düz bant koşulları altında ışık yayılımı gösterimi	18
Şekil 3.7. a) p-n eklemının içerisindeki kuantum kuyulardan meydana gelen basit THH yapısı. b) alt ve üst kısmına DBR aynalar eklenmiş p-n eklem bölgesi arasına yerleştirilmiş QW' lar içeren THH- VCSEL/VCSOA yapısı ve 4 kontak konfigürasyonu	19
Şekil 4.1. Elektromanyetik ışımanın gösterimi	20
Şekil 4.2. Elektromanyetik ışıma türleri elektromanyetik spektrumda gösterimi	21
Şekil 4.3. Üç adımda fotolüminesans aşamaları a) soğurma b) durulma c)yeniden birleşme ışınımı (foton yayılımı), (VB valans bantı, CB iletim bantı)	23
Şekil 4.4. (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) banttan banda (b) verici seviyesinden valans bandına (c) iletkenlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviye yoluyla ışımasız geçiş	24
Şekil 4.5. Gerilme titreşimlerinin şematik gösterimi	27
Şekil 4.6. Eğilme titreşimleri şematik gösterimi.	27
Şekil 4.7. Saçılma türleri	28
Şekil 4.8. Rayleigh ve Raman saçılmalarının kuantum mekaniksel gösterimi	29

Şekil 5.1. B-3050 InGaN çoklu kuantum kuyu yapısı.....	31
Şekil 5.2. In _{0.1} Ga _{0.9} N/GaN çoklu kuantum kuyu yapısı.....	32
Şekil 5.3. Fotolüminesans ve Raman ölçüm deney düzeneği blok gösterimi.....	33
Şekil 5.4. Monokromatör blok diyagramı.....	35
Şekil 6.1. B-3050 kodlu örneğe ait sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumu	37
Şekil 6.2. (a) A örneğine (b) B örneğine (c) C örneğine ait sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumu.....	38
Şekil 6.2. (Devam) (a) A örneğine (b) B örneğine (c) C örneğine ait sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumu.....	39
Şekil 6.3. (a) B-3050 kodlu örneğin (b) A-örneğin (c) B-örneğin (d) C-örneğin fotolüminesans spektrumundaki GaN pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi	42
Şekil 6.3. (Devam) (a) B-3050 kodlu örneğin (b) A-örneğin (c) B-örneğin (d) C-örneğin fotolüminesans spektrumundaki GaN pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi	43
Şekil 6.4. B-3050 kodlu örneğe ait In _x Ga _{1-x} N pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi	44
Şekil 6.5. (a) A-örneğine (b) B-örneğine (c) C-Örneğine ait In _x Ga _{1-x} N pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi (d) A-örneğine, B-örneğine ve C-Örneğine ait In _x Ga _{1-x} N pik enerjisinin FWHM değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	46
Şekil 6.5. (Devam) (a) A-örneğine (b) B-örneğine (c) C-Örneğine ait In _x Ga _{1-x} N pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi (d) A-örneğine, B-örneğine ve C-Örneğine ait In _x Ga _{1-x} N pik enerjisinin FWHM değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi	47
Şekil 6.6. In _x Ga _{1-x} N/GaN çoklu kuantum kuyu örneklerinin indiyum oranına (x) bağlı InGaN yasak enerji aralığı.....	49
Şekil 6.7. (a) B-3050 kodlu örneğin sıcaklığa bağlı Raman spektrumu (b) B-3050 kodlu örneğin oda sıcaklığındaki Raman spektrumu	50
Şekil 6.8. (a). A örneğinin sıcaklığa bağlı Raman spektrumu (b). A örneğinin oda sıcaklığında Raman spektrumu.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

CCD	: Charge Coupled Device
DBR	: Distributed Bragg Reflector
EMCCD	: Electron Multiplying Charge Coupled Device
ESR	: Elektron Spin Rezonans
FWHM	: Full Width at Half Maximum
HCP	: Hexagonal Close-Packed
HELLISH	: Sıcak elektron laser ve ışın yayıcı yarıiletken çok eklemli yapılar (Hot Electron Light emitting and Lasing In Semiconductor Heterojunction)
IR	: Infrared
LED	:Işık Yayıcı Diyot (Light Emitting Diode)
LO	: Longitudinal Optical Phonon
MBE	: Molecular Beam Epitaxy
MOCVD	: Metalorganic Chemical Vapour Deposition
MQW	: Çoklu Kuantum Kuyusu
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans
SQW	: Tekli Kuantum Kuyusu
THH	: Top Hat HELLISH
UV	:Morötesi (Ultraviyole)
UB	: Ultra Parlak (Ultra Bright)
VCSEL	: Yüzey Salımlı Laserler
VCSEA	: Dikey kaviteli yarıiletken optik yükselteç

SİMGELER

A_1	: Optik Fonon Modları
a	: Örgü Sabiti
α	: Varshni Parametresi
b	: Bowing Parametresi
B_1	: Optik Fonon Modları
β	: Varshni Parametresi
c	: Işık Hızı
c	: Örgü Sabiti
E	: Elektrik Alan
E_1	: Optik Fonon Modları
E_2	: Optik Fonon Modları
E_g	: Yasak Enerji Aralığı
E_A	: Akseptör Enerjisi
E_D	: Donor Enerjisi
ϵ_s	: Statik Dielektrik Sabiti
h	: Planck Sabiti (6.626×10^{-34} J.s)
$h\nu_1$	: Foton enerjisi
$\hbar\omega$	: Optik Fonon Enerjisi
k_B	: Boltzmann Sabiti ($=1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
m_e	: Elektron Etkin Kütlesi
m_h	: Boşluk Etkin Kütlesi
μ_e	: Elektron Mobilitesi
μ_h	: Boşluk Mobilitesi

T_E	: Elektron Sıcaklığı
T_L	: Örgü Sıcaklığı
ν_0	: Uyarıcı Işığın Frekansı
ν	: Frekans
$\bar{\nu}$	: Dalga Sayısı
$\Delta c/c$	: Isıl Katsayısı
$\Delta a/a$	: Isıl Katsayısı
ρ	: Yoğunluk
χ	: Isıl iletkenlik
λ	: Dalga Boyu
σ	: Yerelleşme Etkisi

1.GİRİŞ

Gelişen epitaksiyel büyütme teknikleri ile yarıiletkenler uygun alttaşların üzerine tek kristal tabakalar halinde büyütülebilmektedir. Bu gelişen büyütme teknikleri opto-elektronik aygıt yapıların tasarlanıp büyütülüp üretilmesine imkan sağlamıştır.

Farklı tür p-tipi yarıiletken malzeme ile n-tipi yarıiletken malzeme uygun alttaş üzerine büyütülerek p-n heteroeklem yapılar elde edilir. Bu iki tür yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığı farklı olduğundan kuantum kuyu yapılar oluşmaktadır. Bu tarz yapılar; transistör, kuantum kuyu laser, ışık yayan diyod (LED), güneş pili gibi aygıtların temelini oluşturur. Bu aygıtların tasarlanıp üretilmesinde sahip oldukları mükemmel optik ve elektriksel özelliklerden dolayı nitrür yarıiletken malzemeler kullanılabilir.

GaN, InN ve AlN III-V nitrür yarıiletkenleri ile alaşım konsantrasyonu değiştirilerek kırmızıdan morötesi (UV) bölgeye kadar olan bir dalga boyuna sahip ışın yayıcı yapılar üretilebilir.

InGaN, indiyum nitrür (InN) ve galyum nitrür (GaN) yarıiletkenlerinin birleşmesi ile oluşan III-V nitrür yarıiletkendir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı içindeki In miktarının değiştirilmesi ile yayılan ışığın dalga boyu diğer bir ifade ile yasak enerji bant aralığı ayarlanabilir. Önceki çalışmalarda InGaN yapı kaliteli bir şekilde büyütülememiştir. Ancak ilerleyen zamanda, gelişen büyütme teknikleri ile yüksek kaliteli InGaN çoklu kuantum kuyular üretilebilmiştir.

Bu tez çalışmasında III-V nitrür tabanlı yarıiletkenlerden InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu yapısı incelenmiştir. Bu yapının optiksel karakterizasyonu tezin hedefini oluşturmaktadır. Daha sonra, p-n eklemli InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu örneklerinin litografi ve metalizasyon işlemleri yapılarak HELLISH (Hot Electron Light Emission and Lasing in Semiconductor Heterostructure) ışın yayıcı yapıların oluşturulabilmesi adına bu tez çalışmasında InGaN/GaN örneklerin fotoluminesans ve Raman spektroskopisi ile fiziksel özellikleri araştırılmıştır.

HELLISH yapılar, sıcak elektron laser ve ışın yayıcı yarıiletken çok eklemli yapılar sıcak elektron yüzey ışın yayıcılarıdır. Bu yapılar ilk olarak N. Balkan ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra, HELLISH 1-2, Ultra Bright (UB)-HELLISH, HELLISH

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) HELLISH VCSEA (Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier) ve TOP-HAT HELLISH gibi farklı HELLISH yapılar üretilmiştir.

Bu yapıların çalışması sıcak elektron kavramına dayanır. Yapıya elektrik alan uygulandığında, elektronlar enerji kazanır ve örgü sıcaklığından farklı bir sıcaklığa ulaşır. Bu sıcaklık, $3k_B T/2$ enerji değerini aştığında sıcak elektronlar oluşmaktadır.

HELLISH yapıları diğer laser yapılardan ayıran en önemli özelliklerden biri bu yapılara elektrik alanın paralel uygulanmasıdır ve bu durum taşıyıcıların ısınmasına neden olmaktadır. Diğer önemli özellikleri ise, tüm katmanlara nüfuz eden yalnızca iki ohmik kontaklardan oluşmaları ve basit bir yapıya sahip olmalarıdır.

Önceki çalışmalarda, AlGaAs/GaAs çoklu kuantum kuyu yapılar HELLISH yapılar olarak tasarlanmıştır [1-4]

Bu tez kapsamında geniş enerji bant aralığına sahip olan InGaN/GaN çoklu kuantum kuyuların HELLISH yapı olarak üretilmesi için bu yapıların optiksel karakterizasyonu yapılmıştır. Sıcaklığa bağlı (3 K- 300 K) fotoluminesans ve Raman ölçümleri yapılmıştır. Fotoluminesans verilerinden, dalga boyuna bağlı şiddet ve fotoluminesans piklerin ise sıcaklığa bağlı enerji değişimi incelenmiştir. Raman saçılması verilerden elde edilen kristal titreşimlerinin şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar yorumlanmıştır.

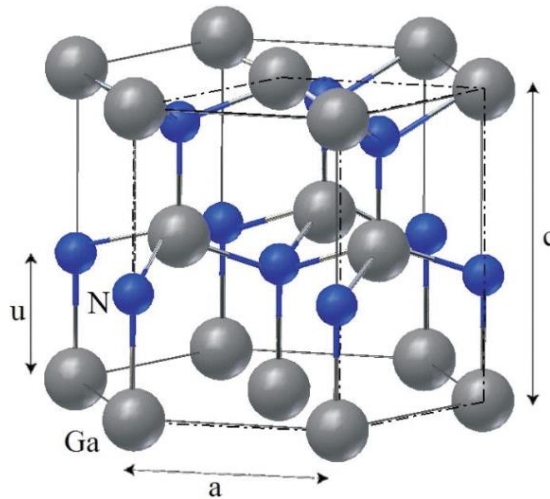
2. GENEL BİLGİLER

2.1.III-Nitrürlerin Temel Özellikleri

Nitrür yarıiletkenleri üstün fiziksel özelliklere sahiptir ve teknolojik uygulamalar için büyük potansiyel oluşturmaktadır. GaN, InN, AlN gibi III- nitrür yarıiletkenler, III grubu elementlerinin V grubu elementlerinden azot ile uygun bir şekilde birleşmesiyle elde edilirler. III-Nitrür ve diğer III-V grubu elementler arasındaki en önemli fark nitrürlerin kararlı kristal yapısıdır [5]. Nitrür yarıiletkenleri sahip oldukları mükemmel optik ve elektriksel özelliklerden dolayı LED, laser, fotodedektör, güneş pili ve yüksek güçlü yükselteç gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Bu bölümde çalışılan yapılar gereği GaN ve InN nitrür yarıiletkenlerinin bazı özelliklerinden bahsedilecektir.

2.1.1 Kristal yapısı

Grup III nitrürleri; *wurtzite*, *zinc blende* ve *rock salt* (kaya tuzu) olmak üzere üç farklı şekilde kristalleşir. Uygun koşullar altında GaN, InN ve AlN için termodinamik olarak kararlı yapı *wurtzite* yapısıdır. GaN ve InN için *zinc blende* yapısı; kübik yapıdaki alttaşların (Si, SiC, MgO ve GaAs gibi) (0 1 1) kristal düzlemleri üzerine ince filmlerin epitaksiyel büyütülmesiyle kararlı hale gelebilirler. Kaya tuzu formu yalnızca yüksek basınç altında mümkündür [6]. Wurtzite yapısı, iç içe geçmiş iki hekzagonal sıkı paketli (hcp) alt örgülerden oluşan bir yapıdır. Wurtzite yapısı altıgen (hexagonal) birim hücreye sahiptir ve bu yüzden *c* ve *a* olmak üzere iki örgü sabiti mevcuttur. (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Hekzagonal yapı [7]

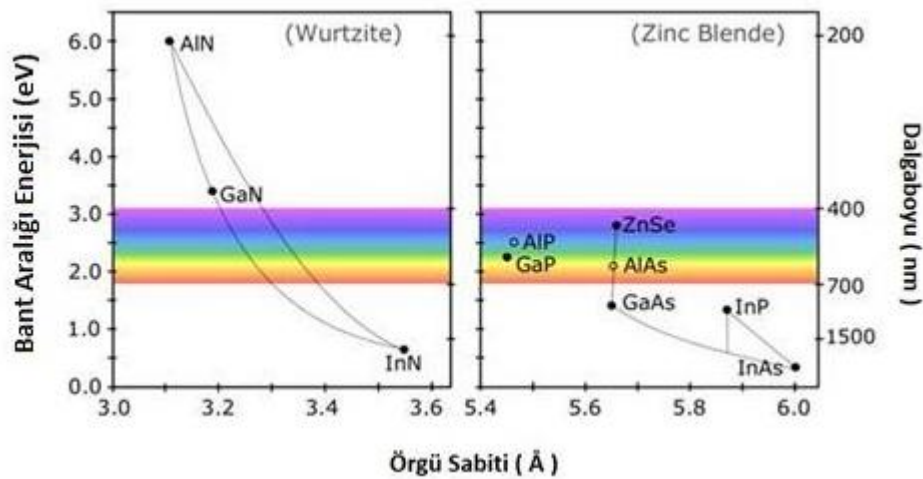
Şekil 2.1’de, a taban düzlemindeki parametreyi (Ga atomları arasındaki bağ uzunluğunu), c birim hücrenin yüksekliğini, u parametresi ise en yakın iki komşu anyon ve katyon (Ga ve N atomları) arasındaki bağ uzunluğunu göstermektedir.

Zinc blende yapısı ise iki iç içe geçmiş yüzey merkezli kübik alt örgülerden oluşur. *Zincblende* ve *wurtzite* yapılar bazı açılardan benzerdir. Her iki durumda da grup-III elementi grup-V elementinin dört atomu ile çevrilmiştir. Bu durumun tam tersine, grup-V elementi grup-III elementinin dört atomu ile çevrilmiştir [8].

Ancak *zinc blende* ve *wurtzite* yapı arasındaki en temel fark, atomların temel düzlem doğrultularındaki dizilim sırasıdır. *Wurtzite* yapının dizilim sırası [0001] yöneliminde olup ABAB şeklindedir. *Zinc blende* yapının dizilim sırası [001] doğrultusunda ABCABC şeklindedir.

2.1.2 Bant yapısı

III-N bileşikleri, doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerdir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere; III-N bileşiklerde, bant aralığı alaşım konsantrasyonuna bağlı olarak 0,7 eV ile 6,2 eV arasında değişmektedir. Hekzagonal kristal yapıda enerji bant aralığı (E_g), InN için 0,7 eV, GaN için 3,42 eV ve AlN için ise 6,2 eV değerini alır. Sonuç olarak 0,7 eV dan 6,2 eV’a kadar olan bir enerji aralığını kaplarlar ve bu yüzden III-Nitürleri, kırmızıdan ultraviyole (UV)’e kadar uzanan dalga boylarında aktif olan optik aygıtların üretilmesine imkan sağlarlar [6].



Şekil 2.2. Wurtzite ve Zinc Blende yapıda kristallen III-V grubu yarıiletkenlerin örgü sabitine karşı bant aralığı enerjisi değişimi [9]

2.2. Materyal Parametreleri

GaN, AlN ve InN yarıiletkenleri için fiziksel parametreler aşağıdaki tablo 2.1’de verilmiştir [6,10,11].

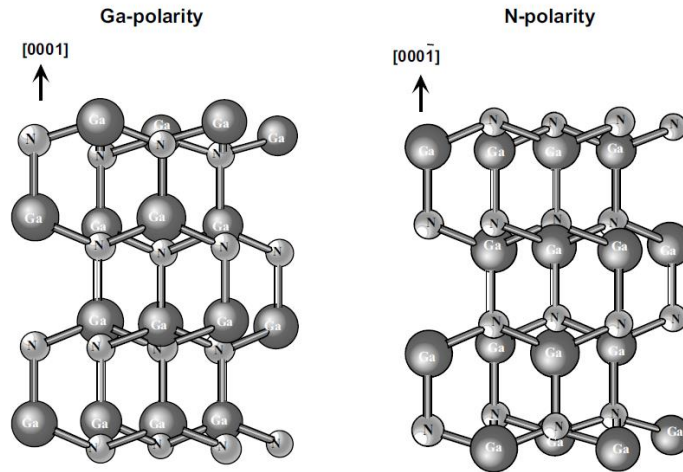
Tablo 2.1. III-V Nitrit yarıiletkenlerine ait fiziksel parametreler

Parametre	Simge	Birim	GaN	AlN	InN
Bant Aralığı (300 K)	E_g	eV	3,42	6,20	0,70
Örgü Sabiti	a	Å	3,189	3,111	3,533
Örgü Sabiti	c	Å	5,186	4,982	5,693
Isıl Katsayı	$\Delta a/a$	K ⁻¹	$5,59 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-6}$	$2,85 \times 10^{-6}$
Isıl katsayı	$\Delta c/c$	K ⁻¹	$3,17 \times 10^{-6}$	$5,3 \times 10^{-6}$	$3,75 \times 10^{-6}$
Elektron Etkin Kütlesi	m_e	m_0	0,20	0,40	0,11
Boşluk Etkin Kütlesi	m_h	m_0	0,8	3,53	1,63
Yoğunluk	ρ	g/cm ³	6,15	3,23	6,81
Optik Fonon enerjisi	$\hbar\omega$	meV	91,2	99,2	73
Statik Dielektrik Sabiti	ϵ_s	ϵ_0	8,9	8,5	15,3
Isıl iletkenlik	χ	W/(cm ⁰ C)	1,3	2,85	0,45
Elektron mobilitesi	μ_e	cm ² /V.s	900	300	4400
Boşluk mobilitesi	μ_h	cm ² /V.s	30	14	39

2.3. GaN Yarıiletken Bileşiği

GaN doğrudan ve geniş bant aralığına (3,4 eV) sahip wurtzite yapıda bir yarıiletkendir. Bu özelliğinden dolayı opto-elektronik uygulamalar için büyük öneme sahiptir. GaN n-tipi özellik göstermektedir. Galyum nitrürün tarihine baktığımızda yapılan ilk çalışmalarda, p-tipi GaN üretilmemesine rağmen GaN mavi ışık yayıcı olarak oldukça uygun bir yarıiletken olarak görülmüştür. Daha sonra, Akasaki ve Amano Mg konsantrasyonu ile kontrol edilebilen p-tipi GaN üretebilmişlerdir [12]. P-tipi ve n-tipi GaN'ün büyütülmesiyle p-n homoelekman LED'ler oluşabilmiştir. 1993 yılında Nakamura ve arkadaşları GaN kullanarak ilk mavi LED'i üretebilmişlerdir [13].

GaN temelli heteroyapılar, ikili katmanlarda atomların ayarlandığı genellikle [0001] temel düzlem doğrultusunda büyütülür. Bu çift katmanlar, polar yüzeylere yol açan birisi anyonlardan diğeri katyonlardan oluşan iki yakın altıgen katmanlardan oluşur. Büyütme yönündeki atomik dizilim sırasına bağlı olarak ya Ga yüzü ya da N yüzü olur. (0001) yüzeylerine Ga-yüzeyi, (000 $\bar{1}$) yüzeylerine N-yüzeyi karşılık gelir. Bunlara bağlı olarak da Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, Ga-yüzeyi polarizasyonu ve N- yüzeyi polarizasyonuna sahip olurlar. Galyum nitrürün (0001) ve (000 $\bar{1}$) yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri farklıdır [14].



Şekil 2.3. Ga-N kutuplu hekzagonal yapının top-çubuk modeli [6]

Tablo 2.2’de 300 K’de, GaN’ün, Si, GaAs ve 4H-SiC yarıiletkenleri ile kıyaslanarak önemi vurgulanmaya çalışılmıştır [15-17].

Tablo 2.2. GaN ile Si, GaAs, 4H-SiC yarıiletkenlerinin fiziksel özellikleri

Özellik	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Bant Aralığı E_g (eV)	1,12	1,42	3,27	3,40
Kırılma Alanı, E (MV/cm)	0,3	0,4	3,0	3,3
Elektron mobilitesi, μ ($\text{cm}^2/(\text{Vs})$)	1400	8500	900	1000
Boşluk mobilitesi ($\text{cm}^2/(\text{Vs})$)	450	400	120	200
Elektron Sürüklenme hızı, v_s (10^7cm/s)	1,0	1,0	2,0	2,5
Isıl iletkenlik, χ (W/(cmK))	1,3	0,55	3,7	1,3
Dielektrik sabiti, ϵ	11,7	12,9	9,7	8,9

GaN, GaAs ile kıyaslandığında yüksek ısı iletkenlik ve kırılma alanına sahiptir. Isıl iletkenlik, bir aygıtın yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kabiliyetini gösterir [18]. Kırılma alanı ise, yüksek güç aygıtlarının tasarımı için en önemli malzeme parametrelerinden biridir ki bu parametre aygıtın en yüksek çalışma gerilim değerini belirler [19]. GaN’ün elektron sürüklenme hızı Si, GaAs, SiC den daha büyük bir değere sahiptir. Bu parametre ise GaN’ü yüksek frekans uygulamaları için uygun hale getirir.

Bu özelliklerden dolayı, GaN yüksek güç, frekans ve sıcaklık gerektiren aygıtlar için uygundur. Diğer önemli parametre dielektrik sabitidir. Dielektrik sabiti yüklenme kapasitesini belirlemektedir. Bu parametre aygıtın boyutunu etkilemektedir [19].

Ancak, yerli ve örgü uyumlu alttaşların eksikliğinden dolayı GaN genellikle safir, SiC ve Si üzerine büyütülür. Bu durum, örgü ve ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluktan dolayı GaN tabakaları arasında gerilme ve kusurlara yol açmaktadır. Bu gerilme ve kusurlar GaN tabanlı aletlerin çalışma ve performansını sınırlamaktadır. Yüksek kaliteli düşük kusurlu GaN ince filmler MBE yöntemiyle büyütülmektedir [20].

2.4. InN Yarıiletken Bileşiği

InN yarıiletken bileşiği, uygun alttaşların eksikliği ve yüksek kaliteli InN kristali elde etmekteki zorluklardan dolayı üzerinde en az çalışılan nitrür yarıiletkenidir. 20.yüzyılın başlarında InN üzerine çalışmalar başlamıştır ancak azot moleküllerinin yüksek buhar basıncı ve düşük ayrışma sıcaklığından dolayı başarı elde edilememiştir. Büyütme tekniklerinin gelişmesiyle 1980'lerin sonlarında tek kristal InN üretilenmiştir [21].

InN, nitrür yarıiletkenleri içerisinde en küçük yasak enerji bant aralığına, düşük etkin kütleye, yüksek mobilite ve yüksek sürüklenme hızına sahip olmasından dolayı önemlidir [21, 22].

InN; grup-III elementi indiyum (In) ile grup-V elementi azot'un (N) bileşiminden oluşan III-V grubu yarıiletken bileşiktir. İlk çalışmalarda, InN yarıiletken bileşiğinin yasak enerji bant aralığı 1,89 eV olarak belirlenmiş ve bu değer uzun süre kabul edilmiştir. Ancak son çalışmalar InN yarıiletken bileşiğinin yasak enerji bant aralığının ~ 0,7 eV olduğunu göstermiştir [23].

2.4.In_xGa_{1-x}N Yarıiletken Alaşımı

InGaN alaşımı, kırmızıdan morötesine kadar spektral aralığı kaplayabildiğinden opto-elektronik aygıtların gelişmesi için büyük öneme sahiptir. Ancak yüksek kaliteli kristal katmanlarının büyütülmesindeki zorluklardan dolayı InGaN ve InN çok gelişmemiştir. Son zamanlardaki epitaksiyel büyütme teknolojisinin gelişmesiyle yüksek kaliteli InN elde edilmiştir [24].

1992’de Nakamura ve Mukai ilk kez, MOCVD yöntemini kullanarak kaliteli InGaN filmlerini büyötmeyi başarmışlardır. Daha sonra InGaN çoklu kuantum kuyu büyötmeyi başarmışlardır.

InGaN aktif tabakası, InGaN içindeki In miktarına bağılı olarak kırmızıdan morötesine ışık yayan III-V nitrür tabanlı LED ve laser diyotlarda kullanılmaktadır [25]. Wurtzite GaN ve In bileşikleri ile oluşan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı da wurtzite yapıdadır [26].

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının örgü sabitleri Vegard yasası ile ifade edilir, alaşımı oluşturan ikili bileşiğin örgü sabitleri arasında doğrusal bağıntı vardır [27]. Örgü sabitlerinin birimleri Å cinsindendir. Mol kesrini x (In) ifade etmektedir [26].

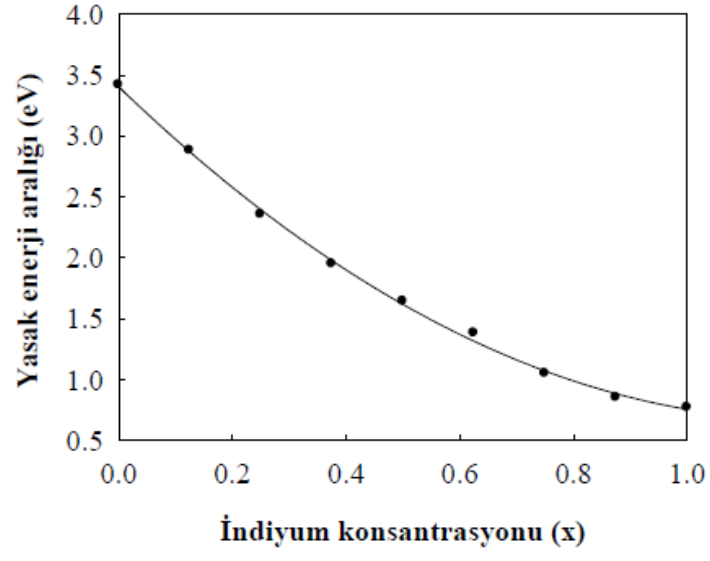
$$a_{\text{InGaN}} = xa_{\text{InN}} + (1 - x)a_{\text{GaN}} \quad (2.1)$$

$$c_{\text{InGaN}} = xc_{\text{InN}} + (1 - x)c_{\text{GaN}} \quad (2.2)$$

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı için bant aralığı enerjisinin bileşimlere bağılılığı genellikle,

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xE_g(\text{InN}) + (1 - x)E_g(\text{GaN}) - bx(1 - x) \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, b eğrilme parametresidir. Eğrilme parametresi, GaN ve InN ikili alaşımının bant aralığı enerjisinin doğrusallıktan sapma miktarını verir [27]. Eğrilme parametresi b ’nin değeri için yayınlanan kaynaklarda farklılıklar gözükmemektedir. Bu değerler 1,4 eV-2,8 eV aralığında değişmektedir. Eğrilme parametresi b ’nin bu geniş aralıkta değerler alması, çalışılan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tabakalarının gerilme durum oranıyla ilgili olması ile açıklanabilir [28]. Şekil 2.4’de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının yasak enerji aralığının In (x) konsantrasyonuna göre değişimi verilmiştir. In oranı arttıkça yasak enerji aralığının azaldığı görölmektedir.



Şekil 2.4. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının indiyum kompozisyonun (x) fonksiyonu olarak yasak enerji aralığı [29,30]

3. HELLISH

3.1. Sıcak Elektron Kavramı

Gelişen kristal büyütme tekniklerinin çok küçük boyutlu yapıların üretilmesine imkan sağlaması yarıiletkenlerdeki sıcak elektronlara olan ilgiyi arttırmıştır. Bu sayede mikron altı yarıiletken cihazlar üretilabilmektedir. Bu durum, birkaç volt uygulandığında bile örnek üzerinden çok yüksek elektrik alanların geçmesini sağlar [31].

Isısal dengede, elektronların belirli bir yönde net momentumları yoktur. Isısal dengede ve çok zayıf elektrik alan altında elektronların ortalama enerjisi $3k_B T/2$ kadardır. Yarıiletkenlere elektrik alan uygulandığında, elektronlar momentum kazanır ve enerjileri artar. Uygulanan elektrik alan arttıkça, elektronların elektrik alandan kazandığı enerji (bu elektronların yüksek mobiliteleri nedeniyle) artar. Ortalama ısısal enerji $3k_B T/2$ değerine ulaşır ve bu değeri aşar. Böylece, 2D elektron gazı içerisinde, kristal örgüyle ısısal dengede olmayan ve enerjileri ortalama ısısal enerjiden büyük olan elektronlar meydana gelir. Bu elektronlara sıcak elektronlar (*hot electrons*) denmektedir. Sıcak elektronlar, örgü sıcaklığından (T_L) daha yüksek olan bir elektron sıcaklığı (T_e) ile ifade edilirler, $T_e > T_L$ [32].

3.2 HELLISH (Hot Electron Light Emitting and Lasing In Semiconductor Heterojunction) Yapılar

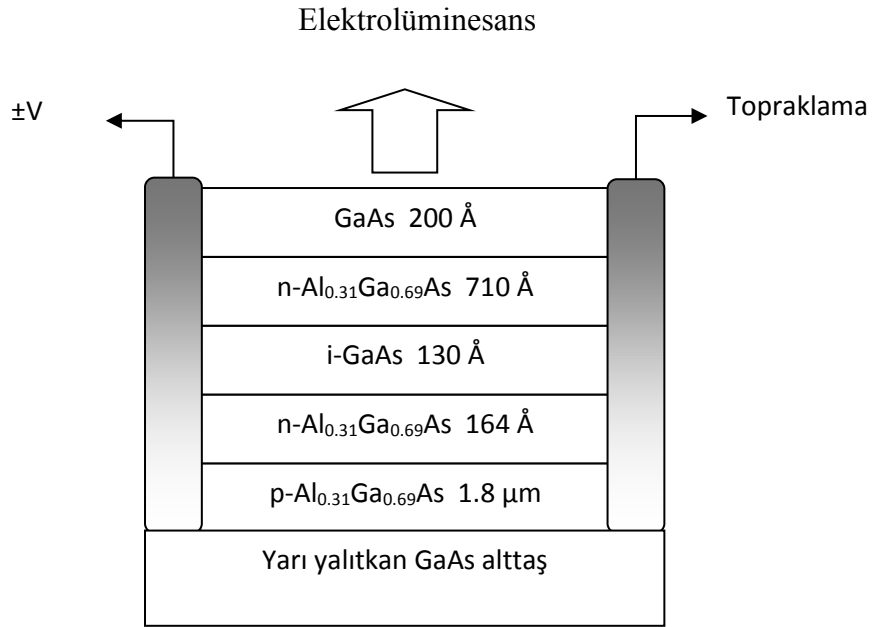
Sıcak elektron laser ve ışın yayıcı yarıiletken çok eklemlili yapılar (**H**ot **E**lectron **L**ight **E**mitting and **L**asing in **S**emiconductor **H**eterostructure, *HELLISH*) sıcak elektron yüzey yayıcılarıdır. HELLISH 1 ve 2' yi içeren ilk HELLISH aygıtları, 1995 yılında Prof. Balkan ve grubu tarafından tasarlanmıştır [33,34]. Daha sonra, bu yapıları UB-HELLISH, HELLISH VCSEL- VCSOA ve son olarak Top-Hat HELLISH (THH)' lerin geliştirilmesi takip etmiştir.

Tüm HELLISH yapılarda boyuna iletim mekanizması kullanıldığından dolayı uygulanan elektrik alan büyütülen katmanlara paraleldir. Bu durum taşıyıcıların bulundukları kanallarda ısınmasına neden olmaktadır.

HELLISH yapıların aksine, geleneksel yarıiletken laser ve ışık yayıcılar p-n eklem bölgesindeki taşıyıcıların dikey iletimine dayanır. Geleneksel ışık yayıcı diyotların aktif bölgelerindeki kuantum kuyuların birleşmesi, yüksek verimliliğe ve düşük eşik akımına

yol açan taşıyıcıların en iyi şekilde hapsedilmesini sağlamaktadır. Ancak, bu geleneksel kuantum kuyu laser aygıtların yüzeylerinin küçük bir kısmından ışının yayılması, bu aygıtların üretim ve test edilmesinin çok pahalı ve zaman alıcı olması bu aygıtların olumsuz yönleridir [1].

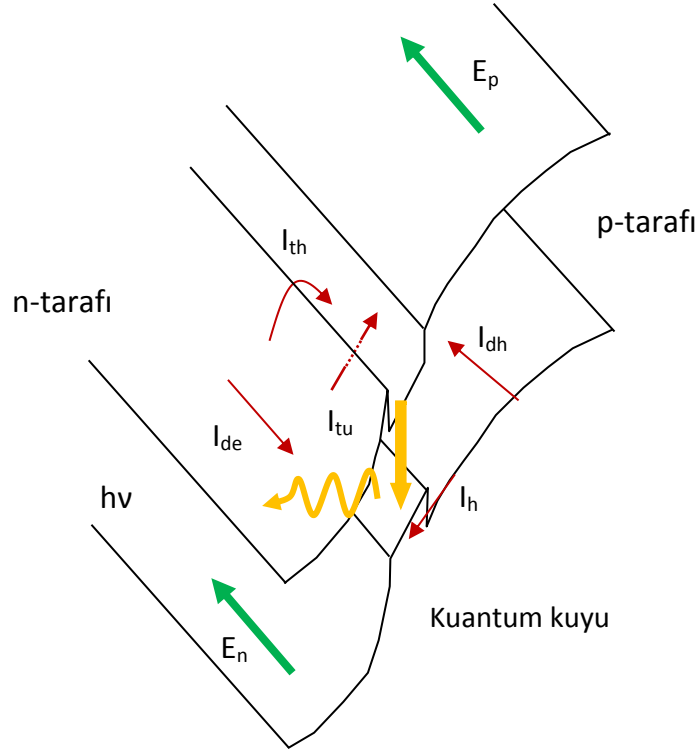
Daha sonra, dikey kaviteli yüzey ışması yapan laserler (VSCEL) keşfedilmiştir. 1990'lı yıllarda, tek kuantum kuyulu GaAs VSCEL'lerin verimliliklerinin %55 ve gücünün 5mW olduğu belirtilmiştir. VSCEL'lerdeki gelişmeler ilgi çekmiştir ancak yapısal tasarım ve fabrikasyon tekniklerinin çok karmaşık olmasından dolayı daha basit yapı, dalga boyu kontrol edilebilen yüzey salımlı aygıtlar araştırılmaya devam edilmiştir. HELLISH yapılar bu özellikleri sağlamak adına iyi bir aday olmuştur [1]. Şekil 3.1'de görüleceği üzere; HELLISH-1 aygıtı, p-n eklemının yüklerden arındırılmış bölgesinin (*depletion region*) n tarafındaki tek kuantum kuyudan (SQW) oluşur [35]. Ohmik kontaklar, tüm katmanlara Au/Ge/Ni yayarak oluşturulmuştur [36]. Bu yapılar en iyi amplifikasyon sağlar ancak geniş ve zayıf ışın yayılımı vermektedir [3,35].



Şekil.3.1.HELLISH-1 aygıt yapısı ve fiziksel parametreleri [36-38]

HELLISH-2 aygıtlarının çalışması ise, p-n eklemının yüklerden arındırılmış bölgesinin (*depletion region*) n tarafındaki çoklu kuantum kuyularının birleşmesine dayanır. Dolayısıyla; HELLISH-2 aygıtları tekli veya çoklu dalga boylarında ışık yayılımı için ayarlanabilir [3, 35, 36].

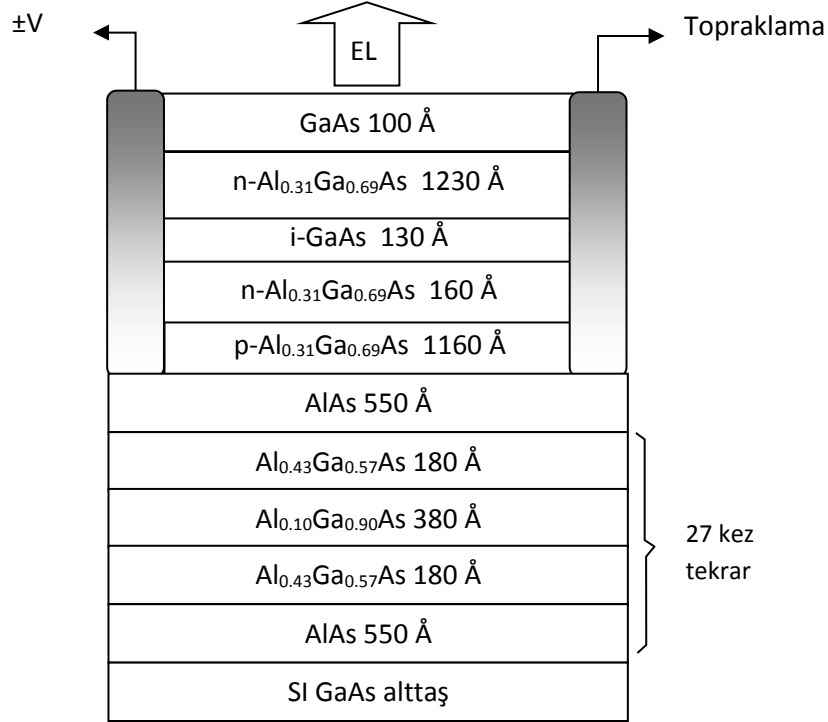
Şekil 3.2’de, temel HELLISH-1 aygıtının içerdığı dinamik taşıyıcıların davranışı gösterilmiştir. Boyuna elektrik alan aygıt tabakalarına paralel olarak uygulandığı zaman n tarafındaki sıcak elektronlar en yüksek enerji durumlarına geçer ve yükten arındırılmış bölgesindeki kuantum kuyu içine hareketlenirler. Kuantum kuyu, sıcak elektronların yükten arındırılmış bölgesine sürüklenmesi için büyük bir tuzak gibi davranır. Kuantum kuyu içindeki elektronlar ısısal olarak örgü ile ısı dengede olmayan ısıya ulaşırlar ve sonuç olarak fazla olan enerjilerini, potansiyel engel boyunca fononlar ile etkileşerek veya kuyu içerisine tünelleyerek kaybederler. Yükten arındırılmış bölgedeki fazla yüklerin artması eklemının enerji-bant profilinin değişmesine neden olur. Bu durumda eklem, eklemının p-tarafında ileri besleme varmış gibi davranır. Böylece yük dengesini korumak için p tarafındaki yükten arındırılmış bölge ve potansiyel engeli azalır. Bu durum, kuantum kuyu içine boşlukların hareketinin artması ile sonuçlanır. Kuantum kuyuların içinde yeniden birleşmenin (*recombination*) olması ile taşıyıcılar ısınır ve yüzeyden ışık yayılır. Bu tür aygıtların kullanılmasıdaki avantaj; üretim aşamaları boyunca tüm tabakalara yayılan sadece iki ohmik kontakın olmasıdır [35].



Şekil 3.2. $Al_xGa_{1-x}As$ p-n eklemi arınmış bölgesinin n tarafındaki QW ile HELLISH-1 aygıtının enerji bant profilinin şematik gösterimi. $E_{n,p}$ tabakalara paralel uygulanan elektrik alandır. I_{th} (termo iyonik) ve I_{tu} (tünelleme) akımları yardımıyla 3D $Al_xGa_{1-x}As$ tabakadan GaAs kuantum kuyunun (QW) birinci alt bant içine dengede olmayan taşıyıcıların enjeksiyonu. I_{de} ve I_{dh} sırasıyla QW içindeki elektron ve boşluk sürüklenme akımlarıdır. I_h ise kuyu içinde sıcak boşlukların sızma akımıdır [35,37]

HELLISH-1 ve 2 yapıları LED yapısıdır. Daha sonra bu yapılar, aktif tabakaların altında büyütülen dağıtıcı Bragg yansıtıcılarının (Distributed Bragg Reflector, DBR) eklenmesi ile (Ultra Bright, UB) UB-HELLISH yapısına dönüştürülmüştür. (şekil 3.3) DBR, iki farklı yüksek ve düşük kırılma indisli malzemelerin eşleştirilmiş tabakalar halinde periyodik olarak büyütülmesiyle elde edilmektedir. DBR aynalar, her tabakanın kalınlığı büyütülen aygıtın çalışma dalgaboyunun dörtte birine eşit olacak şekilde oluşturulmaktadır [39].

DBR %99 üzerinde yansıma sağlar, yani daha önce alttaştan kaybolan yayılım aygıt boyunca geriye yansıtılır. Yarı oluklu ya da parçalı biçimlerde olması ve kırılma indeksindeki süreksizliklerden dolayı kapak tabakası (GaAs gibi)-hava ara yüzeyi yaklaşık %30 yansımaya sahiptir. Bu yüzden süper parlak yapı olarak çalıştırılmaya uygundur ve UB-HELLISH olarak adlandırılırlar [35,37].



Şekil 3.3: UB-HELLISH aygıtının tabaka yapısı [35]

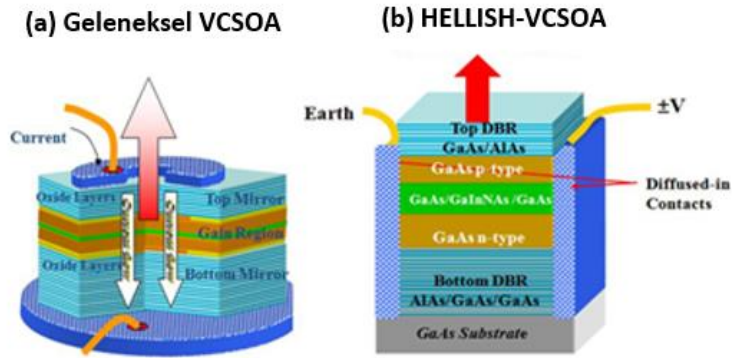
HELLISH aygıtların ana özellikleri:

- Aygıt çalışması için Au/Ge/Ni alaşımlarının yayılması ile oluşturulmuş yalnızca iki elektriksel kontak gereklidir. Dolayısıyla, aygıt üretimi oldukça basit ve ucuzdur.
- Işık yayılması, elektrik alan tarafından taşıyıcıların ısıtılmasından dolayıdır, bu yüzden yayılan ışığın şiddeti uygulanan gerilimin kutupluluğuna bağlı değildir.
- Bu iki özelliğinden dolayı, optiksel XOR ve NAND kapılarının iki boyutlu dizilerin üretimi kolayca gerçekleştirilebilir [1,35,40].

UB-HELLISH aygıtı, üst katmanına DBR aynaların eklenmesi ile HELLISH-VCSEL ve HELLISH-VCSEA yapılarına dönüştürülmüştür [3, 35]. Üst aynaların yansıtması alt aynalarinkine göre nispeten daha düşüktür. HELLISH-VCSEL / VCSEA yapılarında üst DBR'lar aşındırılarak elektriksel kontaklar tüm tabakalar boyunca difüze olmuştur ve bu yapılar tabakalara paralel elektrik alan uygulanarak çalışır [35].

HELLISH aygıtlar, VCSEL yapı olarak ilk GaAs/GaAlAs yapılar şeklinde tasarlanmıştır [2]. İlk başlarda, bu aygıtların şiddet ve ışıma spektrumlarını araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu yapılar GaAs tabanlı oldukları için 850 nm’de ışıma yaparlar.

Şekil 3.4’ de basit yapılı HELLISH-VCSEA karmaşık yapılı geleneksel VCSEA ile karşılaştırılmıştır. Bu iki yapı taşıyıcı iletim mekanizmaları ve elektriksel kontak konfigürasyonları açısından birbirinden farklıdır. HELLISH-VCSEA üst DBR’lar hariç tüm tabakalar boyunca difüze olmuş iki ohmik kontakten oluşur. Bu aygıtlarda p-n eklem bölgesi alt üst DBR aynaların arasındadır. Böylece akım DBR aynalardan geçmeden kazanç bölgesi içine enjekte edilir. Geleneksel VCSEL’lerde ise, akım DBR aynalar boyunca enjekte edilir ve yayılma mesa üzerinden gerçekleşir [35].

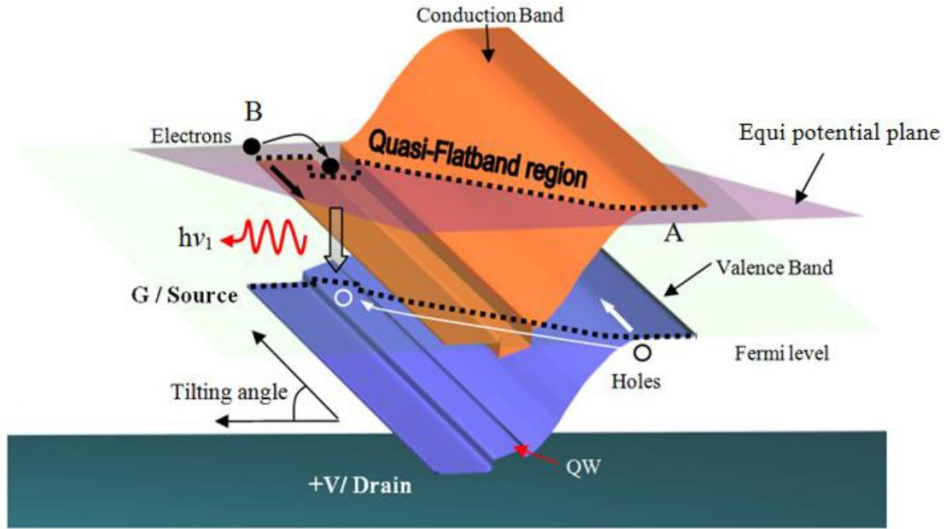


Şekil 3.4. a) Oldukça karmaşık yapı ve üretim teknikleri ile tasarlanmış geleneksel VCSEA yapı b) DBR aynalardan geçmeden aktif tabakanın içine akım iletilmesi için yalnızca iki kontakın gerekli olduğu basit bir yol ile tasarlanıp üretilen basit bar HELLISH-VCSEA yapı

3.2.1. Düşük elektrik alanlarda HELLISH yapılar

HELLISH 1-2, HELLISH-VCSEL ve HELLISH-VCSEA yapıların hepsi HELLISH temelli yapılar olup ışık yayılımı boyuna sıcak elektron iletimine dayanmaktadır. Bu aygıtların performansları birbirlerine göre farklılık gösterir. Örneğin, ışık yayılımı için her bir HELLISH aygıt yapısının eşik elektrik alanları farklıdır. Bu eşik elektrik alan değerleri, HELLISH-1 aygıtlarında 50 ve 100V/cm arasında, UB-HELLISH için 200 ve 600V/cm arasında, HELLISH VCSEL için 50 ve 100V/cm arasında, HELLISH VCSEA için 110 ve 290V/cm arasında değişmektedir [35,37].

HELLISH aygıtların çalışması, elektron hole çiftlerinin kendi kanalları boyunca enjeksiyonuna dayanır. Şekil 3.5’de standart HELLISH aygıtları için üç boyutlu (3D) modeli göstermektedir



Şekil 3.5. İletim ve değerlik bantlarında yarı-düz bant bölgesi (noktalı çizgi) şematik gösterimi. Oklar sırasıyla boşlukların (beyaz ok) ve elektronların (siyah ok) sürüklenmesi ve difüzyonu gösterir. Dolu olmayan ok ışımalı yeniden birleşme alanını gösterir ve yayılan foton enerjisi $h\nu_1$ ’ dir [35,37,41,42]

Elektrik alan uygulanmadığı zaman, ışın üretici taşıyıcılar boyuna kanallarda yan olarak sürüklenmeksizin kuantum kuyu içinde ışımalı olarak yeniden birleşir [42].

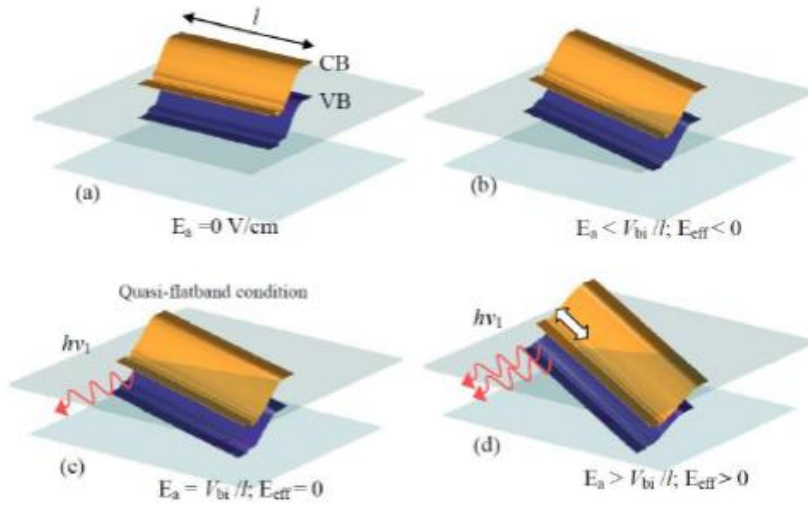
Aygıta düşük gerilim uygulandığı zaman, iki kanalda da eşit potansiyel durumları işgal eden büyütme yolundaki, enerji bantlarını eğerek yarı-düz bant oluşur. Enerji bantları uygulanan voltaj değerine göre eğilir. Enerji bantlarının eğilmesiyle yarı-düz bant oluşur ve az sayıda taşıyıcı boyuna iletiminin artmasına neden olan p-n eklem içine diyagonal olarak sürüklenebilir (şekil 3.5). Bu durumda ışık yayılımı zayıftır ve kuantum kuyuların içine ulaşan boşlukların sayısına bağlıdır. [35,42].

Uygulanan elektrik alanın artması ile enerji bantları daha da eğilecek böylece daha çok taşıyıcı aktif bölge içine akacaktır ve ışık yayılımı artacaktır.

3.2.2.Yüksek elektrik alanlarda HELLISH yapılar

Sıcak elektron ışık yayan aygıtlar büyütme doğrultusu boyunca boyuna elektrik alan (E) uygulanması ile çalışırlar. Yukarıda bahsettiğimiz gibi, uygulanan elektrik alana göre enerji bantları eğilmektedir. Uygulanan elektrik alan arttıkça güçlü elektrik alanın

bir sonucu olarak bantların eğilme oranları da artmaktadır. Ancak büyütme doğrultusundaki iç elektrik alan boyuna etki uygulamaları tarafından etkilenmez. Yüksek elektrik alan uygulamalarında, iletim ve değerlik bantları sıcak elektronlar ve boşluklar tarafından doldurulmuştur ve yarı-düz bant durumu tüm heteroeklem boyunca oluşacaktır. HELLISH aygıtından yayılan ışık sıcak elektron etkileri tarafından yönetilebilir ve onların çalışma sistemi Şekil 3.6’da gösterilmiştir [35].



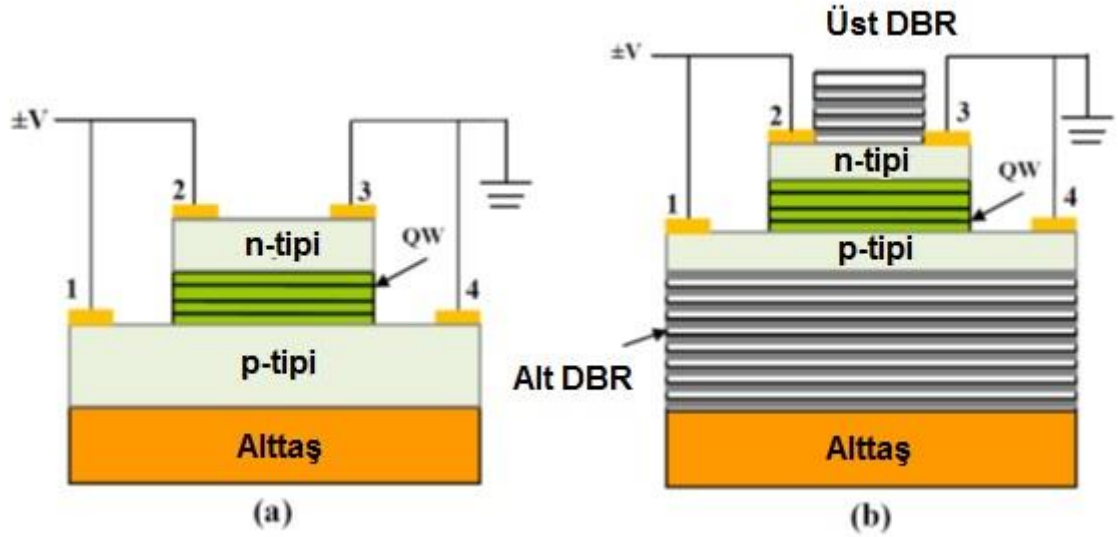
Şekil 3.6. Yarı-düz bant koşulları altında ışık yayılımı gösterimi. CB ve VB sırasıyla iletim ve değerlik bantlarıdır. İki paralel düzlem ile bant eğilme dereceleri gösterilmiştir. a) $E_a = 0$ V/cm b) $E_a < V_{bi} / l$ c) $E_a = V_{bi} / l$ d) $E_a > V_{bi} / l$ [35,37]

3.2.3. TOP-HAT HELLISH yapılar

TOP-HAT HELLISH (THH) yapısı standart HELLISH yapılara benzememektedir. THH yapılar, standart HELLISH yapıların iki ohmik kontak içermesinin aksine, dört bağımsız p ve n kontaklardan oluşur. THH yapılar, p ve n kanalları boyunca farklı elektrik alanların uygulanmasına izin verir [4]. Sırasıyla p kanalı ve n kanalı içindeki elektrik alan kuvvetini azaltmak için THH daha uzun p kanalı daha kısa n kanalı ya da daha uzun n kanalı daha kısa p kanalına sahiptir.

Normal çalışma süresince, sol kontaklar (3 ve 4) topraklanmış iken sağ kontaklara (1 ve 2) gerilim uygulanmıştır. Normal çalışma altında, aygıt pozitif polarite ile etkilendiğinde, 1 ve 2 kontakları biriktirme (drain) kontakları olarak adlandırılırken, 3 ve 4 kontakları kaynak kontakları olarak ifade edilir. Bu süreçlerin her biri 3. kontak

yakınlarında (kaynak) $h\nu_1$ foton enerjili geliştirilmiş ışımalı yeniden birleşme ile sonuçlanır. Böylece çarpan optik sinyal ($h\nu_0$) aygıt tarafından absorplanır ve dönüştürülmüş dalga boyunda ($h\nu_1$) tekrar yayılır [35].

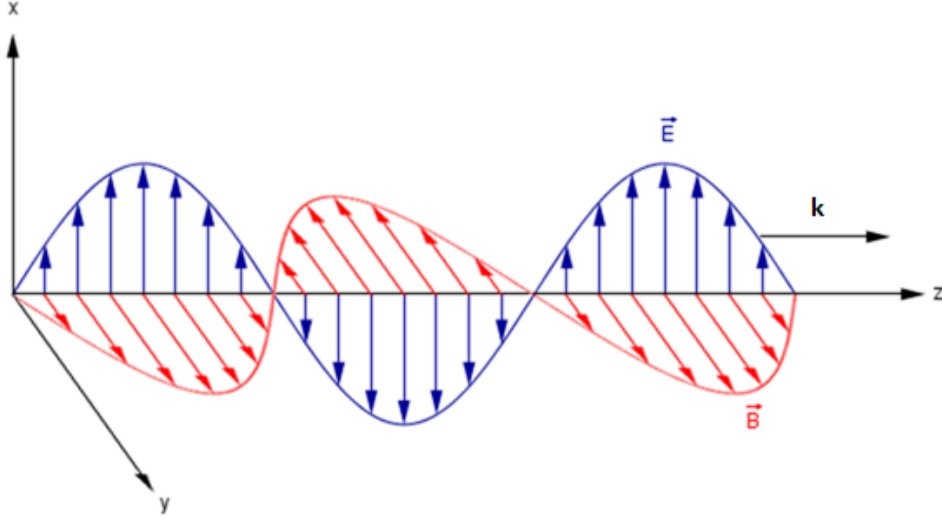


Şekil 3.7. a) p-n eklemine içerisindeki kuantum kuyulardan meydana gelen basit THH yapısı. b) alt ve üst kısmına DBR aynalar eklenmiş p-n eklem bölgesine yerleştirilmiş QW' lar içeren THH-VCSEL/VCSOA yapısı ve 4 kontak konfigürasyonu [37]

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

4.1. Elektromanyetik Işıma

Elektromanyetik ışıma, şekil 4.1’de görüleceği gibi yayılma doğrultusuna ve birbirlerine dik olan aynı faza sahip sinüs salınımları şeklinde yayılan elektrik ve manyetik alanların birleşimini ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Elektromanyetik ışımının gösterimi

Elektromanyetik ışıma dalga-tanecik ikiliği olarak bilinen, hem dalga hem de tanecik özelliği göstermektedir. Işığın girişim ve kırınımını, ortam değiştirirken kırılmasını elektromanyetik ışımının dalga özelliği ile açıklanırken, ışığın soğurulup yayılması parçacık özelliği ile açıklanabilir.

Elektromanyetik ışımının dalga özelliğinde; hız (c), frekans (ν), dalga boyu (λ) gibi özellikleri arasındaki ilişki eşitlik 4.1 ile verilir.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (4.1)$$

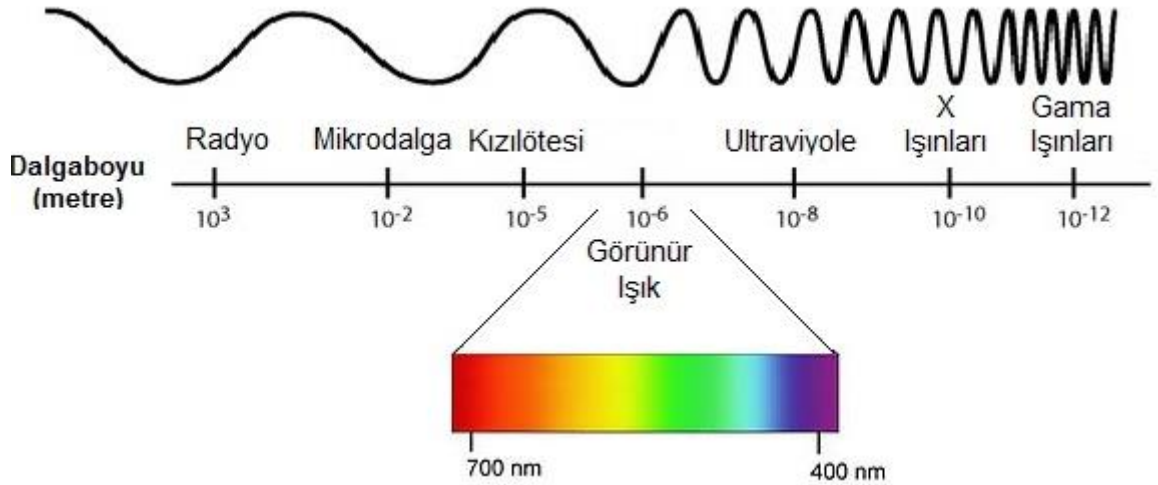
Ayrıca, IR ve Raman spektroskopisinde sık kullanılan, dalga boyunun tersi olan dalga sayısı eşitlik 4.2 ile verilir. Birimi cm^{-1} ‘dir.

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (4.2)$$

Elektromanyetik ışımanın tanecik özelliğinde; elektromanyetik ışımanın enerji parçacıkları adı verilen fotonlardan oluştuğunu düşünmek, elektromanyetik ışıma ile maddenin etkileşimini anlamamızı kolaylaştırır. Madde tarafından foton soğurulduğunda, fotonun enerjisi maddeye geçer. Fotonun enerjisi aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.3)$$

Burada h , Planck sabiti olup 6.626×10^{-34} J.s değerindedir [43].



Şekil 4.2. Elektromanyetik ışıma türleri elektromanyetik spektrumda gösterimi

4.2. Spektroskopi

Spektroskopi en genel tanımıyla, elektromanyetik ışımanın madde ile yaptığı etkileşimi inceleyen bilim dalıdır. Elektromanyetik ışın madde içerisindeki atom, molekül ve iyonlar ile etkileşir. Bu etkileşme; ışığın yansıması, saçılması, soğurulması ve yayılması şeklinde olmaktadır. Bu etkileşimlerin sonuçları incelenip analiz edilerek incelenen malzemenin yapısı, kimyasal ve fiziksel özellikleri tayin edilebilir.

Tablo 4.1. *Elektromanyetik spektrum bölgelerinin frekansı ve bu bölgelere karşılık gelen spektroskopi türleri [43,44].*

SPEKTRAL BÖLGELER	SPEKTROSKOPİ TÜRÜ	FREKANS ARALIĞI(Hz)
Radyo Dalgaları	NMR (Nükleer Manyetik Rezonans); çekirdek-spin etkileşimleri	10^6 - 10^8
Mikrodalga	ESR (Elektron Spin Rezonans); moleküler dönme, elektron-spin etkileşimleri	10^{10} - 10^{12}
Kızıl Ötesi (IR)	IR/RAMAN; moleküler dönme-moleküler titreşim	10^{12} - 10^{14}
Mor Ötesi	UV; dış yörüngedeki elektronların elektronik durumlarındaki değişim	10^{14} - 10^{16}
X-Işınları	X-Işınları Spektroskopisi; iç yörüngedeki elektronların elektronik durumlarındaki değişim	10^{16} - 10^{19}
γ -Işınları	Çekirdek içi değişimler	10^{19} - 10^{22}

Bu tez çalışmasında, HELLISH örneklerin incelenmesinde fotolüminesans ve Raman spektroskopisi yöntemleri kullanılmıştır.

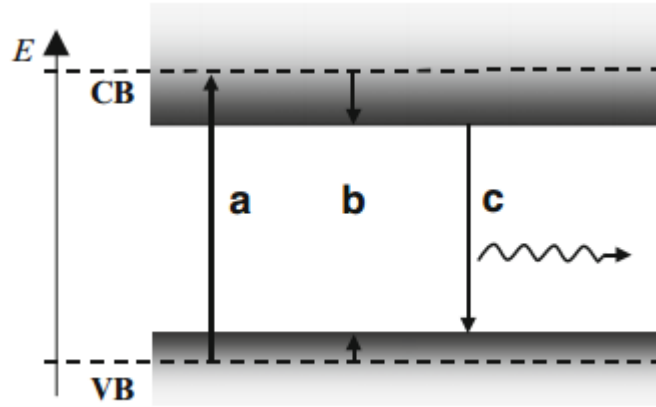
4.2.1.Fotolüminesans spektroskopisi

Atom veya moleküllerin temel enerji düzeylerinde, atom ve moleküldeki elektronlar en düşük enerji seviyesinde bulunurlar. Atom veya molekülün uyarılmış halinde ise, elektronlar daha üst enerji seviyelerinde bulunmaktadır. Uyarılmış hal, atoma yeterli enerji verilmesiyle gerçekleşir. Uyarılmış durumdaki atom veya molekül kararsızdır ve kazandığı fazla enerjisini atarak temel enerji düzeyine geri dönmek ister. Atom veya molekül temel enerji seviyesine geri dönerken, almış olduğu fazla enerjisini

belirli frekanstaki ışık olarak yayar. Işık yayılması olayına *lümİnesans* denir. Atom veya molekül bu uyarılma enerjisini farklı yöntemlerle kazanır. Uyarılma enerjisini kazanma yöntemine göre fotolüminesans, elektrolüminesans, kemilüminesans, katodulüminesans, termolüminesans gibi lüminesans çeşitleri vardır. Bu tez çalışmasında lüminesans çeşitlerinden fotolüminesans yöntemi kullanılmıştır. Uyarılma için gerekli olan enerji, atom veya molekülün fotonları soğurması ile gerçekleşiyorsa bu olaya *fotolüminesans* denilmektedir.

Fotolüminesans, basit ve malzemeye zarar vermeyen tahribatsız bir ölçüm tekniğidir. Fotolüminesans deney düzeneği; örneği uyaran bir laser, yayılan ışığı toplayan optik sistemlerden ve farklı enerjilerde ışığın şiddetini ölçen dedektörlü spektrometreden oluşmaktadır [45]. Dedektörden elde edilen optik sinyaller elektriksel sinyallere dönüştürülür. Daha sonra, bu sinyalin şiddet- dalga boyu grafiği çizilerek yarıiletken malzemenin fotolüminesans spektrumu elde edilir. Bu spektrumun incelenmesiyle, yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığı, kusur ve safsızlıkların seviyeleri hakkında bilgi edinilir.

Şekil 4.3’de fotolüminesans olayının üç-adımlı aşaması gösterilmiştir.



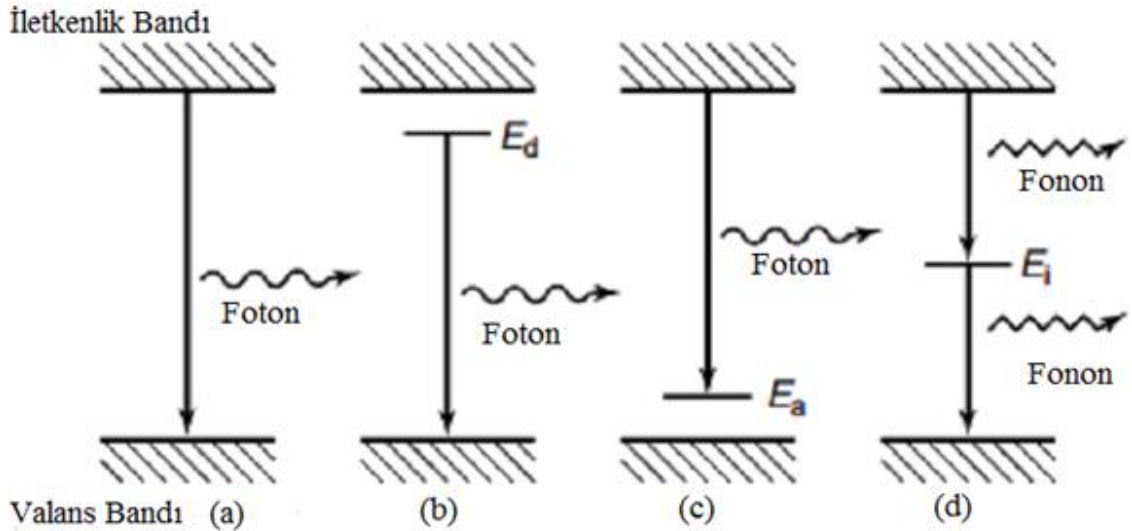
Şekil 4.3. Üç adımda fotolüminesans aşamaları a) soğurma b) durulma c)yeniden birleşme ışınımı (foton yayılımı), (VB valans bantı, CB iletim bantı) [46]

Yeniden birleşme; elektron temel duruma geri dönerken düşük enerjili fotonun oluştuğu, ışımalı ya da ışımasız geçişleri meydana getiren süreçtir [46].

Şekil 4.3'e baktığımızda;

- a durumunda; $\hbar\omega$ enerjili fotonun soğurulması elektron-boşluk çiftini oluşturur.
- b durumunda; elektron boşluk çifti akustik ve optik fononlar ile etkileşerek, serbest elektronlar iletim bandının minimumuna, boşluklar ise valans bandının maksimumuna doğru hareket ederek durulma (termal denge) meydana gelir.
- c durumunda; elektron ve boşlukların yeniden birleşmesiyle, sistem temel durumuna geri dönerken $\hbar\omega$ 'den daha az enerjiye sahip foton yayılır [47].

Fotoluminesans olayı sonununda, elektron ve holelerin yeniden birleşmesiyle elektronların valans banda geri dönmesi sonucu fazla enerji ışımalı ya da ışımasız olarak salınır. Foton salınıyorsa ışımalı yeniden birleşme, foton salınmıyorsa ışımasız yeniden birleşme olarak isimlendirilir. Şekil 4.4'de bazı fotoluminesans geçiş türleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. (a-c) Işımalı geçiş türleri: (a) banttan banda (b) verici seviyesinden valans bandına (c) iletkenlik bandından alıcı bandına, (d) bir orta seviye yoluyla ışımasız geçiş [48].

Banttan banda geçiş, iletkenlik bandındaki elektronun valans bandındaki hole ile birleşmesiyle oluşan geçiş olarak ifade edilebilir. Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerde uyarıcı fotonun enerjisi;

Geçişle ilgili ilk ve son durum enerjileri E_i ve E_s olmak üzere

$$h\nu = E_s - E_i \quad (4.4)$$

şeklindedir.

Safsızlık geçişleri yarıiletkenlerin yapısında doğal olarak bulunan ya da istenmeden oluşmuş geçişlerdir. $k_B T=0$ için bu geçişlerin enerjileri aşağıda verilmiştir. E_g , E_A , E_D sırasıyla yasak enerji aralığı, akseptör ve donör enerji seviyeleri olmak üzere;

$$E = E_g - E_D \text{ (donör- bant geçişi)} \quad (4.5)$$

$$E = E_g - E_A \text{ (bant-akseptör geçişi)} \quad (4.6)$$

şeklinde ifade edilir [49].

Örneği uyaran optik kaynak olan laserin enerjisi örneğin yasak enerji aralığından en az eşit veya büyük olmalıdır. Uyarıcı fotonun frekansı ν , dalga boyu λ ise,

$$h\nu \geq E_g \quad (4.7)$$

veya

$$hc/\lambda \geq E_g \quad (4.8)$$

şeklinde olmalıdır. (h , Planck sabiti c , ışık hızı)

4.2.1.1.Fotoluminesans ölçümlerinin sıcaklığa bağlılığı

Düşük sıcaklık ölçümleri; ısı genleşme ve ısı olarak aktif olan ışımasız yeniden birleşme süreçlerini azaltarak tüm spektroskopik bilgiyi elde etmek için gereklidir. Bant içinde uyarılmış taşıyıcıların termal dağılımı, bu bantdan ileri gelen yayılıma yaklaşık olarak $kT/2$ kadar katkı sağlar. Bu etkiyi azaltmak için örneği soğutmak gereklidir. Isıl enerji $kT/2$, 4,2 K sıcaklıkta sadece 1,8 meV kadardır. Birçok ölçüm için bu değer oldukça düşüktür fakat bazı durumlarda ısı genleşmeyi azaltmak için gereklidir [50].

Düşük sıcaklıklarda fotoluminesans ölçümlerinin iki önemli avantajı vardır. Birincisi elektriksel iletkenliği arttıran alıcı ve verici gibi merkezler hakkında bilgi

edinmektir. Bu ise bu merkezlerdeki taşıyıcıların ısı etkisini ortadan kaldırmakla (dondurmakla) mümkün olur. Çünkü kusurlar ve safsızlıklar için, taşıyıcılar ısı olarak serbest kaldığı zaman taşıyıcı hareketliliği sınırlandırılmış olacaktır.

İkinci avantaj ise, düşük sıcaklıklarda titreşimin minimize edilmesi nedeniyle spektral genişlemenin azalacağıdır [49].

Yarıiletkenlerde sıcaklık ile yasak enerji bant aralığı arasındaki ilişki Varshni formülü ile;

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (4.9)$$

Verilir. α ve β sabitlerdir. $E_g(0)$ ise 0 Kelvin'deki direkt veya indirekt yasak enerji aralığıdır [51].

4.2.2.Raman spektroskopisi

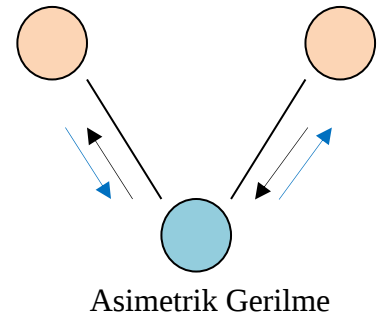
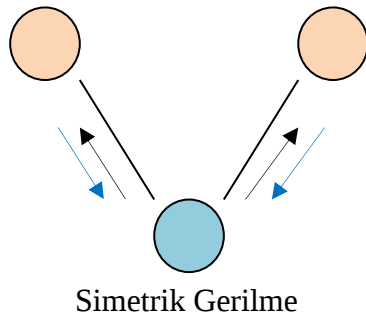
Bu spektroskopi yönteminde, maddenin titreşim dönme ve düşük frekanslı özelliklerinin çalışıldığı bir yöntemdir [50]. Bu yüzden molekül titreşim türlerinden bahsedilmesi gerekir.

4.2.2.1.Molekül titreşim türleri

Bir molekülde bulunan atomların birbirlerine göre konumları tam olarak sabit olmayıp, moleküldeki bağlar etrafında çok sayıda ve değişik titreşimlerden dolayı sürekli değişir [52].

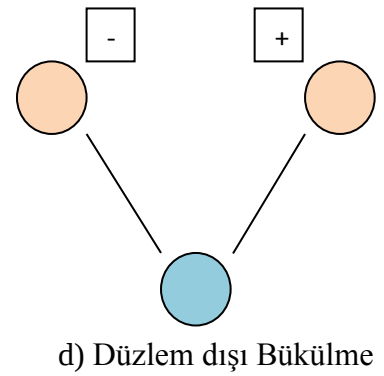
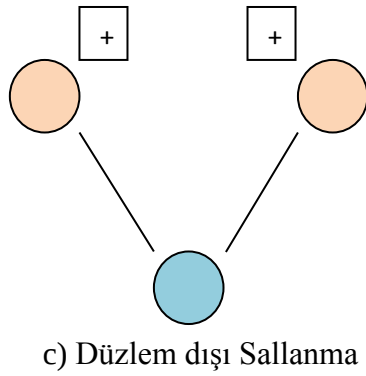
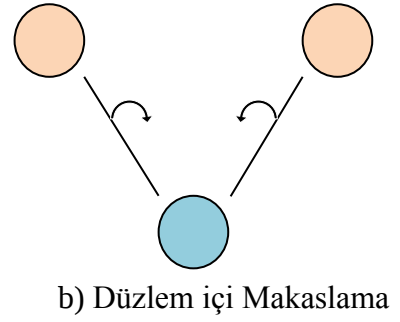
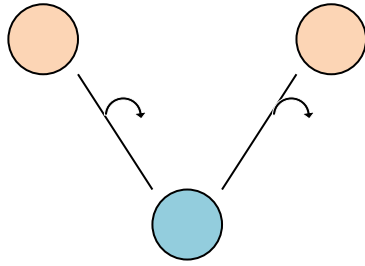
Genellikle, gerilme ve eğilme olmak üzere iki tür molekül titreşimi vardır. Moleküldeki titreşimler kızılötesi bölgede, infrared (IR) soğurma ve Raman saçılma spektroskopisi yöntemleriyle incelenir.

Gerilme titreşimleri, iki atom arasındaki bağ eksenini boyunca atomlar arasındaki uzaklığın değişmesine dayanan titreşimlerdir. Gerilme titreşimleri, simetrik ve asimetrik gerilme olmak üzere ikiye ayrılır. Simetrik gerilme titreşimi, bir molekülde bulunan tüm bağların aynı anda uzayıp kısılması ile oluşurken, asimetrik gerilme titreşimi bağların bir kısmı uzarken bir kısmının kısılmasıyla oluşur.



Şekil 4.5. Gerilme titreşimlerinin şematik gösterimi

Eğilme titreşimleri, iki bağ arasındaki açının değişmesine bağlı titreşimlerdir. Dört tipi vardır.



Şekil 4.6. Eğilme titreşimleri şematik gösterimi (+ ; sayfa düzleminden dışarı, - ; sayfa düzleminden içeri)

4.2.2.2.Raman saçılması

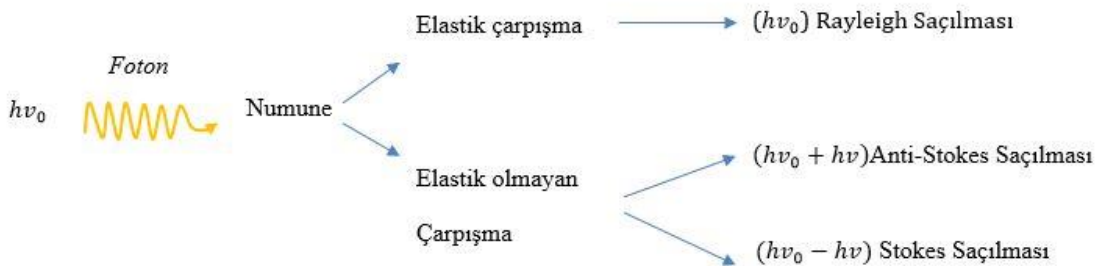
1928 yılında Hintli fizikçi C.V. Raman, molekülden saçılan ışının dalga boyunun moleküle gelen ışının dalga boyundan farklı olduğunu ve bu farklılığın moleküllerin kimyasal yapısına has olduğunu keşfetmiştir. Bu keşfinden dolayı 1931 yılında fizik Nobel ödülü kazanmıştır.

Raman spektroskopisi, organik ve organik olmayan türlerin belirlenebildiği, katının kristalliğinin ölçülebildiği titreşim spektroskopisidir. Raman spektroskopisi, numune üzerine güçlü monokromatik ışının (laser) gönderilmesiyle numuneden saçılan ışının belirli açıdan (genellikle 90 derecelik) ölçülmesine dayanmaktadır.

Işın madde ile etkileştiğinde, elastik ve elastik olmayan saçılmalar olmak üzere iki tür saçılma meydana gelir.

Elastik saçılmada; atom veya molekülden saçılan ışının enerjisi, numuneye gelen ışının enerjisi ile aynıdır. Yani gelen ışının enerjisinde bir değişim olmadan saçılır, bu tür saçılmalara *Rayleigh saçılması* denilmektedir. Rayleigh saçılma pikleri güçlüdür ancak bu saçılmalar molekül titreşimleri hakkında bilgi vermez.

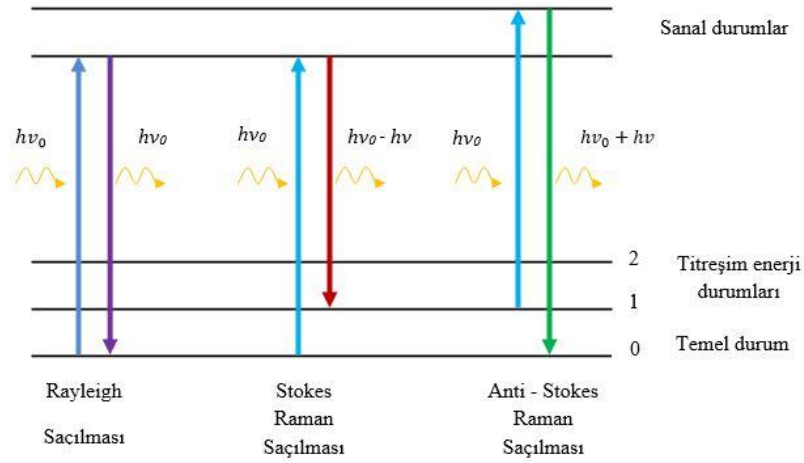
Elastik olmayan saçılmalarda ise; saçılan ışının enerjisi, numuneye gelen ışının enerjisinden az ya da fazladır. Saçılan ışının enerjisi, gelen ışının enerjisinden fazla ise bu tür elastik olmayan saçılmaya *anti-Stokes saçılması* denir. Stokes saçılmalarında; saçılan ışının enerjisi gelen ışının enerjisinden daha azdır. Stokes ve anti-Stokes saçılmaları Raman saçılmalarıdır. Raman saçılmaları, saçılan ışının çok küçük bir kısmını (1×10^{-7}) oluşturur [53].



Şekil 4.7. Saçılma türleri (ν_0 : Uyarıcı ışığın frekansı, ν : Molekülün titreşim frekansı)

Raman saçılmasının olabilmesi için, molekülün titreşimi sırasında etkileştiği fotonun elektrik alanı tarafından periyodik ve fotonun frekansına eşit frekanslı olarak kutuplanabilmesi yani periyodik ve geçici bir dipol momentinin oluşması gerekir [54].

Şekil 4.8'e baktığımızda, $h\nu_0$ enerjili molekülün absorplamadığı foton numuneye gönderildiğinde numunedeki moleküller ile etkileşir ve saçılmalar (elastik ve elastik olmayan) meydana gelir. Bu etkileşme sonucu, fotondan moleküllere veya molekülden fotona enerji aktarılır. Bu enerji aktarımından sonra moleküller farklı titreşim enerji seviyelerinde bulunurlar.



Şekil 4.8. Rayleigh ve Raman saçılmalarının kuantum mekaniksel gösterimi

Uyarıcı ışığın enerjisine göre saçılan ışığın enerjisindeki artış veya azalış, ışık ile etkileşen molekülün enerji düzeyleri arasındaki enerji farkları kadardır. Bu yüzden Raman saçılması spektroskopisi incelenerek molekülün titreşim enerji seviyeleri hakkında bilgi elde edinilebilir.

Raman spektroskopisinde, molekül ile etkileşen ışığın dalga boyuna göre saçılan ışığın dalga boyunda oluşan farklar ölçülür. Bu farklara *Raman kaymaları* denir. Raman kaymaları dalga sayısı ile ifade edilir ve eşitlik 4.10 ile verilir. Birimi cm^{-1} 'dir.

$$= \left(\frac{1}{\lambda_{\text{kullanılan ışın}}} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_{\text{saçılan ışın}}} \right) \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.10 Raman kaymalarının, kullanılan uyarıcı ışının frekansına bağımlı olmadığını gösterir [55].

5. NUMUNE HAZIRLANMASI VE DENEY DÜZENEGİ

5.1. Numunelerin Yapısı

Bu tez çalışmasında, 4 adet InGa_N/Ga_N sıcak elektron çoklu kuantum kuyu HELLISH örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans ve Raman ölçümleri yapılarak örnekler incelenmiştir.

Ölçümleri yapılan örnekler Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde (NANOTAM) ve CRETE Üniversitesi'nde (Yunanistan) epitaksiyel büyütme yöntemleriyle büyütülmüştür.

Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde (NANOTAM) büyütülen örnekler Metal organik kimyasal buhar biriktirme (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) yöntemiyle büyütülürken, CRETE Üniversitesinde büyütülen örnekler Moleküler ışın epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) yöntemi kullanılarak büyütülmüştür.

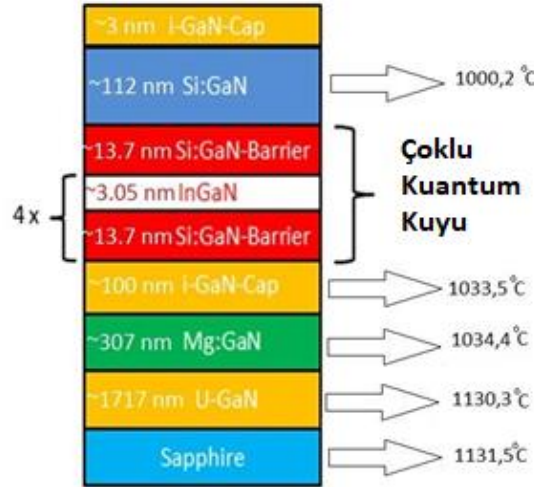
MOCVD yöntemi gaz fazındaki malzemenin alttaş üzerine biriktirilmesine dayanır.

Hidrojen nitrojen gibi taşıyıcı gazlar ile taşınan metal-organik kaynaklar reaktöre ulaşır. Burada gaz karışımları arasında kimyasal reaksiyon gerçekleşir ve alttaş üzerine istenilen özelliklerde malzeme büyütülür [56].

MBE yöntemi, ısı enerjili atom ya da molekül demetleri ile yüksek vakum koşulları altında tutulan gerekli sıcaklığa kadar ısıtılmış alttaş arasındaki reaksiyonlar sonucu alttaş üzerine kristal ince filmlerin oluşturulduğu epitaksi yöntemidir [57,58]. Atom veya molekül demetlerinin açısal dağılımını sağlamak için kaynaklar buharlaştırma hücrelerinde yer almaktadır. Alttaş uygun sıcaklıkta tutulur ve homojen büyütme sağlanması için sürekli döner. Buharlaştırma hücrelerinin sıcaklıklarının ve bu hücrelerin önünde yer alan açıp kapatıcıların (shutter) kontrol edilebilmesi ile istenilen özelliklerde örnek büyütülür bu durum MBE yönteminin avantajlarından biridir [56].

B-3050 kodlu InGa_N/Ga_N sıcak elektron çoklu kuantum kuyu örneği MOCVD yöntemi kullanılarak safir (Al₂O₃) alttaş üzerine büyütülmüştür. Şekil 5.1'de safir alttaş üzerine büyütülen yarıiletken malzemelerin kalınlıkları ve büyütme sıcaklıkları

gösterilmiştir. Öncelikle, safir alttaşın 1131,5 °C sıcaklıkta yüzey kirliliği giderilmiştir. Büyütme işlemi, 1130,3 °C sıcaklıkta birinci tabaka 859 nm kalınlığında 0,45 nm/s büyüme oranıyla GaN tabakanın ve onun üzerine 858 nm kalınlığında 0,61 nm/s büyüme oranıyla ikinci GaN tabakanın büyütülmesiyle başlamıştır. Sonuç olarak alttaş üzerine büyütülen ilk katkılanmamış GaN tabakanın kalınlığı 1717 nm dir. Daha sonra 1034,4 °C sıcaklıkta, 0,25 nm/s büyüme oranıyla 307 nm kalınlığında magnezyum katkılı p tipi GaN büyütülmüştür. Ardından, 1033,5 °C sıcaklıkta 100 nm kalınlığında 0,22 nm/s büyüme oranıyla katkısız GaN kapak tabaka büyütülmüştür. Aktif bölgeyi oluşturmak için 4 periyot InGaN kuantum kuyusu (3,05 nm) / Silisyum katkılı GaN bariyer (13,7 nm) büyütülmüştür. Aktif bölgenin büyütülmesi tamamlandıktan sonra, 1000,2 °C sıcaklıkta silisyum katkılı n tipi GaN 112 nm kalınlığında 0,63 nm/s büyüme oranıyla büyütülmüştür. En son 3 nm kalınlığında katkısız GaN kapak tabaka büyütülerek InGaN/GaN çoklu kuantum yapı büyütülmesi tamamlanmıştır.



Şekil 5.1. B-3050 InGaN çoklu kuantum kuyu yapısı

Diğer 3 örnek Crete Üniversitesinde büyütülmüştür. Yarıiletken tabakalar c-yüzlü (0001) safir (Al_2O_3) alttaş üzerine MBE yöntemiyle büyütülmüştür. Bu InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu 3 örneğin büyütülmesinde kullanılan yarıiletken malzeme ve

kalınlıkları aynıdır. Aralarındaki fark, aktif bölgeyi oluşturan kuantum kuyuların sayısıdır. Bu örneklerin kuantum kuyularının sayısı sırasıyla 2, 3, 4'tür.

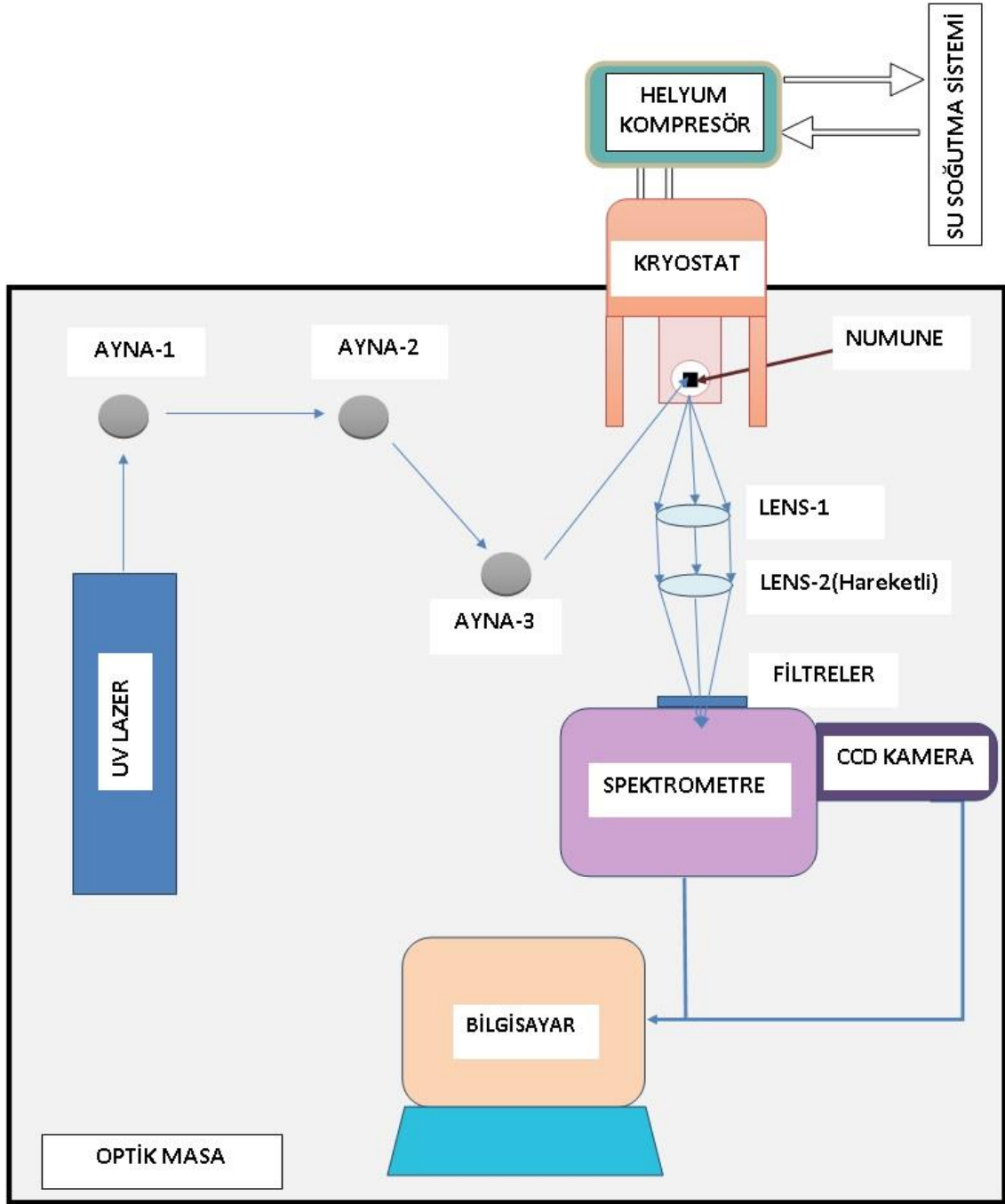
Safir alttaş üzerine p tipi GaN büyütülmüştür. Ardından 100 nm kalınlığında katkısız GaN büyütülmüştür. Aktif bölgeyi oluşturmak için 3 örnekte sırasıyla 2,3,4 periyot $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ kuantum kuyusu (3 nm) / GaN bariyer (14 nm) büyütülmüştür. Aktif bölgenin büyütülmesi tamamlandıktan sonra 100-200 nm kalınlığında GaN ardından da katkısız GaN kapak tabaka büyütülerek $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ /GaN çoklu kuantum kuyu yapıların büyütülmesi tamamlanmıştır. Bu örneklerin temel yapısı şekil 5.2'de gösterilmiştir.

i-GaN Kapak katmanı
100-200 nm GaN ($n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
14 nm GaN Bariyer ($n = 1,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
3 nm i- $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ Kuantum Kuyu
100 nm i-GaN
p-GaN
c- Al_2O_3 Alttaş

Şekil 5.2. $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapısı

5.2. Deney Düzenegi

Bu tez çalışmasında, HELLISH örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans ve Raman ölçümleri için kullanılan deney düzenegi şekil 5.3'de şematik olarak gösterilmiştir. Deney düzenegi; ışın kaynağı (UV laser), optik aletler, numunenin yerleştirildiği kryostat, monokromatör ve CCD kameradan oluşmaktadır.



Şekil 5.3. Fotolümenisans ve Raman ölçüm deney düzeneği blok gösterimi

5.2.1. Işın kaynağı (UV Laser)

Spektroskopik yöntemlerde optik uyarıcı olarak yüksek güçlü ve tek dalga boylu ışın kaynağı olan laserlerin kullanılması uygundur. Laserleri dalga boyuna göre; UV, görünür bölge ve IR laserler olarak gruplandırabiliriz [59]. Bu tez çalışmasında optiksel uyarıcı olarak, UV bölgede fotolüminesans ve Raman ölçümleri için uygun olan 325 nm dalga boylu 100 mw güç çıkışlı He-Cd laser kullanılmıştır.

5.2.2.Kryostat (cryostat)

Kryostat, bir numunenin düşük sıcaklıklar ile yüksek sıcaklıklar arasında karakterizasyonunu yapmayı sağlayan soğutucu sistemdir. Bu tez çalışmasında kullanılan helyum soğutuculu kryostat, 3-300 K sıcaklık aralığında $\pm 0,1$ K hassasiyetle kontrol edilebilmektedir. Helyum kompresörü su soğutmalıdır. Soğutma gücü 4,2 K' de 0,2 W gücündedir. Çapı 25 mm olan dört optik pencereden oluşmaktadır. Optik pencereler 300-1700 nm ışını geçirebilen yüksek verimli kuartz optik cam malzemeden yapılmıştır. Örneğin bulunduğu yeri kontrol için sıcaklık sensörü, ısıtıcı ve sıcaklık kontrol ünitesi sisteme entegre edilmiştir ve RS232 girişiyle arayüz programları kullanılabilir.

Numuneler, kapalı çevrimli helyum soğutuculu kryostat içerisine yerleştirilerek vakum ortamında da 3-300 K sıcaklıkları arasında 10 K artışlarla sıcaklığa bağlı fotoluminesans ve raman ölçümleri gerçekleştirilmiştir

5.2.3.Optiksel bileşenler

Optiksel bileşenler He-Cd laser kaynağından çıkan ışınları yansıtarak numune üzerine düşüren 3 adet dielektrik ayna ve numuneden yayılan ışınları monokromatörün giriş slitine odaklayan 2 adet plano konveks lensten oluşmaktadır.

Dielektrik aynaların ikisi, 6 mm kalınlığında 2,54 cm çapındadır ve 325 nm dalga boylu ışınları yansıtılabilmektedir. Diğer ayna ise, 8 mm kalınlığında 2,54 cm çapındadır ve 290-560 nm arası ışınları yansıtılabilmektedir. Bu ayna laser kaynağın hemen çıkışındaki aynadır.

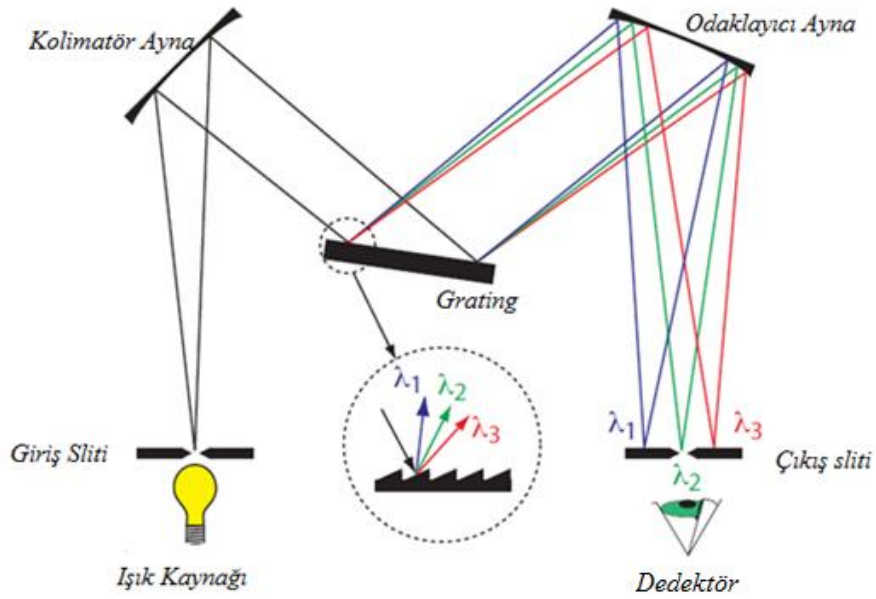
Lenslerden biri sabit diğeri hareketlidir. Sabit lens, 5,08 cm çapında 10 cm odak uzaklığında hemen kryostatın önünde bulunmaktadır. Hareketli lens, 5,08 cm çapında 20 cm odak uzaklığında sabit lens ile monokromatör arasında bulunmaktadır.

5.2.4.Monokromatör

Monokromatörler, gelen polikromatik (çok dalgaboylu) ışıktan monokromatik (tek dalgaboylu) ışık elde edilmesini sağlayan basit yapıları aygıttır.

Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi, monokromatör genellikle kapalı kutu içerisinde; giriş-çıkış slitleri, grating (kırınım ağı), kolimatör ve odaklayıcı aynalardan oluşmaktadır.

Numuneden gelen ışınlar lensler ile odaklanarak monokromatörün giriş slitinden içeriye girer. Slit önünde açıp kapatıcı (shutter) bulunmaktadır. Bu ışınlar kolimatör aynaya gelip paralel olarak yansıyarak gratinge (kırınım ağı) ulaşır. Grating, üzerine düşen ışığı farklı dalga boylarında ışığa ayırıp odaklayıcı aynaya gönderir. Daha sonra tek dalga boylu ışık çıkış slitinden dedektöre ulaşır.



Şekil 5.4. Monokromatör blok diyagramı [60]

5.2.5. Dedektör

Dedektörler monokromatörden gelen optiksel sinyalleri elektriksel sinyallere dönüştüren aygıtlardır. Bu tez çalışmasında elektron çoğaltıcı yük eşlenimli EMCCD kamera kullanılmıştır. Raman ve fotoluminesans ölçümleri için EMCCD kameralar normal CCD kameralara göre daha avantajlıdır. Çünkü EMCCD kameralar daha hassasdır ve zayıf pikleri güçlendirerek daha iyi spektrum elde edilmesini sağlar.

6.DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda HELLISH yapı olarak tasarlanması planlanan, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde (NANOTAM) büyütülen B-3050 kodlu ve CRETE Üniversitesinde büyütülen A, B, C kodlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerin 10 K sıcaklık artışları ile 3-300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilen fotolüminesans ve Raman ölçümlerinin sonuçları verilmiştir.

6.1. Örneklerin Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümleri

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerin sıcaklığa bağlı (3-300 K aralığında) fotolüminesans ölçümleri ile elde edilen piklerden örneklerin yasak enerji bant aralığı değerleri bulunmuş ve yayınının gerçekleştiği örneğin aktif bölgesini oluşturan çoklu kuantum kuyuların karakteristikliği incelenmiştir.

Herbir örnek için fotolüminesans spektrumundan elde edilen GaN'ün pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri çizilmiştir. Yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralığı ile sıcaklık arasındaki ilişki Varshni denklemi ile verilmektedir. Bu denklem eşitlik 6.1'de verilmiştir [54,61,62].

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (6.1)$$

Eşitlik 6.1'den görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralığı değeri azalmaktadır. İncelediğimiz örneklerde, GaN'ün fotolüminesans pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinin Varshni denklemi ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

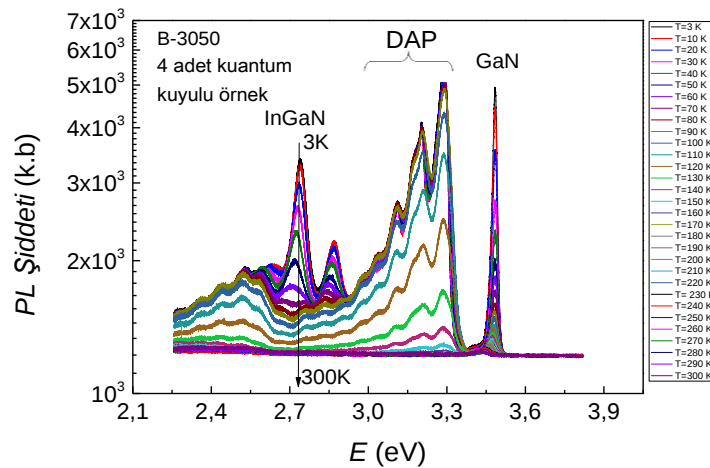
CRETE Üniversitesinde büyütülen A, B, C kodlu örneklerde, yayınının gerçekleştiği aktif bölgeyi oluşturan InGaN kuantum kuyu pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimleri S-tipi olarak adlandırılan davranış göstermiştir. Literatürde, S-tipi davranışın gözlenmesinin nedeni özellikle In miktarındaki dalgalanmalardan dolayı taşıyıcı yerelleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı kabul edilmektedir [63-69]. Yayının enerjisinin sıcaklığa bağlılığı bant kuyruk modeline dayanır ve eşitlik 6.2 ile verilir.

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} - \frac{\sigma^2}{k_B T} \quad (6.2)$$

Eşitlik 6.2, Varshni denkleminde yerleşme etkisinden kaynaklanan üçüncü terimin eklenmesi ile oluşmaktadır. Bu denklemde, $E_g(0)$, $T = 0$ K'de ki bant aralığını, α ve β Varshni fit parametrelerini göstermektedir. Denklemin üçüncü terimindeki, σ yerleşme etkisinin derecesini göstermektedir ve büyük olması yerleşme etkisinin güçlü olduğunu göstermektedir. k_B ise Boltzmann sabitini göstermektedir [67,70,71].

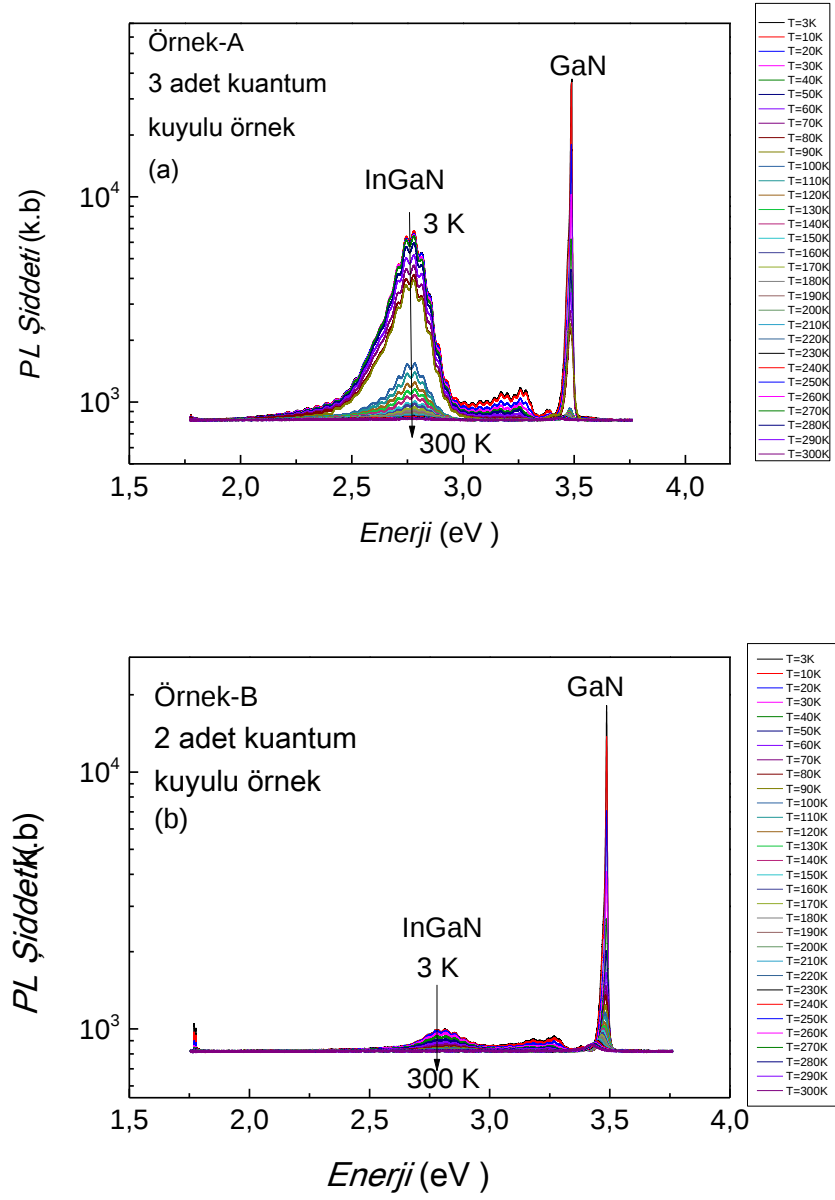
6.1.1. Örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumları

Şekil 6.1'de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapısına sahip B-3050 kodlu örneğin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumunu göstermektedir. Şekilden de görüleceği gibi, spektrumda görünen oda sıcaklığında 3,422 eV ve 3 K'de 3,483 eV değere sahip olan pik GaN pikidir. GaN bu yapıda kuantum kuyuların bariyeri olarak kullanılmıştır. Ayrıca fotoluminesans spektrumunda, Mg katkılı GaN'den gelen 3 K sıcaklıkta 3,276 eV değerinde gözlenen pik donör-akseptör çiftlerinin (DAP) yeniden birleşmesinden kaynaklanmaktadır [72,73]. Bu durum sığ Mg akseptör seviyesi ile iletim bandı arasındaki geçişten kaynaklanmaktadır [74]. 3,192 ve 3,107 eV değerlerinde bulunan pikler donör-akseptör çifti (DAP) pikinin birinci ve ikinci dereceden fonon harmonikleridir. 3 K'de 2,738 eV değere sahip olan pik ise $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusuna ait emisyon pikidir. Bu pikin ayrıntılı analizi bir sonraki bölümde verilmiştir.

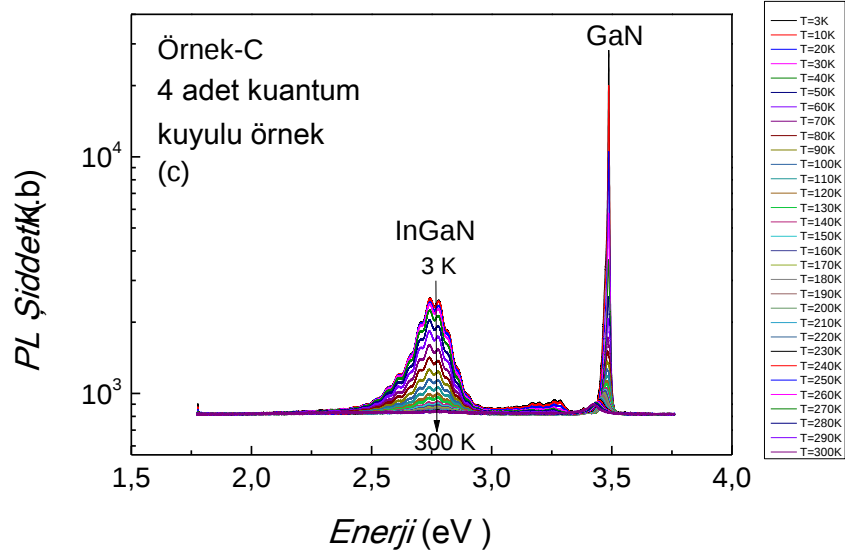


Şekil 6.1. B-3050 kodlu örneğe ait sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumu

Şekil 6.2.(a), (b), (c) 'de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapısına sahip A, B, C kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 6.2.(a) A örneğine (b) B örneğine (c) C örneğine ait sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumu



Şekil 6.2. (Devam) (a) A örneğine (b) B örneğine (c) C örneğine ait sıcaklığa bağlı fotolüminesans spektrumu

A-örneği 3, B-örneği 2 ve C-örneği 4 adet kuantum kuyuya sahiptir. Bu örneklerin $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusundan gelen emisyon pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri S-tipi davranış göstermiştir. Bu durum sonraki başlıklarda ayrıntılı incelenmiştir.

Tablo 6.1’de bu üç örneğin fotolüminesans spektrumlarında gözlenen GaN piklerinin 3-300 K sıcaklıktaki yasak enerji bant (E_g) değerleri verilmiştir. Tüm örneklerin fotolüminesans spektrumlarında gözlenen GaN piklerinin enerji bant (E_g) değerleri literatürdeki benzer çalışmalar sonucu bulunan değerler ile uyum içerisindedir [75-78]. Tablo 6.1’de görüldüğü üzere sıcaklığın artması ile yasak enerji bant aralığı değeri azalmıştır.

Tablo 6.1. *A, B, C kodlu örneklerin 3 K ve 300 K sıcaklıklardaki GaN piklerine ait E_g değerleri*

Örnek Kodu	E_g (3 K)	E_g (300 K)
Örnek-A	3,486 eV	3,425 eV
Örnek-B	3,486 eV	3,421 eV
Örnek-C	3,486 eV	3,421 eV

A, B, C kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumlarında gözlenen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusuna ait emisyon piklerinin 3 K’de yasak enerji bant aralığı değerleri ve çizgi genişlikleri (*FWHM*) tablo 6.2’de verilmiştir.

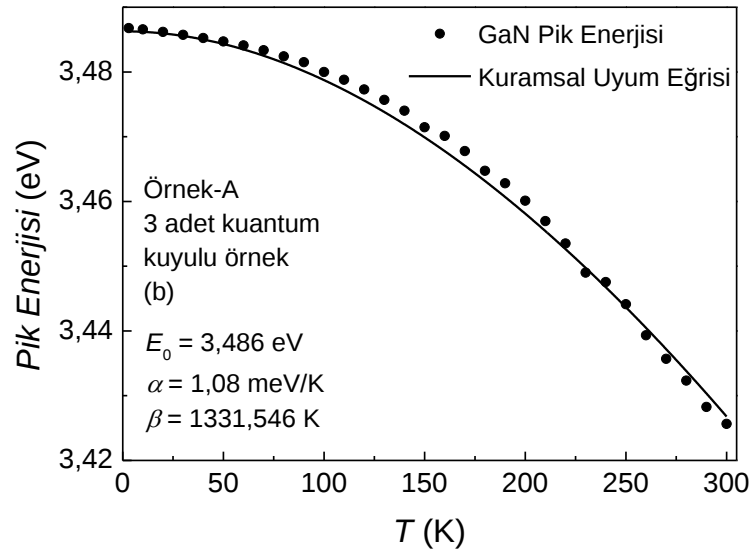
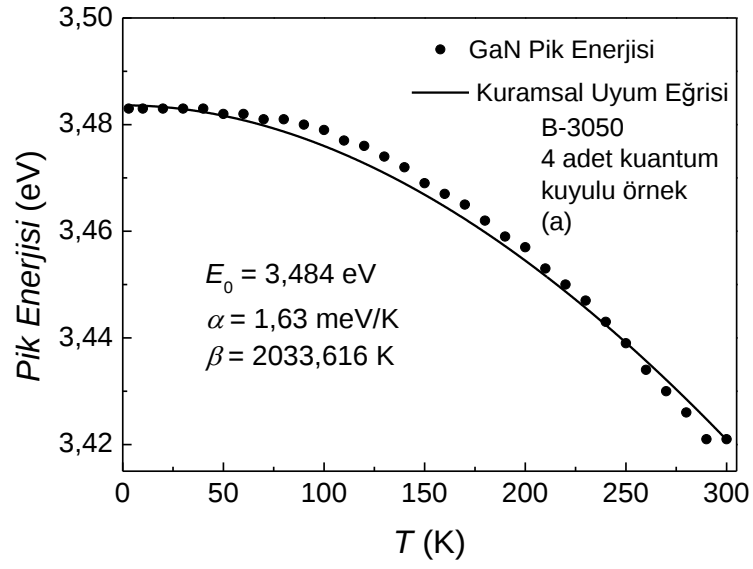
Tablo 6.2. *A, B, C kodlu örneklerin 3 K sıcaklıktaki $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyu piklerine ait E_g ve *FWHM* değerleri*

Örnek Kodu	E_g (3 K)	<i>FWHM</i> (3 K)
Örnek-A	2,763 eV	155,59 meV
Örnek-B	2,806 eV	173,89 meV
Örnek-C	2,754 eV	144,98 meV

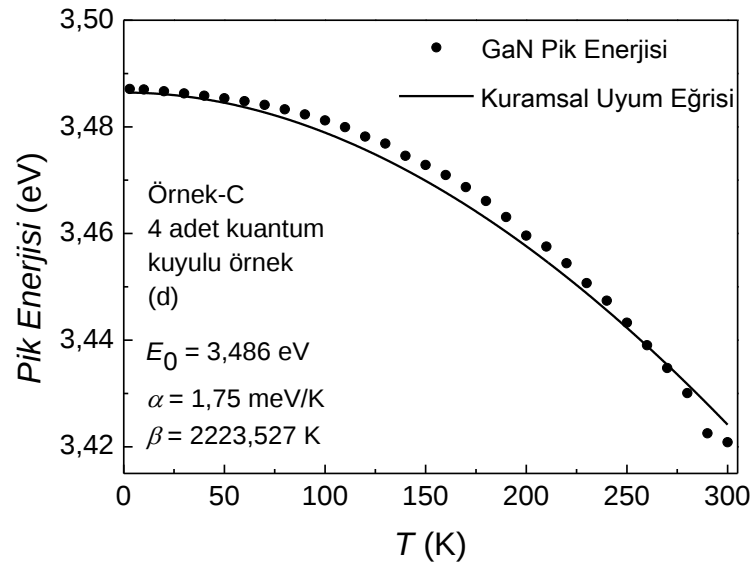
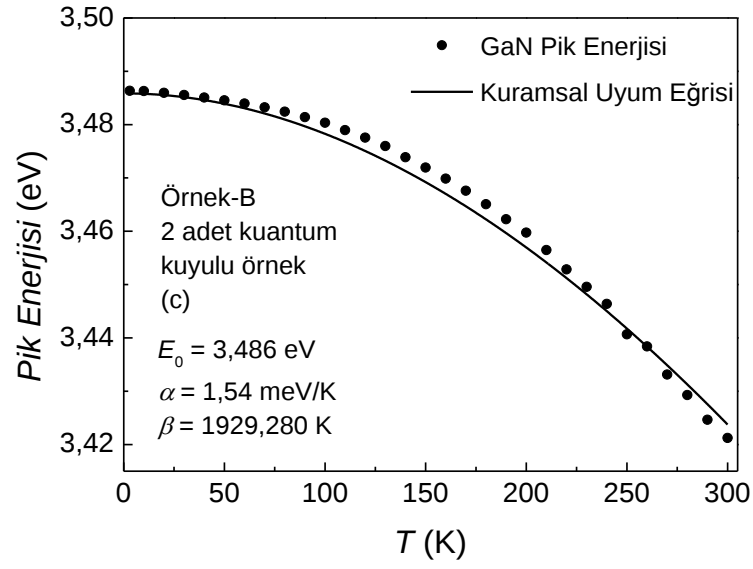
6.1.2.Örneklerin fotoluminesans spektrumlarında gözlenen GaN pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri

Şekil 6.3.(a), (b), (c), (d)'de tüm örneklerin sıcaklığa bağlı fotoluminesans spektrumlarında gözlenen GaN'ün pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri verilmiştir. B-3050 kodlu örneğe ait GaN pikinin yasak enerji bant aralığı değeri oda sıcaklığı (300 K)'nda 3,422 eV ve 3 K'de 3,483 eV olarak bulunmuştur. Diğer A, B, C kodlu örneklerle ait GaN pikinin yasak enerji bant aralığı değerleri ise tablo 6.1'de verilmiştir. GaN'ün yasak enerji bant aralığı değerlerine bakıldığında sıcaklığın artması ile yasak enerji bant aralığının azaldığı gözlenmiştir. Eşitlik 6.1'de verilen Varshni denklemi (kuramsal uyum eğrisi)'ne göre de, sıcaklığın artması ile yasak enerji bant aralığının azalması beklenir. Bu durum, deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralığının sıcaklık ile değişimini teorik olarak ifade eden Varshni denkleminin uyumlu olduğunu gösterir. Sıcaklığın artması ile yasak enerji bant aralığının azalmasının sebebi, sıcaklığa bağlı olarak örgünün genişlemesi ve elektron-fonon etkileşmesidir [63].

Ayrıca Varshni denkleminin deneysel sonuçlara fit edilmesinden varshni parametreleri olan α ve β değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler literatürdeki benzer çalışmalar ile yakınlık göstermektedir [79,80].



Şekil 6.3.(a) B-3050 kodlu örneğin (b) A-örneğinin (c) B-örneğinin (d) C-örneğinin fotolüminesans spektrumundaki GaN pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi

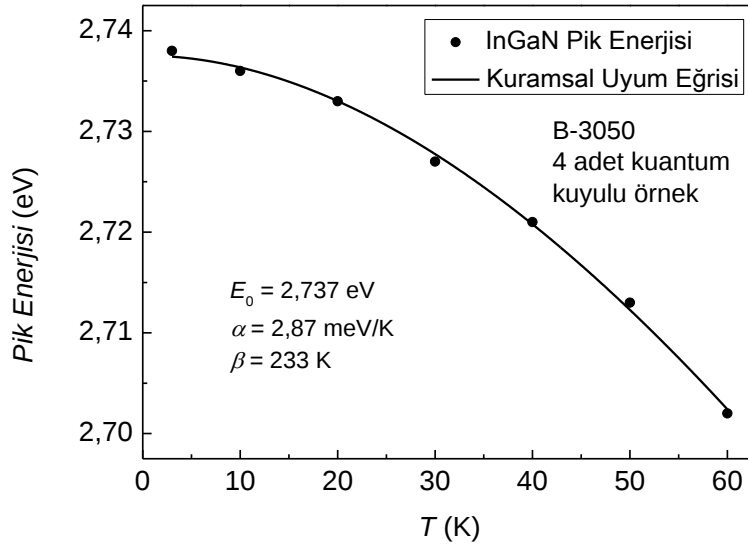


Şekil 6.3. (Devam) (a) B-3050 kodlu örneğin (b) A-örneğinin (c) B-örneğinin (d) C-örneğinin fotolüminesans spektrumundaki GaN pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi

6.1.3.Örneklerin fotoluminesans spektrumlarında gözlenen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusuna ait emisyon pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri

Şekil 6.4. ve Şekil 6.5. de fotoluminesans spektrumlarında gözlenen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ait emisyon pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri verilmiştir.

B-3050 kodlu örneğe ait emisyon pikinin enerjisi 3 K’de 2,738 eV ve 60 K’de 2,702 eV olarak bulunmuştur. 3-60 K aralığında bulunan pik enerji değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi Varshni denklemi (eşitlik 6.1) ile uyum içerisindedir. Bu durum, 3-60 K sıcaklık aralığında pik enerjisinin mavi ışık bölgesine denk geldiğini göstermektedir. 60 K sıcaklıktan sonra emisyon piki gözlenememiştir.



Şekil 6.4. B-3050 kodlu örneğe ait $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 6.5.(a), (b), (c)’den de görüldüğü gibi A, B, C kodlu örneklere ait $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimleri kırmızı-mavi-kırmızı kayma şeklinde olan S-tipi olarak adlandırılan davranış göstermiştir. Emisyon pikinin sıcaklığa bağlı değişimi Varshni denkleminde göre beklenen yasak enerji bant aralığının sıcaklık ile azalmasıyla uyumlu değildir. Bu davranış artık, Varshni denkleminde 3.terimin eklenmesi ile elde edilen eşitlik 6.2’de verilen bant kuyruk modeli ile ifade edilir. Bu davranış, alaşımdaki In miktarındaki dalgalanmalardan dolayı taşıyıcı yerelleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı kabul edilmektedir. Deneysel olarak elde edilen verilerimiz teorik olarak bant

kuyruk modeli ile uyum içerisinde. Eşitlik 6.2'deki denklem ile deneysel sonuçlarımız fit edilerek yerleşme etkisinin derecesini gösteren σ değerleri bulunmuştur.

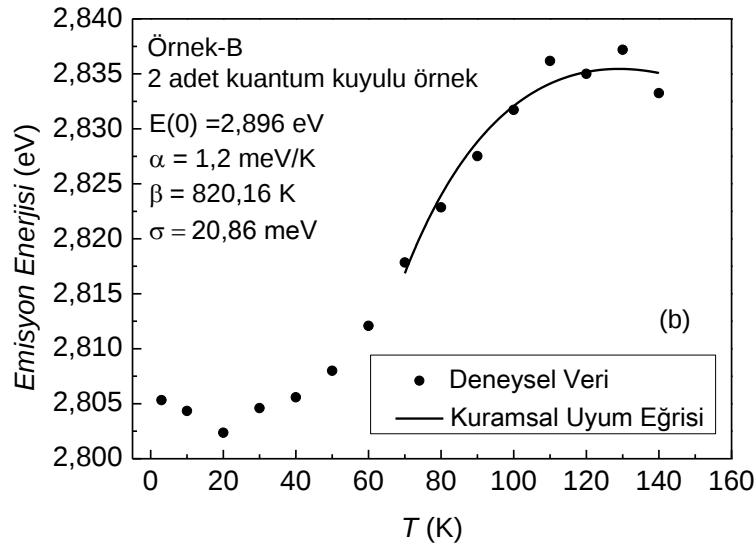
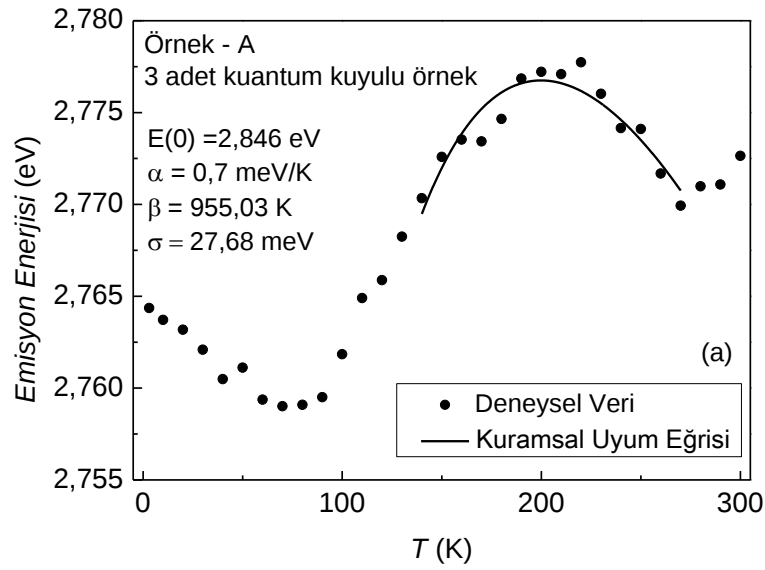
Şekil 6.5.(a)'da A-örneğinin $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, emisyon enerjisi sıcaklığın artması ile S-tipi davranış göstermiştir. İlk olarak sıcaklık arttıkça pik enerjisi 100 K'e kadar azalmıştır ve 100 K'deki değeri 2,758 eV'dur. Bu durum, 3-100 K sıcaklık aralığında kırmızıya kaymanın olduğunu göstermektedir. Bu sıcaklıktan sonra (100 K) emisyon pikinin enerjisi 190 K'e kadar artmıştır ve 190 K'de 2,773 eV'a ulaşmıştır. Bu ise, 100-190 K sıcaklık aralığında maviye kaymanın olduğunu göstermektedir. 190 K'den sonra emisyon pikinin enerjisi sıcaklığın artması ile tekrar azalma göstermiştir. 190-300 K sıcaklık aralığında tekrar bir kırmızıya kayma meydana gelmiştir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ fotoluminesans pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişiminin S-tipi kayma göstermesinin sebebi, homojensizlik ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımındaki taşıyıcıların yerleşmesinden dolayı sıcaklığın artması ile taşıyıcı dinamiğindeki değişimin meydana gelmesidir [63]. Yerleşme etkisinin tespit edildiği bu davranış için deneysel sonuçlar ile uyumlu olan kuramsal uyum eğrisi olarak bant kuyruk modeli (eşitlik 6.2) kullanılmıştır ve $E(0) = 2,846$ eV, $\alpha = 0,7$ meV/K, $\beta = 955,03$ K, $\sigma = 27,68$ meV olarak bulunmuştur.

Şekil 6.5.(b)'de B-örneğine ait $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Emisyon enerjisi sıcaklığın artması ile S-tipi davranış göstermiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ilk olarak emisyon enerjisi 3 K'den 20 K'e kadar azalma göstermiştir. 20 K'deki değeri 2,802 eV'dur. Bu durum 3-20 K aralığında kırmızıya kayma olduğunu göstermektedir. Daha sonra 30 K'den 130 K'e kadar emisyon enerjisi artmıştır ve 130 K'de 2,837 eV değere ulaşmıştır. Bu durum, 30-130 K aralığında maviye kaymanın olduğunu göstermektedir. 140 K'den sonra tekrar emisyon enerjisinde azalma gözlenmiştir bu sıcaklıktaki emisyon enerjisi değeri 2,833 eV'dur. 140 K sıcaklıktan sonra emisyon piki gözlenmemiştir.

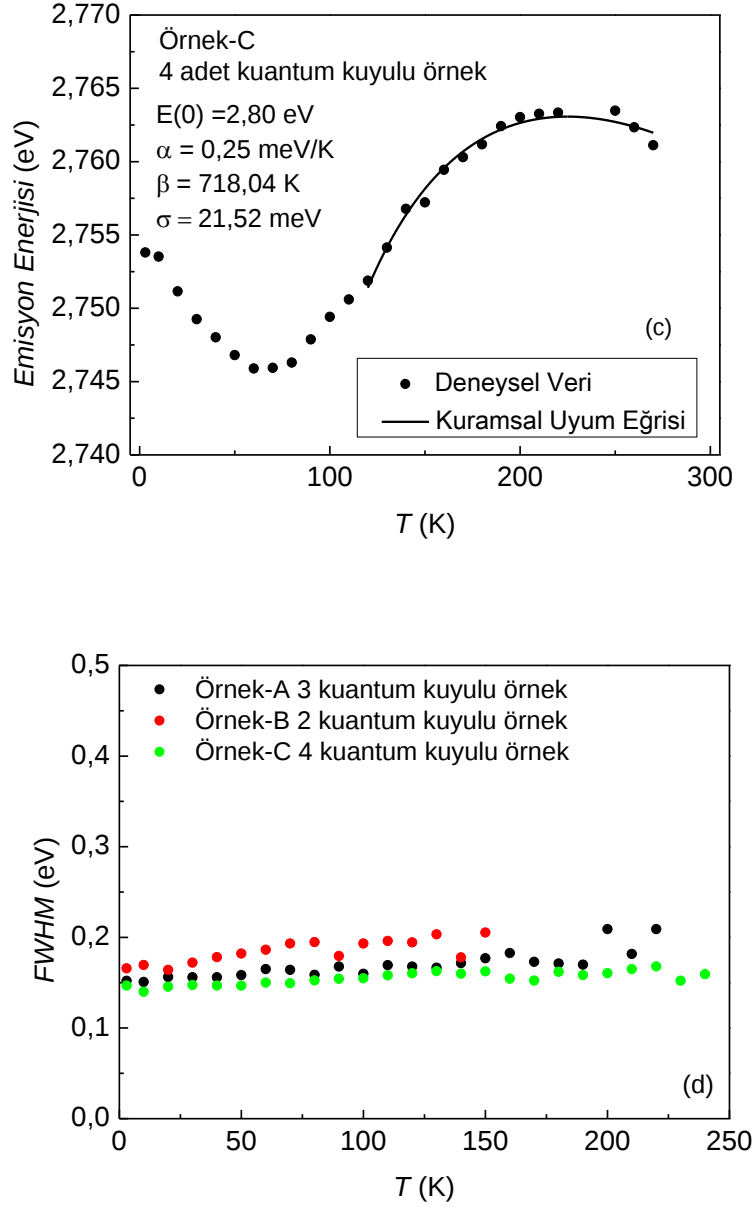
Şekil 6.5.(c)'de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. Emisyon enerjisi sıcaklığın artması ile S-tipi davranış göstermiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, ilk olarak emisyon enerjisi 3 K'den 60 K'e kadar azalma göstermiştir. 60 K'deki değeri 2,746 eV'dur. Bu durum 3-60 K aralığında kırmızıya kayma olduğunu göstermektedir. Daha sonra 60 K'den 240 K'e kadar emisyon enerjisi artmıştır ve 240

K'de 2,767 eV değere ulaşmıştır. Bu durum, 60-240 K aralığında maviye kaymanın olduğunu göstermektedir. 250 K'den sonra tekrar emisyon enerjisinde azalma gözlenmiştir bu sıcaklıktaki emisyon enerjisi değeri 2,763 eV'dur. 250 K sıcaklıktan sonra emisyon piki gözlenmemiştir.

Şekil 6.5.(d)'de A-örneğine, B-örneğine ve C-örneğine ait $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pik enerjisinin *FWHM* değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.5.(a) A-örneğine (b) B-örneğine (c) C-Örneğine ait $In_xGa_{1-x}N$ pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi (d) A-örneğine, B-örneğine ve C-Örneğine ait $In_xGa_{1-x}N$ pik enerjisinin FWHM değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 6.5. (Devam) (a) A-örneğine (b) B-örneğine (c) C-Örneğine ait $In_xGa_{1-x}N$ pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi (d) A-örneğine, B-örneğine ve C-Örneğine ait $In_xGa_{1-x}N$ pik enerjisinin FWHM değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

6.1.4.Örneklerdeki In miktarının hesaplanması

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı için bant aralığı enerjisinin bileşimlere bağlılığı genellikle Vegard Yasası ile verilmektedir (eşitlik 6.3).

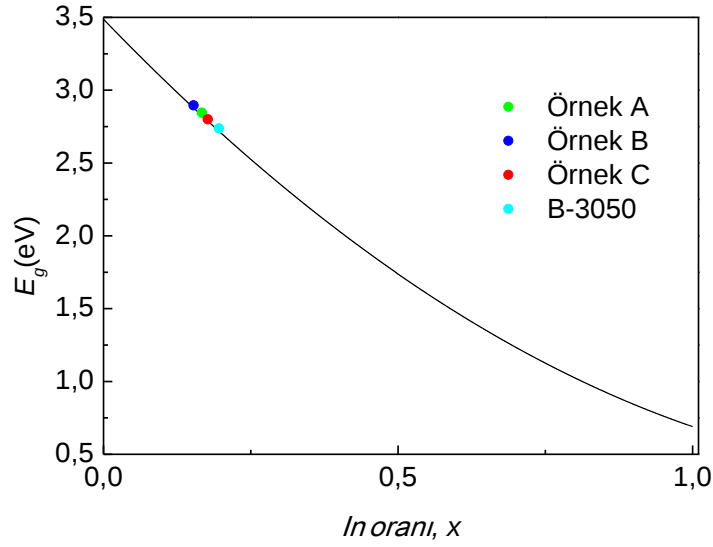
$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xE_g(\text{InN}) + (1 - x)E_g(\text{GaN}) - bx(1 - x) \quad (6.3)$$

Burada x yapıdaki indiyum oranı, b ise bowing parametresidir. Hesaplamalarda bowing parametresi 1,4 eV olarak alınmıştır [81]. InN örneğinin yasak enerji bant aralığı 0,69 eV olarak kullanılmıştır [82]. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerinin kuantum kuyularında $\Delta E = 18$ meV olarak kullanılmıştır [83]. Tablo-6.3 de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerinin PL ölçümleri sonucunda elde edilen parametreleri verilmiştir.

Tablo 6.3. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örnekleri için düşük sıcaklıktaki yasak enerji bant aralıkları ve In oranları

Örnek Kodu	$E_g^{\text{InGaN}}(0)$, eV	$E_g^{\text{GaN}}(0)$, eV	In Oranı, x
B-3050	2,738	3,483	0,196
Örnek-A	2,846	3,486	0,167
Örnek-B	2,896	3,486	0,153
Örnek-C	2,800	3,486	0,177

Vegard yasası kullanılarak örneklerin indiyum oranına bağlı yasak enerji bant aralığı grafiği şekil 6.6’da verilmiştir.



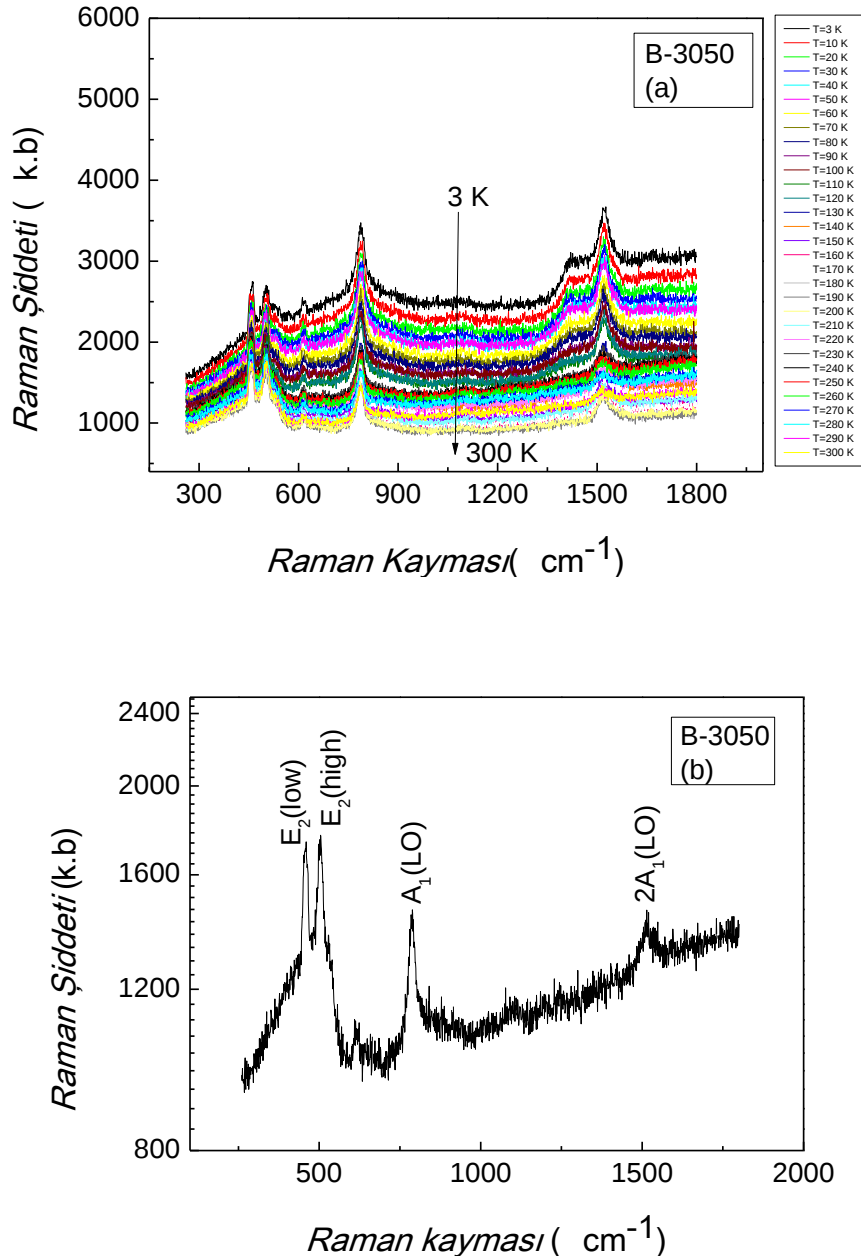
Şekil 6.6. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerinin indiyum oranına (x) bağlı InGaN yasak enerji aralığı

6.2. Örneklerin Sıcaklığa Bağlı Raman Ölçümleri

Üç kuantum kuyulu-A örneği ile B-3050 kodlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerinin sıcaklığa bağlı (3-300 K aralığında) Raman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Raman ölçümleri ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerinin boyuna optik fonon enerjileri belirlenmiştir. Optik fonon enerjilerinin belirlenmesi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerinin yüksek sıcaklık uygulamaları için önemlidir [84]. InN ve GaN temelli yapılar üzerinde yapılan Raman çalışmalarında A_1 , E_1 , iki adet E_2 ve iki adet B_1 olmak üzere toplam altı adet optik fonon modlarının olduğu belirlenmiştir. Bu fonon modları arasında A_1 , E_1 ve E_2 (iki adet) raman aktif modlardır [85-87]. E_2 modu düşük ve yüksek frekanslı [$E_2(\text{low})$, $E_2(\text{high})$] iki moddan oluşur. A_1 modları c eksenini boyunca atomik yer değiştirmeyi verirken, E_1 ve E_2 modları c eksenine dik yer değiştirmeyi verir [85,87].

Şekil 6.7.(a)'da B-3050 kodlu örneğin 3-300 K sıcaklık aralığındaki Raman spektrumu verilmiştir. Spektrum incelendiğinde sıcaklığın değişmesi Raman piklerinde herhangi bir kaymaya neden olmamıştır. Bu durum $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapının kararlı bir yapı olduğunu göstermektedir.

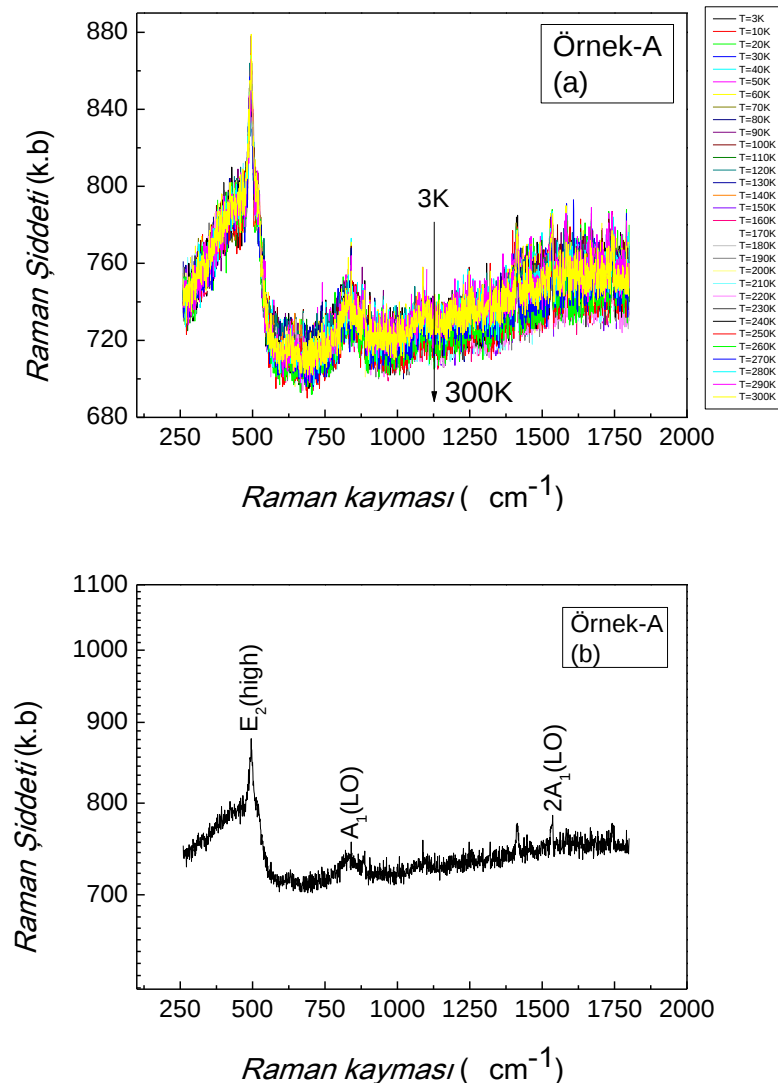
Şekil 6.7.(b)' de B-3050 kodlu örneğin oda sıcaklığındaki Raman spektrumu verilmiştir. Bu spektrumda $E_2(\text{low})$, $E_2(\text{high})$, $A_1(\text{LO})$ ve onun harmoniği olan $2A_1(\text{LO})$ Raman aktif modları belirlenmiştir. $E_2(\text{low})$ 458 cm^{-1} , $E_2(\text{high})$ 503 cm^{-1} , $A_1(\text{LO})$ 788 cm^{-1} ve harmoniği $2A_1(\text{LO})$ 1524 cm^{-1} de gözlenmiştir. Bu değerler literatürdeki benzer çalışma ile uyum içerisindedir [84, 86, 88, 89].



Şekil 6.7.(a) B-3050 kodlu örneğin sıcaklığa bağlı Raman spektrumu (b) B-3050 kodlu örneğin oda sıcaklığındaki Raman spektrumu

Şekil 6.8.(a)'da A kodlu örneğin 3-300 K sıcaklık aralığındaki Raman spektrumu verilmiştir. Spektrum incelendiğinde sıcaklığın değişmesi diğer örnek ile benzer şekilde Raman piklerinde herhangi bir kaymaya neden olmamıştır. Bu durum $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu yapının kararlı bir yapı olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.8.(b)' de ise A örneğinin oda sıcaklığındaki Raman spektrumu verilerek raman aktif modları gösterilmiştir. Bu spektrumda, $E_2(\text{high})$ 487 cm^{-1} , $A_1(\text{LO})$ 842 cm^{-1} ve $2A_1(\text{LO})$ 1533 cm^{-1} gözlenmiştir.



Şekil 6.8.(a). A örneğinin sıcaklığa bağlı Raman spektrumu (b). A örneğinin oda sıcaklığında Raman spektrumu

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde (NANOTAM) MOCVD yöntemiyle büyütülen B-3050 kodlu ve CRETE Üniversitesinde MBE yöntemiyle büyütülen A (3 kuantum kuyulu), B (2 kuantum kuyulu), C (4 kuantum kuyulu) kodlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyu örneklerin optiksel özellikleri 10 K sıcaklık artışları ile 3-300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilen fotoluminesans ve Raman ölçümleri ile analiz edildi.

Fotoluminesans ölçümleri ile elde edilen spektrumlardan örneklerin yasak enerji bant aralığı değerleri tayin edildi. Fotoluminesans ölçümleri sonucu sıcaklık arttıkça yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralığı değerlerinin düştüğü gözlemlendi. Varshni eşitliği de, sıcaklığın artması ile yasak enerji bant aralığının azalacağını göstermektedir. Analizini yaptığımız örneklerden elde edilen GaN'ün pik enerjisinin sıcaklığa bağlı değişiminin Varshni eşitliği ile uyum içerisinde olduğu gözlemlendi. Literatürde, sıcaklığın artması ile yasak enerji bant aralığının azalmasının sebebi, sıcaklığa bağlı olarak örgünün genişlemesi ve elektron-fonon etkileşmesi olarak verilmiştir [62].

B-3050 kodlu örneğin fotoluminesans spektrumunda, Mg katkılı GaN'den gelen donör-akseptör çiftlerinin (DAP) yeniden birleşmesinden kaynaklanan DAP piki ve bu pikin birinci ve ikinci dereceden harmonikleri gözlemlendi. Bu DAP piklerinin Mg akseptör seviyesi ile iletim bandı arasındaki geçişten kaynaklandığı düşünülmektedir [74]. Ayrıca spektrumda, 3 K'de 2,738 eV değere sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusuna ait emisyon piki gözlemlendi. Emisyon pikinin enerjisi, 60 K sıcaklığa kadar azalma göstermiş bu sıcaklıktan sonra pik gözlenmemiştir. Bu durum, 3-60 K'de mavi ışımanın olduğunu göstermektedir. Emisyon pikinin sıcaklığa bağlı değişiminin Varshni eşitliği ile uyumlu olduğu gözlemlendi.

A, B, C, kodlu örneklerin $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusuna ait emisyon pik enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimlerinde çoklu pik davranışı gözlemlendi. Örnekler için emisyon pikleri sıcaklık arttıkça, S-tipi davranış gösterdi. Bu davranış kırmızı-mavi-kırmızı kayma şeklindedir.

Literatürde, bu S-tipi davranışın sebebi lokalizasyondur ve özellikle In miktarındaki dalgalanmalardan dolayı taşıyıcı yerelleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı kabul edilmektedir. Emisyon piklerinin gösterdiği S-tipi davranış lokalizasyon derecesinin belirlendiği bant kuyruk modeli ile uyumlu olduğu gözlemlendi. A, B, C kodlu örnekler için sırası ile lokalizasyon derecesini gösteren σ değerleri 27,68, 20,86 ve 21,52 meV olarak bulundu. Literatürdeki benzer çalışmalar ile bu değerlerin uyum içerisinde olduğu gözlemlendi.

Ayrıca fotoluminesans spektrumlarından elde edilen yasak enerji bant değerleri ile Vegard yasası kullanılarak örneklerdeki In miktarları bulundu. Bulunan In miktarları B-3050 ve diğer A, B, C kodlu üç örnek için sırası ile; %19,6, %16,7, %15,3 ve %17,7 olarak bulunmuştur. Bu değerlere bakıldığında kuantum kuyu sayısı arttıkça yapıdaki In miktarının arttığı gözlemlendi.

B-3050 ve A kodlu örneklerin sıcaklığa bağlı raman ölçümleri gerçekleştirildi. Boyuna optik fonon enerjileri belirlendi. Optik fonon modlarının sıcaklık ile değişmediği ve yapının kararlı olduğu gözlemlendi.

Fotoluminesans ve Raman ölçümleri sonucu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoklu kuantum kuyulu örneklerin detaylı optiksel karakterizasyon ve analizi yapıldı. Elde edilen bütün bu sonuçlar incelediğimiz örnek yapılarının optik özelliklerinin HELLISH aygıt yapımı için uygun olduğunu göstermektedir. Bu örneklerin litografi ve metalizasyon işlemleri yapılarak HELLISH ışın yayıcı yapılar oluşturulabilir.

KAYNAKÇA

- [1] O'Brien, A., Balkan, N., Boland-Thoms, A., Adams, M., Bek, A., Serpengüzel, A., Aydınli, A., Roberts, J. (1998). Super-radiant surface emission from a quasi-cavity hot electron light emitter. *Optical and Quantum Electronics*, 31, 183-190.
- [2] Sceats, R., Dyson, A., Potter, R., Boland-Thoms, A., Balkan, N., Adams, M.J., Button, C.C. (2001). Hot electron light emission from a GaInAsP/InP structure. *IEE Proc. Optoelectron*, Vol.148, No.1.
- [3] Wah, J.Y., Balkan, N., Potter, R.J., Roberts, J.S. (2002). The operation of a wavelength converter based on a field effect light emitting and absorbing heterojunction. *Phys. Stat. Sol.* 196, No.2, 496-503.
- [4] Wah, J.Y., Boland-Thoms, A., Balkan, N. (2005). The operation of a novel optically modulated vertical-cavity semiconductor optical amplifier with wavelength converting functionality. *Phys. Stat. Sol. (c)* 2, No.8, 3100-3103.
- [5] Seong, T.Y., Han, J., Amano, H., Morkoç, H. (2013). *III-Nitride Based Light Emitting Diodes and Applications*.
- [6] Morkoç, H. (2008). *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [7] Hoang, M.T., Yvonnet, J., Mitrushchenkov, A., Chambaud, G. (2012). First-principles based multiscale model of piezoelectric nanowires with surface effects. *Journal of Applied Physics*
- [8] Acharya, A.R. (2013). Group III-Nitride Semiconductors: Preeminent Materials for Modern Electronic and Optoelectronic Applications. *The Himalayan Physics*, Vol.4, No.4, 22-24
- [9] Kuritzky, L.Y. ve Speck, J.S. (2015). Lighting fort he 21st century with laser diodes based on non-basal plane orientations of GaN. *Materials Research Society*, 5 (3), 463-473.
- [10] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/index.html> (Erişim tarihi: 17.09.2017)
- [11] Sahu, R. (2014). *Design, Growth and Fabrication of $In_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 0.25$) Based Solar Cell*. Degree of Master. India: Pt. Ravishankar Shukla Universty, School of Studies in Electronics & Photonics.

- [12] Akasaki, I. ve Amano, H. (1997). Crystal Growth and Conductivity Control of Group III Nitride Semiconductors and Their Application to Short Wavelength Light Emitters. *Japanese Journal of Applied Physics*, part1, 5393-5408
- [13] Nakamura, S. (2014). Background Story of the Invention of Efficient Blue InGaN Light Emitting Diodes. *Nobel Lecture*.
- [14] Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J.R., Weimann, N.G., Chu, K., Muphy, M., Schaff, W.J., Eastman, L.F., Dimitrov, R., Wittmer, L., Stutzmann, M., Rieger, W., Hilsenbeck, J. (1998). Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaN/GaN heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 85(6), 3222-3233.
- [15] Acar, M.A. (2009). *GaN HEMT Yapılarının Üretimi, Modellenmesi Ve Ölçümü, Ve Yüksek Güçlü Mınc Yükselteçlerin Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Bilkent Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Pearton, S.J., Ren, F., Zhang, A.P., Lee, K.P. (2000). Fabrication and performance of GaN electronic devices. *A Review Journal*, R30, 55-212.
- [17] SUMIYOSHI, K., OKADA, M., UENO, M., KIYAMA, M., NAKAMURA, T. (2013). Low On-Resistance High Breakdown Voltage GaN Diodes on Low Dislocation Density GaN Substrates. *Sci Technical Review*, 77, 113-115
- [18] Tolbert, M.L., Ozpineci, B., Islam, S.K., Chinthavali, M.S., (2003). Wide Bandgap Semiconductors for Utility Applications.
- [19] GOLIO, M., (2003). *RF and Microwave Semiconductor Device Handbook*. United States of America: CRC press.
- [20] Wang, W.K., Huang, S.Y., Jiang, M.C., Wu, D.S. (2017). Optoelectronic Properties and Structural Characterization of GaN Thick Films on Different Substrates through Pulsed Laser Deposition. *Applied Sciences*, 7, 87.
- [21] Nanishi, Y., Saito, Y., Yamaguchi, T. (2003). RF-Molecular Beam Epitaxy Growth and Properties of InN and Related Alloys. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.42, 2549-2559.
- [22] King, P.D. (2009). *Charge Neutrality Level in Significantly Cation-Anion Mismatched Semiconductors*. Doktora Tezi. İngiltere, University of Warwick, Department of Physics.

- [23] Butcher, K.S.A., Wintrebert-Fouquet, M., Chen, P.P.T., Timmers, H., Shrestha, S.K. (2003). Detailed analysis of absorption data for indium nitride. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 6, 351-354.
- [24] Kuo, Y.K., Liou, B.T., Yen, S.H., Chu, H.Y. (2004). Vegard's law deviation in lattice constant and band gap bowing parameter of zincblende $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *Optics communications*, 237, 363-369.
- [25] Nakamura, S. (2000). Current Status And Future Prospects Of Ingan-Based Laser Diodes. *JSAP International*, No.1.
- [26] KORCAK, S. (2007). $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Tabakalı Yarıiletken Yapıların Optik Ve Yapısal Özelliklerinin Tayini. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [27] Walle, C.G.V., McCluskey, M.D., Master, C.P., Romano, L.T., Johnson, N.M. (1999). Large and composition-dependent band gap bowing in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys. *Materials Science and Engineering*, B59, 274-278.
- [28] Orsal, G., Gmili, Y.E., Fressengeas, N., Streque, J., Djerboub, R., Moudakir, T., Sundaram, S., Ougazzaden, A., Salvestrini, J.P. (2014). Bandgap energy bowing parameter of strained and relaxed InGaN layers. *Optical Society of America*, Vol.4, No.5.
- [29] ÇETİN, S.Ş. (2010). GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapıların Optik Ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [30] Liou, B.T., Lin, C.Y., Yen, S.H., Kuo, Y.K. (2005). First-principles calculation for bowing parameter of wurtzite $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *Optics communications*, 249, 217-223.
- [31] Reggiani, L. (1985). *Hot-Electron Transport in Semiconductors*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- [32] Mutlu, S. (2013). *Elektronik Transport Mekanizmalarının Pulsu Ölçüm Teknikleri İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [33] Balkan, N., Cunha, A.D., O'Brien, A., Teke, A., Gupta, R., Straw, A., Arıkan, M.Ç. (1996). Hot Electron Light Emitting Semiconductor Heterojunction Devices (Hellish)-Type-1 And Type-2. *Hot Carriers in Semiconductors*.

- [34] Gupta, R., Balkan, N., Teke, A., Straw, A., Cunha, A.D. (1995). Hot Electron light-emitting semiconductor heterostructure device-type-2. *Superlattices and Microstructures*. Vol.18, No.1.
- [35] CHAQMAQCHEE, F.A.I. (2012). *Electrically Pumped GaInNAs Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifiers for Operation at 1.3 μm Wavelength*. Doctoral thesis. England: Universty of Essex, School of Computer Science & Electronic Engineering.
- [36] Hess, K., Leburton, J.P., Ravaoli, U. (1996). *Hot Carriers in Semiconductors*. New York, Plenum Press.
- [37] Wah, J.Y. (2003). *Top Hat HELLISH (Hot Electron Light Emitting And Lasing Heterostructures)*. Doctoral thesis. England: Universty of Essex, Department of Electronic Systems Engineering.
- [38] Straw, A., Balkan, N., O'Brien, A., Da Cunha, A., Gupta, R. (1995). Hot Electron light-emitting and lasing semiconductor heterostructures -type-1. *Superlattices and Microstructures*. Vol.18, No.1.
- [39] Alias, M.S. and Hassan, A.A.M. (2004). Optical Properties Of Gaas/Algaas Dbr Mirror For Optoelectronics Devices. *Solid State Science and Technology*, Vol.12, No.1, 120-127.
- [40] Balkan, N., Serpengüzel, A., O'Brien-Davies, A., Sökmen, I., Hepburn, C., Potter, R., Adams, M.J., Roberts, J.S. (2000). VSCSEL structure hot electron light emitter. *Material Science and Engineering*, B74, 96-100.
- [41] Chaqmaqchee, F.A.I. and Balkan, N. (2012). Gain studies of 1.3 μm dilute nitride HELLISH-VCSOA for optical communications. *Nanoscale Research Letters*. 7:526.
- [42] Chamaqchee, F.A.I., Mazzucato, S., Oduncuoglu, M., Balkan, N., Sun, Y., Gunes, M., Hugues, M., Hopkinson, M. (2011). GaInNAs-based Hellish-vertical cavity semiconductor optical amplifier for 1.3 μm operation. *Nanoscale Research Letters*. 6:104.
- [43] Harvey, D. (1991). *Spectroscopic Methods*.
- [44] Andreas, H., (2010). *Spectroscopic Techniques: I Spectrophotometric techniques*. Cambridge Universty Press.

- [45] Oliva Vidal, Robert. (2010). *Optical Emission and Raman Scattering in InGaN thin films grown by molecular beam epitaxy*. Master Thesis. Barcelona: Raman Spectroscopy Group, ICTJA, CSIC Lluís Solé i Sabarís.
- [46] Islam, Md.M. (2015). Photoluminescence in analysis of surface and interfaces of Semiconductor nanostructures. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*.vol.57,102-113.
- [47] Patanè, Amalia. and Balkan, N. (2012). *Semiconductor Research Experimental techniques*. Berlin Heidelberg: Springer.
- [48] Gfroerer, T.H. (2006). Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces. *Encyclopedia of Analytical Chemistry in 2006*.
- [49] Kınacı, B. (2009). *InxGa1-xAs / GaAs çoklu kuantum kuyu yapısının MBE tekniği ile büyütülmesi: yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [50] Schroder, D.K. (2006). *Semiconductor Material And Device Characterization*. Canada: John Wiley.
- [51] Varshni, Y.P. (1967). Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors. *Physica* 34, 149-154.
- [52] http://www.bayar.edu.tr/besergil/IR_2.pdf (Erişim tarihi: 21.09.2017)
- [53] Sur, U.K. (2010). Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Resonance*, Volume 15, Issue 2, 154-164.
- [54] <http://w3.gazi.edu.tr/~mkaracan/enstrumental.pdf> (Erişim tarihi: 21.09.2017)
- [55] Gündüz, T. (1993). *İNSTRÜMENTAL ANALİZ*. (3.Baskı). Ankara: bilge yayıncılık.
- [56] Knodle, W.S. and Chow, R. Chapter 10. Molecular Beam Epitaxy: equipment and practice.
- [57] Cho, A.Y. and Arthur, J.R. (1975). Molecular Beam Epitaxy. *Progress in Solid State Chemistry*. Vol.10.part 3. 157-191.
- [58] Rinaldi, F. (2002). Basic of Molecular Beam Epitaxy (MBE). *Annual Report*, Optoelectronics Department, University of Ulm.
- [59] Kahraman, M. (2011). *Proteinlerin yüzeyde zenginleştirilmiş Raman saçılmasıyla tayini için yeni yöntemlerin geliştirilmesi*. Doktora tezi. İstanbul: İstanbul Teknik üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [60] <https://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2012/07/Chapter1011.pdf> (Erişim tarihi: 21.09.2017)
- [61] O'Donnell, K.P. and Chen, X. (1991). Temperature dependence of semiconductor band gaps. *Appl. Phys. Lett.* 58 (25)
- [62] Feng, Z.C., Chen, J., Tsai, H., Yang, J., Li, P., Wetzel, C., Detchprohm, T., Nelson, J., Ferguson, I.T. (2006). Optical and structural investigation on InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes grown on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition. *Proc. of SPIE*, Vol. 6337 63370D-2.
- [63] Cho, Y.H., Gainer, G.H., Fischer, A.J., Song, J.J., Keller, S., Mishra, U.K., DenBaars, S.P. (1998). "S-shaped" temperature-dependent emission shift and carrier Dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells. *Applied Physics Letters*, 73, 10.
- [64] Lin, T.Y., Fan, J.C., Chen, Y.F. (1999). Effects of alloy potential fluctuations in InGaN epitaxial films. *Semicond. Sci. Technol*, 14, 406-411.
- [65] Kazlauskas, K., Tamulaitis, G., Pobedinskas, P., Žukauskas, A. (2005). Exciton hopping in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ multiple quantum wells. *PHYSICAL REVIEW B* 71, 0 85306.
- [66] Li, Q., Xu, S.J., Xie, M.H., Tong, S.Y. (2005). Origin of the 'S-shaped' temperature dependence of luminescent peaks from semiconductors. *J. Phys.: Condens. Matter*, 17, 4853.
- [67] Jiang, Y., Li, Y., Li, Y., Deng, Z., Lu, T., Ma, Z., Zuo, P., Dai, L., Wang, L., Jia, H., Wang, W., Zhou, J., Liu, W., Chen, H. (2015). Realization of high-luminous-efficiency InGaN light-emitting diodes in the "green rap" range. *Scientific Reports*, 5:10883.
- [68] Jeong, H., Jeong H.J., Oh, H.M., Hong, C.H., Suh, E.K., Lerondel, G., Jeong, M.S. (2015). Carrier localization in In-rich InGaN/GaN multiple quantum wells for green light-emitting diodes. *Scientific Reports*, 5 :9373
- [69] Su, Z. And Xu, S. (2017). A generalized model for time-resolved luminescence of localized carriers and applications: Dispersive thermodynamics of localized carriers. *Scientific Reports*, 7: 13
- [70] Wang, T., Bai, J., Sakai, S., Ho, J.K. (2001). Investigation of the emission mechanism in InGaN/GaN-based light-emitting diodes. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, No. 18.

- [71] Wang, T., Bai, J., Sakai, S. (2001). Influence of InGaN/GaN quantum-well structure on the performance of light-emitting diodes and laser diodes grown on sapphire substrates. *Journal of Crystal Growth* 224, 5-10.
- [72] Monemar, B., Khromov, S., Pozina, G., Paskov, P., Bergman, P., Hemmingsson, C., Hultman, L., Amano, H., Avrutin, V., Li, X., Morkoç, H. (2013). Luminescence of Acceptors in Mg-Doped GaN. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52.
- [73] Monemar, B., Paskov, P., Pozina, G., Hemmingsson, C., Bergman, P., Khromov, S., Izyumskaya, V.N., Avrutin, V., Li, X., Morkoc, H., Amano, H., Iwaya, M., Akasaki, I. (2014). Properties of the main Mg-related acceptors in GaN from optical and structural studies. *J. Appl. Phys.*, 115.
- [74] Sheu, J.K., Su, Y.K., Chi, G.C., Pong, B.J., Chen, C.Y., Huang, C.N., Chen, W.C. (1998). Photoluminescence spectroscopy of Mg-doped GaN. *J. Appl. Phys.*, Vol. 84, No. 8.
- [75] Shan, W., Walukiewicz, W., Haller, E.E., Little, B.D., Song, J.J., McCluskey, M.D., Johnson, N.M., Feng, Z.C., Schrumann, M., Stall, R.A. (1998). Optical properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys grown by metalorganic chemical vapor deposition. *J. Appl. Phys.*, Vol. 84, No. 8, 15.
- [76] Sasaki, C., Naito, H., Iwata, M., Kudo, H., Yamada, Y., Taguchi, T., Jyouichi, T., Okagawa, H., Tadatomo, K., Tanaka, H. (2003). Temperature dependence of Stokes shift in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ epitaxial layers. *J. Appl. Phys.*, Vol. 93, No. 3.
- [77] Tung, L.T., Lin, K.L., Chang, E.Y., Huang, W.C., Hsiao, Y.L., Chiang, C.H. (2009). Photoluminescence and Raman studies of GaN films grown by MOCVD. *Journal of Physics: Conference Series* 187.
- [78] Dan-Mei, Z., De-Gang, Z., De-Sheng, J., Zong-Shun, L., Jian-Jun, Z., Ping, C., Wei, L., Xiang, L., Ming, S. (2015). Temperature-dependent photoluminescence spectra of GaN epitaxial layer grown on Si (111) substrate. *Chin. Phys. B* Vol. 24, No. 10.
- [79] Vurgaftmana, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan, L.R. (2001). Band parameters for III-V compound semiconductors and their allays. *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, No. 11.
- [80] ELISEEV, P.G., OSINSKI, M., LEE, J., SUGAHARA, T., SAKAI, S. (2000). Band-Tail Model and Temperature-Induced Blue-Shift in Photoluminescence

- Spectra of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Grown on Sapphire. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 29, No. 3.
- [81] Pelá, R.R., Caetano, C., Marques, M., Ferreira, L.G., Furtmüller, J. (2011). Accurate band gaps of AlGaN, InGaN and AlInN alloys calculations based on LDA-1/2 approach. *Appl. Phys. Lett.* 98, 151907.
 - [82] Wu, J., Walukiewicz, W., Shan, W., Yu, K.M., Ager, J.W., Li, S.X., Haller, E.E., Lu, H., Schaff, W.J. (2003). Temperature dependence of the fundamental band gap of InN. *J. Appl. Phys.*, Vol. 94, No. 7.
 - [83] Mukhtarova T, (2015). InGaN/GaN Multiple Quantum Wells for Photovoltaics. Doktora Tezi, Université Grenoble Alpes.
 - [84] Tiras, E., Gunes, M., Balkan, N., Schaff, W.J. (2010). In rich $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$: Composition dependence of longitudinal optical phonon energy. *Phys. Status Solidi B* 247, No. 1.
 - [85] Liu, M.S., Bursill, L.A., Prawer, S., Nugent, K.W., Tong, Y.Z., Zhang, G.Y. (1999). Temperature dependence of Raman scattering in single crystal GaN films. *Applied Physics Letters*. 74, 21.
 - [86] Ager III, J.W., Walukiewicz, W., Shan, W., Yu, K.M., Li, S.X., Haller, E.E., Lu, H., Schaff, W.J. (2005). Multiphonon resonance Raman scattering in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *Physical Review B* 72, 155204.
 - [87] Yan, F., Gao, H., Zhang, H., Wang, G., Yang, F., Yan, J., Wang, J., Zeng, Y., Li, J. (2007). Temperature dependence of the Raman-active modes in the nonpolar α -plane GaN film. *Journal of Applied Physics* 101, 023506.
 - [88] Correia, M.R., Pereira, S., Pereira, E., Frandon, J., Alves, E. (2003). Raman study of the $A_1(\text{LO})$ phonon in relaxed and pseudomorphic InGaN epilayers. *Appl. Phys. Lett.* 83, 4761.
 - [89] Hernández, S., Cuscó, R., Pastor, D., Artús, L., O'Donnell, K.P., Martin, L.W., Watson, I.M., Nanishi, N., Calleja, E. (2005). Raman-scattering study of the InGaN alloy over the whole composition range. *Journal of Applied Physics* 98, 013511.