



**In_xGa_{1-x}N (x= 0,075; 0,090; 0,100) MAVİ LED'LERİN MİKROYAPISAL
KUSURLARININ TERS ÖRGÜ UZAY HARİTASI İLE İNCELENMESİ**

Yunus BAŞ

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2014

Yunus BAŞ tarafından hazırlanan “ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x= 0,075; 0,090; 0,100$) MAVİ LED’LERİN MİKROYAPISAL KUSURLARININ TERS ÖRGÜ UZAY HARİTASI İLE İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

İkinci Danışman: Doç. Dr. Halit ALTUNTAŞ

Fizik Anabilim Dalı, Çankırı Karatekin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Abdullah GÜNEN

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Ziya MERDAN

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Hüseyin ÇELİKKAN

Kimya Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Semran SAĞLAM

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hacı ÖZİŞİK

BÖTE Anabilim Dalı, Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu Onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 25/12/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Yunus BAŞ
25/12/2014

In_xGa_{1-x}N (x= 0,075; 0,090; 0,100) MAVİ LED'LERİN MİKROYAPISAL
KUSURLARININ TERS ÖRGÜ UZAY HARİTASI İLE İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Yunus BAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2014

ÖZET

Bu tezde, In_xGa_{1-x}N (x= 0,075; 0,090; 0,100) temelli mavi ışık yayan diyot (LED) yapısı çalışıldı. Öncelikle n-GaN ve p-AlGa_{1-x}N+Ga_xN kontak arasında, c-yönelimli safir alttaş üzerine metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemi ile InGa_xN/GaN çoklu kuantum kuyu (MQW) LED yapısı büyütüldü. Örnek büyütme aşamasında tüm örnekler için InGa_xN tabakanın büyütme sıcaklığı dışındaki basınç ve kaynak akı oranları gibi tüm parametreleri sabit tutuldu. Farklı In oranlarındaki InGa_xN/GaN ışık yayan diyot örneklerin; yapısal, optiksel, elektriksel ve morfolojik özellikleri, Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HRXRD), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Fourier Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Fotoluminesans (PL) ve Akım-Gerilim Karakteristiği (I-V) teknikleri ile incelendi. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı Tekniği kullanılarak yapı kusurlarının araştırılması için ters örgü uzayı haritası çıkarıldı. GaN epitaksiyel yapının özellikleri referans alınarak, InGa_xN ve AlGa_{1-x}N tabakanın nokta kusurları (örgü rahatlaması, örgü zorlaması, üç yönlü zorlama ve iki yönlü zorlama) ve mozaik yapı kusurları (eğim açısı, yanal ve dikey mozaik kristal boyut, vida ve kenar dislokasyon yoğunluğu) hesaplandı. Yüzey pürüzlülük parametrelerinin, büyütme sıcaklığına bağlı olarak araştırması yapıldı. Tüm yapısal kusurların, büyütme sıcaklığı ile değiştiği ters örgü uzayı haritalaması ile net bir şekilde görüldü. Ayrıca LED yapıların AlGa_{1-x}N tabakasındaki nokta kusurları InGa_xN tabaka ile kıyaslandı. Her iki tabakanın rahatlama yüzdeleri birbirine göre ters davranış gösterirken, hidrostatik ve iki yönlü zorlama değişimleri her iki tabaka içinde benzer özellikler gösterdi. Sonuç olarak bir tabakadan diğer tabakaya nokta ve çizgi kusurların taşınması nedeniyle aynı tip kusur eğilimleri görüldü. Değişen In oranı değerlerinde elde edilen mozaik yapı kusurları, InGa_xN aktif tabakası için uygun büyütme sıcaklığını ortaya koydu. 667 °C olan bu büyütme sıcaklığında: AFM analizlerine göre LED yapının, yüksek kristal boyutlu ve pürüzlü, PL ve FTIR sonuçlarına göre yasak band enerji aralığının ve dalgaboyunun maviye kaydığı ve titreşim enerji piki yarı genişliğinin azaldığı, I-V ölçümlerine göre LED'in ışığa karşı tepki verdiği görüldü. Nihai olarak InGa_xN MQW mavi LED'lerin tüm analiz sonuçlarının birbirlerini desteklediği ve 667 °C'nin LED üretimi için optimum büyütme sıcaklığı olduğu anlaşıldı.

Bilim Kodu : 202.1.147

Anahtar Kelimeler : InGa_xN, Mavi LED, Kusurlar, Ters örgü uzayı haritası

Sayfa Adedi : 120

Danışman : Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

İkinci Danışman : Doç. Dr. Halit ALTUNTAŞ

INVESTIGATION OF $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x= 0,075; 0,090; 0,100$) BLUE LED's
MICROSTRUCTURE DEFECTS FROM RECIPROCAL SPACE MAPPING

(Ph. D. Thesis)

Yunus BAŞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
December 2014

ABSTRACT

In this thesis, The microstructure of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x= 0,075; 0,090; 0,100$) blue light emitting diodes (LED) were investigated. First, LED structures with InGaN/GaN multiple quantum wells (MQW) were grown between n-GaN and p-AlGaIn+GaN contacts using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) on c-oriented sapphire substrates. The process parameters, such as the pressure and source flow rates, were kept constant with the exception of growth temperature of the InGaN layers. Then, the structural, optical, electrical and surface morphologic properties of InGaN/GaN LED samples with different Indium content were characterized using High-Resolution X-Ray Diffraction (HRXRD), Atomic Force Microscopy (AFM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Photoluminescence (PL) and Current-Voltage (I-V) Characteristics. To examine the structural defects in crystal forms, a reciprocal lattice space was mapped using a High Resolution X-Ray Diffractometer. The point defects (lattice relaxation, lattice strain, hydrostatic strain, biaxial strain) and mosaic structure defects (the tilt angles, lateral and mosaic crystal dimension of mosaic blocks, screw and edge dislocation densities) of GaN and InGaN layers were estimated by taking the structure properties of GaN epitaxial layer as the reference. Furthermore, the relationship between the parameters of surface roughness and the growth temperature were examined. The changes in structural defects with respect to the growth temperature were observed using reciprocal space mapping. Additionally, the point defects of the blue LED structure on AlGaIn layer were compared to those of InGaN layer. While the relaxation percent of both layers were opposite to each other; hydrostatic and biaxial strain changes showed the same properties for both layers. The defect types were showing similar trends in both structures, because the same type of point defects and line defects were extended from one layer to the other. The changing ratio of mosaic structure defects with respect to the Indium content revealed the optimized growth temperature for the InGaN active layers. The following specific observations were made at the optimized growth temperature of 667 °C: The AFM analysis revealed that the LED structures were high crystal size and rough. According to PL and FTIR results, the band gap energy and wavelengths shifted towards the blue spectrum and the half-width of vibrational energy peak decreased. According to the I-V measurements, LED structure was responsive to the light. Finally, it was concluded that all the analysis results of the InGaN MQW blue LEDs were consistent and supported each other, and 667 °C was found to be the optimized growth temperatures for LED fabrication.

Science Code : 202.1.147

Key Words : InGaN, Blue LED, Defects, Reciprocal Space Mapping

Page Number : 120

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Halit ALTUNTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşum serüveni benim için oldukça güzel, anlamlı ve çok değerlidir. Bu serüvenin doktora tezine dönüşmesinde rol alan başta ailem ve hocalarım olmak üzere tüm dostlarıma sonsuz minnettarım. Bu serüveni bir filme benzetecek olursak bu eserin en iyi erkek oyuncularını; emeğinin hakkını halen hesaplayamadığım hocam Doç.Dr. Mustafa Kemal Öztürk ve maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babalarım Muhsin Baş ve Bahattin Çavdar'a en iyi kadın oyuncularını; her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen eşim İmran Baş ve annelerim, Hatice Baş ve Mukaddes Çavdar'a, en iyi yardımcı oyuncu, varlığıyla neşe kaynağım oğlum Ahmet Selim Baş'a ve ailemin kıymetli diğer üyelerine sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca örneklerin üretiminde ve analizlerinde ve tez kontrol sürecinde yardımlarını esirgemeyen; Gazi Üniversitesi Fotonik Laboratuvarında Dr. S. Şebnem Çetin, Nihan Akın, Ü. Ceren Başköse, Yunus Özen ve Bilkent Üniversitesi NANANOTAM'daki tüm arkadaşlara teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİ	5
2.1. Fonksiyonel Malzemeler	5
2.2. Nanoteknoloji	6
2.3. Kristal Yapılar	7
2.4. Epitaksi.....	8
2.4.1. Azotlu yapı büyütmede kullanılan alttaş malzemeler	8
2.4.2. Safir alttaş	9
2.5. Yarıiletkenler.....	10
2.5.1. Yarıiletkenlerin katkılanması.....	13
2.5.2. p-tipi ve n-tipi yarıiletken	13
2.6. Doğrudan ve Dolaylı Band Yapıları	14
2.6.1. Doğrudan band aralıklı yarıiletken	15
2.6.2. Dolaylı band aralıklı yarıiletken	15

2.7. p-n Eklem	15
2.8. Yarıiletken Kuantum Kuyular	17
2.8.1. Tekli kuantum kuyusu	18
2.8.2. Çoklu kuantum kuyusu	19
2.9. Azotlu Yarıiletken Malzemeler	21
2.9.1. III-V azotlu bileşiklerin kristal yapısı	23
2.9.2. III-V azotlu bileşiklerin mekanik özellikleri	25
2.9.3. III-V azotlu bileşiklerin elektriksel özellikleri	26
2.9.4. III-V azotlu bileşiklerde polarizasyon	26
2.9.5. III-V azotlu bileşiklerin termal özellikleri	27
2.9.6. III-V azotlu bileşiklerin optik özellikleri	27
2.10. Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode, LED)	29
2.10.1. LED'den beyaz ışınım elde edilmesi	32
2.11. InGaN Yarıiletken Alaşımının Özellikleri	33
2.12. Yapısal Kusurlar	36
2.12.2. Burgers vektörü	38
2.12.3. Çizgisel kusurlar (bir boyutlu dislokasyonlar)	39
3. DENEYSEL YÖNTEM VE ANALİZ SİSTEMLERİ	43
3.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirmesi Yöntemi (MOCVD)	43
3.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı Tekniği (HRXRD)	46
3.2.1. Kırınım ve ters örgü uzayı	47
3.2.2. Difraktometreler (kırınım ölçer)	51
3.2.3. HRXRD sisteminin çalışma prensibi	57
3.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	59

3.4. Fotolüminesans (PL)	61
3.5. Fourier Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)	62
3.6. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi	63
4. DENEYSEL BULGULAR ve YORUMLAR.....	65
4.1. MOCVD Tekniği ile InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Büyütülmesi	65
4.2. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin HRXRD Ölçüm Tekniği Tarama Sonuçları	67
4.3. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Ters Örgü Uzayı Tarama Sonuçları.....	70
4.4. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin pik yüksekliği yarı genişliklerinin (FWHM) Sonuçları	73
4.5. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin In Alaşım Oranı (x) Değerlerin "Üçüncü Derece Denklem" ile Hesabı	76
4.6. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Örgü Parametrelerinin Hesabı	80
4.7. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Nokta Kusurları	83
4.7.1. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakalarına ait örgü rahatlama değerinin hesabı	83
4.7.2. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakalarına ait a - ve c - zorlama değerlerinin hesabı	84
4.7.3. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakaları a - ve c - iki eksenli ve üç boyutta hidrostatik zorlama değerlerinin hesabı	86
4.7.4. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakanın gerilme değerlerinin hesabı	90
4.8. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Mozaik (Çizgi ve Hacim) Kusurları	91
4.8.1. Williamson-Hall (W-H) grafiğinden yanal mozaik boyutu ve düzlem eğilme açısının hesabı	91
4.8.2. Williamson-Hall (W-H) grafiğinden dikey mozaik boyutun hesabı	93
4.8.3. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin kenar ve vida dislokasyonları.....	95

Sayfa

4.9. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Optik Karakterisliği	98
4.10. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Yüzey Morfolojik Özellikleri.....	101
4.11. InGaN MQW LED Yapımın I-V Karakterisliği	103
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	105
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ.....	118

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. GaN ve azotlu epitaksizde yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri	9
Çizelge 2.2. AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler	25
Çizelge 2.3. Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler	28
Çizelge 2.4. LED'in üretildiği malzemelere göre elde edilen ışığın rengi, dalgaboyu ve yasak enerji band aralığı	31
Çizelge 3.1. Gösterim karakter dönüşümleri.....	48
Çizelge 3.2. Yüksek çözünürlüklü difraktometrelerde aşağıdaki tarama tipleri mevcuttur. ω gelen ışın demeti ile örnek yüzeyi arasındaki açığa, 2θ gelen ile kırılan ışın demeti arasındaki açığa karşılık gelir.....	55
Çizelge 4.1. A,B ve C InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu mavi LED'lerin büyütme koşulları.....	66
Çizelge 4.2. Numunelerin InGaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığına göre In (%) oranı ve kuantum kuyu kalınlığı (L) değerleri.....	72
Çizelge 4.3. Numunelerin GaN ve InGaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığına göre karışık zorlama değerleri	80
Çizelge 4.4. InGaN tabakanın tüm örnekler için Vegard Yasası, evrensel örgü parametreleri ve kübik denlem yöntemlerine göre bulunan örgü parametrelerinin büyütme sıcaklığına göre karşılaştırılması.....	81
Çizelge 4.5. AlGaN tabakanın tüm örnekler için Vegard Yasası, evrensel örgü parametreleri ve kübik denlem yöntemlerine göre bulunan örgü parametrelerinin büyütme sıcaklığına göre karşılaştırılması.....	81
Çizelge 4.6. A, B ve C numunelerinin, GaN aktif tabaka için HRXRD ve AFM sonuçları.....	93
Çizelge 4.7. A, B ve C numunelerinin, InGaN aktif tabaka için HRXRD ve AFM sonuçları.....	93
Çizelge 4.8. A, B ve C numunelerinin, GaN ve InGaN aktif tabaka için Dikey Kristal Boyut değerleri	95
Çizelge 4.9. A, B ve C numunelerinin, GaN aktif tabaka için artan büyütme sıcaklığına bağlı olarak In % oranı ve sırasıyla birinci ve ikinci metoda göre hesaplanan vida ve kenar tipi TD	97

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.10. A, B ve C numunelerinin, InGaN aktif tabaka için artan büyütme sıcaklığına bağlı olarak In % oranı ve sırasıyla birinci ve ikinci metoda göre hesaplanan vida ve kenar tipi TD.....	97
Çizelge 4.11. InGaN/GaN yapıların PL analizine göre hesaplanan, yasak enerji band aralığı ve FWHM değerleri	99
Çizelge 4.12. InGaN/GaN yapıların FTIR analizine göre hesaplanan, dalga sayısı, FWHM ve PL şiddeti değerleri	100

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Fonksiyonel malzemelerin genel sınıflandırılması	5
Şekil 2.2. (a) Kristal yapı (b) Amorf yapının molekül deseni	7
Şekil 2.3. Farklı yarıiletkenler için yasak band aralığının örgü sabitine göre değişimi	12
Şekil 2.4. (a) Doğal halde Si atomu (b) Bor katkılanmış (p- tipi) Si (c) Fosfat katkılanmış (n- tipi) Si atomu.....	14
Şekil 2.5. (a) Özgün yarıiletken (b) n ve p tipi katkılı yarıiletken	14
Şekil 2.6. (a) Doğrudan band aralığı (b) Dolaylı band aralığı	15
Şekil 2.7. p-n ekleme yeniden birleşme	16
Şekil 2.8. InGaN/GaN kuantum kuyusu enerji-band yapısı	17
Şekil 2.9. InGaN/GaN kuantum kuyusunun şematik olarak gösterimi.....	18
Şekil 2.10. Tekli kuantum kuyusu (E_v : valans bandı enerji seviyesi; E_i : iletkenlik bandı enerji seviyesi)	19
Şekil 2.11. Çoklu kuantum kuyusu (L_b bariyer genişliği L_z kuantum kuyusunun genişliğidir)	19
Şekil 2.12. (a) Wurtzite, (b) zincblende ve (c) NaCl kristal yapıların şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.13. Ga ve N polarlık.....	26
Şekil 2.14. RGB yöntemi ile beyaz ışık yayan LED'in spektrumu CEI'si ve 5mm boyutlarında bir RGB LED'in ışınması	32
Şekil 2.15. (a) mavi+kırmızı LED - yeşil fosfor (b) mavi LED - kırmızı + yeşil fosfor (c) Mavi LED - sarı fosfor.....	33
Şekil 2.16. $In_xGa_{1-x}N$ alaşımlarının büyütülmesinde kullanılan InN ve GaN yarıiletken bileşikler ve bu bileşikleri oluşturan III-V grubu elementleri ...	34
Şekil 2.17. InGaN'ın kristal yapısı	34

Şekil	Sayfa
Şekil 2.18. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının In kompozisyonun (x) fonksiyonu olarak yasak enerji aralığı	35
Şekil 2.19. Noktasal kusurlar: (a) atomsal boşluk kusuru, (b) arayer atom kusuru, (c) küçük yeralan atom kusuru (d) büyük yeralan atom kusuru, (e) Frenkel kusuru, (f) Schottky kusuru.....	37
Şekil 2.20. Burgers vektörünün gösterimi	38
Şekil 2.21. Kenar tipi dislokasyon	39
Şekil 2.22. Kristal düzleminde dislokasyon oluşumunun kademeli olarak gösterimi	40
Şekil 2.23. Kenar ve vida tipi dislokasyonun karşılaştırılması.....	41
Şekil 3.1. MOCVD sisteminin şematik gösterimi	44
Şekil 3.2. İnce film büyütülmesi esnasında meydana gelen temel fiziksel olaylar.....	45
Şekil 3.3. X-Işını kırınım geometresi; a) Bragg kırınımının oluşması için gereken şartlarını b) kristale gelen k_0 ve kırınan k_h ve saçılma S vektörleri ile ilişkileri açıklar.....	47
Şekil 3.4. [0001] yörüngeli GaN filimler için ters örgü uzayı (Ewald Küresi)	49
Şekil 3.5. Olası saçılma geometrileri (a) Simetrik $2\theta=\omega$ (b) Asimetrik $2\theta\neq\omega$ (c) Ters dönmüş simetri, χ sapma ($\varphi 90^\circ$ döndükten sonra) (d) Düzlem saçılması	50
Şekil 3.6. Genişlemiş ters uzayda farklı tip bozukluklara bağlı olarak; (a) dikey eğim açısı (tilt), döndürme açısı ve sınırlı büyüklük ve (b) noktasal zorlama ve bileşim/zorlama eğimleri (gradyan). A, C ve D asimetrik (bazıları simetrik) geometride, B sadece ulaşılabilir, birbirine paralel olmayan geometride (veya bazen düzlem geometride) olduğu zaman ölçülebilir.....	51
Şekil 3.7. Örnek geometriler (a) gelen ışın demeti monokromatörü buldurmeyen toz kırınımı (b) gelen ışın monokromatörü ve hassas açılı analizör bulunduran, çözümleyici kristalin opsiyonel olduğu yüksek çözünürlüklü kırınım ...	53
Şekil 3.8. Koyu gri ile renklendirilmiş probun hacmi; ters uzayda gelen ışın demetinin ıraksaklığı $k_0(\delta\omega)$ ve kırınan ışın demetinin ıraksaklığı $k_h(\delta\theta)$ 'ya bağlıdır	53
Şekil 3.9. Dönüş eksenini gösteren örnek referans uzay	54
Şekil 3.10. Ters örgü uzayında ω , 2θ ve $\omega-2\theta$ tarama tipleri tarafından alınan yönler...	54
Şekil 4.1. InGa _N /Ga _N MQW mavi LED'in yapısı.....	67

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. (0004) miller yansıma düzleminde Örnek A mavi LED yapısının HRXRD yansıması	68
Şekil 4.3. (0004) miller yansıma düzleminde Örnek B mavi LED yapısının HRXRD yansıması	68
Şekil 4.4. (0004) miller yansıma düzleminde Örnek C mavi LED yapısının HRXRD yansıması	69
Şekil 4.5. Simetrik (0002) ve asimetrik (10-15) düzlemlerde tüm numunelerin ters örgü uzayı haritası	71
Şekil 4.6. (0002) simetrik düzleminde GaN ve InGaN tabakalar için büyütme sıcaklığına bağlı FWHM değişimi	73
Şekil 4.7. (10-15) asimetrik düzleminde GaN ve InGaN tabakalar için büyütme sıcaklığına bağlı FWHM değişimi	74
Şekil 4.8. Örnek A,B ve C için InGaN tabakası (0002), (0004), (0006) ve (10-15) Bragg kırınım açılarına bağlı olarak FWHM değerleri	74
Şekil 4.9. Örnek A,B ve C için AlGaN tabakası (0002), (0004), (0006) ve (10-15) Bragg kırınım açılarına bağlı olarak FWHM değerleri	75
Şekil 4.10. İki eksenli zorlama altında altıgen birim hücre	76
Şekil 4.11. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm örnekler için sıcaklığa bağlı örgü rahatlaması	84
Şekil 4.12. InGaN ve AlGaN tabakaların <i>a</i> - örgü zorlaması	85
Şekil 4.13. InGaN ve AlGaN tabakaların <i>c</i> - örgü zorlaması	86
Şekil 4.14. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm numuneler için sıcaklığa bağlı iki eksenli <i>a</i> - zorlama	87
Şekil 4.15. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm numuneler için sıcaklığa bağlı iki eksenli <i>c</i> - zorlama	88
Şekil 4.16. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm numuneler için sıcaklığa bağlı hidrostatik zorlama.....	89
Şekil 4.17. InGaN MQW mavi LED yapılarında InGaN ve AlGaN tabakaların sıcaklığa bağlı iki eksenli gerilmesi	90
Şekil 4.18. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin InGaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde yanal mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri	92

Şekil	Sayfa
Şekil 4.19. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin GaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde yanal mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri	92
Şekil 4.20. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin InGaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde dikey mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri	94
Şekil 4.21. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin GaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde dikey mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri	94
Şekil 4.22. InGaN/GaN mavi LED yapıların PL spektrumu	99
Şekil 4.23. InGaN aktif tabaka için FTIR titreşim spektrumu	100
Şekil 4.24. Farklı büyüme sıcaklığındaki InGaN/GaN mavi LED yapıların yapıları 2D ve 3D AFM görüntüleri; (a) 650 °C, (B) 667 °C, (C) 700 °C. Tüm görüntüler 5x5 µm ² tarama alanındadır.....	102
Şekil 4.25. Karanlık ve aydınlık ortam için Akım-Voltaj ölçümleri	104

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. (a) Çok uzun mesafeden bile fark edilebilecek parlaklıkta olan LED'lerin kullanıldığı trafik lambaları, (b) 100GB kapasiteli tekrar yazılabilir üç katmanlı blue-ray diskler, (c) GaN temelli UV detektörler	23
Resim 2.2. (a) LED yapının çalışma prensibi (b) LED yapının ışınması	30
Resim 2.3. Mitsubishi Electric tarafından "Diamond Vision" adıyla geliştirilen dünyanın en büyük HD LED televizyonu	32
Resim 3.1. Bilkent Üniversitesi bünyesindeki NANOTAM da bulunan AIX 200/4 RF-S MOCVD sistemi fotoğrafı	45
Resim 3.2. NANOTAM'da kurulan MOCVD sistemi reaktörünün fotoğrafı	46
Resim 3.3. Bruker D8 Discover HRXRD cihazının genel görünümü	59
Resim 3.4. High Performance AFM/MFM	60
Resim 3.5. Jobin Yvon Florog-550 sistemi	62
Resim 3.6. Bruker Vertex 80 spektrometresi	63
Resim 3.7. I-V ölçüm düzeneği (Keithley 4200 ve Newport Oriel Sol1A)	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
\hbar	İndirgenmiş Planck sabiti
μ	Elektron mobilitesi
v_s	Doyum sürüklenme hızı
σ_Y	Akma dayanımı
ΔE_c	İletkenlik bandı süreksizliği
ΔE_v	Valans bandı süreksizliği
$2\theta, \omega$	Kırınım-tarama açısı
a, c, u	Örgü parametreleri
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Safir
AlAs	Alüminyum Arsenit
AlGaAs	Alüminyum Galyum Arsenit
AlInGaP	Alüminyum İndiyum Galyum Fosfit
AlN	Alüminyum Nitrür
AlP	Alüminyum Fosfit
As	Arsenik
B	Bor
b	Burgers vektörü
Be	Berilyum
C	Karbon
Cd	Kadmiyum
CdSe	Kadmiyum Selenit

Simgeler	Açıklama
CH₃	Metil
CH₄	Metan
CP	Kritik nokta
Cp₂Mg	Bis (siklopentadienil) Magnezyum
C_{xy}	Elastik sabiti
d	Düzlemler arası mesafe
D	Vida tipi dislokasyon
E	Toplam enerji
E_A	Alıcı enerji düzeyi
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_D	Verici enerji düzeyi
E_{ds}	Elektronik deformasyon potansiyel
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_v	Valans bandı enerji seviyesi
Ga	Galyum
GaAlAs	Galyum Alüminyum Arsenit
GaAlAsP	Galyum Alüminyum Arsenik Fosfit
GaAs	Galyum Arsenit
GaAsN	Galyum Arsenik Nitrür
GaAsP	Galyum Arsenik Fosfit
GaN	Galyum Nitrür
GaP	Galyum Fosfit
GaSb	Galyum Antimonit
Ge	Germanyum
H	Hamilton operatörü
h,k,l	Miller indisleri

Simgeler	Açıklama
H₂	Hidrojen gazı
He	Helyum
In	İndiyum
InAs	İndiyum Arsenik
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
InGaN	İndiyum Galyum Nitrür
InN	İndiyum Nitrür
InP	İndiyum Fosfit
InSb	İndiyum Antimonit
K	Kelvin
k	Dalga vektörü, Termal iletkenlik
Kα_2, Kβ	Enerji seviyeleri arası geçişler
L	Yanal mozaik boyut uzunluğu
L_b	Bariyer genişliği
L_z	Kuantum kuyusunun genişliği
m*	Elektronun etkin kütlesi
M_f	Eksenli modül
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum Oksit
MgS	Magnezyum Sülfid
MgSe	Magnezyum Selenit
N	Azot
N	Kenar tipi dislokasyon
n	Kırılma indisi
n, p	Katkılama tipi
N₂	Azot gazı
NaCl	Kaya tuzu

Simgeler	Açıklama
NH₃	Amonyak
Ni	Nikel
P	Fosfor
<i>p</i>	Penetrasyon derinliği
<i>P</i>	Momentum işlemcisi
R	Örgü rahatlaması
<i>s</i>	Saçılma vektörü
S	Kükürt
Sb	Antimon
Si	Silisyum
SiH₄	Silane
Si₂H₆	Disilane
SiC	Silisyum karbür
<i>T</i>	Kinetik enerji
T_g	Altaş büyüme sıcaklığı
Ti	Titanyum
<i>V</i>	Kuantum kuyusunun yüksekliği
<i>x</i>	Alaşım kompozisyonu
x, y, z, Φ, ξ, χ	Ölçüm eksenleri
ZnS	Çinko Sülfid
ZnSe	Çinko Selenit
<i>α</i>	Burkulma açısı
α, β	Atomlar arası açılar
α_a, α_c	Termal genişleme katsayıları
<i>β</i>	Burgers vektör uzunluğu
δ	Gelen ışın demetinin ıraksaklığı
Δa/a, Δc/c	Termal genişleme katsayıları

Simgeler**Açıklama**

ΔH	Oluşum ısısı
ϵ	Örgü uyumsuzluğu, örgü zorlaması, dielektrik sabiti
θ	X-ışını demetinin düzleme gelme açısı
λ	Dalgaboyu
ρ	Öz direnç
σ	İki eksenli gerilme
τ	Örgü eğilme açısı
ν	Poisson oranı
Ψ	Dalga fonksiyonu

Kısaltmalar**Açıklama**

2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
CD	Kompakt disk
CIE	Renk oluşumu
cps	Sayım/saniye
CRI	Renksel geri verim
CVD	Kimyasal buhar birikimi
DF	Dielektrik fonksiyonu
DNA	Deoksiribo nükleik asit
DVD	Yazılabilir kompakt disk
eV	Elektron volt
FTIR	Fourier kızılötesi spektroskopisi
FWHM	Yarı maksimumdaki tam genişlik
GB	Giga bayt

Kısaltmalar	Açıklama
hcp	Sıkı paketlenmiş altıgen
HEMT	Yüksek hızlı elektron mobiliteli tranzistör
HRXRD	Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı
Hz	Hertz
I-V	Akım-Voltaj
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
LO	Boyuna optik fonon enerjisi,
MBE	Moleküler demet epitaksi
MOCVD	Metal organik kimyasal buhar birikimi
MP	Mega piksel
MQW	Çoklu kuantum kuyusu
NANOTAM	Nanoteknoloji araştırma merkezi
P,Q,R,S	Sabit katsayılar
PL	Fotoluminesans
QW	Kuantum kuyusu
RF	Radyo frekansı
RGB	Kırmızı yeşil mavi
RLU	Ters uzunluk brimi
RMS	Kuadratik ortalama
SdH	Shubnikov de Haas etkisi
SL	Uydu piki
TD	Tedirgin edici dislokasyon
TMAI	Trimetilalüminyum
TMGa	Trimetilgalyum
TMI_n	Trimetilindiyum
UHV	Çok yüksek vakum

Kısaltmalar**Açıklama****UV**

Mor ötesi

W-H

Williamson-Hall

1. GİRİŞ

İleri teknoloji; uzay çağı olarak anılan günümüzde oldukça kritik bir noktada bulunmakta ve gelişmiş ülkelerin araştırma-geliştirme yatırımlarında en büyük payı bünyesinde toplamaktadır. Çünkü ileri teknoloji ve özellikle nanoteknoloji; iletişimden savunma sanayine, ulaşımdan eğitim ve sağlık sektörüne kadar hemen hemen her alanda vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Uçak, uydu, insansız hava araçları, iletişim cihazları, bilgisayarlar, tabletler ve tüm görüntülü cihazların nanoteknolojinin geliştirilmesiyle hem performansları artmakta hem de hacimsel olarak küçülmektedirler. Tüm bu sayılan nanoteknolojik cihazların en önemli unsurlarından biri olan ışık yayan diyot (LED), fotodetektör, fotolazer ve çipler gibi nano aygıtlar, bu cihazların verimliliği için tartışılmaz bir öneme sahiptir [1]. Aralık 2014 tarihinde Aselsan ve Bilkent Üniversitesi işbirliği ile Türkiye’de ilk dünyada dördüncü olan GaN (Galyum Nitrür) temelli çip üretim fabrikasının temelleri atılmıştır. Bu tür malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi araçların veya sistemlerin çalışma performanslarını daha da arttıracaktır. Bu tez çalışmasının amacı; Azotlu nanoteknolojik malzemelerden olan, InGaN (İndiyum Galyum Nitrür) ve GaN yarıiletken malzemelerle büyütülen, $In_xGa_{1-x}N/GaN$ çoklu kuantum kuyulu mavi LED aygıtlarının; üretimlerindeki kritik koşullarının belirlenmesi, mikroyapısal kusurlarının, türlerinin, miktarlarının; daha kesin sonuç verebilen ters örgü uzayı haritalaması tekniğiyle incelenmesi ve bu kusurların nano yapının elektriksel ve optiksel özelliklerini nasıl değiştirdiğinin ve çalışma performansına etkilerinin araştırılmasıdır.

Azotlu (III-V gurubu) yarıiletken bileşikler optoelektronik aygıtların üretiminde özel bir yere sahiptir. 0,7 eV’den (InN) (İndiyum Nitrür), 3,4 eV (GaN) ve 6,2 eV’a (AlN) (Alüminyum Nitrür) kadar elektromagnetik spektrumun yakın kızıl ötesi bölgesinden mor ötesi (UV) bölgeye kadar olan çok geniş direk band enerji aralığına sahiptir [1]. Bu özellik azot tabanlı yarıiletkenleri, LED, lazer, diyod, çip ve mor ötesi fotodetektör gibi optoelektronik aygıtların üretilmesinde ve geliştirilmesinde çok önemli bir yere koymaktadır. Dahası bu aygıtlara kazandırdığı yüksek sıcaklık basınç gibi zor koşullarda çalışabilme özelliğiyle büyük avantaj sağlamaktadır [2].

LED teknolojisinde geline son nokta; hem ticari hem de bilimsel açıdan bu alandaki yeniliklerin yakından takip edilmesini gerekli kılmıştır. Gösterge, ekran, panel gibi pek çok

alandaki LED'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. LED'lerde beyaz renkli ışık doğrudan elde edilememekte, ya üç rengin karışımı olarak (kırmızı, mavi ve yeşil) ya da mavi ışınım veren İndiyum Galyum Nitrür (InGaN) LED'lerin üzerinin fosforla kaplanması yolu ile elde edilmektedir [3,4]. Parlaklık, uzun ömürlülük, düşük enerji gereksinimi; InGaN mavi LED'lerin geliştirilmesi ile sağlanabilmektedir [4]. Güncel bir gelişme olarak, 2014 Ekim ayında "parlak ve enerji tasarruflu beyaz ışık kaynakları için verimli kullanılabilen mavi LED" buluşları için Fizik 2014 Nobel Ödülü Shuji Nakamura, Isamu Akasaki ve Hiroshi Amano'ya verilmiştir [5].

InGaN LED'ler altıgen yapıda yüksek sıcaklık, frekans ve basınç değerlerinde dayanıklı bir malzeme olması nedeni ile tercih edilir. Ancak safir (Al_2O_3) ya da silisyum (Si) gibi geleneksel bir alttaşın üzerine InGaN yapısının epitaksiyel olarak büyütülmesinde yüksek örgü uyumsuzluğu nedeni ile dislokasyon gibi çizgi kusurları, eğilme ya da topaklaşma gibi mozaik kusurları ortaya çıkmaktadır. Bu kusurlarda aygıt performansını değiştirebilecek etkiler oluşturabilir. Örneğin bu dislokasyonlar epitaksiyel tabakalarda $10^{-7} - 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ aralığında dislokasyonlar oluşur ve tabakalarda çatlamaya neden olur [6,7]. Genelde bu yapılarda daha baskın olan hacimsel ya da çizgisel kusurları ortadan kaldırmak için bu aygıtlarda GaN tampon ve kanat tabaka büyütülür. Bu tabakalar, InGaN/GaN çoklu tabaka büyütülmesi öncesinde InGaN ve Safir alttaş arasına büyütülerek, örgü uyumsuzluğu ortadan kaldırmak istenir. Bu sayede kristal yapı oluşumu ile yapısal özellikleri iyileşirken, elektriksel ve optik özellikler gelişir. Ayrıca bu LED yapılarında, GaN ve safir tabaka arasındaki %15'e varan büyük örgü uyumsuzluğu nedeni ile InGaN aktif tabakalar 1×10^8 'den $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 'ye kadar tedirgin edici dislokasyon (TD) içerebilmektedir [8,9]. Bu dislokasyonların, çekirdeklenme yoğunluğu ve ada birleşmesi etkileşimlerin bir dizi karmaşık sonucundan doğan bir enerjiyle oluştuğu düşünülmektedir [6]. Bu dislokasyonlar çok sayıda olmasına rağmen, InGaN tabanlı LED ve Lazer Diyodların (LD) etkinliği, geleneksel III-V grubu yarıiletken bileşik tabanlı LED ve LD'lere göre çok daha büyüktür. Birçok geleneksel optoelektronik aygıtta, aygıtın performansı; nokta kusurları ve malzemelerin yapısal kusurlarının etkisi ile sınırlı kalmıştır. Ancak, günümüzdeki III-V grubu azot tabanlı optoelektronik cihazların kusur duyarlılığının geleneksel yarı iletkenlere göre daha az olduğu araştırmalarda rapor edilmiştir [6-9].

Bu tez çalışmasında; ikinci bölümde fonksiyonel malzemelerden ve nanoteknolojiden kısaca bahsedilip, kristal yapılar, azotlu malzemelerdeki epitaksi ve bu işlemde kullanılan alttaş malzemeler tanıtıldı. Daha sonra fonksiyonel malzemelerin ve bu çalışmada üretilen LED yapıların temel taşı olan yarıiletkenler ve özellikleri ayrıntılı olarak anlatıldı. Devamında LED yapısı tanıtılıp, bu yapının büyütülmesindeki ana malzeme olan InGaN yarıiletkenlerin özellikleri ve bu yapılarda meydana gelen kusur tipleri hakkında bilgi verildi. Üçüncü bölümde ise LED yapıların üretimi ve analizleri için kullanılan sistemler tanıtıldı.

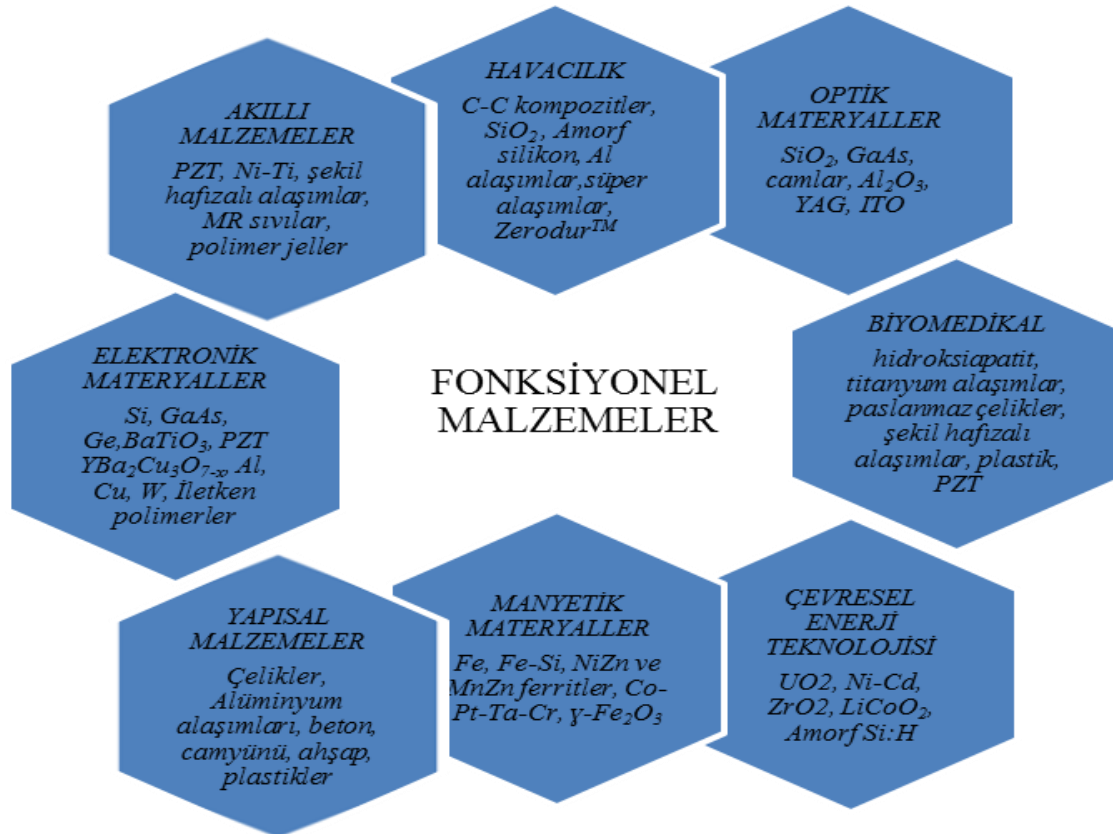
Dördüncü bölümde deneysel bulgular ve yorumlar başlığı altında aşağıda özetlenen çalışmalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında incelenen üç farklı InGaN çoklu kuantum kuyu mavi LED örnekleri (0001) yönelimli safir alttaş üzerine büyütüldü. Bu örneklerde yapısal olarak InGaN büyütme sıcaklığı dışında tüm parametreler sabit tutuldu. Örneklerin incelenmesinde kristalize tabakaların yapısal özelliklerini ayırt etmek için yüksek çözünürlükte simetrik-asimetrik düzlemlerin ters örgü uzay haritalaması HRXRD tekniği ile yapıldı. Bu sayede yapıdaki kusurlar daha iyi gözlemlendi. Literatürde, yaygın olarak yapılan hataların zorlama ve In (İndiyum) oranlarının birbirinden ayırt edilememesi kaynaklı olduğu sıkça rapor edilmektedir [10,11]. Çalışmamızda bu amaç doğrultusunda zorlama ve In oranlarının birbirinden ayırt etmek için *kübik denklem* (üçüncü derece denklem) kullanıldı [10]. Ters örgü uzayı haritalamasını optimize eden eksenlerle birlikte her bir ölçüm hassas bir şekilde yapıldı. Herbir ölçüm süresi ortalama yedi saat olmakla birlikte, toplamda tüm çekimler yaklaşık 112 saat sürdü. Bu sayede yapıdaki kusurlar bu yöntem ile daha iyi gözlemlendi. AFM görüntülerinden yüzeyin morfolojik yapısı incelendi. Yasak enerji band aralığı PL ölçümlerinden, InGaN yapının molekül titreşim bandları, FTIR spektrumdan ve LED'in ışığa karşı tepkisi de I-V ölçümleri ile belirlendi. Elde edilen sonuçlar, son bölümde sonuç ve öneriler başlığında özetlenmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan numuneler; Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde (NANOTAM) bulunan, MOCVD sistemi ile büyütülmüştür. Numunelerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan; HRXRD, AFM, FITIR, I-V ve PL cihazları ile incelendi.

2. TEMEL BİLGİ

2.1. Fonksiyonel Malzemeler

Sanayiden elektronik sektörüne birçok cihazın, uçak, bilgisayar, gibi birçok aracın veya sistemin temel malzemeleri fonksiyonel malzemelerden oluşmaktadır. LED, fotodetektör, foto lazerler vb. malzemelerin temelinde kullanılan arsenikli ve azotlu yapılar fonksiyonel malzemelere en iyi örnektir. Bu tür malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi bu aygıtların veya sistemlerin çalışma performanslarını arttıracaktır. Fonksiyonel malzemelerin genel sınıflandırması Şekil 2.1’de verilmiştir [12].



Şekil 2.1. Fonksiyonel malzemelerin genel sınıflandırılması

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi fonksiyonel malzemeler, sağlıktan mühendislik bilimlerine kadar teknolojinin ve Ar-Ge sektörünün en kritik materyallerinin tasarımlarında oldukça önemli roller oynamaktadırlar.

Bu tez çalışmasında incelediğimiz InGaN mavi LED yapılar, azotlu fonksiyonel malzemelere güzel bir örnek olup popüler teknolojinin son yıllardaki ilgi çeken alanlarından biri olmuştur.

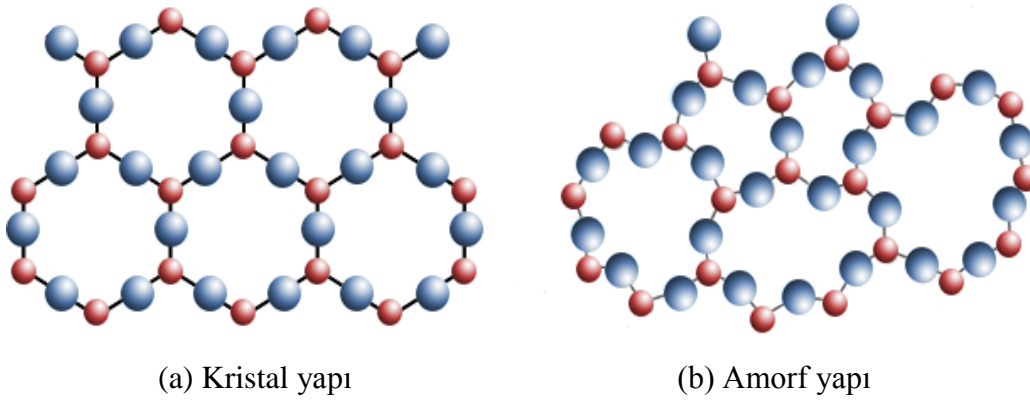
2.2. Nanoteknoloji

Maddeyi atomik ve moleküler seviyede kontrol etme bilimidir. Genel olarak 100 nm ve daha küçük boyutta malzeme, aygıt geliştirmekle ilgilidir. Bir nm, metrenin milyarda biridir. Atomların büyüklüğünün yaklaşık olarak 0,1 nm, bir biyolojik hücre çapının yaklaşık olarak bin nanometre, bir DNA molekülünün 2,5 nm büyüklüğünde, bir saç telinin ise yaklaşık olarak 100.000 nm kalınlığında olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda nanoteknoloji, atom ve moleküllerin bir araya getirilmesi ile nanometre ölçeklerde çeşitli yapıların oluşturulmasını sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanabilmektedir. Nanoteknoloji birçok alanı (aygıt fiziği, malzeme bilimi, elektronik, kimya, biyoloji) kapsayan bir bilim dalıdır. Nanoteknolojinin tıp, elektronik ve enerji üretimi gibi alanlarda uygulanma potansiyelinin yanında her yeni teknolojide olduğu gibi, nanomalzemelerin de sağlık ve çevre üzerindeki geniş ve etkin kullanım alanları oldukça dikkat çekmektedir [13]. Nanoteknoloji kelimesini ilk defa kullanan Tokyo Bilim Üniversitesi'nden Norio Taniguchi olmuştur. 1974'de yayınlanan bir çalışmada Taniguchi nanoteknolojiyi: “Nanoteknoloji genel olarak malzemelerin atom ya da molekül işlenmesi, ayrılması, birleştirilmesi ve bozulmasıdır” şeklinde açıklamıştır [14]. Nanoteknolojinin gelişmesini sağlayan buluş ise Tarama Tünelleme Mikroskobu'nun keşfedilmesidir. Bu mikroskop sayesinde iletken bir yüzeydeki atomların yerleri değiştirilebilmiştir. Bu gelişmeyi 1986'da karbon nanotüplerin keşfi izledi. 2000'de ABD'nin nanoteknolojiye yatırım yapması sonucu tüm Dünya'nın birçok ülkesinde nanoteknoloji araştırmaları başlamıştır.

Üçüncü devresinde olduğumuz nanoteknolojide, dördüncü nesil nanoteknolojik ürünlerin 2020 yılında ortaya çıkması beklenmektedir. ABD'de de bulunan Project On Emerging Nanotechnologies adlı kurumun yayınladığı listede sağlık, tekstil, elektronik, otomotiv, gıda ürünlerinden örnekler bulunmaktadır. Günümüzdeki nanoteknolojik ürünlerin birçoğu var olan bir malzemeye nano yapılarla suyu itme, güzel koku salma gibi ek özellikler eklenmiş halidir.

2.3. Kristal Yapılar

Katı yapılar, kristaller ve amorf yapılar olarak kabaca iki gruba ayrılabilir. Kristal katılarda atom ve moleküller belirli bir geometrik şekle ve düzene göre dizilirler. Amorf katıları ise lastiğe benzetebiliriz yani belirli bir düzenleri yoktur. Poli kristaller ise küçük kristal grupların bir araya gelmesiyle oluşmuş kristaller topluluğudur. Kristal ve amorf yapının molekül desenleri arasındaki fark Şekil 2.2’de verildi [15].



Şekil 2.2. (a) Kristal yapı (b) Amorf yapının molekül deseni

Kristallerin belirli bir yönelimde dizildiği ilk defa 1832 yılında William Hallowes Miller tarafından keşfedildiği birçok kaynak kitapta yer almaktadır. Bu keşiften sonra Miller, kendini tekrarlayan en küçük üç boyutlu yapıyı birim hücre olarak adlandırdı. Millerin çalışmalarından esinlenen Auguste Bravais 1850 yılında yayınladığı çalışması ile katı kristallerde; kübik, altıgen, rombohedral, tetragonal, ortorombik, monoklinik ve triklinik olmak üzere yedi temel birim hücre bulunduğunu açıklamıştır [16]. Birim hücreler ayrıca; basit kübik, hacim merkezli, yüzey merkezli ve taban merkezli olmak üzere dört adet Bravis örgüye sahiptir. Bu yedi birim hücre ve dört örgü yapısı, birbirini tekrarlayan kombinasyonları elendiğinde 14 temel Bravis hücresi elde edilir [16]. Basit kübik sistemde birim hücrenin sadece köşelerinde birer atom bulunur. Her bir köşedeki atom kendisine komşu 8 adet birim hücreye paylaştırıldığında birim hücre başına $1/8$ atom düşer, sekiz adet köşeden gelen katkı ile toplamda her birim hücrede bir atom bulunur. Hacim Merkezli Kübik sistemde, birim hücrenin köşeleri ve birde ortasında tek bir atom bulunur. Basit kübik sistemdekine benzer bir şekilde köşelerden bir atom ve merkezdeki müstakil atomla birlikte birim hücrede iki atom bulunur. Yüzey Merkezli Kübik sistemde ise her birim hücrenin köşelerinde ve yüzeyinde birer atom bulunur. Köşelerden gelen katkı basit kübik

sistemdeki gibi bir atomdur, bir yüzey atomunun iki birim hücre ile paylaşılmasından gelen katkı ise $1/2$ atom olup altı yüzeyden toplam üç atom katkı elde edilir ve böylece yüzey merkezli birim hücrede toplam dört atom bulunur [16].

2.4. Epitaksi

Tek kristal alttaş üzerine yönelimli kristal büyütme işlemine epitaksi denir. Büyütme işlemi; film ve alttaşın aynı tür malzeme olması durumunda homoepitaksi, farklı tür malzeme olması durumunda ise heteroepitaksi olarak adlandırılır. Tez çalışmamızda MOCVD ile büyütülen yapılar heteroepitaksi sınıfına dahil edilebilir [2,17].

Maksimum örgü uyumunun olduğu MOCVD ürünlerinin, kaliteli aygıt üretimi için oldukça önemli olduğu çok iyi bilinmektedir. Örgü uyumunda ilk bakılacak unsur tabiki kullanılacak alttaş seçimidir. GaN, son yıllarda yaygın olarak araştırılmaya başlanan ve alttaş olarak kullanılan önemli III-V grubu bileşik yarıiletkenlerdendir. Kaliteli GaN kristali elde edilebilmesi için yüksek basınç ve yüksek büyütme sıcaklığına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple GaN alttaş yerine alternatif olarak safir ve silisyum karbür (SiC) alttaşların kullanımı önerilmiş ancak GaN ile kullanılan bu materyaller arasındaki örgü uyumsuzluğu düşük kalitede filmler üretilmesine sebep olmuştur [18]. Ayrıca termal genişleme katsayısındaki farklılıklarda filmlerde gerilmeler ve dislokasyonların oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu gerilme ve dislokasyonların azaltılması için tampon tabaka kullanılması önerilmiştir. Bu öneriye göre alttaş üzerine öncelikle GaN veya AlN tabakası büyütülmektedir [18]. Bu tez çalışmasında büyüttüğümüz malzemenin (InGaN) özelliklerinden dolayı, tampon tabaka olarak GaN tercih edilmiştir. Bu tabaka ilk olarak amorf büyümeye başlamakta sonrasında tek kristal yapı oluşturmaktadır. Önerilen bu düşük sıcaklıklı tampon tabaka kullanılması yöntemi ile daha yüksek kalitede GaN film üretilmesine olanak sağlanmıştır.

2.4.1. Azotlu yapı büyütmede kullanılan alttaş malzemeler

Azotlu büyütme için bir malzemenin alttaş olarak seçiminde en önemli husus örgü uyumudur. Ayrıca kristal yapı, yüzey sonlanması, kompozisyon, reaktivite, kimyasal, ısısız ve elektriksel özellikler de göz ardı edilmemelidir.

Safir, GaN, silisyum ve silisyum karbür; InGaN malzemelerin büyütme aşamasında en çok kullanılan alttaşlardır. Bu gruptan, silisyum karbür ve safir daha yaygın olarak kullanılan iki alttaş malzemedir [19]. Son zamanlarda Silisyum alttaş üzerine yapılan çalışmalarda dikkat çekici bir artış görülmektedir [20,21]. Çizelge 2.1’de GaN, ve azotlu epitaksiyel tabakalar için yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri verilmiştir [22].

Çizelge 2.1. GaN ve azotlu epitaksilde yaygın olarak kullanılan alttaş malzemelerin bazı özellikleri

Alttaş	a (Å)	c (Å)	Termal Genleşme $\Delta a/a$ (K ⁻¹) (x10 ⁶)	Termal Genleşme $\Delta c/c$ (K ⁻¹) (x10 ⁶)	Termal İletkenlik W/cmK	Erime Noktası °C
Safir	4,765	10,298	7,5	8,5	0,4	2303
Si (Kübik)	5,4301	-	3,99	-	1,56	1412
6H-SiC	3,0806	15,1173	4,46	4,16	3,8	3102
GaN	3,199	5,184	5,59	3,17	2,3	2791

2.4.2. Safir alttaş

Bu tez çalışmasında büyüttüğümüz InGaN mavi LED yapılar için alttaş olarak safir kullanıldığı için bu alttaşın özellikleri hakkındaki bazı ayrıntılar aşağıda verildi.

Safir alttaş ilk olarak 1969’da Maruska ve Tietjen tarafından GaN büyütme için kullanılmıştır ve halen azotlu malzeme büyütmede kullanılan en yaygın alttaş malzemedir [23]. En önemli avantajları; büyütme teknolojisinin gelişmiş olması, düşük maliyeti, yüksek sıcaklıktaki kararlılığı ve kolay temizlenmesidir [18]. En büyük dezavantajlarından biri düşük termal iletkenliğe sahip olmasıdır. Bu durum diğer alttaş malzemelere göre daha zayıf ısı dağıtımını oluşturacağından, yüksek güç uygulamalarında kullanılmamasıdır. Bir diğer dezavantajı ise yalıtkan olmasından dolayı ölçüm için alınacak kontakların cihazın ön tarafında olma gerekliliğidir. Bu durumda cihaz için aktif kullanım alanı azalır ve daha karmaşık bir cihaz yapısı oluşur [19]. Ek olarak safir ve azotlu bileşik yarıiletken malzemeler arasındaki 10^{10} cm⁻² mertebesine varan büyük örgü sabiti uyumsuzlukları

epitaksiyel tabakada ciddi dislokasyonların oluşmasına yol açar [24]. Ayrıca numune soğutulduğunda safir ve azotlu malzeme arasındaki termal uyumsuzluk epitaksiyel tabakada gerilme meydana getirir. Kritik kalınlıktaki malzemeler için bu gerilme alttaş ve epitaksiyel tabakada çatlak oluşumuna yol açar [25]. Önemli diğer bir dezavantaj da safir bileşimindeki oksijenin büyütülen epitaksiyel tabakada istenmeyen bir katkıya neden olması ve arka plan safsızlığını artırmasıdır [26]. Bu tez çalışmasında da kullanılmış olan (0001) yönelimi; safir alttaş üzerine azotlu yapı büyütmede kullanılan en yaygın yönelimdir. MOCVD ile (0001) yönelimli safir üzerine büyütülen GaN epitaksiyel filmler Ga polariteye sahiptir [3].

2.5. Yarıiletkenler

Tüm maddeler elektriği az ya da çok iletirler. Örneğin; $\rho_{\text{metal}} 10^{-10} \Omega \cdot \text{cm}$, $\rho_{\text{yarıiletken}} 10^{-2}-10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ve $\rho_{\text{yalıtkan}} = 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ mertebelerinde öz dirence sahiptir. Öz direncin dirençle doğru orantılı, akımın ve dolayısıyla iletkenliğinde bunlara ters orantılı bir şekilde bağlı olduğu düşünüldüğünde her madde çok az da olsa bir iletkenidir denilebilir. Ayrıca elementlerin iletkenlik yalıtkanlık karakterleri elektronlarını bulundukları enerji bandlarıyla ayrıntılı olarak incelenebilir. Bir katının band yapısı, onun elektrik, manyetik ve optik gibi birçok özelliğini tanımlar. Atomlar birbirinden uzakta oldukları zaman, etkileşim gerçekleşmez ve elektron düzenleri birbirlerinin etkisiyle değişmez. Atomlar arasındaki mesafe azaltılırsa, dış yörüngeler üst üste gelmeye başlar ve artık atomlar bağımsız olmaktan çıkarlar. Kristallerdeki elektronlar enerji bandlarında bulunurlar. Bu bandlar, elektronların bulunmadığı bölgelerle birbirinden ayrılır. Elektronların bulunmadığı bu bölgelere yasak enerji aralığı (E_g) veya yasak band aralığı denir. En düşük boş band iletkenlik bandı (E_c) ve elektron seviyeleriyle doldurulmuş en yüksek band valans bandı (E_v) olarak tanımlanır. Valans bandı, kristaldeki her bir atom tarafından verilen valans elektronlarının sayısı ve band içinde mevcut olan elektron seviyeleri arasındaki orana bağlı olarak, tamamıyla veya kısmen dolu olabilir. Valans bandın doldurulması ve valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji aralığının büyüklüğü, bir kristalin iletkenlik, yarıiletkenlik veya yalıtkanlık karakterini tanımlar. 0 °K'de, tüm elektronlar valans bandında bulunur ve iletkenlik bandında birçok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyelle bu elektronlar kolaylıkla iletkenlik bandına geçebilir. Valans bandtaki bir elektrona çeşitli etkilerle yasak band aralığı kadar enerji aktarılırsa bulunduğu battan koparak serbest hale

gelerek, iletim bandına geçer. Fermi enerjisi (E_f), 0 °K'de bir elektronun doldurabileceği en son seviyenin enerjisidir.

Band yapısına bağlı olarak katıların sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılabilir;

- (i) Metallerde valans bandı kısmen dolu.
- (ii) Yarıiletkenlerde valans bandı tamamen dolu, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında küçük bir enerji aralığı mevcuttur.
- (iii) Yalıtkanlarda valans bandı tamamen dolu, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında büyük bir enerji aralığı mevcuttur.
- (iv) Yarımetallerde iletkenlik ve valans bandın üst üste gelmesinden dolayı valans bandı kısmen doludur.

En üst enerji kabuğunda 4 elektron bulundurup normal halde yalıtkan olan ve akım ışık ve ısı gibi dış etkenlerle uyarıldığında iletkenlik özelliği gösteren yarıiletkenler, gerek elektriksel gerekse diğer özellikleri, iletkenlerle yalıtkanlar arasında yer alır. Yarıiletken malzemelerin en önemli iki özelliği; serbest elektronların bulunduğu iletim bandı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bandı arasında bir yasak enerji aralığının bulunması ve bu malzemelere yapılacak çok düşük orandaki uygun etki ile bu yapıların elektriksel özelliklerinin büyük ölçüde değiştirilebilmesidir. Yarıiletkenleri; elementer, bileşik ve alaşım yarıiletkenler olarak üç grupta sınıflandırabiliriz.

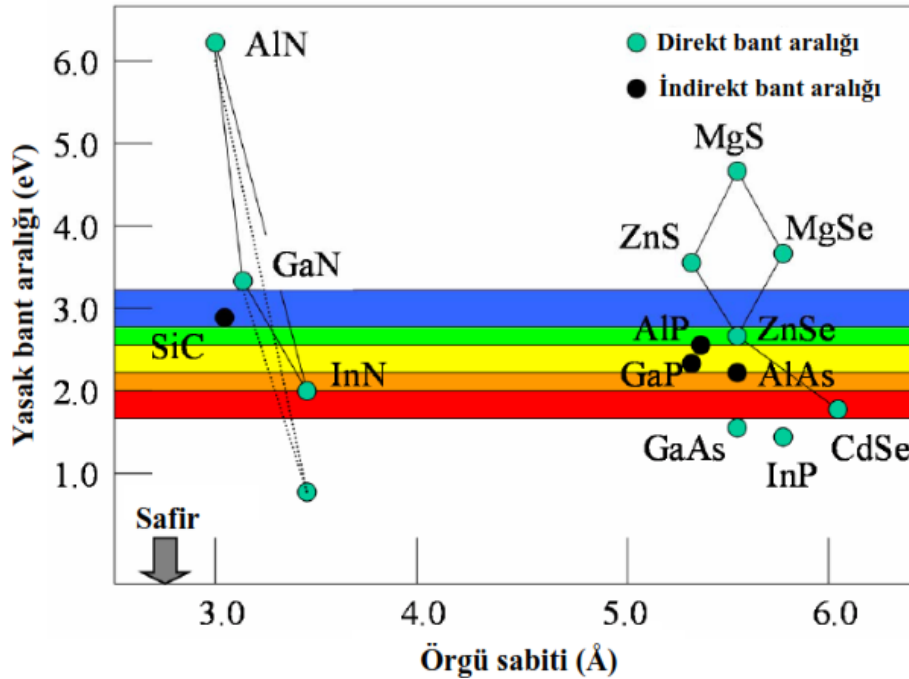
Elementer yarıiletkenler; Silisyum ve Germanyum (Ge) gibi aynı cins atomlardan oluşan yarıiletkenlerdir. Bu atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır ve doğada saf halde bulunurlar.

Bileşik yarıiletkenler, doğal halde bulunmayan ancak yapay büyütme teknikleri ile elde edilebilen GaAs, InP ve GaN gibi iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı kristal bağlanma iyonik ve kovalent bağlanmanın bir bileşimidir.

Alaşım yarıiletkenler; bileşiğe üçüncü bir elementin katılmasıyla oluşturulur. $In_xGa_{1-x}As$, $GaAs_{1-x}P_x$ ve $In_xGa_{1-x}N$ bunlara örnek olarak verilebilir. Burada x ilgili elementin alaşımdaki oranını temsil eder. Bununla birlikte $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ve $Ga_xAl_{1-x}As_yP_{1-y}$ gibi

dörtlü alaşım yarıiletkenleri elde etmek mümkündür. Burada x ve y alaşımı meydana getiren elementlerin oranlarını gösterir. İşlenmiş doğal yarıiletkenler, ikili bileşik yarıiletkenler, üçlü ve dörtlü alaşım yarıiletkenlerin tesisiyle; transistör, diyot, LED, Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT), entegre devre elemanları, fotodedektörler, lazerler gibi elektronik ve optoelektronik cihazlar üretilebilmektedir. Nanoteknolojide yarıiletken malzemelerin tercih edilmesi, üstün optoelektronik özellikler taşımalarının yanında küçük, hafif ve verimli olmalarındandır.

Farklı bileşimlerden oluşan katmanların örgü sabitleri arasındaki farklılıklar gerilmeli yapıların oluşumuna neden olmaktadır. Bu tabakalar üst üste büyütüldüğünde, yarıiletkenin yüzeyindeki boş bağlardan kaynaklanan “yüzey birleşmeleri” olarak adlandırılan birleşme merkezleri oluşur ve örgünün bu istenmeyen süreksizliği, “yüzey durumları” olarak adlandırılan çok sayıda enerji durumu oluşturur [27]. Bu boş bağlı atomlar aynı zamanda bir birleşme mekanizması gibi davranarak taşıyıcıları tuzaklayarak taşıyıcı ömrünü azaltır. Bu nedenle örgü uyumlu tabakaların üst üste büyütülmesi önem taşır. Şekil 2.3’de farklı yarıiletkenler için yasak band aralığı ve örgü sabiti verilmiştir [30].



Şekil 2.3. Farklı yarıiletkenler için yasak band aralığının örgü sabitine göre değişimi

Örgü uyumlu yapıların elde edilebilmesi için örgü sabiti bir birine en yakın materyallerin kullanılması gereklidir. Ayrıca örgü uyumu için uygun alttaşın seçimi önemlidir. Eğer

alttaş ile üstüne büyütülecek tabaka arasında örgü sabiti açısından önemli derecede farklılıklar var ise; örgü uyumu, doğrusal artımlı büyüme modu ile sağlanabilmektedir [28,29].

Bileşik ve alaşım yarıiletkenlerin epitaksiyel olarak büyütülmesi amacıyla çok sayıda teknik geliştirilmiştir: Kimyasal Buhar Birikimi (CVD), Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) bu tekniklerden bazılarıdır. Bu teknikler ile periyodik tablonun III-V, II-VI ve IV-VI gruplarındaki elementlerin uygun bileşimleri ile amaca yönelik çeşitli yarıiletken kristalleri büyütme mümkündür.

2.5.1. Yarıiletkenlerin katkılanması

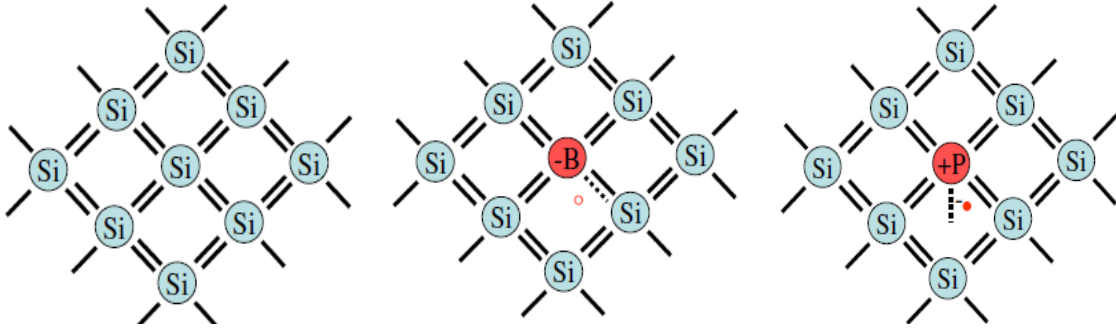
Katkılama, yarıiletken kristalini oluşturan atomlardan bir kısmının yerine uygun atomlarının yerleştirilmesi işlemidir. Arzu edilen özelliğe ve kullanım alanına bağlı olarak katkılama oranı ve cinsi değiştirilebilir. Yarıiletken kristale katkılanan elementler ya elektron verici ya da elektron alıcı olarak işlev görürler.

2.5.2. p-tipi ve n-tipi yarıiletken

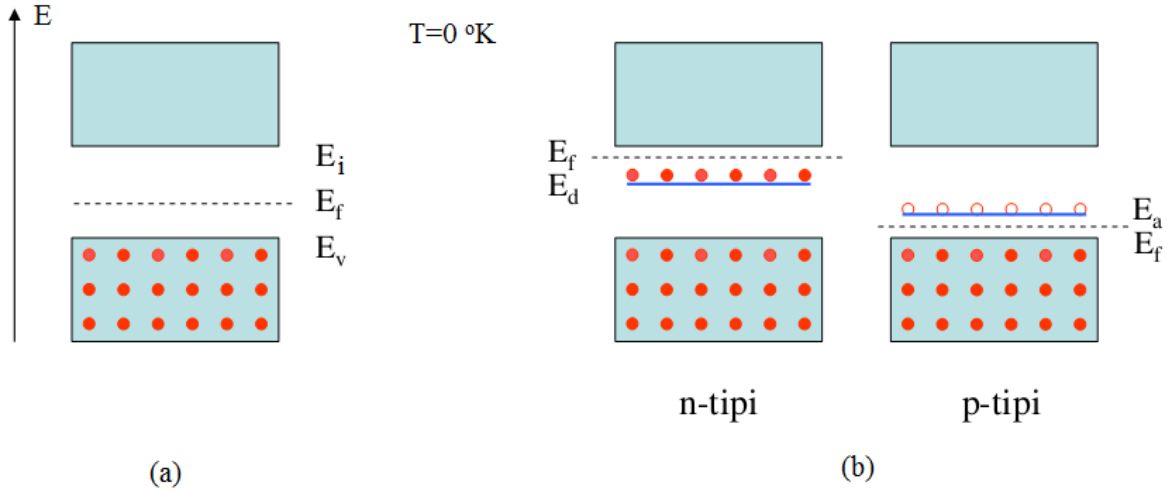
Alüminyum (Al), Bor (B), İndiyum (In) gibi en üst enerji kabuğunda 3 elektronu bulunan safsızlık elementleri Si veya Ge gibi son yörüngesi dört elektronlu olan doğal yarıiletkenlere katkıldığında oluşan yeni yarıiletkenlere pozitif yük taşıyıcıları ürettiği için p-tipi yarıiletken denir ve bu tip yarıiletkenlerde deşik yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır (Şekil 2.4-b) [31,32]. Böylece deşikler çoğunluk taşıyıcı, elektronlar azınlık taşıyıcı rolünü üstlenirler. Deşik (pozitif yük) üreten katkı maddeleri, alıcı olarak bilinir. Bu tip katkılı alıcı enerji düzeyi (E_a), yasak enerji aralığında olup valans bandının üstünde yer alırken, Fermi enerjisi (E_f) ise valans bandın üst kenarına daha yakındır [31] (Şekil 2.5). Çalışmalarımızda ürettiğimiz LED yapılarındaki p-GaN tabakayı üretmek için MOCVD büyüme sisteminde Mg katkılama yapılmıştır.

Arsenik (As), Fosfat (P), Kükürt (S), Antimon (Sb) gibi en üst enerji kabuğunda 5 elektronu bulunan safsızlık elementleri Si veya Ge gibi doğal yarıiletkenlere katkıldığında oluşan yeni yarıiletkenlere negatif yük taşıyıcıları ürettiği için n-tipi yarıiletken denir ve bu tip yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan

fazladır (Şekil 2.4-c) [31]. Bu tip yarıiletkenlerde ise elektronlar çoğunluk taşıyıcı deşikler azınlık taşıyıcı rolünü üstlenirler. Kristalde elektron üreten katkılar, verici olarak isimlendirilir. Verici enerji düzeyi (E_d), yasak enerji aralığında ve iyonlaşma enerjisi kadar iletkenlik bandının altında yer alır. Fermi enerjisi ise iletkenlik bandın üst kenarına daha yakındır (Şekil 2.5) [32]. Çalışmalarımızda ürettiğimiz LED yapılarıdaki n-GaN tabakayı üretmek için MOCVD büyüme sisteminde Si katkılama yapılmıştır.



Şekil 2.4. (a) Doğal halde Si atomu (b) Bor katkılanmış (p- tipi) Si (c) Fosfat katkılanmış (n- tipi) Si atomu



Şekil 2.5. (a) Özgün yarıiletken (b) n ve p tipi katkılı yarıiletken

2.6. Doğrudan ve Dolaylı Band Yapıları

Yarıiletkenlerin band boşluk yapısı, malzemenin elektriksel optiksel ve diğer özellikleri hakkında bilgi verir ve daha kullanışlı optoelektronik aygıt üretimi için bize ışık tutar. Bu malzemeler, doğrudan band aralığına sahip malzeme ve dolaylı band aralığına sahip

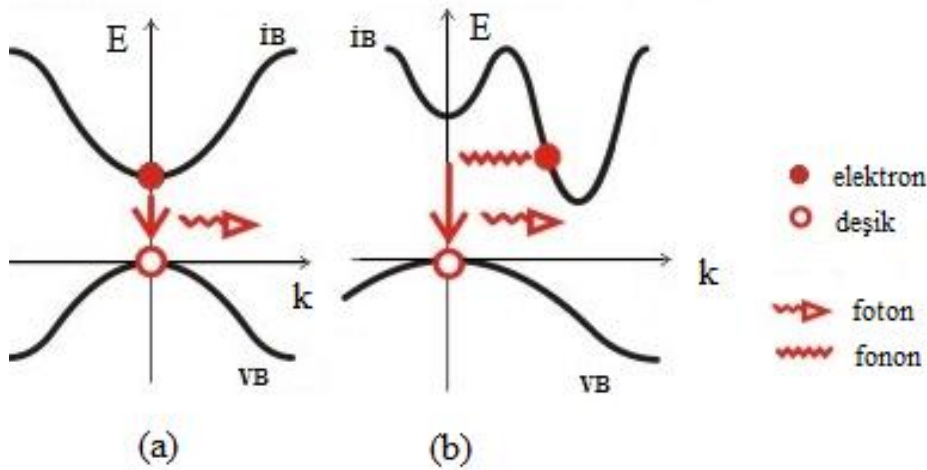
malzeme olarak iki grupta sınıflandırılır. Doğrudan ve dolaylı band aralığı gösterimi Şekil 2.6'da verilmiş olup k dalga vektörü doğrudan ve dolaylı band aralığı için farklıdır.

2.6.1. Doğrudan band aralıklı yarıiletken

Bir yarıiletkenin valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu aynı k değerinde ve sıfır ($k=0$) ise elektron en az yasak band aralığına eşit bir enerjiyi alarak iletkenlik bandına ulaşır. Bu durumda k dalga vektörü değişmediğinden momentum kristal örgüde harcanarak kaybolmaz (Şekil 2.6-a) [30]. Çalışmalarımızda önemli bir yere sahip GaN; değerlik bandının maksimum noktasıyla, iletkenlik bandının minimum noktası aynı doğrultuda olduğundan doğrudan band aralıklı bir yarıiletkendir.

2.6.2. Dolaylı band aralıklı yarıiletken

Bir yarıiletkenin valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu farklı k değerinde ($k \neq 0$) ise valans bandının bir elektronu, farklı k değerindeki iletkenlik bandına ulaşabilmesi için yarıiletken örgüsüne momentum aktararak geçiş yapar (Şekil 2.6-b).

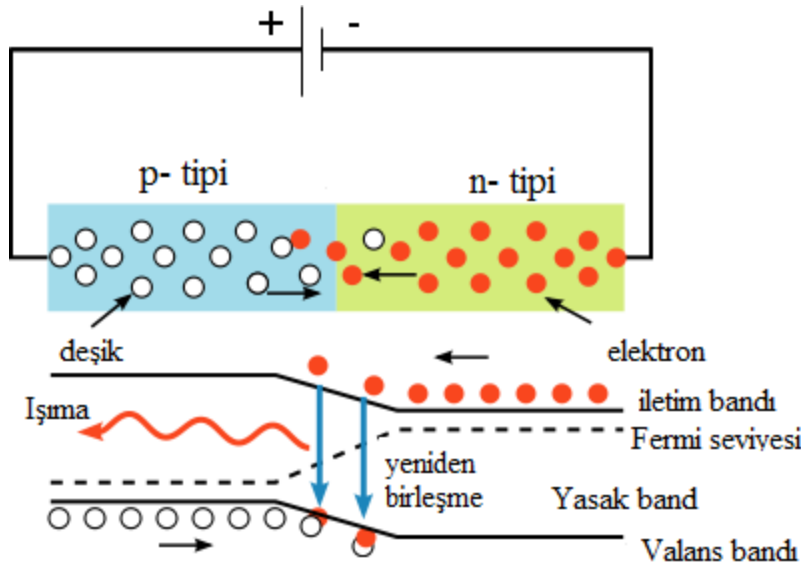


Şekil 2.6. (a) Doğrudan band aralığı (b) Dolaylı band aralığı

2.7. p-n Eklem

Işık yayan diyotlar morötesi, kızılötesi veya görünür bölgelerde kendiliğinden ışımaya yayabilen p-n eklemlerdir [33]. p-n eklemler, yük taşıyıcıları elektronlar ve deşikler olan

iki katmanın üst üste büyütülmeleriyle oluşur ve tabakaların epitaksiyel büyütülmesi esnasında uygun elementlerle katkılanmasıyla özellikleri ve performansları geliştirilebilir. Ayrıca p-n eklemeler difüzyon, iyon ekimi yöntemleri ile de oluşturulabilmektedir [33,34]. Eklemde p bölgesi yakınında negatif ve n bölgesi yakınında pozitif yük tabakası (tüketim bölgesi) oluşur ve bir engel potansiyeli meydana gelir [35]. Bu yük bölgesinde (hareketli taşıyıcı yoğunluğunun olmadığı bölge), pozitif yükten negatif yüke doğru bir elektrik alan oluşur ve bu elektrik alan, her bir yük taşıyıcı tipi için difüzyon akımına zıt doğrultudadır [33,35]. p-n eklemeye uygulanan gerilimle birlikte, elektron ve deşiklerin difüzyon akımı ile sürüklenme akımı arasındaki dengesi bozulur. Doğru beslemde uygulanan gerilim, tüketim bölgesi boyunca elektostatik potansiyeli azaltır ve bunun neticesinde sürüklenme akımının, difüzyon akımına göre azalmasıyla, p bölgesinden n bölgesine doğru artan deşik difüzyonu ve n bölgesinden p bölgesine doğru elektron difüzyonu oluşur. Böylece azınlık taşıyıcı enjeksiyonu meydana gelir yani, ilk durumun tersine bir itelenme hareketi oluşur ve eklem yakınında karşılaşan elektronlar ve deşikler yeniden birleşirler (Şekil 2.7) [36].

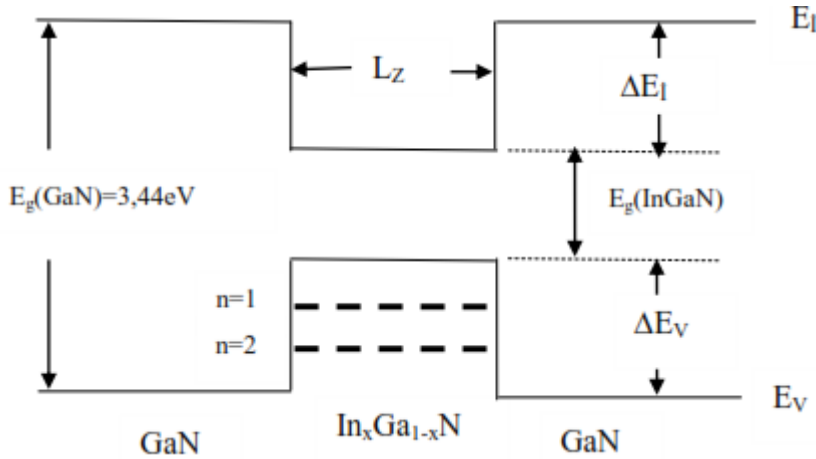


Şekil 2.7. p-n eklemde yeniden birleşme

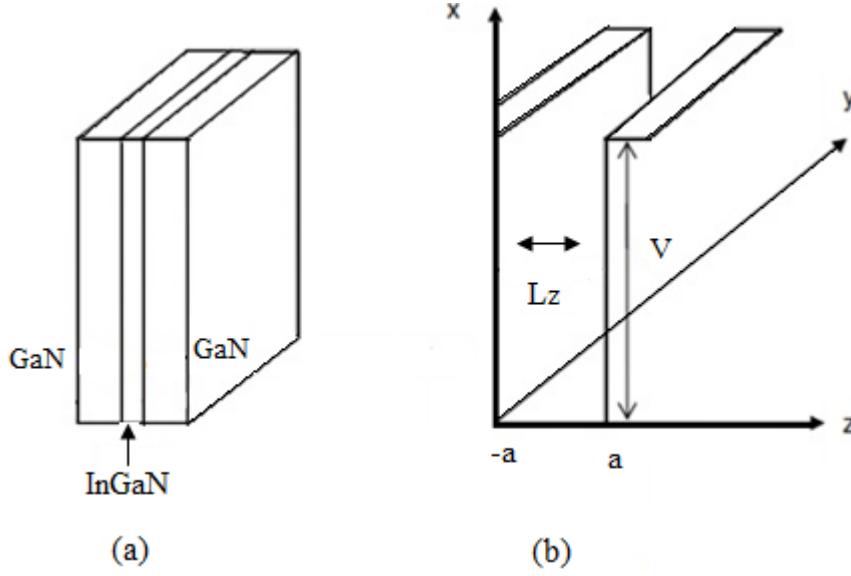
Yeniden birleşme sonucunda, eklemde foton salınımı gerçekleşir. Bu olay LED ve LD'lerin temelini oluşturur. LD aygıtlar uyarılmış emisyonu temel alarak çalışırken, LED aygıtlar kendiliğinden emisyonu temel alır.

2.8. Yarıiletken Kuantum Kuyular

InGaN gibi düşük band aralıklı bir yarıiletken tabakanın, GaN gibi InGaN a göre daha yüksek band aralığına sahip yarıiletken tabaka ile bir nevi sandviç oluşturarak üst üste büyütülmesiyle elde edilebilen kuantum kuyular birkaç nm kalınlığındadırlar [33,37]. Düşük band aralığına sahip malzemenin (InGaN) iletim bandı elektronlar için, valans (değerlik) bandı deşikler için kuantum kuyusunu oluşturur. Kuantum kuyular üst üste birden fazla peryotta büyütülerek çoklu kuantum kuyular oluşturulabilir. Kuantum kuyular arasındaki mesafe yakın olduğu durumda (süper örgü) kuantum kuyuların etkileşimiyle taşıyıcılar kuyular arasında tünelleme ile hareket edebilirler. Bir kuantum kuyusu, bir düzlemde iki boyutlu harekete zorlanmış taşıyıcıların hapsedildiği bir potansiyel kuyusu olarak da ifade edilebilir. Kuantum kuyu kalınlığı 20 nm'den küçük, yani elektron ve deşiklerin de Broglie dalgaboyu ile kıyaslanabilir seviyede olduğunda; kuantum kuyuda hapsolünme durumundan söz edilebilir, böylece kuyu içerisinde “enerji alt bandları” oluşur ve taşıyıcılar sadece kesikli enerji değerlerine sahip olurlar [27]. InGaN/GaN kuantum kuyusu enerji band yapısı Şekil 2.8’de [27] ve şematik olarak gösterimi Şekil 2.9’da verildi [38].



Şekil 2.8. InGaN/GaN kuantum kuyusu enerji-band yapısı



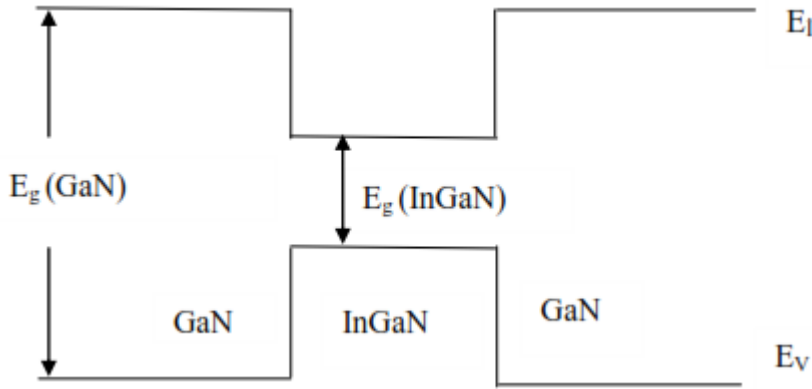
Şekil 2.9. InGaN/GaN kuantum kuyusunun şematik olarak gösterimi

Kalın ve yüksek band aralıklı GaN tabakaları arasında büyütülmüş, çok ince düşük band aralıklı bir InGaN aktif tabaka Şekil 2.9 (a)'da temsili olarak verildi. Şekil 2.9 (b)'de verildiği gibi, elektronlar sonlu bir kare potansiyeli ile ince InGaN tabakasında tuzaklanmaktadır. Burada V : kuantum kuyusunun yüksekliği, L_z : kuantum kuyusunun genişliği, a ve $-a$: kuantum kuyusu sınır şartlarıdır.

InGaN yarıiletkeninin band aralığı, GaN yarıiletkeninin band aralığından daha küçük olduğundan, InGaN bir kuantum kuyusu gibi davranır ve GaN tabaka hem elektron hem de boşluklar için bir potansiyel engeli oluşturur. InGaN ve GaN yarıiletkenlerinin band yapılarındaki bu farklılıktan dolayı, sistemin band diyagramında, iletkenlik ve valans bandı kenarları arasındaki geçiş bölgesinde basamak şeklinde süreksizlikler oluşmaktadır. Bu basamakların yükseklikleri "iletkenlik bandı süreksizliği" ΔE_c , ve "valans bandı süreksizliği" ΔE_v , olarak adlandırılmaktadır.

2.8.1. Tekli kuantum kuyusu

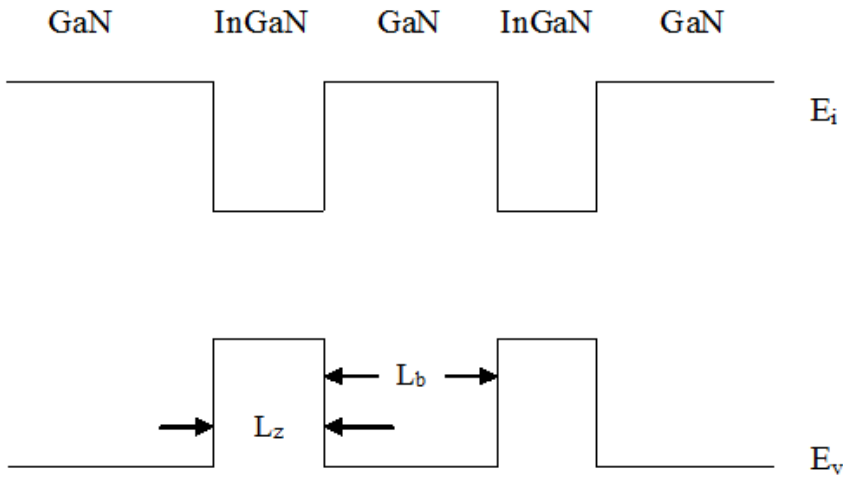
Tekli kuantum kuyuları, dar enerji band aralığına sahip yarıiletkenin (InGaN), daha geniş band aralığına sahip iki yarıiletken arasında (GaN) sandviç şeklinde büyütülmesi ile oluşturulur [39]. Şekil 2.10 tekli kuantum kuyusunu göstermektedir. Dar enerji band aralığına sahip yarıiletken, kuantum kuyusu etkisini oluşturan tabakadır.



Şekil 2.10. Tekli kuantum kuyusu (E_v : valans bandı enerji seviyesi; E_l : iletkenlik bandı enerji seviyesi)

2.8.2. Çoklu kuantum kuyusu

Tekli kuantum kuyulu yapıların ard arda büyütülmesi ile çoklu kuantum kuyulu yapılar elde edilir. Çoklu kuantum kuyulu yapılarda, kuyu genişliği potansiyel bariyer genişliğinden küçüktür. İki komşu kuyunun dalga fonksiyonlarının üst üste binmemesi bu bariyer genişliğinin bir sonucudur. Her bir kuantum kuyusu diğerinden yalıtıldığından, taşıyıcılar her kuyuda sınırlanırlar (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Çoklu kuantum kuyusu (L_b bariyer genişliği L_z kuantum kuyusunun genişliğidir)

kuantum kuyuda hareket eden parçacığın izinli seviyelerde enerjisi

Kuantum kuyuları içerisindeki izinli alt bandları bulmak için, parçacığın L genişliğindeki sonsuz kuyuda bulunduğunu düşündüğümüzde, kuyu içerisinde yer alan parçacığın kuyuda bulunabileceği izinli enerji seviyelerinin hesaplanması için Eşitlik 2.1 ile verilen zamandan bağımsız Schrödinger dalga denklemi çözümlenmelidir [27].

$$H\psi_n = E_n\psi_n \quad (2.1)$$

Burada H Hamilton operatörüdür ve kinetik enerji ile potansiyel enerjinin toplamına eşittir. Sonsuz kuyu içerisinde potansiyel enerji sıfırdır.

Kinetik enerji ve momentum sırasıyla; $T^2 = P^2 / 2m^*$, $P = -i\hbar\nabla$ eşitlikleriyle verilir. Burada m^* elektronun etkin kütlesi, P momentum işlemcisidir. Bu ifadeler Eşitlik 2.1'de yerine yazılıp, Eşitlik 2.2'deki çözüm fonksiyonu ve Eşitlik 2.3 ile verilen sınır şartlarıyla sonsuz engel yüksekliği için çözüm yapılırsa;

$$\psi_n(z) = A_n \sin k_n z + B_n \cos k_n z \quad (2.2)$$

$$\psi_n(0) = \psi_n(L) = 0 \quad (2.3)$$

$\psi_n(z) = A_n \sin k_n z$ ifadesindeki k_L ve k_n katsayıları, $kL = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots, k_n = n\pi / L$ değerlerini alır ve, $A_n = \sqrt{2/L}$ ifadesine eşit olur. Böylece parçacığın dalga fonksiyonu Eşitlik 2.4'deki gibi yazılabilir [40].

$$\psi_n(z) = \sqrt{2/L} \sin(n\pi / L)z \quad (2.4)$$

Parçacığın enerji ifadesi ise Eşitlik 2.5 ile ifade edilebilir,

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} k_z^2 = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \quad (2.5)$$

Burada n , kuantum sayısı, k_z ise z doğrultusundaki dalga vektörüdür. Schrödinger denklemi x ve y doğrultularında serbestçe hareket eden parçacık için benzer şekilde çözümlerse Eşitlik 2.6 ifadesi elde edilir [27].

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} \right) \quad (2.6)$$

Parçacığın hareket ettiği kuyuda, x ve y yönündeki genişlikler eşit ise ($L_x=L_y=L$), iki boyutta hareket eden parçacığın toplam enerjisi Eşitlik 2.7 şeklinde yazılır.

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* L^2} (n_x^2 + n_y^2) = \frac{\pi^2}{2m^*} k_{xy}^2 \quad (2.7)$$

Sistemde yer alan parçacıklar arasındaki, enerji ve momentum dağılımını anlayabilmek için, söz konusu sistemdeki bu parçacıkların durum yoğunluğu bilinmelidir [40].

2.9. Azotlu Yarıiletken Malzemeler

Bu kısımda ilk olarak azotlu malzemelerin bilimsel gelişimine, önemine ve kullanım alanlarına değinilerek, AlN, GaN ve InN yarıiletkenlerin bazı özellikleri [3,41] tartışılıp, azot temelli yapılarda görülen kusurlardan ve çok katmanlı yapılarda oluşan polarizasyonlardan bahsedilecektir. Farklı şartlarda büyütülen InGaN epitabaka, InGaN/GaN aktif tabakalar ve kuantum kuyulu yapıların özellikleri izah edilecektir.

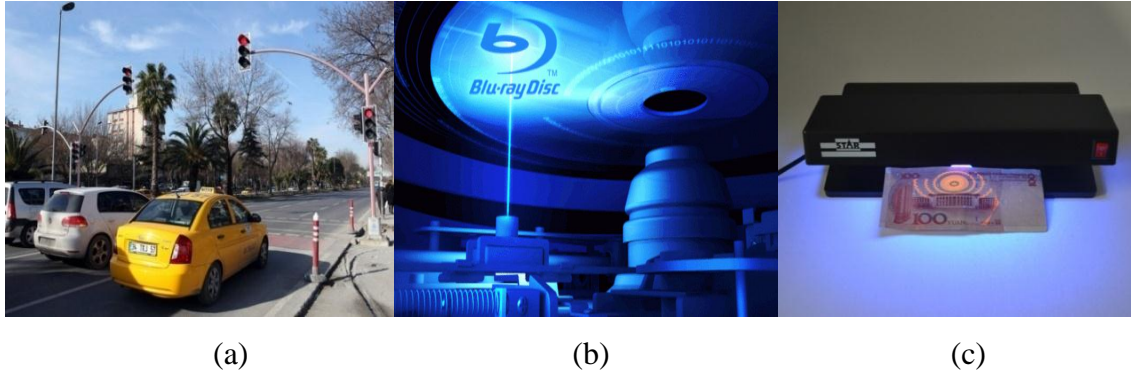
Nanoteknolojik sınıfı oluşturan optoelektronik cihaz üretimi için azotlu malzemelerin önemi son derecede büyüktür. Bu yüzden bu malzemelerin karakteristik özelliklerinin, büyütülme şartlarının ve yüzey durumlarının bilinmesi üretilecek aygıt kalitesi açısından oldukça önemlidir. Metallerden yalıtkanlara kadar uzanan bölgeyi kapsayan yarıiletkenler, katıların önemli bir sınıfını oluştururlar. Yarıiletkenler geniş bir teknolojik uygulama alanlarına sahiptirler. III-V grup yarıiletkenleri, yarıiletkenlerin önemli bir alt grubunu oluştururlar. InAs, GaAs, InSb, GaP, GaSb bu gruptaki en bilindik bileşik yarıiletkenleri iken InGaAs, AlGaAs, InGaN ve GaAsN III-V grubunun önemli alaşım yarıiletkenleridir.

Yapılan çalışmalarda; SiC ve elmasın yanı sıra, azot alaşımlı yarıiletkenlerin daha yüksek sıcaklıklarda cihaz işlemleri için daha yüksek potansiyel ve direnç değerlerini sağlayabilecekleri gözlemlenmiştir [42]. Bu nedenle, yüksek güç ve yüksek frekans gerektiren uygulamalar için III-V grubu azotlu alaşımlarının kullanımı giderek artmaktadır [42,43].

Bu materyallerden üretilen elektronik cihazlar, yüksek band aralığına, yüksek ısı iletkenliğine ve düşük özgün taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmalarından dolayı yüksek güç, yüksek sıcaklık ve yüksek frekanslarda çalışabildiğinden geniş uygulama alanlarına sahiptirler [44]. Bu uygulama alanlarından bazılarını aşağıda kısaca değinilmiştir.

Renkli göstergeler veya sokak aydınlatılması için beyaz veya renkli ışık yayan diyotlarda, lazer baskı veya optik veri depolama için mavi veya mor lazer diyotlarda, tanılama veya füze yönlendirme için morötesi dedektörlerde, radarlar veya iletişim için yüksek güç ve yüksek frekansta çalışan transistörlerde ayrıca su altı iletişimi gibi çok çeşitli ticari alanlarda kullanılmaktadırlar [43,45].

Optiksel okuma ve yazma teknolojisinde kullanılan yarıiletken lazerlerin yazma hızını ve CD, DVD gibi depolama aygıtlarının kapasitesini belirleyen en önemli faktör, dalgaboyudur. Çünkü küçük dalgaboylarında yansımalar ve kırılmalar azalır ve optik depolama yoğunluğu dalgaboyunun tersinin karesi ile orantılı olarak artar. Mesela azotlu malzemelerden elde edilen, mavi ve mor ötesi dalgaboylarında yayınım yapan lazerler, Blue-Ray disk olarak adlandırılan yeni nesil kayıt ve depolama teknolojilerinde kullanılmaya başlanmıştır [46]. Tek tabakalı bir Blu-Ray disk 25 GB'lık kapasiteye sahiptir. Ayrıca katman sayısı artırılarak kapasiteleri genişletilebilir. Günümüzde üç katmanlı 100 GB kapasiteli yeniden yazdırılabilir blu-ray diskler üretilmektedir. Resim 2.1 de ise Azot temelli optoelektronik aygıtların uygulama alanlarından bazıları gösterilmektedir.



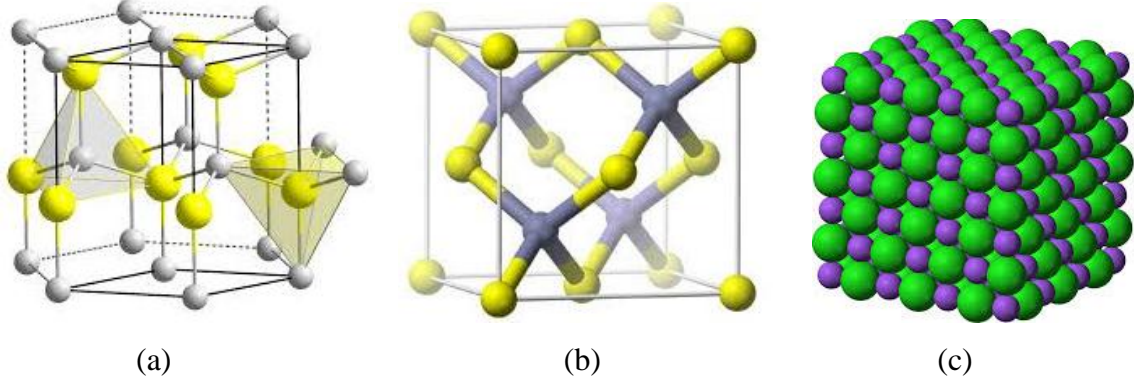
Resim 2.1. (a) Çok uzun mesafeden bile fark edilebilecek parlaklıkta olan LED'lerin kullanıldığı trafik lambaları, (b) 100GB kapasiteli tekrar yazılabilir üç katmanlı blue-ray diskler, (c) GaN temelli UV detektörler

Bu tez çalışmasında incelenen InGaN mavi LED yapının en önemli bileşiği olan GaN ile ilgili çalışmalar 20. yüzyılın başlarında yoğunlaşmıştır. Bu gurupda GaN üzerindeki çalışmaların üzerinde çok durulmasının sebebi onun ve GaN tabanlı malzemelerin doğrudan geniş enerji band aralıklarından faydalanılarak yüksek performanslı optoelektronik aygıtların üretilebilmesidir. 1970'li yıllarda Pankove ve arkadaşları ilk GaN tabanlı LED'i o zamanlarda henüz p tipi katkılanmış GaN'ın elde edilememiş olmasından dolayı Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapısı kullanılarak üretmiştir [47]. 1990'larda yüksek kalitede GaN epitabakaların üretiminin ve p-tipi iletkenliğin elde edilmesi gibi önemli gelişmeler, yapılan araştırmaları arttırmıştır. Devam eden bu yoğun çalışmaların sonucu olarak Amano ve arkadaşları ilk p-n eklemli LED üretimini gerçekleştirmişlerdir [48]. Daha sonraki süreçte aynı tip eklemli yapıların içsel soğurma, tam iç yansıma ve enjekte edilen taşıyıcıların aktif bölgede hapsedilememesi gibi sorunlardan dolayı birden fazla sayıda karışık tip eklemler LED üretiminde kullanılmaya başlamıştır [49,50]. Daha sonra spektrumun diğer bölgelerinde de LED tasarımları için $In_xGa_{1-x}N/GaN$ kuantum kuyulu yapılar çalışılmaya başlanmıştır [51,52].

2.9.1. III-V azotlu bileşiklerin kristal yapısı

Yarıiletkenler, farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip çok sayıda element ve bileşiği içine almaktadır. Bu element ve bileşikler, periyodik cetvelindeki konumlarına bağlı olarak, benzer davranışlı gruplara ayrılırlar. Elmas yapı, özdeş iki atomun oluşturduğu bir yüzey merkezli kübik yapıdır ve saf yarıiletkenler elmas yapıda kristalleşir. III-V grubu bileşik yarıiletkenlerde, üç değerlik elektronu ve beş değerlik elektronu olan atomlar bu

elektronlarını tetrahedral kovalent bağa katar. Bu gruptaki bağlanma tam olarak kovalent değildir. Bileşikteki iki element farklı olduğundan, bağ boyunca elektronların dağılımı simetrik değildir, yük dağılımı büyük atoma doğru kaymış vaziyettedir. Bu yük kayması III-V grubundaki kovalent bağlanmaya iyonik bir görünüm kazandırır. Bu yüzden III-V grup yarıiletken bileşiklerin bağlanmaları, kovalent ve iyonik bileşenlerin karışımı olmakla birlikte birçok yarıiletkende kovalent bağ baskındır [53,54]. III-Azot grubu yarıiletkenler (GaN, AlN ve InN), altıgen (wurtzite), zincblende (çinko karışım) ve NaCl (kaya tuzu) yapıda kristalleşirler (Şekil 2.12) [2,3]. Normal şartlar altında termodinamik olarak dayanıklı olan yapı, altıgen yapı olup; AlN, GaN ve InN en kararlı olan altıgen yapıda kristallenir. ZnS (çinko sülfür) yapıyı, elmas yapıdan ayıran tek fark bazı oluşturan iki atomun farklı olmasıdır. Her atom, öteki cinsten dört atom tarafından çevrilidir ve bu atomlar düzgün dört yüzlü yapıyı oluştururlar. Si, SiC, MgO, GaAs gibi kübik yapıdaki alt tabakalar üzerine (011) kristal düzleminde epitaksiyel olarak büyütme işlemi yapılarak ZnS yapıda kristalleşmiş GaN ve InN'ı kararlı hale getirilebilir. NaCl yapısının kararlı hale gelebilmesi ise ancak yüksek hidrostatik basınç altında mümkündür [53].



Şekil 2.12. (a) Wurtzite, (b) zincblende ve (c) NaCl kristal yapılarının şematik gösterimi

Altıgen kristal yapısı sıkı paketlenmiş altıgen (hcp) yapısına dayanır (Şekil 2.12-a). Yapı bir altıgen birim hücreden oluşur ve her örgü noktasında iki atomlu bir baz bulunur [53,54]. Altıgen yapı ve çinko sülfür kristal yapısı, tetrahedral bağlanma gösterdiklerinden dolayı birbirlerine benzer. Çinko sülfür yapıda en yakın komşu atomları arası bağ uzunlukları eşitken altıgen yapıda eşit değildir. Altıgen yapının birim hücresinde her atomdan altı adet bulunur ayrıca iki tane iç içe geçmiş ve sıkı paketlenmiş her alt örgüsünde bir tip atom bulunan altıgen örgüden oluşur. Asimetrik yapıdaki altıgen birim

hücresi “a” ve “c” olarak iki örgü sabiti ile tanımlanır. [001] yönündeki bağ diğer üç bağdan daha uzundur [53,54].

Bu tez çalışmadaki kullanılan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -kuyulu çoklu yapı numuneler altıgen yapıda kristalleşirler. Altıgen yapı, diğer grup III-azot yapılarıyla kıyaslandığında farklı simetrisinden dolayı farklı bir band yapısına yol açar. Bu yapıdaki grup III-azot yarıiletkenler doğrudan band aralıklıdır [3].

2.9.2. III-V azotlu bileşiklerin mekanik özellikleri

Malzeme biliminde; sertlik, esneklik sabitleri, hacimsel modül, Young modülü, Yield kuvveti gibi kavramlar mekaniksel özelliklerdir. Altıgen yapılarda C_{11} , C_{33} , C_{12} , C_{13} ve C_{44} olarak bilinen beş tane bağımsız esneklik sabiti vardır ve C_{11} [1000], C_{33} [0001] doğrultularındaki boyuna optik modu verir. C_{44} [0001] yöneliminde C_{66} ise [1000] yöneliminde yayılan enine modların ses hızından belirlenebilir ve C_{11} ve C_{12} sabitlerinin farkının yarısına eşittir. C_{13} ise [0011] gibi düşük simetrikli doğrultuda yayılan modların hızındaki diğer dört modülün değerlerinden hesaplanır [55]. Çizelge 2.2’de; AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen bazı yapısal parametreler verilmiştir [3].

Çizelge 2.2. AlN, GaN ve InN için deneysel gözlenen yapısal parametreler

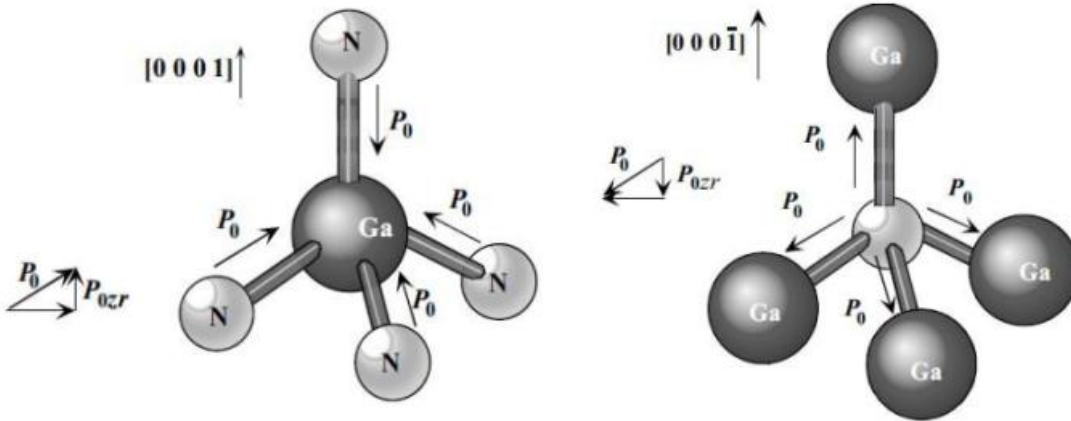
Örgü Parametreleri	GaN	InN	AlN
a (Å)	3,199	3,585	3,110
c (Å)	5,185	5,760	4,982
c /a	1,634	1,618	1,606
u	0,377	0,379	0,382
b (Å)	1,971	2,200	1,907
b_1 (Å)	1,955	2,185	1,890
b_1' (Å)	3,255	3,600	3,087
b_2' (Å)	3,757	4,206	3,648
b_3' (Å)	3,749	4,198	3,648
α	109,17	108,69	108,19
β	109,18	110,24	110,73

2.9.3. III-V azotlu bileşiklerin elektriksel özellikleri

GaN ve diğer azotlu malzemeler; geniş ve doğrudan band aralığı, yüksek sürüklenme hızı, yüksek mobilite değerleri ve yüksek kırınım voltajları gibi çok önemli elektriksel özelliklere sahiptir. Ek olarak uygulama alanına göre yeterli seviyede n-tipi ve p-tipi iletkenlikte sağlanabilirler. Elektriksel özelliklerin karakterize edilmesi için; Hall etkisi, Shubnikov de Haas etkisi (SdH) ve Akım-Voltaj ölçümleri gibi teknikler kullanılmaktadır [3].

2.9.4. III-V azotlu bileşiklerde polarizasyon

Polarizasyon etkisi; III-V azotlu yarıiletkenler grubu için hem temel fiziksel özelliklerin belirlenmesinde hem de alan etkili taranzistörler, LED'ler gibi aygıt uygulamalarında son derece önemlidir. Katılar için üç çeşit polarizasyondan birincisi; elektrik alan ile polar moleküllerin kısmi ya da tamamen düzenlenmesi sonucu oluşur, ikincisi; kısmen ya da tamamen iyonik kristallerde, pozitif ve negatif iyonların elektrik alan altındaki göreceli hareketi sonucu oluşan dipol tarafından indüklenen iyonik polarizasyon; üçüncüsü ise, tüm dielektriklerde bulunan elektronik polarizasyondur. Şekil 2.13'de görüldüğü gibi, Ga polarlığı c doğrultusundaki bağların Ga (katyon) atomundan N (anyon) atomuna doğru olduğu kabul edilen polarlıktır [3]. N polarlık ise Ga polarlığın tersi bir durumdur ve c doğrultusundaki bağların N atomundan Ga atomuna doğru olduğu kabul edilen polarlıktır [3]. III-V grubu azotlu bileşiklerde görülen altıgen yapıdaki; AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler Çizelge 2.3'de verilmiştir [41].



Şekil 2.13. Ga ve N polarlık

2.9.5. III-V azotlu bileşiklerin termal özellikleri

Örgü parametresindeki Kelvin başına düşen değişim, termal genişleme olarak ifade edilir. Termal genişleme katsayısı ise, a örgü parametresi için $\Delta a/a$ (αa) ve c örgüsü için $\Delta c/c$ (αc) şeklinde sembolize edilir, kusurlara ve serbest taşıyıcı yoğunluğuna bağlıdır [3]. Isıl iletkenlik (k), kinetik özelliklerin belirlenmesinde önemli bir malzeme özelliği olup, titreşim, dönme ve serbestlik elektronik derecesi ile belirlenir.

2.9.6. III-V azotlu bileşiklerin optik özellikleri

Hem iç hem de dış etkiler yarıiletkenlerin optik özelliklerini etkiler. Bir yarıiletkenin fotoluminesans olayı üç temel süreçte oluşur. Bu süreçler;

Uyarılma: Tek dalgaboylu optik uyarma kaynağı tarafından, $h\nu$ kadar bir enerjiye sahip uyarıcı fotonlar tarafından uyarılan malzemedeki elektronlar değerlik bandından iletim bandına çıkarlar. Kaynağın enerjisi yarıiletkenin yasak band aralığından (E_g) büyük olursa elektron-deşik çiftleri oluşur [3].

Termalizasyon: İlk anda üretilen ve çok yüksek kinetik enerjiye sahip elektron-deşik çiftleri, akustik ve optik fonon yayınımlı yoluyla 0,2-100 ps gibi küçük bir zaman diliminde hızlı bir şekilde boşaltarak, band kenarına (deşikler; valans bandının maksimumu yönünde, elektronlar; iletim bandının minimumu yönünde) doğru hareket eder ve termal dengeye ulaşırlar [3].

Yeniden birleşme: Elektron-deşik çiftlerinin yeniden birleşmesiyle elektron valans bandına geri dönerken fazlalık enerji ışımlı veya ışımazsız olarak salınır.

Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için optiksel, elektriksel, mekanik, termal ve polarizasyon parametreleri Çizelge 2.3'de verildi [3].

Çizelge 2.3. Altıgen yapıdaki AlN, GaN ve InN için bazı fiziksel parametreler

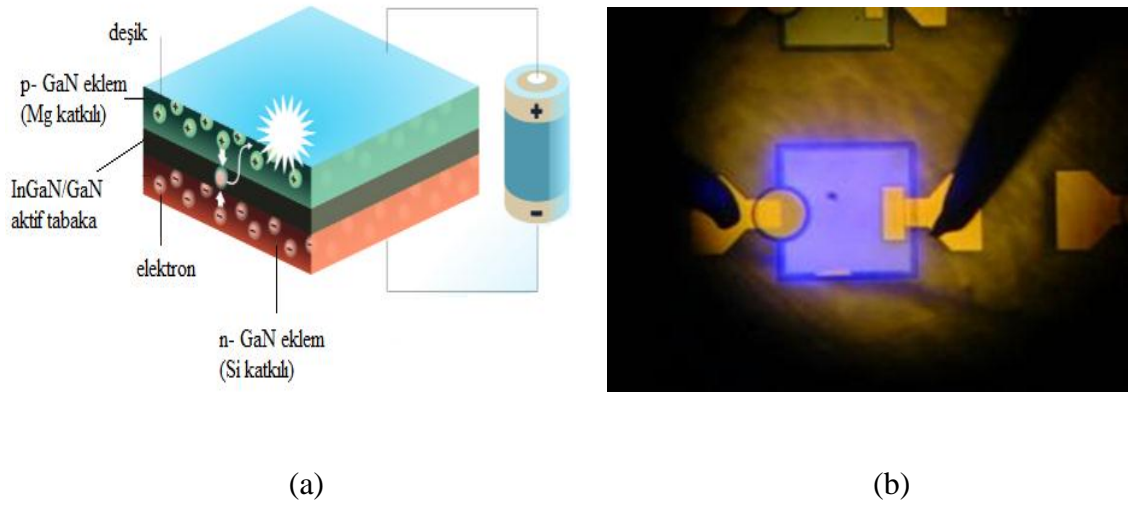
Parametreler	InN	GaN	AlN
Optiksel Özellikler			
Enerji bant aralığı, $E_g(\Gamma)$ (eV)	6,20	3,42	0,78
Kırılma indisi, n	2,15	2,35	2,80
Dielektrik sabitleri	$\epsilon_r=8,50$ $\epsilon_\infty=4,77$	$\epsilon_r=10,40$ $\epsilon_\infty=5,33$	$\epsilon_r=15,30$ $\epsilon_\infty=8,40$
Polarizasyon			
E_{33} (C/m ²)	1,46	0,73	0,97
E_{31} (C/m ²)	-0,60	-0,49	-0,57
ϵ_{11}	9	9,50	-
ϵ_{33}	10,70	10,40	14,60
P_{KP} (C/m ²)	-0,08	-0,03	-0,03
Elektriksel Özellikler			
Elektron etkin kütlesi, m^* (kg)	0,33 m_0	0,20 m_0	0,11 m_0
Elektron Mobilitesi, μ (cm ² /V.s)	300	1500	100-2100
Doyum sürüklenme hızı, v_s (cm/s)	1,40x10 ⁷	2,50x10 ⁷	2,50x10 ⁷
Mekanik Özellikler			
C_{11} , (GaP)	345-411	296-396	190-271
C_{12} , (GaP)	125-149	120-160	104-124
C_{13} , (GaP)	90-127	80-158	92-121
C_{33} , (GaP)	373-395	209-405	182-224
C_{44} , (GaP)	96-125	81-105	10-48
Poisson oranı, ν	0,216	0,372	--
Hacim modülü, B (GaP)	160-218	195-245	125-147
Young modülü, E (GaP)	295-374	150	--
Kesme modülü,	117-154	121	43
Akma dayanımı, σ_Y (GaP)	1000 °C'de 0,3	900 °C'de 0,1-0,2	--
Sertlik (GaP)	Nano;11,2	Mikro; 10,2 Nano; 8-20	Mikro;17,7 Nano; 18
Elektronik deformasyon potansiyel, E_{ds} (eV)	7,10	8,54	9,50
LO fonon enerjisi, $\hbar \omega_{LO}$ (meV)	73	91,20	99,20
Termal Özellikler			
Isısal genleşme (K ⁻¹)	$\Delta a/a=2,85 \times 10^{-6}$	$\Delta a/a=5,59 \times 10^{-6}$	$\Delta a/a=4,20 \times 10^{-6}$
	$\Delta c/c=3,75 \times 10^{-6}$	$\Delta c/c=3,17 \times 10^{-6}$	$\Delta c/c=5,30 \times 10^{-6}$
Isısal iletkenlik, (W/cmK)	0,80	2,30	3,20
Oluşum ısısı, ΔH_{298} (kcal/mol)	-4,60	-26,40	-64
Erime noktası (°C)	1100	>1700	3000

2.10. Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode, LED)

Yarıiletkenlerin ışık yayabildiği ilk defa 1900'lerin başlarında Henry Round tarafından rapor edildi. İlk LED modeli ise 1920'de Oleg Vladimirovich Losev tarafından üretildi. LED'in babası olarak bilinen Nick Holonyak Jr, 1962 yılında ilk ışık yayan diyotu keşfederken 1972'de öğrencisi M. George Craford tarafından kırmızı LED'den 10 kat daha parlak ilk sarı LED üretildi [56]. Daha sonra Shuji Nakamura İndiyum Galyum Nitrür (InGaN) yarıiletkeniyle yüksek parlaklıkta mavi LED üretilebileceğini kanıtladı [57,58]. Bu çalışma Shuji Nakamura'ya 2006 Millennium Technology Prize ödülünü getirmiştir.

Klasik ışık kaynaklarında görünür ışık elde edebilmek için ya metal filamanlar ısıtılır ya da bir gaz boşalmasındaki morötesi ışıma dönüştürülür. Akkor lambalar elektrik enerjisinin sadece %5'ini görünür ışığa dönüştürürler. Enerji tasarrufu yapan sıkıştırılmış floresan lambalar için bu oran % 20'dir [3]. Günümüzde kullanılan LED'ler, floresan lambadan ortama 4-5 kat, normal bir ampulden yaklaşık 20 kat daha verimlidir ve enerjinin %90'ından fazlasını ışığa çevirebilirler. Avantaj hesabı yapıldığında, akkor flamanlı lamba veya tasarruflu lamba gibi diğer aydınlatma teknolojilerine kıyasla %25 ile %75 arasında tasarruf sağladığı söylenebilir.

LED yapılarıdaki ışınım, içerisinden elektrik akımı geçirilen, elektron yoğunluğu yüksek n-tipi ve pozitif yük yoğunluğu yüksek p-tipi bölgeden oluşan p-n eklem arasındaki katı bir kristal ile sağlanır. Kristale doğru akım uygulandığında, p-n eklemdeki elektron ve deşik fazlalıkları yeniden birleşme ile dengelenir ve ışıma gerçekleşir [59]. Bölüm 2.8'de p-n eklem mekanizması ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan ve Bilkent NANOTAM'da büyütüğümüz, 5 nm kalınlıktaki çoklu kuantum kuyulu mavi LED yapıların çalışma prensibi ve uygun kontaklar alındığındaki yapacağı ışıma görünümü sırasıyla Resim 2.2 (a) ve (b)'de verildi.



Resim 2.2. (a) LED yapının çalışma prensibi (b) LED yapının ışınması

LED'lerden elde edilen ışının rengi, ışığın dalga boyuyla, dalga boyu ise yarıiletken kristalin üretildiği malzemelerin band aralığı ile ilişkilidir. LED ışınımdaki bir renk değişik malzemelerle elde edilebilir; mesela ilk uygulamalarda kırmızı LED'ler genelde galyum arsenat (GaAs) malzemenin kullanımıyla elde edilmiştir. Ayrıca kırmızı veya sarı renkteki ışınım; alüminyum indiyum galyum fosfat (AlInGaP), yeşil ya da mavi ışınım; InGaN tabanlı LED'lerden elde edilebilir [3]. Örneğin, I. Akasaki ve çalışma arkadaşları AlGaIn/GaN temelli, S. Nakamura ise InGaN/GaN temelli çoklu kuantum kuyu kullanarak mavi ışınım veren LED'leri ürettiler [4,30,49]. İncelediğimiz InGaN/GaN mavi LED'ler; InN (0,7 eV) ve GaN (3,4 eV) kaynaklarından oluşmuştur ve A, B ve C örnekleri için sırasıyla 2,88; 2,84 ve 2,86 eV yasak enerji band aralığına sahiptir.

LED teknolojisinde önemli bir sorun olan beyaz ışığın elde edilmesi; renk karıştırma veya fosforlama yoluyla gerçekleştirilebilir. Kullanılan fosfor, mavi ya da mavi-yeşil LED'lerin yaydığı ışınımın birazını soğurur ve sarı-turuncu ışımaya yayar, üst üste oluşan bu emisyonlar beyaz ışık olarak algılanır. Bu yöntemler aşağıda Bölüm 2.10.1'de ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Son dönemlerde $In_xGa_{1-x}N$, GaN gibi malzemeler kullanılarak mor ötesi, mor, mavi, yeşil ve kehribar renkte ışınım yapan diyotlar üretilmektedir [3]. Çizelge 2.4'de üretilen bazı LED'lerin üretildiği malzemeye göre rengi, dalga boyu ve yasak enerji band aralığı verilmiştir.

Çizelge 2.4. LED'in üretildiği malzemelere göre elde edilen ışığın rengi, dalgaboyu ve yasak enerji band aralığı

Renk	Dalga boyu (nm)	Yarıiletken malzeme	Yasak Enerji band aralığı (eV)
kızılötesi	940	GaAlAs/GaAs	< 1,60
kızılötesi	880	GaAlAs	1,60
parlak kırmızı	700	GaP	1,80-2,10
kırmızı	655	GaAsP/GaAs	1,80-2,10
çok parlak kırmızı	635	GaAsP/GaP	1,80-2,10
turuncu	610	GaAsP/GaP	2,20
yeşil	585	GaAsP/GaP	2,60
çok parlak yeşil	568	GaP	2,60
ultra yeşil	502	InGaN/SiC	2,60
saf mavi	470	InGaN/SiC	3,0-3,5
ultra mavi	430	GaN/SiC	3,0-3,5
morötesi	385	GaN	>3,5

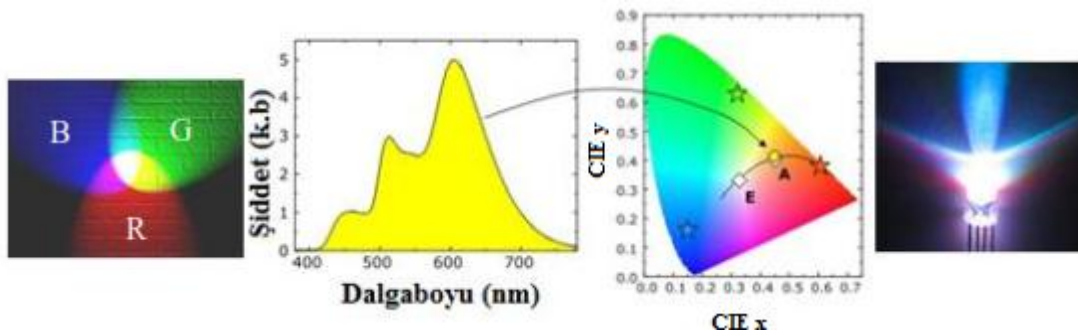
Yüksek parlaklıktaki azot temelli değişik renklerde ışınım yapabilen LED'ler, teknolojinin hemen hemen tüm alanlarında, sağlık, eğitim, otomotiv, tarım sektörlerinde, ışıklı reklam panolarında, trafik lamba ve işaretlerinde, aydınlatma sistemlerinde, her türlü gösterge ve ışıklı panellerin kullanıldığı mekanlarda, alışveriş merkezlerinde dev ekran televizyonlarda kullanılmaktadır. Son zamanlarda özellikle mavi LED'ler yenidoğan kliniklerindeki küvezlerde neoblu LED fototerapi denilen yöntemle sarılık tedavisinde, akne, sedef gibi hastalıkların ve cilt kırışıklıklarının tedavilerinde, kırmızı LED'ler cilt yenileme gibi plastik cerrahi alanında, sarı LED'ler ise lenfatik sistem üzerindeki tedavilerde kullanılmaktadır. Ayrıca ABD Dallas'ta, Dallas Cowboys stadyumunda bulunan, "Diamond Vision" adındaki Mitsubishi Electric tarafından geliştirilen dünyanın en büyük HD televizyonu; 1058 metrekare ekran alanı (yani 3268 adet 52 inç televizyonun ekrana eşit) ve 600 tonluk ağırlığıyla Guinness Rekorlar kitabına girdi. Ekranında 10.584.064 adet LED hücresi bulunmaktadır (Resim 2.3).



Resim 2.3. Mitsubishi Electric tarafından "Diamond Vision" adıyla geliştirilen dünyanın en büyük HD LED televizyonu

2.10.1. LED'den beyaz ışınım elde edilmesi

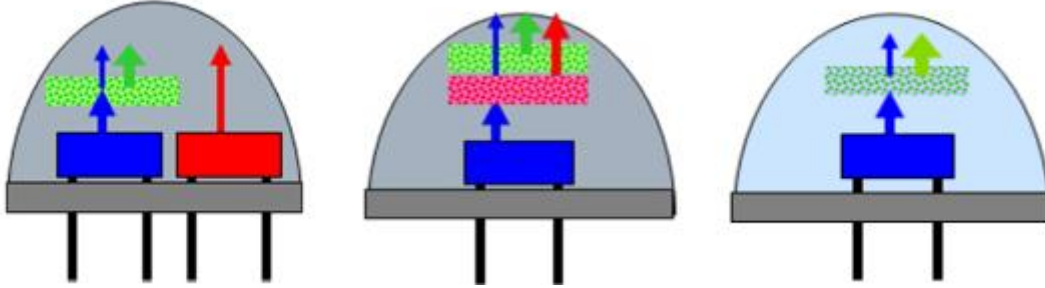
LED'lerden beyaz ışık elde etmek için temelde iki yöntem vardır. Birinci yöntem RGB olarak adlandırılır ve kırmızı, yeşil ve mavi ışık yayan LED'ler kullanılarak açık beyaz ışık elde edilir (Şekil 2.14) [3].



Şekil 2.14. RGB yöntemi ile beyaz ışık yayan LED'in spektrumu CEI'si ve 5mm boyutlarında bir RGB LED'in ışınması

Fakat bu yöntemdeki yeşil LED'in mavi ve kırmızı LED'e kıyasla verimliliğinin düşük olmasından dolayı eşgüdüm sorunu en önemli dezavantajıdır [60-62].

İkinci yöntemde; mavi ve morötesi yayınım yapan LED'lerin ışınımlarının bir kısmı fosfor kullanımıyla diğer renklere dönüştürülerek, beyaz ışık elde edilir. Şekil 2.15'de beyaz LED üretimi için fosforlama yöntemleri gösterildi [3].



Şekil 2.15. (a) mavi+kırmızı LED - yeşil fosfor (b) mavi LED - kırmızı+yeşil fosfor (c) Mavi LED - sarı fosfor

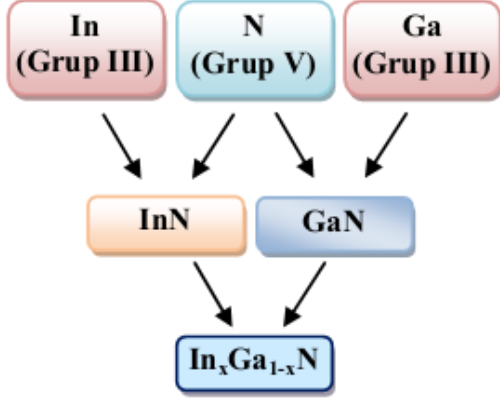
Şekil 2.17 (a)'da mavi ve kırmızı iki LED kullanılır. Yeşil renk için mavi ışığın bir kısmı yeşil renkli fosfor tarafından emilir, mavi ve yeşil olarak tekrar yayımlanır. Böylece üç temel renk elde edilmiş olur. Şekil 2.17 (b)'de mavi LED'den kırmızı ve yeşil fosforlar ile üç temel renk elde edilir. Şekil 2.17 (c)'de ise InGaN/GaN tabanlı mavi LED, sarı ışık yayan ince bir fosfor tabakası ile kaplanıp oluşacak sarı ışık ve mavi ışığın birleşimiyle beyaz ışık elde edilir. Günümüzde üretilen beyaz LED'lerde çoğunlukla bu yöntem kullanılmaktadır. Maliyetinin düşük oluşu ve %80 den büyük CRI değeri bu yöntemin avantajı, fosforlama işleminin ışığın etkisini azaltması ve ışık karakterinin değişim göstermesi ise dezavantajı olarak gösterilebilir.

Elde edilen parlak beyaz ışınım her alanda tercih sebebi değildir. Örneğin ev ortamlarında gün ışığına kayan ılık beyaz tercih konusu olabilir. Bu şekildeki ışık mavi LED ve sarı fosfor üzerine kırmızı fosfor ilave edilerek elde edilebilir. Yalnız buradaki en büyük sorun ışık veriminin düşmesidir. Tüm bunların sonucunda hem kaliteli hem de verimli beyaz ışık eldesi için UV LED ile birlikte kalın tabaka halinde kırmızı, yeşil ve mavi fosfor kullanılabilir [3].

2.11. InGaN Yarıiletken Alaşımının Özellikleri

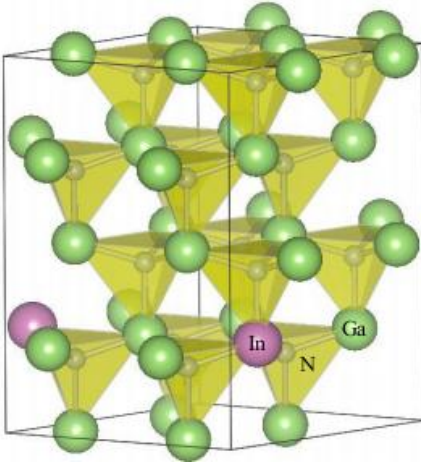
III-Azot Grubu ile yapılan çalışmalarda önceleri GaN, AlN ve InN gibi ikili bileşiklere önem verilmiş, daha sonra bu ikili bileşiklerle ilgili çalışmalarla birlikte bunların üçlü ve

dörtlü alaşımları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2.16'da InGaN alaşımının III-V grubu elementlerinden oluşumu temsilen gösterildi [27].



Şekil 2.16. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımlarının büyütülmesinde kullanılan InN ve GaN yarıiletken bileşikler ve bu bileşikleri oluşturan III-V grubu elementleri

III grup elementi olan İndiyum'un V grubu elementi olan Azot ile bileşik yapması ile InN ve aynı şekilde III grup elementi olan Galyum'un V grubu elementi olan Azot ile bileşik yapmasından GaN oluşur. Bu bileşiklerde değişik In x oranlarında $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yarıiletken alaşımını oluştururlar. Altıgen yapıdaki GaN ve InN bileşikleriyle oluşan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı da altıgen yapıdadır (Şekil 2.17) [27].



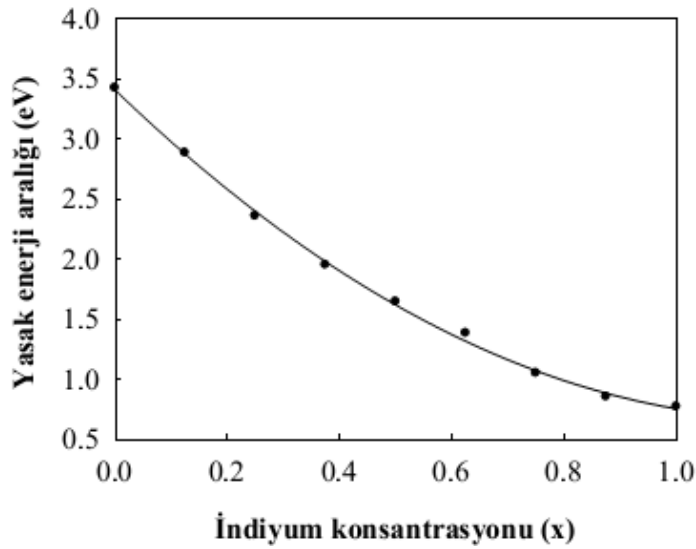
Şekil 2.17. InGaN'in kristal yapısı

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının örgü sabitleri ise bu alaşımı oluşturan GaN ve InN bileşiklerinin örgü sabitleri ile lineer bağıntılıdır [63]. InGaN alaşımındaki In kompozisyonu Vegard yasası

denklemleri kullanılarak belirlenebilir. InGaN'nin kompozisyona bağılı yasak enerji aralığı enerjisinin değişimi, Eşitlik 2.8 ifadesi ile verilir.

$$E_g(x) = E_g(\text{GaN}) + x[E_g(\text{InN}) - E_g(\text{GaN})] - bx(1-x) \quad (2.8)$$

Burada b, bükülme (bowing) parametresidir [64]. Bu alaşımın yasak enerji aralıklarının In kompozisyonuna göre değişimi Şekil 2.18'de verildi [65].



Şekil 2.18. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının In kompozisyonunun (x) fonksiyonu olarak yasak enerji aralığı

Nakamura'nın $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı üzerine yaptığı çalışmalarla, bu malzemenin çektiği ilgiyi daha da arttırmıştır [66,67]. Bu yapının geliştirilmesiyle, mavi, yeşil ve sarı renkli yüksek parlaklıkta ışık yayan diyotların ve mavi lazer diyotların yapımı giderek hızlanmıştır [68,69]. InGaN yarıiletkenler tasarlanan optoelektronik aygıtlar için kristal katmanlarının kuantum kuyusu (QW) olarak kullanılmaktadır [70]. Tüm bu gelişmelerle birlikte InGaN/GaN kuantum kuyulu yapıların büyütülmesinde karşılaşılan bazı teknolojik problemlerden biri, GaN ve InN oluşumundaki iç enerji farklılıkları nedeniyle InGaN büyütme sürecinde yüzeyden In ayrılmasıdır [71]. Bu durum malzemedeki In kompozisyonunda dalgalanmalara yol açar ve bu yarıiletkenlerle üretilen cihaz verimlilikleri etkilenir. Bir diğer problem, örgü uyumsuzluklarının sebep olduğu gerilmeli yapıların oluşmasıdır. Daha kaliteli optoelektronik cihazlar üretebilmek için bu gibi problemler ortadan kaldırılmalı, bunun için de büyütme şartları irdelenmeli ve geliştirilmelidir.

Katkılama, büyütme sıcaklığı, büyütme basıncı, kuyu kalınlığı, tabaka büyütme sürecinde duraksamaların yapılması, In, Ga ve N kaynaklarının akı oranları, kuyu-engel tabakalarının büyütme süresi gibi parametreler dikkat edilmesi gereken büyütme şartları içerisinde en önemlileridir.

Bu tez kapsamı içerisinde büyütülen InGaN/GaN kuantum kuyulu yapılarda, bahsedilen bu büyütme şartlarından; aktif tabakanın büyüme sıcaklığı değiştirilerek diğer parametreleri sabit tutulmuştur.

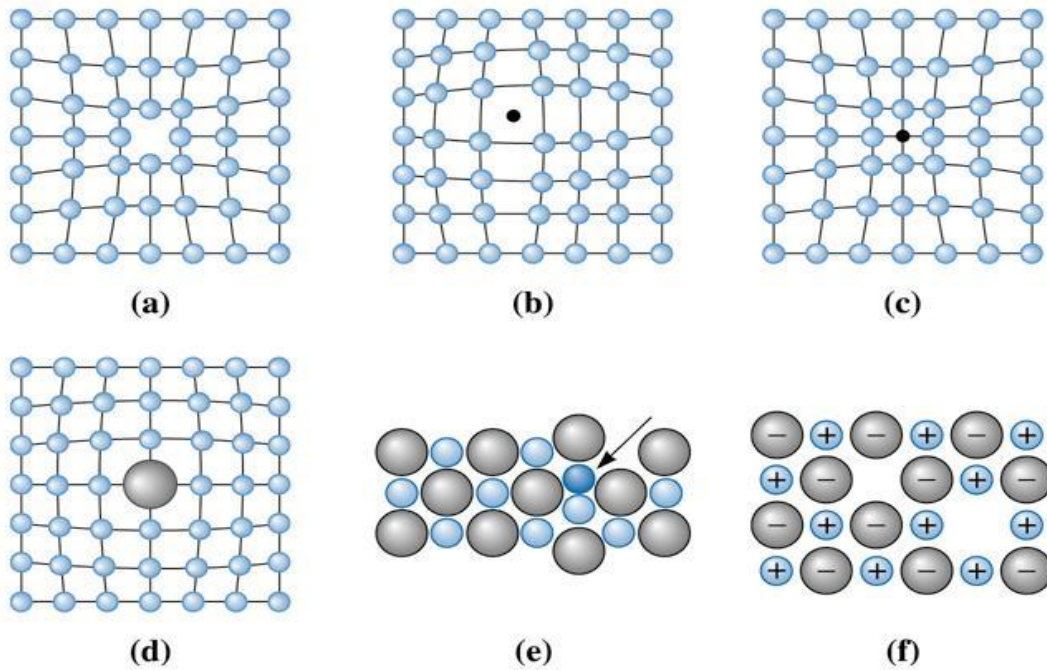
2.12. Yapısal Kusurlar

Bir kristalde yer alan atomlar üç boyutlu, periyodik bir simetri içinde sıralansalar da, bu düzen kusursuz bir şekilde meydana gelmez. Yarıiletkenler, hem kristalin termodinamik davranışları nedeniyle (doğuştan kusurlar) hem de büyütme işlemi sırasında ortaya çıkan safsızlıklar (yapısal kusurlar) nedeniyle bazı kusurlar içerir. Büyütme şartları, katkılama seviyesi, safsızlıkların cinsi, alttabaka ve tampon tabaka gibi faktörler kusurların oluşumu etkiler [72]. Bu kusurlar ilk bakışta bir kristal yapıda zor fark edilecek kadar az miktarda olsalar bile, malzemelerin makroskopik özellikleri üzerinde çok büyük etkiler oluşturabilirler. Hatta bazen malzemelerin bazı özelliklerinin kontrol altına alınabilmesi için bu hatalar isteyerek oluşturulur. Kristal yapılarda kusurları; noktasal (sıfır boyutlu), çizgisel (bir boyutlu), düzlemsel (iki boyutlu) ve hacimsel (üç boyutlu) olmak üzere dört grupta sınıflandırabiliriz. Bu tez çalışmasındaki örneklerde sıfır ve bir boyutlu kusurlar baskın olarak görüldüğü bu tip kusurların anlatımına yer verildi.

2.12.1. Noktasal kusurlar (sıfır boyutlu)

Noktasal hatalar tek bir örgü noktasındaki ya da civarındaki hatalardır. Bunları; boşluk, arayer, büyük yeralan ve küçük yeralan, Frankel ve Schottky nokta kusuru olarak Şekil 2.19'da vermiştir [73]. Eğer kristal yapı üzerinde atom bulunması gereken bir noktada atom bulunmuyorsa, bu hata türüne boşluk kusuru denir (Şekil 2.19-a). Bu tip kusurlar; çoğunlukla yüksek sıcaklıklarda, bazen de düşük sıcaklıklarda atomların kristal yapı içindeki konumlarını değiştirmesiyle ortaya çıkar. Eğer örgü noktaları arasına bir atom yerleşmişse, bu kusura arayer atomu kusuru denir (Şekil 2.19-b). Yapı içindeki aralıklara yerleşmeleri nedeniyle, arayer atomlarının yapıyı oluşturan asıl atomlara kıyasla daha

küçüktür. Eğer bir örgü noktasında olması gereken atomdan farklı türde bir atom bulunuyorsa bu tip kusura, başka bir atomun yerini alması nedeniyle, yeralan atom denir. Bu atom bulunduğu konuma göre büyük çaplı ise büyük yeralan, küçük çaplı ise küçük yeralan nokta kusuru olarak adlandırılır (Şekil 2.19-c,d). Yeralan atomları, yapıda çok ciddi bir tahribat oluşturmazlar. Kristal yapıdaki bir iyonun yer değiştirerek bir arayer atomu haline gelmesi ve geldiği yerde oluşturmasıyla meydana gelen kusur, Frenkel kusurudur (Şekil 2.19-e). Ters elektriksel yükte iki iyonun kristal örgüsünde olması gereken yerde bulunmaması Schottky kusuru olarak adlandırılır (Şekil 2.19-f). İyonik bağlı malzemelerde görülür ve elektriksel nötrlük korunur. Katkılama durumlarında; n-tipi GaN'da Ga boşluk kusurları (V_{Ga}) baskınken, p-tipi GaN'da N boşluk kusurları (V_N) baskın olacak şekilde boşluk kusurları artar. n-tipi GaN'ta Fermi seviyesi iletkenlik bandına yakındır ve V_{Ga} düşük formasyon enerjisinden dolayı alıcı (akseptor) gibi davranır [74,75]. Azot boşluğu durumunda ise enerji seviyeleri iletim bandının üstüne çıkar ve Ga-Ga arasında metalik bir bağ oluşur, V_{Ga} 'nın tersine bir mekanizma ile V_N , verici (donor) gibi davranır [76].



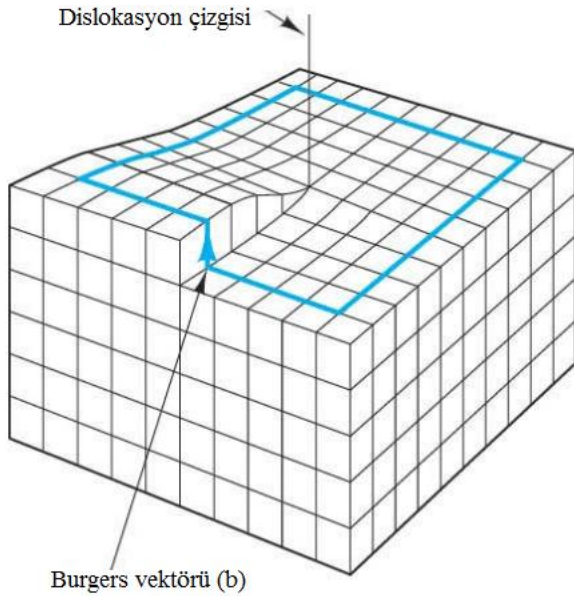
Şekil 2.19. Noktasal kusurlar: (a) atomsal boşluk kusuru, (b) arayer atom kusuru, (c) küçük yeralan atom kusuru (d) büyük yeralan atom kusuru, (e) Frenkel kusuru, (f) Schottky kusuru

Ga ve N arayer kusurları büyük formasyon enerjisi gerektirmektedir. GaN yapısındaki diğer içsel kusurlar Ga zıt yerleşme ve N zıt yerleşme kusurları olup GaN içerisinde derin

seviyelere neden olurlar. Safsızlık durumunda, Ga tarafında; C, Si ve Ge safsızlıkları sığ verici, Be, Mg, Ca, Zn ve Cd safsızlıkları sığ alıcı gibi davranırken, N tarafında; O, S ve Se safsızlıkları sığ verici C, Si ve Ge safsızlıkları sığ alıcı gibi davranırlar [75]. Ayrıca doğal kusurlar ve safsızlıklar arasında derin seviyeler oluşturabilen özellikle hidrojen içeren kompleksler oluşabilir. Örnek olarak Ga yerine yerleşen bir Mg atomu ile bir azot boşluğu arasında oluşan bağ yapmayan $Mg_{Ga}-V_N$ kompleksi, iletkenlik bandının altında yaklaşık 0,4 eV enerji seviyeli derin verici oluşturur [75].

2.12.2. Burgers vektörü

Dislokasyonların hareket yön ve büyüklüklerini ifade etmek için kullanılan parametredir. Dislokasyonun örgü içerisinde ilerlemesi için gereken minimum mesafe olarak kısaca tarif edilir ve basitçe Şekil 2.20'deki gibi çizilebilir [77].



Şekil 2.20. Burgers vektörünün gösterimi

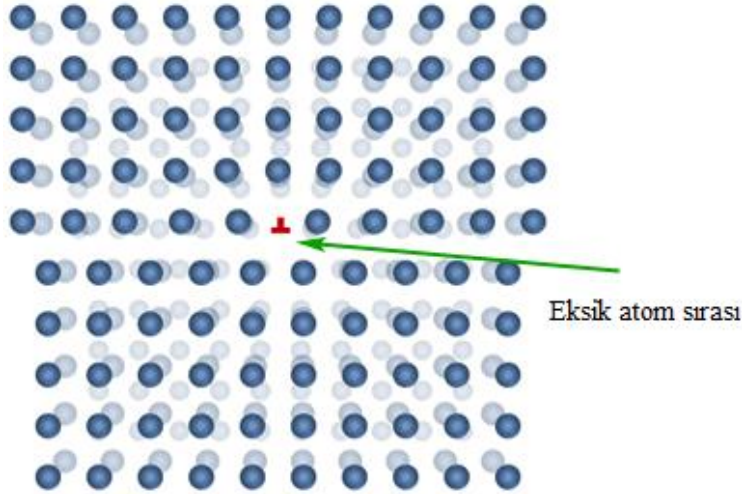
Burgers vektörü kenar dislokasyonuna diktir. Burgers vektörü şöyle bulunur; kusur etrafında eşit adım sayısında yanlara, yukarı ve aşağı yönlerde hareket edilir. Kristalde başlangıç noktasına geri dönülürken kusurlu kristalde başlangıç noktasına geri dönülmez. Bitiş noktasını başlangıca birleştiren vektörel uzunluk miktarı burgers vektörü ile ifade edilir.

2.12.3. Çizgisel kusurlar (bir boyutlu dislokasyonlar)

Dislokasyonlar; Taylor, Orowan ve Polyani tarafından farklı çalışmalar neticesinde ortaya konulmuştur. Dislokasyonlar, yani boş atom sıraları, atomların toplu şekilde bazı düzlemler üzerinde kayabilmeleri ile oluşur. Dislokasyonların nedeni çoğunlukla, büyütülen film ile alttabaka arasındaki örgü ve termal uyumsuzluklardır [11]. Bu kusurlar örgü içerisinde oldukça uzun atomik boyutlarda ortaya çıkarlar ve özelliklerinin tespitinde Burgers vektörü kullanılır [77]. Bu kusurlar kristalin elektriksel ve optiksel özelliklerine etki edebildiklerinden önemli kusurlardır. Bu tezde incelenen InGaN mavi LED yapılarda çizgisel kusurlar diğerlerine daha baskın olarak kendini göstermiştir.

Kenar tipi dislokasyon

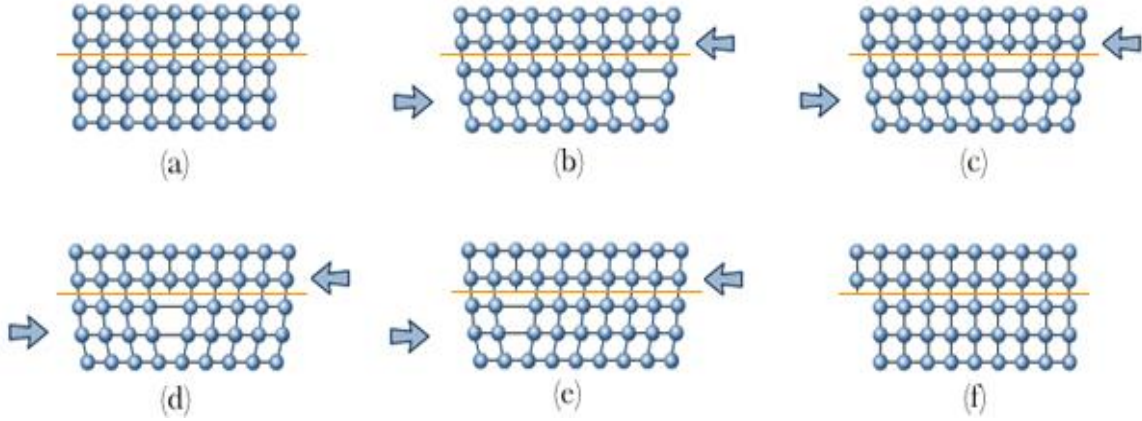
Çizgisel hatalar, kristal içinde bir sıra boyunca dizilmiş atomların oluşturdukları kusur tipleridir. Dislokasyon adını verdiğimiz bu çizgisel hatalar, kristalin bir ucundan diğerine devam etmesi gereken bir düzlemin kristal içinde bir yerde, sona ermesiyle ortaya çıkar (Şekil 2.21) [15].



Şekil 2.21. Kenar tipi dislokasyon

Şekil 2.22 de kristal düzleminde dislokasyon oluşumunun kademeli olarak gösterimi temsilen verildi [15]. Şekil 2.22 (a)'da düzlemin yukarısında, alt tarafa kıyasla fazladan bulunan iki atomlu bir düzlem, kademeli olarak dislokasyon hareketiyle sol tarafa geçirilmiştir. Düzleme paralel olacak şekilde kristalin alt ve üst kısımlarına ters yönlerde

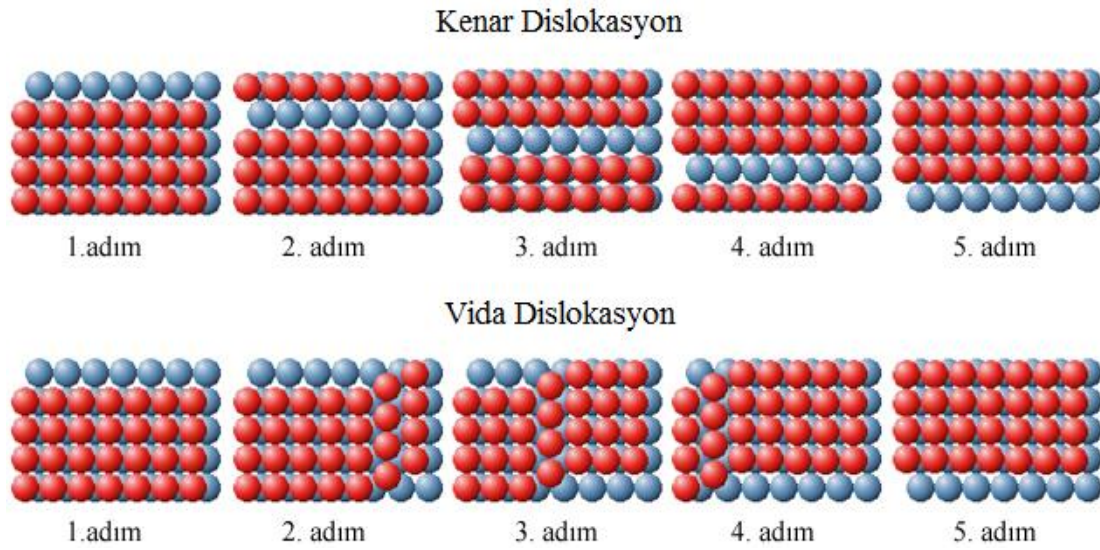
bir miktar kuvvet uyguladığımızda alt ve üst atom kümelerinin dislokasyon hareketi ile nasıl kaymaya başladıklarını Şekil 2.22’de verildi. Şekildeki çizgi şeklindeki bu düzlem, kayma hareketinin gerçekleştiği kayma düzlemidir. Bu dislokasyon türü kenar tipi dislokasyondur, burada Burgers vektörü dislokasyon çizgisine diktir ve (\perp) şekliyle sembolize edilir.



Şekil 2.22. Kristal düzleminde dislokasyon oluşumunun kademeli olarak gösterimi

Vida tipi dislokasyon

Atom kümeleri birbirleri üzerinde sadece kenar dislokasyonu şekliyle değil, vida adı verilen farklı bir işleyişle de kayabilirler. Vida dislokasyonları da kenar dislokasyonları gibi kayma düzlemine paralel uygulanan kesme kuvvetleriyle harekete geçebilirler. Eğer uygulanan kuvvet kayma düzlemine dik ise, bu kuvvet atomları kaydıramaz. Kenar dislokasyonunda atomlar sıra sıra bir sonraki konumlarına doğru ilerliyorlardı. Vida dislokasyonunda ise bu işleyiş biraz farklıdır. Şekil 2.23’de kenar ve vida tipi dislokasyonların hareketleri kıyaslamalı olarak verildi [15]. Gördüğü gibi, vida dislokasyonunun hareketi kenar dislokasyonu gibi sıra sıra değil, bir kenardan başlayıp diğer kenara uzanan bir dalga hareketi gibidir. Bu iki işleyişte de, düzlemlerin başlangıçtaki ve sondaki konumları aynı, aralarındaki fark, dislokasyon çizgisinin konumu ve hareket yönüdür ve Burgers vektörü dislokasyon çizgisine paraleldir.



Şekil 2.23. Kenar ve vida tipi dislokasyonun karşılaştırılması

Karışık dislokasyon

Dislokasyonları, kenar ve vida olarak iki grupta toptasak da, gerçekte mutlak manada kenar ya da vida dislokasyonu şeklindeki kusurlar pek görülmez. Kristal yapıda genellikle bu iki kusur beraber görülür ki bu tip kusurlar karışık dislokasyon olarak adlandırılır [11]. Ayrıca dislokasyonları uyumsuz ve tedirgin edici dislokasyonlar olarak iki grupta sınıflandırabiliriz. Uyumsuz dislokasyonlar, GaN tabaka ile altındaki altaş tabakası ve üstündeki ile epitaksiyel tabaka ve arayüzeylerinde oluşurlar. Bu tip dislokasyonlar GaN tabaka içine ulaşamadıklarından dolayı tabakadaki zorlamayı rahatlatıcı rol üstlenirler [11]. Tedirgin edici dislokasyonlar ise çizgi, vida ve karışık tip dislokasyon olarak üç farklı etki ile kendisini gösterirler. Bu tip dislokasyonların sebep olduğu etkiler; GaN tabakalardaki taşıyıcı mobilitesini etkileyen saçılma merkezleri ve ışınsal olmayan geçiş merkezleri gibi davranmalarının meydana getirdiği durumlardır.

3. DENEYSEL YÖNTEM VE ANALİZ SİSTEMLERİ

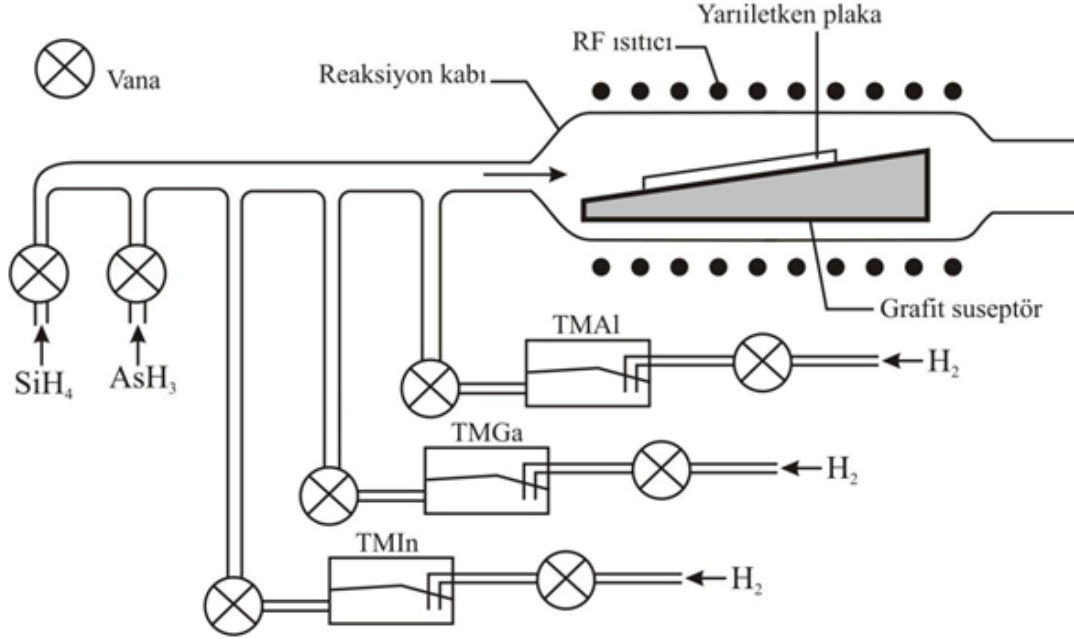
Optoelektronik yapılar genellikle, Kimyasal buhar biriktirme, Metal Organik Kimyasal Buhar biriktirme ya da Moleküler Demet Epitaksi gibi büyütme sistemlerinde üretilir. Yarıiletken kristalin hangi optoelektronik aygıt için uygun olduğu karakteristik özelliklerinin incelenmesiyle belirlenir. Ayrıca hangi şartlar altında çalışabileceği, avantajları ve dezavantajları konusuna ışık tutacağı için karakterizasyon belirleme, büyük Ar-Ge yatırımlarından önce yapılması zaruri bir tetkik silsilesidir. Bu bölümde bu tez çalışmasındaki örneklerimizi büyüttüğümüz MOCVD büyütme sistemi ve analizler için kullandığımız karakterizasyon teknikleri olan; HRXRD, AFM, PL, FTIR, I-V hakkında bilgi verildi.

3.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirmesi Yöntemi (MOCVD)

MOCVD yöntemi ilk olarak Maruska ve Tietjen tarafından GaN büyütme reaktörü olarak tasarlandı. Günümüzde çeşitli reaktör geometrilerinde üstün kalitede III-Azot yapıların büyütülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullandığımız InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu mavi LED yapılarının büyütüldüğü, ülkemizdeki ilk MOCVD reaktörü Bilkent Üniversitesi NANOTAM bünyesinde kurulmuştur. Bu sistem azot temelli geniş band aralıklı yarıiletken malzemelerin ince atomik tabakalar halinde çeşitli alttaşlar üzerine film halinde büyütülmesinde kullanılmaktadır. MOCVD sisteminde birbiri üzerine ince katmanlar halinde çok katmanlı yapılar da büyütülmektedir. Bu sayede çok hassas şekilde kalınlığı kontrol edilen tabakaların oluşturduğu yapılardan çok özel optik ve elektriksel özellikleri olan malzemeler elde edilebilmektedir. Kullanılan bu teknikle çok geniş bir yelpazede dalgaboyuna sahip LED'ler, lazerler, fotodedektörler, transistorler elde etmek mümkündür.

MOCVD sisteminde seçmiş olduğumuz bir alttaş ısıtılmış grafit suseptör zemin üzerine bulunur, gaz halindeki kaynak malzemeler N_2 ve H_2 taşıyıcı gazları ile birlikte bu tabaka üzerinden geçirilerek kimyasal reaksiyon oluşumu sağlanır ve istenen tabaka atomik biriktirme şeklinde oluşturulur [78]. III-V grubu malzemelerin hızlı ve istenilen hassasiyette büyütülmesine imkan verdiğinden kullanımı oldukça yaygındır. Optoelektronik cihazların büyütülmesindeki tutarlılığı ve yüksek büyütme hızına sahip

olmasından dolayı grup III-azot tabanlı malzemelerin MOCVD tekniği ile büyütülmesi tercih edilmektedir [79]. MOCVD kullanım klavuzlarından temin edilebilen Şekil 3.1, grup III-azot malzemelerin MOCVD tekniği ile büyütülmesinin şematik gösterimi temsil etmektedir.



Şekil 3.1. MOCVD sisteminin şematik gösterimi

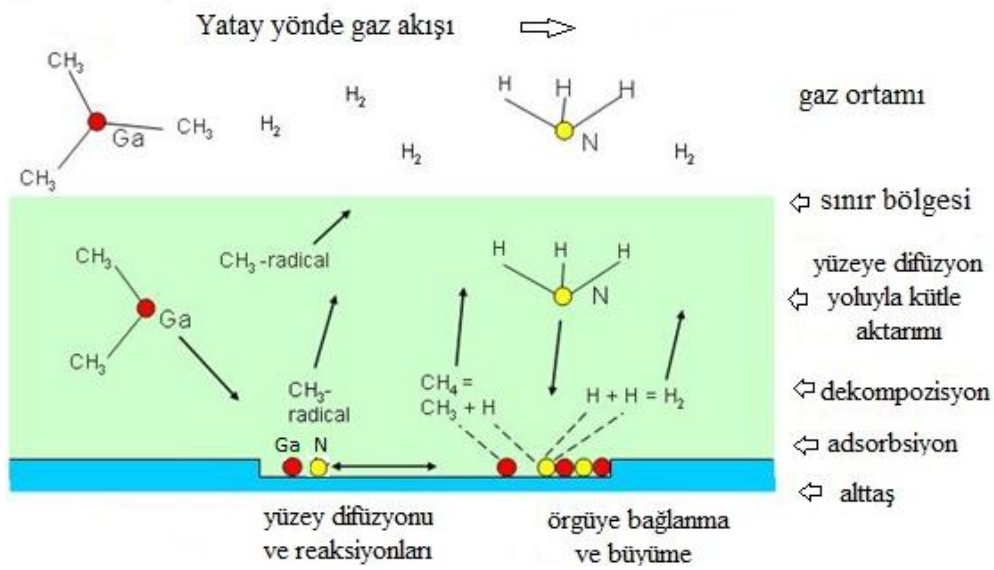
Trimetil-Galyum (TMGa), Trimetil-Alüminyum (TMAI), Trimetil-İndiyum (TMIn) gibi gaz halindeki kaynaklar, sıcak alt tabaka yüzeyinin üzerinde amonyak (NH_3) ile reaksiyona girer. Sıcak ortamda organik moleküller ile metal atomları arasındaki bağlar kırılır (Pirroliz) böylece istenen malzemenin atomik biriktirme ile alttaş üzerine tabakalar halinde kristallenmesi sağlanır. Herhangi bir tabaka için oluşum formülü Eşitlik 3.1’de verilmiştir ve ince filmin büyümesi sırasında meydana gelen fiziksel olaylar Şekil 3.2. de gösterilmiştir [80].



Mesela InN için bu denklem; $In(CH_3)_3(v) + NH_3(v) \rightarrow InN(s) + 3CH_4(v)$ şeklinde yazılır.

Tepkime sonunda ortamdaki atık CH_4 (metan) ve diğer gazlar dışarı atılır.

Büyütme esnasında Azot, SiH_4 (Silane), Si_2H_6 (Disilane) ve Bis (siklopentadienil) magnezyum (Cp_2Mg) gibi ek kaynaklara da ihtiyaç duyulur [81].



Şekil 3.2. İnce film büyütülmesi esnasında meydana gelen temel fiziksel olaylar

Numunelerimizin büyütüldüğü Bilkent Üniversitesi bünyesindeki NANOTAM da bulunan AIX 200/4 RF-S MOCVD sistemi ve yatay gaz akışına sahip reaktörü sırasıyla, Resim 3.1 ve Resim 3.2 de verilmiştir.

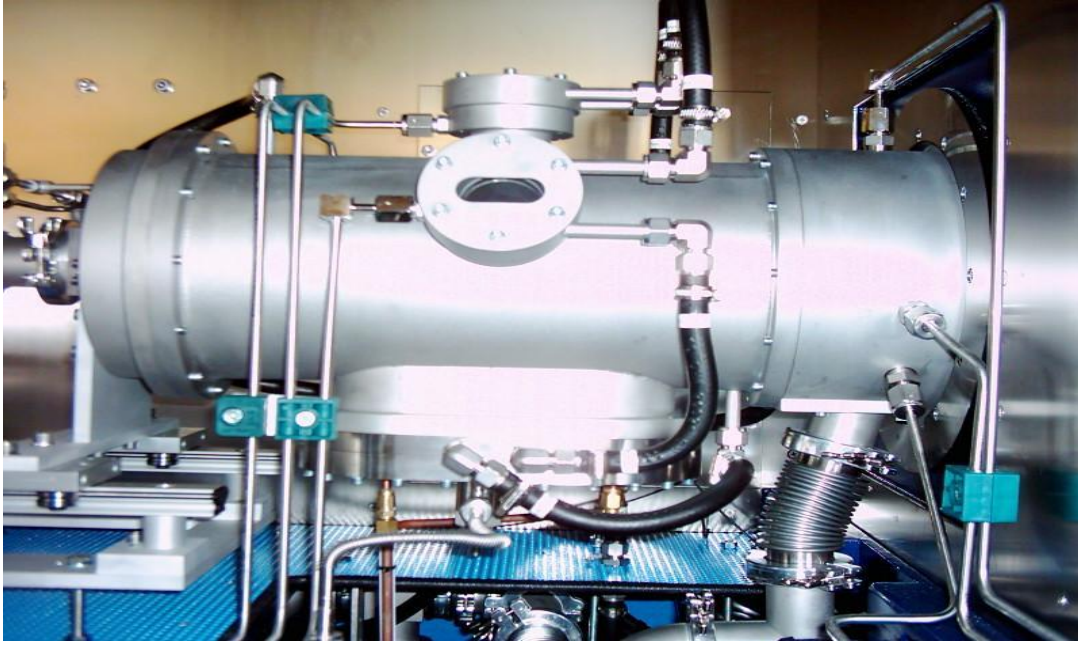


Resim 3.1. Bilkent Üniversitesi bünyesindeki NANOTAM da bulunan AIX 200/4 RF-S MOCVD sistemi fotoğrafı

Bu sistem 3 fazlı 50 Hz 380 V 24 kVA RF jeneratörü ile reaktörü ısıtır. Elektronik bileşenleri yine 3 faz 50 Hz 380V 20 kVA ile beslenmektedir. Sistemde yüksek saflıkta taşıyıcı N_2 ve H_2 kullanılmaktadır. Gazlar sisteme 3,5 bar basınçta verilmekte olup N_2 ve H_2

yaklaşık 10 l/dak hızda tüketilmektedir. İki adet 1000 m³/saat hızda kabin havalandırma sistemi olup soğutma suyu için dört bar basınç farkı 15 l/dak bir akış hızı sağlanmalıdır. Sistem her defasında iki inç'lik tek bir materyal üretme kapasitesine sahiptir. Aynı zamanda bu sistem, sıcaklık kontrolü, büyütme sırasında görüntüleme, büyütülen materyalin yüzey düzgünlüğünün sağlanması imkanlarına sahiptir.

Ayrıca sistemin Azotlu bileşikler için özel yüksek sıcaklık (1200 °C) reaktörüne sahip olması, küçük ölçekli üretim ve araştırma geliştirmeler için uyarlanabilirliği, büyütülen filmin kalınlığının ayarlanabilmesi, homojenliğinin çok yüksek seviyede olması, bileşenlerinin istenilen oranlarda ayarlanabilmesi ve büyütülen filmlerin elektriksel ve optik kalitesinin çok iyi olması diğer sistemlere karşı avantajlarıdır.



Resim 3.2. NANOTAM'da kurulan MOCVD sistemi reaktörünün fotoğrafı

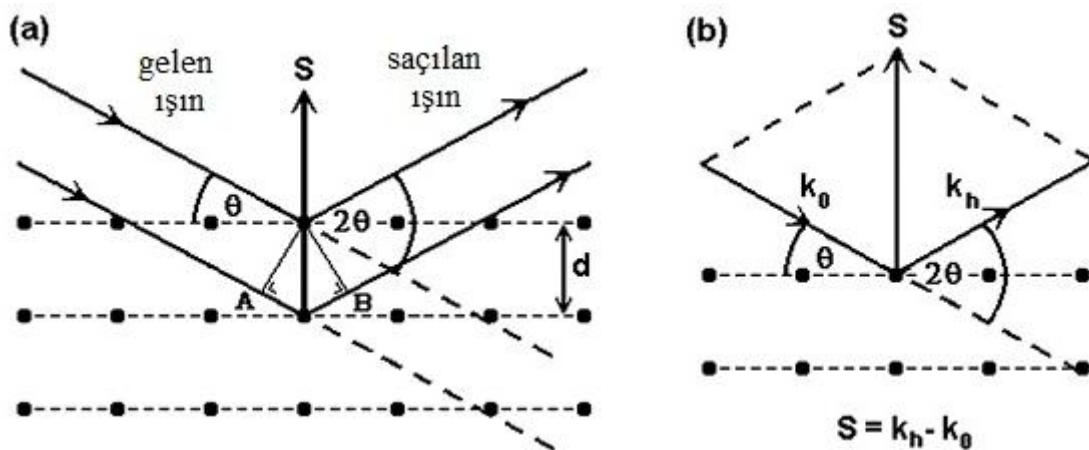
3.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı Tekniği (HRXRD)

İlk defa Alman fizikçi Röntgen tarafından 1895 yılında keşfedilen X-Işınları; atomların iç yörüngelerindeki elektron geçişleriyle doğal yolla ya da yapay olarak; kapalı tüp içerisinde katottan salınan elektronların hızlandırılıp ve anotaki (örneğin bakır) bir metalin bombardıman edilmesiyle oluşurlar. Yüksek enerjili elektronlar hedefteki metal içerisinde yüksek ivmeyle yavaşlamak zorunda kaldıklarından enerjilerini foton yayımlayarak atarlar. Bu olay zincirleme olarak devam eder ve bu fotonlardan X-Işınları oluşur. Üretilen X-

Işınlarından karakteristik olanları seçilir. Bu karakteristik X-Işınları kullanarak gerçekleştirilen HRXRD tekniği ile çoklu alaşımların ayrıntılı analizlerinde kullanılır.

3.2.1. Kırınım ve ters örgü uzayı

XRD tekniğinde ışınlar, kristalde her bir atomu saran elektron bulutu ile saçılır. Yol farkı AB ($n\lambda$), $2d\sin\theta$ 'ya (Eşitlik 3.2) eşit olduğu zaman saçılan X-Işınları arasında yapıcı girişim oluşur (Şekil 3.3) [11]. Bu durum Bragg yasasının temelidir. (d) ve (θ) açısından oluşan bu yasa X-Işını kırınımında atomların düzlemler arası mesafesiyle alakalıdır. Bu durumda gelen karakteristik demetin, yapıcı bir girişim vermesi için düzleme uygun olması gerekir.



Şekil 3.3. X-Işını kırınım geometresi; a) Bragg kırınımının oluşması için gereken şartlarını b) kristale gelen k_0 ve kırılan k_n ve saçılma S vektörleri ile ilişkileri açıklar

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (3.2)$$

Şekil 3.3'de vektörel yönelimi verilen, λ dalga boyuna sahip X-Işını radyasyonunun oluşturduğu kırınım yol farkı, kristal örgü mesafesine yakındır. Kristal üç boyutlu kırınım örgüsünden oluşur. Bu yüzden örnek ve dedektör hareket ettirilerek deneysel olarak 2θ açısı ölçülür, böylece kırınım piklerinin maksimumu, üç boyutlu örgünün araştırılmasını mümkün kılar. Kristal düzlemlerin Bragg kırınım şartına göre, örgü uzunluğu ve kristal boyutu ile alakalı olan kırınım deseninin değişken şekil ve pozisyonu ile kırınım pikleri üretilir. Gelen (k_0) ve kırılan (k_n) demet vektörü kristalle uygun bir açı yaparsa saçılma vektörü ($S = k_n - k_0$) ters örgü noktasında son bulur (Şekil 3.3-b). Saçılma vektörü (S) ters

örgüyü araştırmak için kullanılan bir parametredir ve uzunluğu 2θ açısının değişimine bağlıdır. S'nin yön veya yörüngesi ω taramasıyla bulunur. Bu durumda gelen demet tarafındaki açı örneğin yüzeyi ile buluşacaktır. ω 'nın değeri θ 'nın değerinden farklı olduğunda düzlemler örnek yüzeyine paralel olmayacaktır. Bu yüzden ters örgü uzayının farklı alanları araştırılır ki bu araştırma; ilk önce kristal yörüngeyi değiştirerek, ikinci olarak da uygun S vektörünün uzunluğunu değiştirerek yapılır. Bu düzenleme ω ve 2θ açıları değiştirilerek elde edilir.

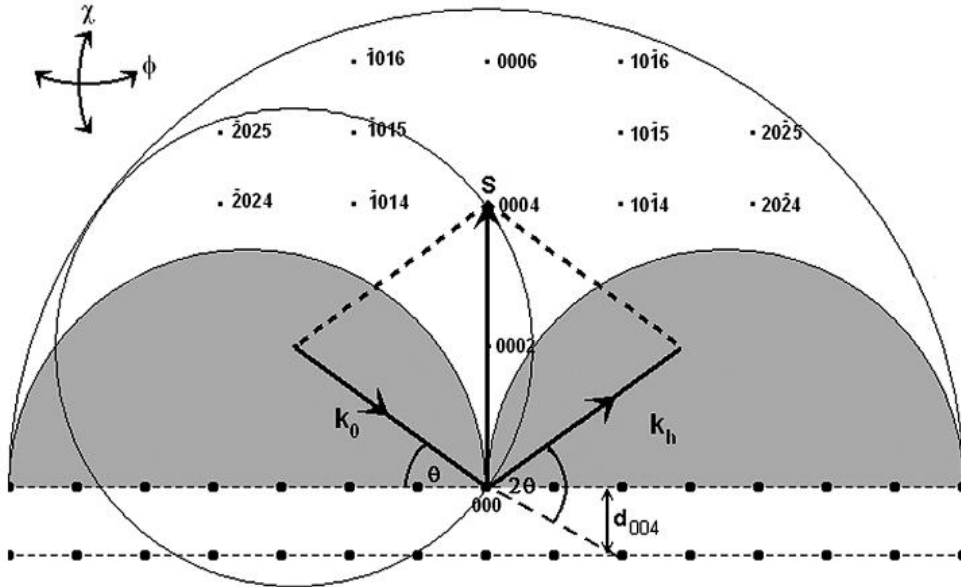
Kristal düzlemler gerçek uzayla, kırınım desenleri ise ters örgü uzayı ile tanımlanır. Ters örgü uzayı üç boyutlu, ters örgüden oluşur. Bir kristalden ters örgü noktalarını oluşturmak için her bir kristalin düzlemle alakalı ters örgü noktaları çizilir. Bu işlem, kristal düzleminin özel setlerine normal yönde bir orjin seçilerek ve orjinden çizilen bir vektörle yapılır. $1/d$ büyüklüğindeki bu vektörün bitimine bir nokta konulur, bu noktaların periyodik dizisi yukarıya kadar düzlemlerin her bir seti için tekrarlanır. Sonuç olarak yönler hem gerçek uzayda hem de ters örgü uzayında aynı kalır, fakat uzaklıklar vektörel olarak terstir.

Altıgen kristal sistem için sık sık dört indeks karakteri (hkil) kullanılır [82]. Ek kısaltma indeksi i, $-(h+k)$ 'ya eşittir. Bu gösterim düzlemin eşitliğinin gösterilmesine yardımcı olur. Bu karakter dönüşümleri Çizelge 3.1'de verildi. Çizelgede (105) düzleminin dönüştürölmesi örnek olarak gösterildi. Örnekte sırasıyla ($h=1$), ($k=0$) ve ($l=5$) olduğundan, i notasyonu; $-(h+k)$ olacağından, $i = -(1+0) = (-1)$ olarak hesaplanır. Böylece (105) olan üç indisli gösterim (10-15) olarak dört indisli gösterime dönüştürölmüş olur.

Çizelge 3.1. Gösterim karakter dönüşümleri

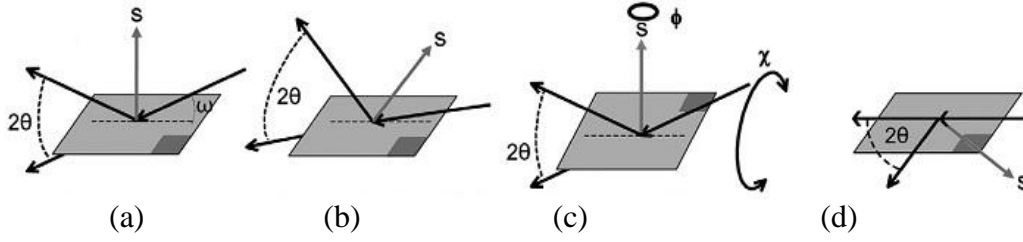
Üç indisli gösterim	Dört indisli gösterim	Anlamı
105	1 0 -1 5	Yansıma
(105)	(1 0 -1 5)	Düzlem
{105}	{1 0 -1 5}	Düzlem ailesi
[105]	[1 0 -1 5]	Kırınım
<105>	<1 0 -1 5>	Kırınım ailesi

Düzlemler arası mesafesinin değişmesiyle kırınım desenlerinin pozisyonları değiştirecektir. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi; GaN'da a-örgü baskılı iç düzlem zorlaması, düzlem dışı ve c-yönlü düzlemlerin arasındaki örgü mesafesini arttıracaktır [11]. Fakat örneğin ters örgü uzayında orjinden (0002) desenine olan mesafesi azalır. Burada k_0 ve k_h vektörü $1/\lambda$ uzunluğundadır. S vektörü $1/d_{0004}$ uzunluğuna sahiptir ve (0004) düzlemine diktir. Ewald küresi burada çember ile gösterilir ve (0004) ters örgü kırınım düzlemini keser. Bu gösterimde bazı kırınım düzlemleri yoktur, çünkü saçılma sonucundaki şiddeti sıfırdır. Evad küresinin oluşumu, bu durumu açıklamak için sık sık kullanılır (Şekil 3.4). Aynı vektörler $1/\lambda$, (gelen demet vektörünün başlangıcında merkezlenir) kürenin yarıçapı boyunca gösterilir. Ters örgü uzayını gösteren bu küre, λ dalga boyu ve θ açısı ile verilen S ile açıklanabilir. θ artarken saçılma vektörü S'nin uzunluğu, $2/\lambda$ 'nin (gelen k_0 vektörünün uzunluğunun iki katı) maksimum mümkün uzunluğu kadar artar. Bu da küre kırınımının oluşması için bir düzleme çarpar. Şekil 3.4'deki geniş kırınım çemberi, verilen λ ve maksimum θ için ulaşılan S vektörü değerinin dış limitini göstermektedir.



Şekil 3.4. [0001] yörlügel GaN filimler için ters örgü uzayı (Ewald Küresi)

Ayrıca Şekilde 3.4'de gri ile boyalı alanlar örneğe gelen veya saçılan ışınların bloklandığı bölgeleri gösterir [11]. Erişilmeyen düzlemlerin miller değerlerine ancak bu şekilde ulaşılabilir. Şekil 3.4'deki taralı alanlarda X-Işının alttaş ve filmi geçtiği durum için geçiş geometrisine ulaşılmıştır. Sıklıkla Şekil 3.4'deki sayfanın dışında bulunan ϕ ve χ ofsetleri 90° derece döndürülerek örneğin ters dönmüş simetrik şekline ulaşılabilir (Şekil 3.5) [11].

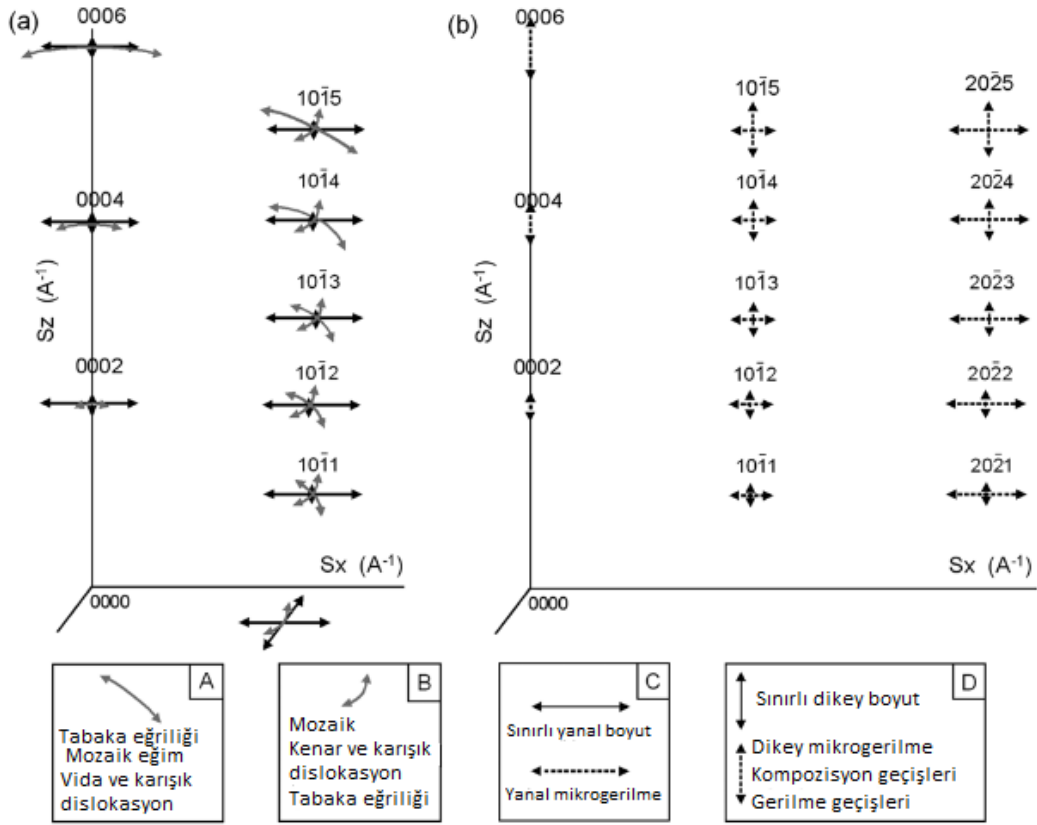


Şekil 3.5. Olası saçılma geometrileri (a) Simetrik $2\theta=\omega$ (b) Asimetrik $2\theta\neq\omega$ (c) Ters dönmüş simetri, χ sapma (ϕ 90° döndükten sonra) (d) Düzlem saçılması

Şekil 3.5’de verilen sapmalar, düzlemler arası açılar için standart olan eşitliklerden hesaplanabilir ve bu hesaplamalar için program kullanılır [11]. Bu tez çalışmasındaki ters örgü uzay haritası ile yapılan hesaplamalar için EVA ve LEPTOS programları kullanıldı.

Yüzeydeki düzlemi temsil eden örgü noktasına düşük açılı veya yalayarak gelen X ışını kırınımı; ayrıntılı bir inceleme tekniğidir. Bu tez çalışmasında bu teknik kullanılmadı ancak, simetrik kırınım girişim sonucu oluşan uydu pikleri, yukarıda bahsedilen teknikteki oluşan uydu piklerinin alternatifidir.

Pratikte kristaller, çok nadir olarak yüksek şiddetli kırınım deseni oluşturur. Düşük şiddetin olması kırınım piklerini genişletir, ters örgü uzayındaki bu genişlemenin sebebi mikroyapısal kusurlardır. Bazen de cihaz çözünürlüğünün uygun olamaması pikte genişleme yapar, mikro yapısal kusur daha ziyade, mozaik blokların makroskobik boyut ve şeklindeki bozulmalardır. HRXRD taraması ile ölçülmüş ters örgü uzayındaki kırınım görüntülerin boyutları, saçılma vektörü olan Δs ile tanımlanır ve $s=1/d=2(\sin\theta)/\lambda$ ile ifade edilir. Aşağıdaki eşitliklere uygun olarak gerçek örneğin özellikleri ters örgü uzayındaki kırınım deseninin genişlemesine neden olur; $L=1/\Delta s$, $\alpha=\Delta s/s$ ve $\varepsilon=\Delta s/2s$. Oysaki (L)’nin sınırlı büyüklüğüne bağlı olarak genişleme, orijinden uzaklığa göre değişmediği yani S’den bağımsız olduğu halde; örgü eğimi ve burkulma açısı (α)’ya bağlı genişleme, ε ve $\Delta d/d$ olarak tanımlanmış olan noktasal zorlama veya alaşım oranı/zorlama değişimleri orijinden uzaklığın artışına bağlı olarak Şekil 3.6’da gösterildiği gibi S’ye bağımlı olarak artar [11].



Şekil 3.6. Genişlemiş ters uzayda farklı tip bozukluklara bağlı olarak; (a) dikey eğim açısı (tilt), döndürme açısı ve sınırlı büyüklük ve (b) noktasal zorlama ve bileşim/zorlama eğimleri (gradyan). A, C ve D asimetrik (bazıları simetrik) geometride, B sadece ulaşılabilir, birbirine paralel olmayan geometride (veya bazen düzlem geometride) olduğu zaman ölçülebilir

Yanal noktasal zorlamalar, simetrik yansımaları etkilemez, çünkü onlardan ortaya çıkan yüzeyler yanal bileşene sahip değildir. Kristal tabakası eğim derecesi de orijin etrafında merkezlenmiş katı yay boyunca odak noktalarını genişletir. Buna ek olarak dislokasyonlar, dizilim hataları ve yapısal nokta bozuklukları da her bir odağın etrafındaki zayıf dağılımlara katkıda bulunabilir.

3.2.2. Difraktometreler (kırınım ölçer)

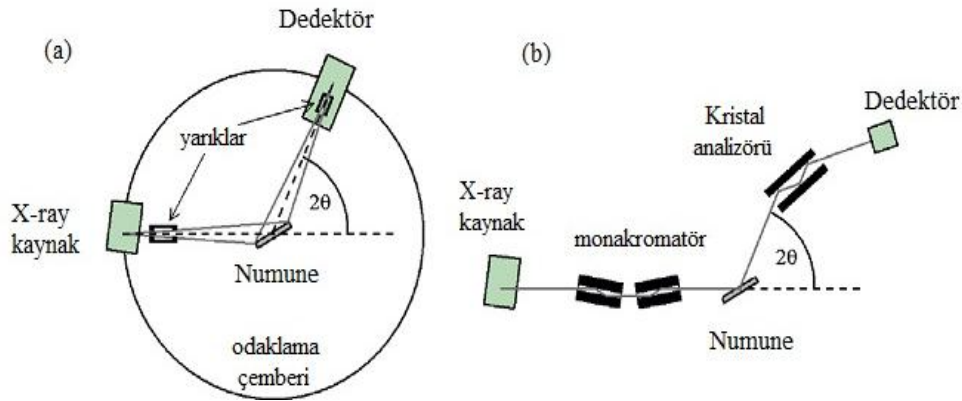
Difraktometreler genel olarak; X-Işını kaynağı, gelen ve-veya kırınan ışın boyunca bulunan düzeltici içeren bir dedektörden oluşur. Bu dedektörler, ışın demeti sapmasını sınırlayan yarıklar ve dışarıdan gelen dalga boylarını filtreleyen monokromatörler gibi davranırlar. Çoğu X-Işını dedektörü $\sim 10^5$ sayım/saniye (cps) ye kadar lineer olmasına rağmen, otomatik bir emici kullanarak lineer aralık 10^7 cps veya daha yükseğe ayarlanabilir

[11]. En yaygın olarak, düşük açısal ıraksaklığa sahip monokromatik ışın demeti ile birlikte ölçümlerde 2θ büyüklüğünde açılara gereksinim duyan örgü parametrelerine ihtiyaç vardır [11]. Ölçüm hesaplamaları için Eşitlik 3.3 kullanılabilir.

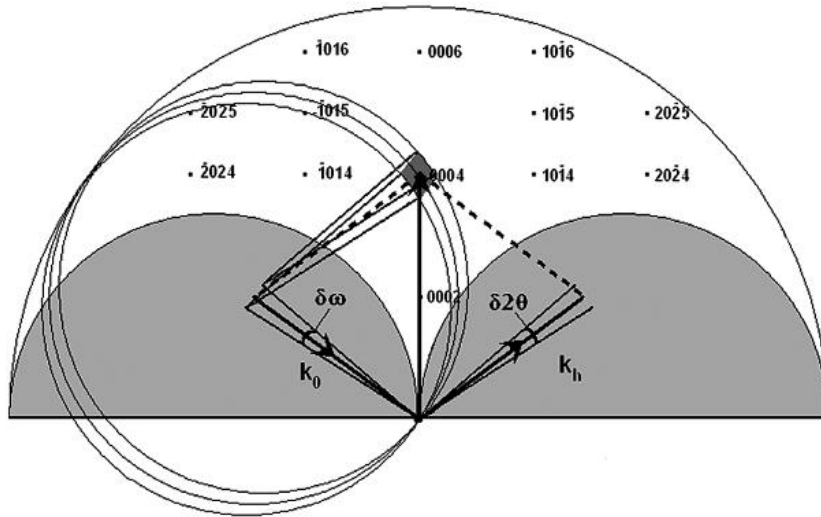
$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\delta}{\tan \theta} \quad (3.3)$$

Burada Δd düzlemlerarası aralığın hassasiyeti, $\Delta \lambda$ radyasyonun dalga boyu yayını, δ gelen ışın demetinin ıraksaklığı, 2θ kırınım açısıdır. Ters uzayda genişlemenin araştırılması esnasında düşük δ gereklidir. Düşük δ ve düşük $\Delta \lambda$ sağlayabilen bir difraktometre bu ölçüm için oldukça önemli ve gereklidir. Standart toz difraktometreleri, çözünürlüğü düşüren ve alttaş yakınlarındaki pikleri ölçmeyi zorlaştıran ekstra $K_{\alpha 2}$, K_{β} ve W çizgileri ile birlikte oldukça büyük $\Delta \lambda$ içeren ıraksak ışın demetine sahiptirler (Şekil 3.7-a) [11]. Yönlendirilmemiş örneklerle yüksek yoğunluklu veri oluşturmak için optimize edilmiştir ve ışın demeti odağı eğimli olduğundan odak kaybı ters uzay koordinat eşleşmelerine izin vermez. Yönlendirilmiş örnekler için parabolik eğimli, derecelendirilmiş çok katmanlı bir ayna, ıraksak ışın demetini neredeyse paralel bir ışın demetine ($\delta \sim 0,03^\circ$) dönüştürmek için kullanılabilir, böylece ω deki genişleme genellikle 10 katı civarında azalır ve bunun sonucu olarak yoğunluk artar [11]. Bunlar, istenmeyen dalga boylarını engellemek, $\Delta \lambda$ 'yı düşürmek ve δ 'yı $0,003^\circ$ seviyesine indirmek için birincil monokromatörlere sahiptirler. Genellikle GaN çalışmaları için yüksek çözünürlüklü difraktometreler gerekir (Şekil 3.7-b) [11]. Bu tez çalışmasında kullandığımız Bruker D8 Discover marka HRXRD cihazı bahsi geçen bu şartları sağlayabilen yüksek çözünürlüğe sahiptir.

Dedektör, tüp ve iki eksen ile toz XRD cihazını meydana getirir. Fakat Bagg şartı; monokromatör ve bir analizöre sahip, üç eksenli ve 2θ açısında iyi bir çözünürlük veren ama düşük şiddetli bir XRD cihazı ile sağlanabilir (Şekil 3.8) [11]. Bu düzenekte 2θ açısı mutlak skalada ölçülebilir.



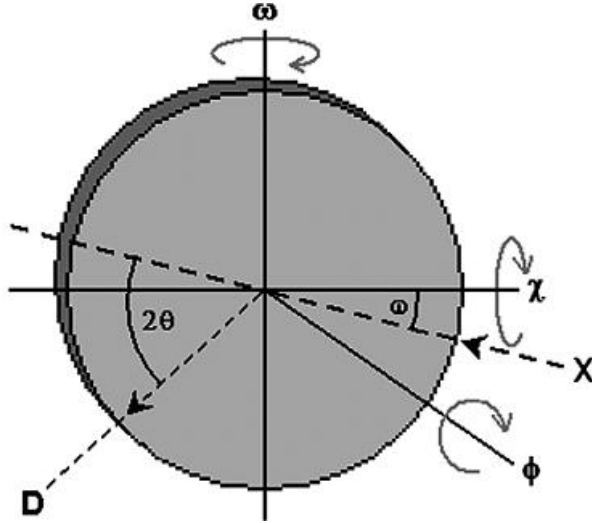
Şekil 3.7. Örnek geometriler (a) gelen ışın demeti monokromatörü bulundurmayan toz kırınımı (b) gelen ışın monokromatörü ve hassas açılı analizör bulunduran, çözümleyici kristalin opsiyonel olduğu yüksek çözünürlüklü kırınım



Şekil 3.8. Koyu gri ile renklendirilmiş probun hacmi; ters uzayda gelen ışın demetinin ıraksaklığı k_0 (δw) ve kırınan ışın demetinin ıraksaklığı k_h ($\delta \theta$)'ya bağlıdır

Tarama Tipleri

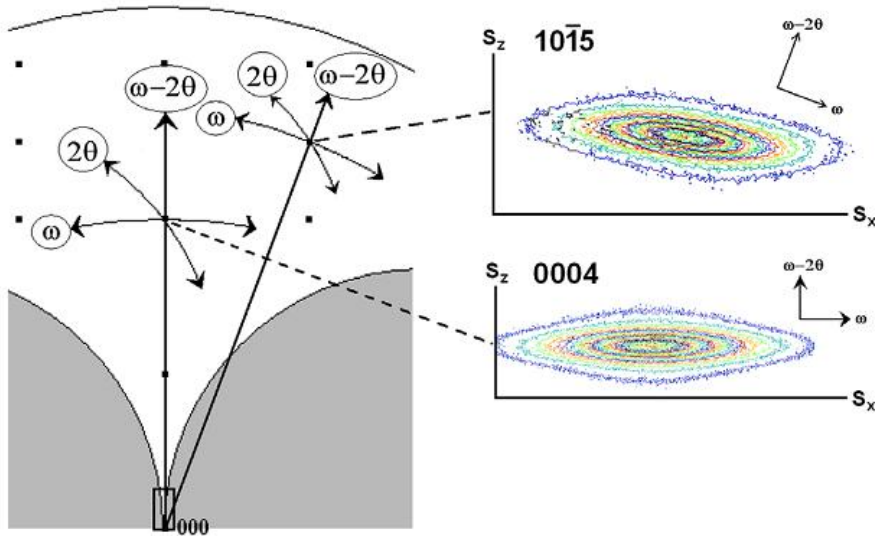
Tipik bir “4-çember” difraktometrede örneğin dönüş eksenini Şekil 3.9’da gösterildi [11]. ω taramaları film kalitesini, kayma ve tabaka kavislerini saptayarak ölçer. ω - 2θ veya 2θ - ω taramaları genel olarak daha az genişlemenin olduğu bir yön boyunca olan kırınım odaklarını artan saçılım vektörü ile araştırır ve bu taramalar, örgü parametresinin saptanması için gereklidir. ω ve ω - 2θ taramalarının ikisi de ω eksenini etrafında salınımı kapsadığı için dönme eğrileri (rocking curve) olarak adlandırılır (Bknz Şekil 3.8) [11]. HRXRD de, tipik olarak gelen ışın demeti monokromatöründe $\delta\omega$ yaklaşık $0,005^\circ$ ’dir.



Şekil 3.9. Dönüş eksenini gösteren örnek referans uzay

Burada sayfa yüzeyinden dışarıya doğru olan ϕ eksen için; ω ve χ eksenleri sayfa yüzeyinde yer alır. X , X-Işını kaynağını ve D , detektörü ifade eder.

Şekil 3.10'da örnek ters örgü uzay haritaları (0004) ve (10-15) düzlemleri için verildi [11].



Şekil 3.10. Ters örgü uzayında ω , 2θ ve $\omega-2\theta$ tarama tipleri tarafından alınan yönler

Ters örgü uzayı haritasındaki (10-15), Şekilde gösterilen ters uzayın asimetric geometrisine karşılık gelir. Aynı şekilde açıklama kutusu, X-Işını yansıma ölçümü tarafından incelenen yaklaşık bölgeyi gösterir [11]. Çeşitli tarama tipleri ile Çizelge 3.2'de özetlenmiş ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Yüksek çözünürlüklü difraktometrelerdeki tarama tipleri. ω gelen ışın demeti ile örnek yüzeyi arasındaki açıya, 2θ gelen ile kırınan ışın demeti arasındaki açıya karşılık gelir

Tarama tipi	Anlamı
$2\theta-\omega$	Örnek veya X-Işını kaynağı, ω kadar döndürülür ve dedektör açısal oranı 1:2 olan 2θ kadar döndürülür. Ters uzayda S vektörü orijinden dışarı doğru hareket eder. S vektörünün uzunluğu değişir, ama yönü aynı kalır ve ofsete bağlıdır. $2\theta-\omega$ taramaları için, x-ekseni 2θ açı değerinde, ama $\omega-2\theta$ taramaları için x-ekseni ω açı değerindedir. Eğer ofset yoksa ve $\omega=\theta$ ise bu ters uzayda dik olan simetrik tarama $(\theta,2\theta)$ 'dır ve toz kırınım tekniğine uygundur.
$\omega-2\theta$	x eksenini ω açı biriminde olan basitçe bir $2\theta-\omega$ taramasıdır. Küçük açılı yansıma ve yüksek çözünürlük çalışması için standart tarama tipidir.
2θ	Örnek ve kaynak hareketsiz kalır ama dedektör hareket ettirilir. S vektörü Ewald küresi çevresi boyunca bir yayı izler. S vektörünün hem uzunluğu hem de yönü değişir.
ω	Dedektör hareketsiz kalır ve örnek ω eksenini etrafında döndürülür. Ters uzayda S vektörü orijin merkezli bir yayı izler. S vektörünün uzunluğu aynı kalır, ama yönü değişir.
Q	S vektörünü verilen bir yönde ters uzayda tarayarak, tam sayı olmayan oranlarda ω ve 2θ yı taramak için yazılım kullanılabilir. İstenen her şekildeki ters uzay haritaları ile ters uzayda toplanabilir.
φ	Örneğin, φ eksenini etrafında döndürülmesidir. Örnek hareket ettirilir ama S vektörünün uzunluğu aynı kalır, böylece S vektörünün yönünün örneğe göre değişmesi için ters örgü odağı, S vektörü boyunca getirilir.
χ	Örneğin χ eksenini etrafında döndürülmesi hariç, φ taramasına benzer biçimdedir. Örnek yüzeyi gelen ışın demetine göre döndürülür.

Girim derinliği değişik şekillerde tanımlanabilir ama ışın demetinin farklı yansımalar için olan yol uzunluğu p (penetrasyon derinliği) basit ve görece ölçüm değeri olarak kullanılabilir [11]. Işın demetinin yoğunluğu I , Beer-Lambert yasasına göre p 'deki artışa bağlı olarak azalır ve Eşitlik 3.4 ile verilir [11]. İncelediğimiz numunelerde; $\mu_{\text{GaN}}=429 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{\text{InN}}=1508 \text{ cm}^{-1}$, ve $\mu_{\text{AlN}}=119 \text{ cm}^{-1}$ 'dir; μ lineer soğurma katsayısıdır. Eşitlik 3.4'deki p ifadesi, kırınım geometrisine bağlıdır.

$$I = I_0 e^{-\mu p} \quad (3.4)$$

Bu denklemde p , asimetric ve simetric düzlemler için sırasıyla Eşitlik 3.5 ve Eşitlik 3.6 dan hesaplanabilir.

$$p = \frac{t}{\cos \chi \sin \theta} \quad (\text{simetric veya çarpık simetric}) \quad (3.5)$$

$$p = \frac{t}{(\sin \omega + \sin(2\theta - \omega))} \quad (\text{asimetric}) \quad (3.6)$$

Buradan hareketle, geliş açısı azaldığı zaman, yol uzunluğu artar ve böylece örnekleme derinliği düşer. Geliş açısı daha küçük 2θ değerleri ve ω de veya χ deki artan kayma (ofset) değerleriyle azalır.

Düzlemler arası mesafeye ve bozukluklara bağlı genişleme ile ilgili birçok bilgi, ters uzay boyunca iki boyutlu (2D) kesitleri gösteren ters örgü uzay haritalarında özetlenebilir. Ters örgü uzay haritalarında gösterilen yoğunluk normal olarak kırınım odaklarının üç boyutlu (3D) yoğunluğunun, 2D yüzeylerindeki izdüşümüdür. Ters örgü uzay haritaları ardışık ω değerlerinde bir seri ω - 2θ taraması (veya tersi biçimde) yaparak ve sonuçları bir harita formunda göstererek elde edilir. Bu haritaları çizmek için, gelen ışın demeti tarafından örnek yüzey ω 'ya göre yapılan açılar ve saçılan ışın demetinin gelen ışın demetine göre "düz boyunca" yaptığı açı; genellikle ters uzay örgü birimleri olan S etiketiyle, ($1 \text{ RLU} = 1 \text{ \AA}^{-1} = 2(\sin\theta)/\lambda$) Eşitlik 3.7 ve Eşitlik 3.8'den hesaplanabilir [11].

$$s_x = \frac{1}{\lambda} \{ \cos \omega - \cos(2\theta - \omega) \} \quad s_x = \frac{Q_x}{2\pi} \quad (3.7)$$

$$s_z = \frac{1}{\lambda} \{ \sin \omega + \sin(2\theta - \omega) \} \quad s_z = \frac{Q_z}{2\pi} \quad (3.8)$$

Bu kullanılan açıların ölçümlerinin, ters uzaydaki koordinatlara doğrudan dönüşümü mümkündür. Bazı yazılımlar ters uzayda tarama yapar ve eğer gerekirse bu difraktometre açılarına geri dönüştürebilir. Geleneksel olarak kristalografide s_x ve s_z ve bir dalga vektörü olan $|k| = 1/\lambda$ kullanılır. Bu birimler öyle seçilmiştir ki ters örgü aralıkları ilgili düzlemler arası aralığın tersidir. Başka bir deyişle saçılım vektörü S_{0002} nin boyu, $1/d_{0002}$ dir. Ama katıhal fiziğinde Q_x ve Q_z birimlerinin kullanılması yaygındır. Literatürde; dalga vektörü $|k| = 2\pi/\lambda$ ve saçılım vektörü S_{0002} 'nin uzunluğu $\lambda/2d_{0002}$ olacak şekilde bu iki kullanımda da karşılaşılabılır.

3.2.3. HRXRD sisteminin çalışma prensibi

X-ışını demeti ilk olarak yüksek kaliteli bir kristale çarparak kırınımına uğrar. Kırınan demet örnek kristal üzerine düşer. Eğer iki kristal için Bragg açıları eşitse oldukça dar bir kırınım deseni gözlenir. Örnek kristalin geniş aralıkta yapısal dizilimini veren dönme eğrilerini elde etmek için örnek kristal küçük bir ω açısıyla döndürülür ve kırınan demet şiddeti kaydedilir. Yüksek kaliteli kristaller birkaç arc-saniye genişliğinde piklere sahiptirler. Bu teknik özellikle kalın alttaşlar üzerine büyütülmüş ince katman filmler için yararlıdır. Genellikle, bu durumlarda birisi alttaştan ve diğeri ise ince film katmanından gelen iki pik gözlenir. Alttaş ve ince katmanın Bragg yansımaları için $\Delta\omega$ farkı $\Delta\theta$ ve $\Delta\phi$ olmak üzere iki bileşen içermektedir. Alttaş ve katman için $\Delta d/d$ örgü düzlemleri arasındaki fark Bragg açılarındaki $\Delta\theta$ farkına neden olur. $\Delta\omega$ 'nın ikinci bileşeni $\Delta\phi$ ise ince katmanın ve alttaş örgü düzlemlerinin eğiklikleri arasındaki farktır [83,84]. Birim hücre örgü parametresi (a) olan kübik yapı bir kristalde, (d) düzlemler arasındaki uzaklık olmak üzere örgü parametresi ile arasındaki bağıntı Eşitlik 3.9 ile hesaplanır.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.9)$$

a ve c birim hücre örgü parametrelerine sahip altıgen yapı bir kristalde; örgü parametrelerinin d ile bağıntısı Eşitlik 3.10 ile verilir [85].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.10)$$

Burada h, k ve l miller indislerini temsil eder. Yapılan analizlerin sonuçları ve bu temel eşitlikler yardımıyla, malzemeler hakkında detaylı yapısal bilgilere ulaşabiliriz. Mesela Vegard yasasında örgü parametreleri kullanılarak $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ epitaksiyel alaşımındaki In elementinin oranı x, Eşitlik 3.11 yardımıyla belirlenebilir [86].

$$a_0 = x a_{\text{InN}} + (1-x) a_{\text{GaN}} \quad (3.11)$$

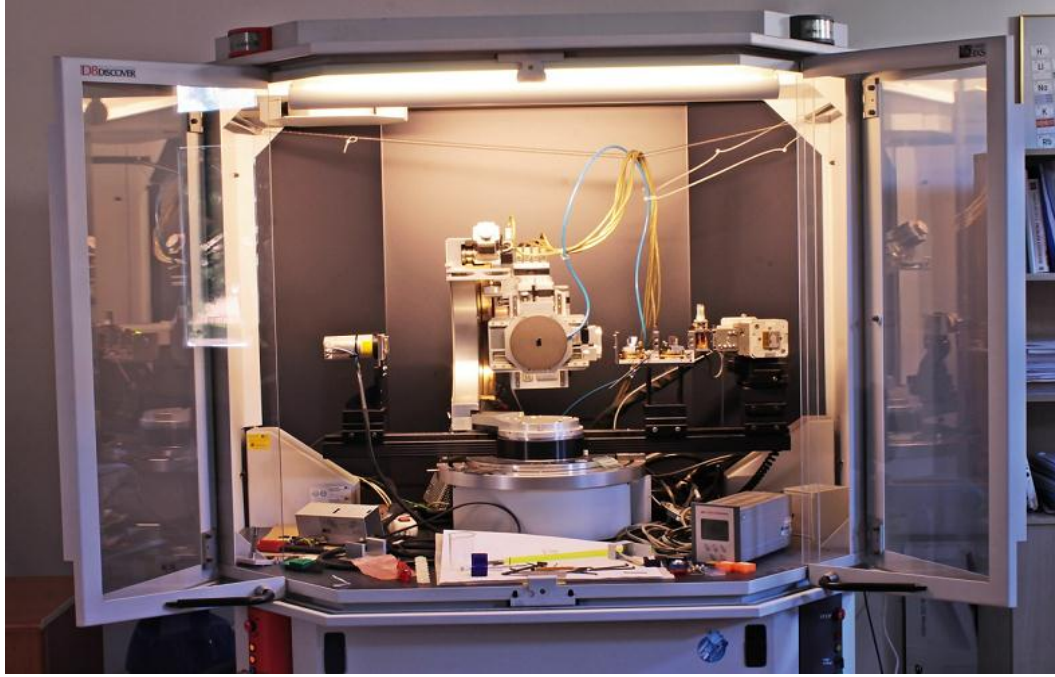
Bu eşitlikte a_0 , InGaN tabakasının örgü parametresi, a_{InN} ve a_{GaN} ise sırasıyla InN ve GaN bileşiklerinin örgü parametreleridir. HRXRD analizleri ile aşağıdaki bilgiler ayrıntılı olarak elde edilebilir [87,88,89,90,91,92]:

Örgü sabitleri: Büyütme düzlemine dik alttaşın üzerine büyütülen tabaka ile alttaş arasındaki uyumsuzluk belirlenebilir. Bu teknikler kristallerin örgü parametrelerinin ölçülmesini sağlayarak yapısal kusurlar hakkında bilgi edinmemizi sağlar.

Kalite analiz eğrisi (Rocking curve): Maksimum pik yarı genişliği olarak da adlandırılan (FWHM) açı birimindeki X-Işınının kalite analiz eğrisinin genişliği, tabakalardaki dislokasyonların sayısı ile ters orantılıdır. Böylelikle filmlerde oluşan gerginlik, mozaik yapıdaki kusur tipleri ve miktarları belirlenebilir. Bu yüzden ölçüm, filmin kalitesinin bir göstergesi olarak kullanılabilir.

Çoklu yapıların katkı oranı, kalınlık ve kalitesi: Süperörgü gibi çok tabakalı yapılarda farklı tabaka kalınlıkları ana pikin kenarında görülen küçük pikler arasındaki mesafe ile belirlenebilir. Ayrıca bu küçük piklerin şiddetleri ve sayıları film kalitesinin bir ölçüsüdür.

Numunelerin yüksek çözünürlüklü X-Işınları analizi ölçümleri için Bruker D8 Discover HRXRD cihazı kullanıldı. Bu cihaz Ge (220) yönelimli dört kristal monokromatöre ve X-Işını kaynağı 1,540 Å dalgaboylu $\text{CuK}_{\alpha 1}$ 'e sahiptir. Cihazın genel görüntüsü Resim 3.3'de verildi.



Resim 3.3. Bruker D8 Discover HRXRD cihazının genel görünümü

3.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

AFM analiz sistemleri ile kristal yüzeylerinin ne kadar pürüzlü olduğu anlaşılabilir, ayrıca yüzey üzerinde oluşmuş moleküler yapılar ve bunların büyüklükleri, şekli ve birbiri ile etkileşimleri hakkında bilgi edinilebilir. AFM ile nano boyutta (10^{-9} m) görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme yapılabilir. Ek olarak AFM kullanılarak örneği oluşturan molekül ve elementlerin bileşimi, bunların bağıl miktarları ve maddelerin erime noktaları ve sertliği gibi bazı fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Bunların yanında atomların madde içindeki dizilişleri, bu dizilişler arasındaki ilişkiler ve örneği oluşturan maddelerin iletkenlik gibi elektriksel özellikleri hakkında bilgi de veren AFM görüntüleri alınabilir [83].

AFM ölçümleri High Performance AFM/MFM (hpAFM) sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. Düzeneğin görüntüsü Resim 3.4’de verildi. Performansı ve fonksiyonelliği ile dünyadaki en gelişmiş AFM’lerden biri olan High Performance hpAFM, otomatik lazer odaklama sistemi (alignment free), 10 MP video kamera, kapalı devre flexure tarayıcı ve özel çalışmalar için modlardan oluşan bölüm ve sistemlere sahiptir. Ayrıca RF modülasyonlu düşük gürültülü lazeriyle gürültü seviyesi $25\text{fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ’e kadar düşürülür ve

0,01 nm çözünürlüğe ulaşılabilir. Bilgisayara bağlı kontrol ünitesi ile görüntüler ekrandan takip edilip uygun programlarla kayıt edilir. Diğer AFM sistemleri Yüksek Vakum (UHV) ortamında çalışırken hpAFM'in atmosfer ortamında çalışabilmesi önemli bir avantajdır.



Resim 3.4. High Performance AFM/MFM

Analiz tek atom boyutlarındaki cantilever ile yapılır, yüzeyi tarayan bu sivri bir uç nanometre ölçeğinde eğrilik yarıçapına sahiptir. Cantilever genellikle silikon ya da silikon nitrürdür. Uç, numune yüzeyine yakın bir mesafeye getirilince, uç ile yüzey arasındaki kuvvetler Hooke kanununa göre manivelanın bükülmesine neden olur. Bu değişim değerleri yüzeyin bir nevi topolojik haritasını oluşturur.

AFM analizi yaparken, eğer uç sabit bir yükseklikte tarama yaparsa, yüzeye çarpıp uç ya da numunede hasar oluşturabilir. Bunun için genellikle uç ile yüzey arasındaki kuvveti sabit tutup mesafeyi ayarlayan bir sistem kullanılır. Numune, “z” yönünde hareket edip yüksekliği ayarlayan, “x” ve “y” yönünde hareket edip taramayı sağlayan bir dizi piezo elektrik düzenek aracılığıyla taranır.

Bazı düzeneklerde, tarama ucu dikey piezo tarayıcıya monte edilirken, incelenen örnek başka bir piezo grup kullanılarak x ve y doğrultusunda taranır. Açığa çıkan $z=f(x,y)$ haritası yüzeyin şeklini temsil eder.

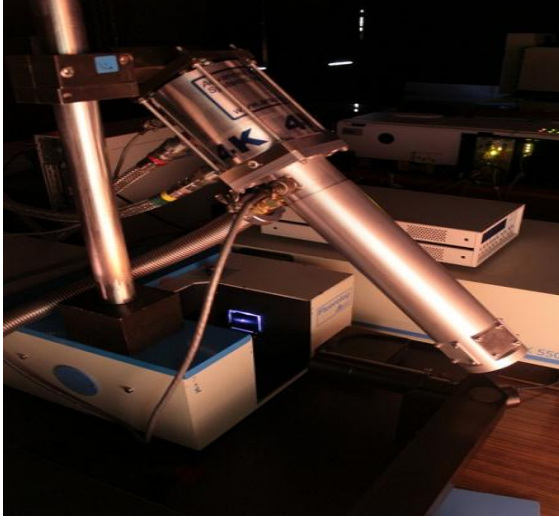
AFM uygulamaya bağı olarak çeşitli modlarda kullanılabilir. Bu görüntüleme modları “statik” (temas) ya da “dinamik” (temassız) olabilir. Bu tez çalışmasında yapılan ölçümler dinamik modda yapıldı.

Dinamik modda; cantilever akustik ya da manyetik yollarla titreştirilir. Statik mod; analizi yapılan numuneye temas edilerek ölçüm yapılırken kullanılır. Temas etkisinden dolayı çözünürlüğü yüksek ve atomik seviyede görüntüler elde edilir [93].

Bunların yanında iki mod daha vardır. Bu iki mod ise; sabit yükseklik ve sabit kuvvet modudur. Sabit yükseklik modunda, tarama yapılırken cantilever ile yüzey arası mesafe sabit tutulur ve kuvvetteki değişim değerleri kullanılır. Sabit kuvvet modunda, tarama yapılırken cantilever ve yüzey arasında kuvvet sabit tutulacağı için mesafe değişir, bu mesafe değişim değerlerine göre topografya oluşturulur.

3.4. Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans spektroskopisi, yarıiletken malzemede hasar oluşturmadan elektronik yapılarını ve optik özelliklerini incelemeye kullanılan bir metoddur. PL optik uyarılmaya maruz bırakılan bir materyalin ışınım yapmasıdır. Numunelerin PL ölçümleri Jobin Yvon Florog-550 sistemi ile 50 mW gücündeki 325 nm dalgaboylu He-Cd lazer kullanılarak gerçekleştirildi. Kullanılan cihazın fotoğrafı Resim 3.5’de verildi. PL sistemi kısaca şöyle çalışır; numune üzerine ışık gönderilir, bu ışınım numune tarafından soğurulur (fotouyarılma), bu uyarılma neticesinde elektronlar üst, izinli uyarılma seviyelerine atarlar. Elektronlar tekrar denge haline geri dönmek için bu fazla enerjiyi ışınım olarak atarlar, bu ışınımın enerjisi; denge durumu ve uyarılmış hal arasındaki enerji farkına eşittir. Bu yayımlanan ışık odaklanır ve bir spektrometre ve foton dedektörü ile toplanır. Toplanan ışınımın ifade ettiği optik sinyal, elektriksel sinyale dönüştürülür. Malzemenin lüminesans ışımına karşılık gelen bu sinyalin; şiddet-dalgaboyu veya şiddet-enerji grafiği çizilir ve fotolüminesans spektrumu elde edilir. Elde edilen bu spektrumun analizi ile malzemenin kalitesi, safsızlık oranı ve katkı miktarı, yasak enerji band aralığı ve arayüzey pürüzlülüğü bilgilere ulaşılabilir [2,94]. Bu bilgilerin ayrıntıları aşağıda kısaca açıklandı.



Resim 3.5. Jobin Yuvon Florog–550 sistemi

Band aralığı enerjisi (yasak enerji aralığı): Yarıiletkenlerdeki en yaygın ışımali geçiş, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit olan iletkenlik ve valans bandındaki durumlar arasındaki geçiştir.

Kirlilik (safsızlık) seviyeleri ve kusurların belirlenmesi: Yarıiletkenlerdeki ışımali geçişler lokalize olmuş kusur seviyelerini kapsarlar. Bu seviyelere karşılık gelen PL enerjisi, belirli kusurları tanımlamak için kullanılır.

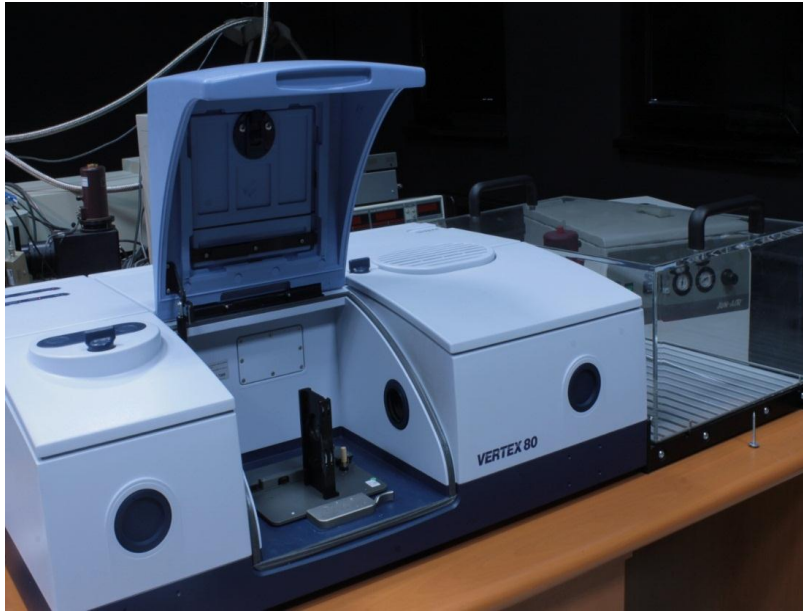
Yeniden birleşme (Rekombinasyon) mekanizmaları: Bir p-n eklemdeki tüketim bölgesinde, elektronların denge haline döndükleri zaman, hem ışımali hem de ışımaz geçişler yapabilirler. PL pikinin şiddeti ve bunun foto-uyarılma seviyesine ve sıcaklığa bağlılığı, baskın rekombinasyon işlemi ile doğru orantılıdır.

Malzeme kalitesi: Bir PL spektrumunun şiddeti ve çizgi genişliği (FWHM) malzemenin kalitesinin göstergesidir. Ayrıca kusurlarla ilgili piklerin varlığı epitaksiyel tabakadaki kusurların varlığının göstergesidir.

3.5. Fourier Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Titreşimsel spektroskopi, spektrumun infrared bölgesinde oluşan moleküler titreşime bağlı olarak ışığın absorplanması (infrared) ya da saçılmasını (Raman) inceler. IR

spektroskopisinde, infrared bölgede tüm frekansları içeren elektromanyetik ışınım, incelenmesi istenen örnek üzerine gönderilerek molekülün yapısına ve ışınımın frekansına bağlı olarak geçen veya soğurulan ışık incelenir. Soğurulan ışınımın frekansı iki titreşimsel enerji seviyesindeki enerji farkı ile belirlenir. Madde ile etkileşen ışının soğurulma miktarı Beer-Lambert kanunu ile verilir. FTIR karakterizasyonu için Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Laboratuvarında bulunan Bruker Vertex 80 spektrometresi kullanılarak örnekler incelendi. Kullanılan cihazın fotoğrafı Resim 3.6'da verildi.



Resim 3.6. Bruker Vertex 80 spektrometresi

3.6. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi

I-V ölçümleri elektriksel karakterizasyon için oldukça önemlidir. Yapısal, morfolojik ve optiksel karakterizasyonları yapılan numunelerin istenilen cihaz performansı sergileyip sergileyemeyecekleri I-V ölçümleri sonucunda belirlenebilir. Daha sonra diğer karakterizasyon sonuçlarıyla karşılaştırılarak sonuçların doğruluğu desteklenebilir. Fabrikasyonu tamamlanan numunelerin belirli voltaj aralığında akım değişimi ölçülür ve elektriksel karakterizasyon sonucunda diyotlar, ledler ve güneş hücreleri gibi cihazlar için gerekli olan temel elektriksel parametreler belirlenir.

I-V ölçümleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan ve Resim 3.7'de görülen Keithley 4200 I-V ölçüm sistemi ile yapıldı. Aydınlatma

altındaki I-V ölçümlerinde ise, Keithley 4200 I-V ölçüm sistemine ilave olarak, AM1,5,1 güneş kalibre edilmiş NewPort Oriel Sol1A güneş simülatörü kullanıldı.



Resim 3.7. I-V ölçüm düzeneği (Keithley 4200 ve NewPort Oriel Sol1A)

4. DENEYSEL BULGULAR ve YORUMLAR

Bu bölümde öncelikle incelediğimiz InGaN MQW mavi LED yapıların büyütülme aşamaları anlatıldı. Daha sonra bu örneklerin HRXRD tekniği ile yapılan analizlerinden elde edilen Ters Örgü Uzay Haritası verildi. Bu haritalama ile birlikte “Üçüncü Dereceden (Küçük) Denklem” çözümünde Vegard Yasası ve Poission Oranı eşitlikleri de kullanılarak, hesaplanan; *In* oranı, kuantum kuyu kalınlığı, üç farklı metodla hesaplanan örgü parametreleri, örgü rahatlaması, zorlama, gerilme, dikey ve yatay mozaik boyut, iki ayrı metodla hesaplanan vida ve kenar dislokasyonlar, eğilme açısı gibi yapısal parametre değerleri verildi. PL ve FTIR analizleriyle hesap edilen optiksel sonuçlar, AFM görüntüleriyle elde edilen yüzey morfolojisi ve I-V ölçümleriyle belirlenen elektriksel özellikleri sunuldu.

4.1. MOCVD Tekniği ile InGaN/GaN MQW Mavi LED’lerin Büyütülmesi

Bu tez çalışmasında incelenen InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulu mavi LED örnekler Bilkent Üniversitesi NANOTAM Araştırma Laboratuvarlarında bulunan AIXTRON RF200/4 RF-S MOCVD sistemi ile c-(0001) yönelimli safir alttaş üzerine büyütüldü. Numunelerin büyütme koşulları Çizelge 4.1 de verildi. Ga, Al, In ve N kaynakları sırasıyla, TMGa, TMAI, TMIIn, ve NH₃ bileşiklerinin kimyasal reaksiyonlarından elde edildi. Epitaksiyel büyütme işleminden önce safir alttaş 1100 °C de 10 dakika boyunca Azot gazı ortamında ısıl işleme tabi tutularak yüzeydeki oksitlerden arındırıldı. İlk olarak safir alttaş üzerine 500 °C’de GaN çekirdek tabaka ardından, 1020 °C’de GaN tampon tabaka büyütüldü. Bu işlemler esnasında basınç 200 mbar’da sabit tutuldu. Daha sonra 1030 °C’de n-tipi GaN kontak tabakalar; ilk katman 35 dakika, ikinci katman 20 dakika boyunca 23 sccm Trimetilgalyum (TmGa) sabit akısında büyütüldü. Sonraki adımda her bir örnek için farklı sıcaklıkta, InGaN/GaN MQW aktif tabaka sırasıyla, 90 ve 390 saniye süreyle, 140 sccm TeGa ve Trimetilindium (TmIn) akı oranlarında beş katman olarak oluşturuldu. Aktif tabakalar üzerine 730 °C’de, 390 saniye boyunca 140 sccm TeGa akı oranıyla GaN kep tabaka büyütüldü. Magnezyum (Mg) katkılı p-kontak, AlGaIn tabaka; 1085 °C ve 50 mbar basınçta, 65 saniye süreyle, 9 sccm TmGa, 15 sccm TmAl ve 90 sccm Cp₂Mg akı oranı kullanılarak, p-GaN katmanı ise 1010 °C ve 200 mbar basınçta, 720 saniye süreyle, 14 sccm TmGa ve 100 sccm Cp₂Mg akı oranı ile büyütüldü. NH₃ akı oranı; GaN ve AlGaIn

Çizelge 4.1. A,B ve C InGaN/GaN çoklu kuantum kuyu mavi LED'lerin büyütme koşulları

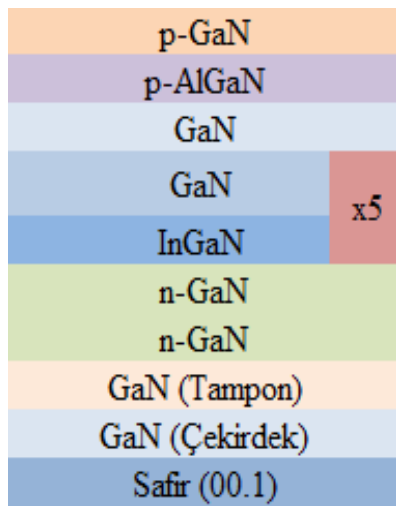
Numuneler	Tabaka Yapıları ve Detaylar	Büyütme süresi (s)	Basınç (mbar)	Büyütme sıcaklığı (°C)	TMGa Akısı (sccm)	TEGa Flow (sccm)	TMAI Akısı (sccm)	TMIn Akısı (sccm)	Cp ₂ Mg Akısı (sccm)	NH ₃ Akısı (sccm)	SiH ₄
A	p-GaN	720	200	1010	14				100	1300	
	p-AlGaN	65	50	1085	9		15		90	1300	
	GaN	390	200	650		140				1300	
	GaN	390	200	650				140		5200	
	InGaN	90	200	650		140		140		5200	
	n-GaN	1200	200	1030	23					1600	800
	n-GaN	2100	200	1030	23					1600	900
	GaN (T)	720	200	1020	15					1300	
	GaN (Ç)	450	200	500	5					1500	
B	p-GaN	720	200	1010	14				100	1300	
	p-AlGaN	65	50	1085	9		15		90	1300	
	GaN	360	200	667		140				1300	
	GaN	390	200	667				140		5200	
	InGaN	90	200	667		140		140		5200	
	n-GaN	1200	200	1030	23					1600	800
	n-GaN	2100	200	1030	23					1600	900
	GaN (T)	720	200	1020	15					1300	
	GaN (Ç)	450	200	500	5					1500	
C	p-GaN	720	200	1010	14				100	1300	
	p-AlGaN	65	50	1085	9		15		90	1300	
	GaN	390	200	700		140				1300	
	GaN	390	200	700				140		5200	
	InGaN	90	200	700		140		140		5200	
	n-GaN	1200	200	1030	23					1600	800
	n-GaN	2100	200	1030	23					1600	900
	GaN (T)	720	200	1020	15					1300	
	GaN (Ç)	450	200	500	5					1500	

tabakalar için 1300 sccm, InGaN/GaN aktif tabaka için 5200 sccm olarak ayarlandı. İncelenen A,B ve C örneklerinin InGaN/GaN aktif tabaka büyütme sıcaklığı sırasıyla 650 °C, 667 °C ve 700 °C olarak belirlendi. Büyütülen diğer tabakaların büyütme şartları tüm numuneler için aynı tutuldu.

Numunelerin I-V analizlerin yapılabilmesi için n-p kontak materyalleri; n-metal için Ti-Al kontaklar sırasıyla 100 Å ve 1000 Å kalınlığında ve p-metal için Ni-Al kontakları sırasıyla 200 Å ve 2000 Å kalınlığında oluşturuldu.

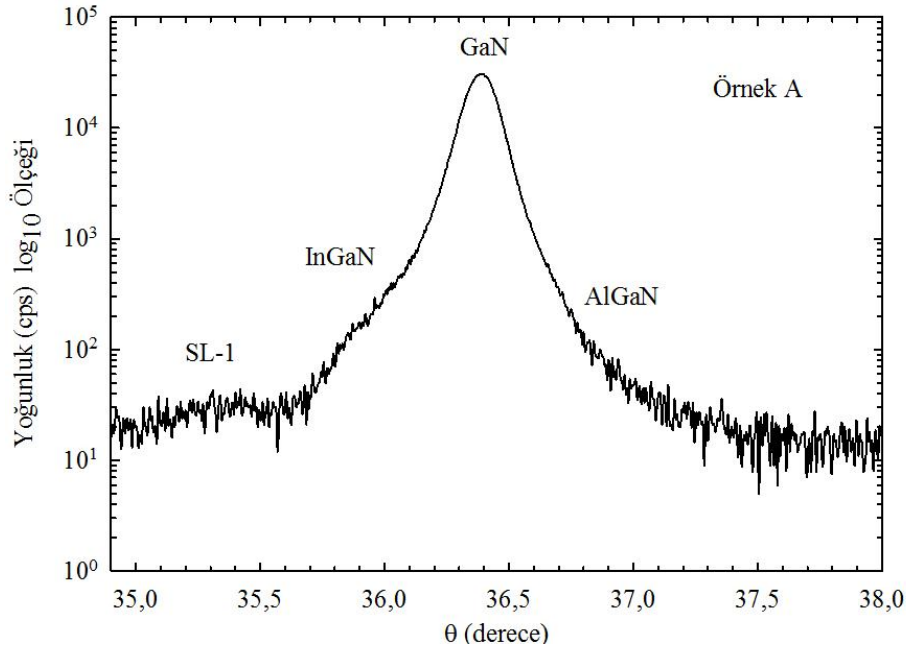
4.2. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin HRXRD Ölçüm Tekniği Tarama Sonuçları

Örneklerin X-Işını analizleri HRXRD D8-Discovery cihazında yapıldı. Kaynak olarak $\text{CuK}\alpha_1$ tüp kullanıldı. Ölçüm düzeneğinde, simetrik ve asimetrik düzlemlerinde kırınım şartını sağlamak için θ ve 2θ eksenleri dışında x, y, z, Φ ve ξ eksenleri de mevcuttur. Çalışmalarımızda ters örgü uzayı haritası için θ , 2θ , Φ ve ξ eksenleri kullanıldı. Ters örgü haritalaması; taramayı optimize eden eksenlerle birlikte her bir ölçüm için ortalama çekim süresi 7 saat olmakla birlikte toplamda tüm çekimler yaklaşık 112 saat sürdü. Büyütülen InGaN/GaN mavi LED yapıların genel şematik gösterimi Şekil 4.1'de verildi.



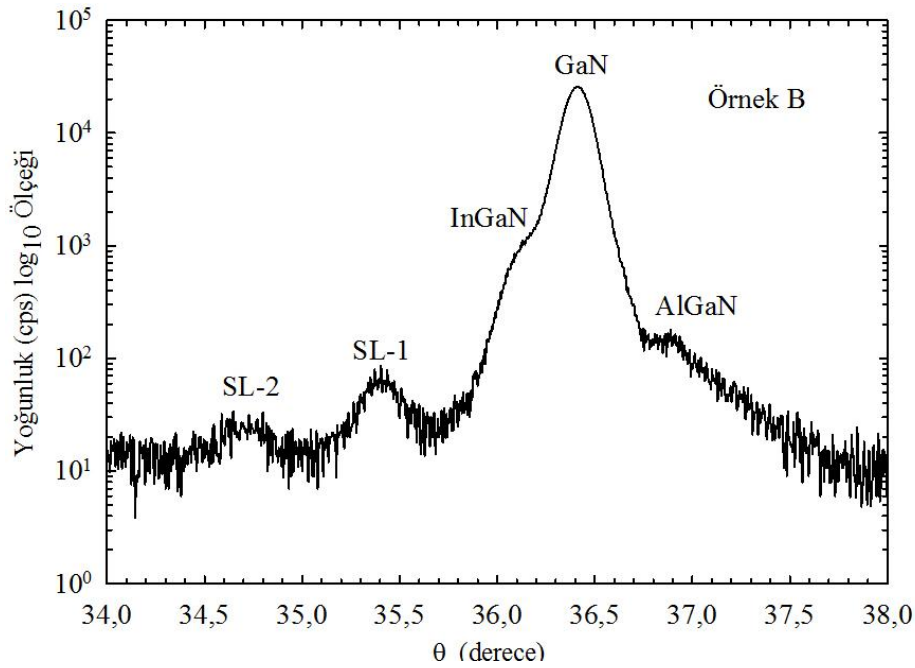
Şekil 4.1. InGaN/GaN MQW mavi LED'in yapısı

Şekil 4.2 incelendiğinde InGaN, GaN ve AlGaN tabakalara ait pikler sadece SL-1 uydu pikinin olduğu görülmektedir.

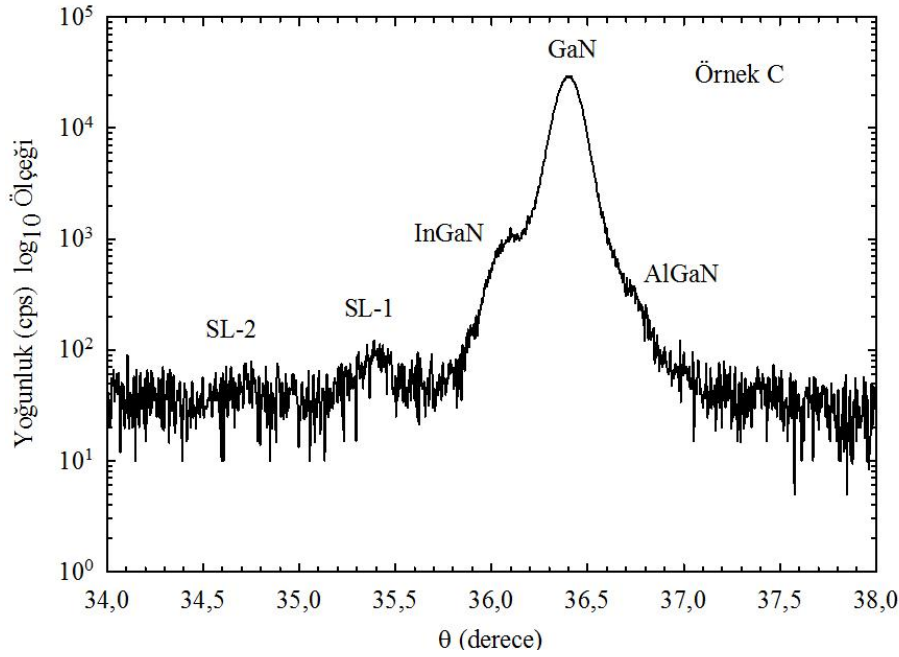


Şekil 4.2. (0004) miller yansıma düzleminde Örnek A mavi LED yapısının HRXRD yansıması

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de ise SL-1 ve SL-2 uydu pikleri beraber görülmektedir. Bu uydu pikleri GaN ve InGaN tabakalarından gelen yansımaların girişiminden oluşur ve çoklu kuantum kuyu kalınlığının bulunmasında kullanılır.



Şekil 4.3. (0004) miller yansıma düzleminde Örnek B mavi LED yapısının HRXRD yansıması



Şekil 4.4. (0004) miller yansıma düzleminde Örnek C mavi LED yapısının HRXRD yansıması

Ayrıca bu uydu pikleri kristal kalitesi ve tabakalar arası yüzey pürüzlülüğü ile ilgilidir. Şekil 4.3'ün temsil ettiği örnek B için SL-1 ve SL-2 uydu pikleri birbirinden ayrılmış ve daha belirgin olarak görülmektedir. Şekil 4.2'de temsil edilen örnek A'da SL-2 uydu piki görülmemekte, Şekil 4.4'de ise örnek C için uydu pikleri tam olarak ayrılmamıştır. Çünkü tabakalar arası pürüzlülüğün artması ile pürüzlülük kaynaklı XRD girişimleri bozulmaktadır. A ve C örneklerinde uydu piklerinin arasındaki parmak pikleri oluşumu zayıftır, bunun sebebi; sırasıyla A ve C örneklerinin tabakalar arası pürüzlülüklerinin fazla ve kristal kalitesinin düşük, B örneğinin ise daha az pürüzlü tabakalara ve daha iyi kristal kalitesine sahip olmasıdır.

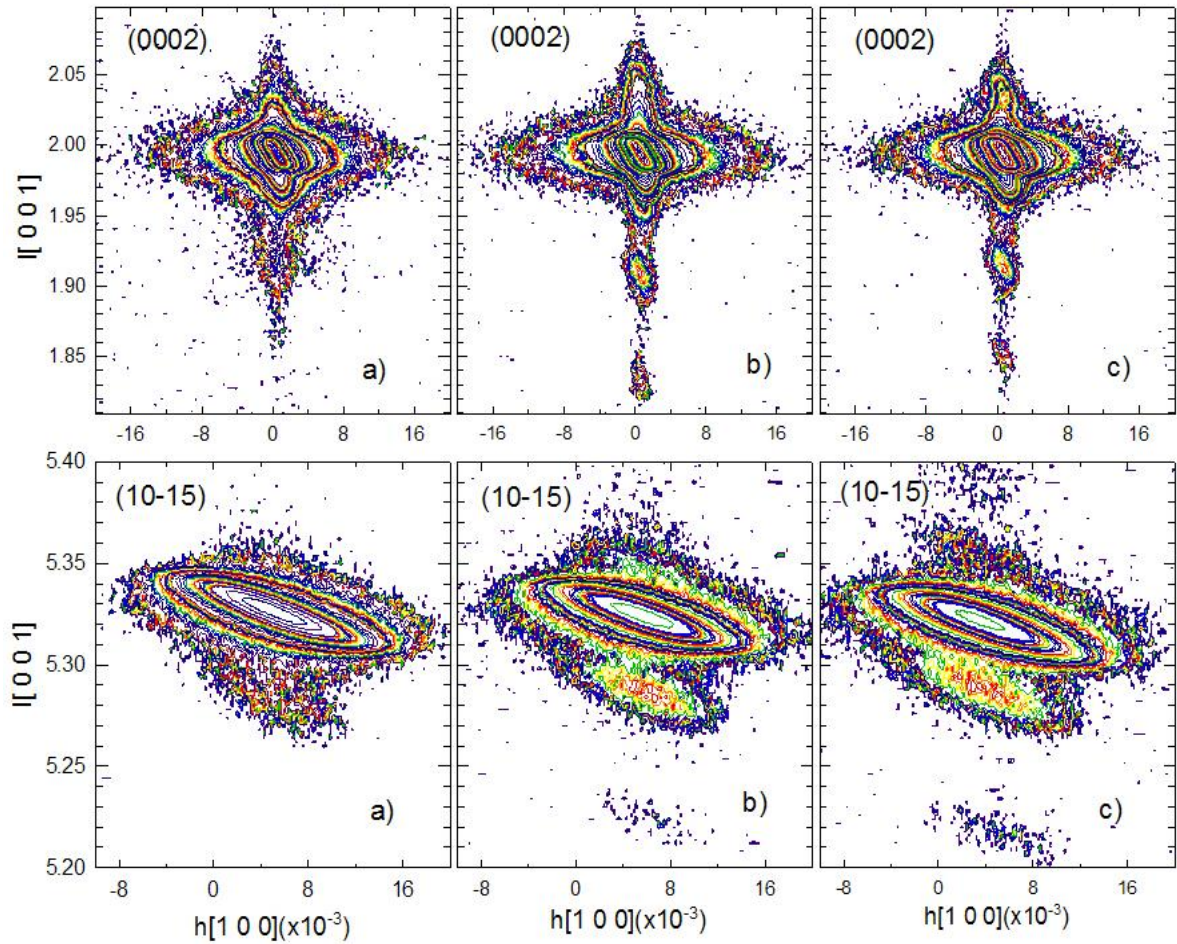
Ek olarak örnek A için Şekil 4.2'de, GaN tepe pikinin solunda InGaN ve sağında AlGaN tabakalara ait pikler tam olarak ayrılmamış olarak görülmektedir. Örnek B için Şekil 4.3'de GaN pikinin solunda ve sağında InGaN ve AlGaN piklerinin varlığı daha iyi görülmektedir. Örnek C için ise Şekil 4.4'de GaN pikinin solunda InGaN tabakanın piki daha belirginken, sağında AlGaN tabakaya ait pik örnek A'dakine benzer bir şekilde tam olarak ayrılmamıştır. InGaN ve AlGaN tabakalara ait bu HRXRD piklerinin tam olarak ayrılmaması A ve C örneklerindeki mikroyapısal kusurlara atfedilir [87-91].

4.3. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Ters Örgü Uzayı Tarama Sonuçları

Mavi LED örneklerin yapı kusurlarını araştırmak için HRXRD tekniği ile elde edilen ters örgü uzayı haritalaması kullanıldı. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda kırınım düzleminde 2θ kırınım açısı sabit tutularak θ taraması ile elde edilen dönme eğrisi sonuçları sıkça kullanıldığı görüldü [87,88,95]. Fakat dönme eğrisinin optimize edilmesinde birçok faktör etkilidir. Bunlar arasında örnek yüksekliğinin ayarlanması, yüzey eğriliği ve azumut ayarları ön plana çıkar. Kristalografik olarak cihaz ayarlarının iyi optimize edilmesi ile yine bu dönme etkisini etkileyen faktörlerden kaynaklı hata payları ile pik açısı, düzlemler arası uzaklık ve örgü parametreleri doğru sonuçlarla bulunabilir. Ancak bu parametreleri çok daha hassas ve kesin değerlerle hesaplayabilmek için ters örgü uzayı haritasını kullanmak daha etkili bir tercihtir. Çünkü örneklerin, kristalografik olarak iyi ayarlanması durumunda yavaş tarama adımlarıyla uzun sürede çalışılarak daha ayrıntılı sonuç verebilen ters örgü uzay haritası elde edilir. Ters örgü uzayı haritasında düzlem piki tüm ayrıntılarıyla net bir şekilde gözlemlenir. Dönme eğrisinde asıl piklerden uzaklaşarak, asimetrik düzlemdaki pik yansımaları hatalı bir görüntü oluşturabilir. Burada asimetrikliğin yanlış anlaşılması için bu durumu kısaca şöyle özetleyebiliriz. X-ışınlarının düzlemlerde tam yansması ile simetrik girişim yapan pikler gözlemlenir. Bazen örnek kusurları yüzünden bu durum; asimetrik pikin, şiddetini kaybederek ve simetrikliğini bozarak bir kırınım deseni oluşturması ile neticelenir. Bu sonuç örneğin analizinde yanlış yorumlara neden olur. Bu yanıltıcı olabilen kırınım desenleri ters örgü uzayı haritalama yöntemi ile engellenebilir. Dolayısıyla ters örgü haritalaması ile hem mozaik kusurların daha kesin sonuçlarla araştırılması mümkün hale gelir hem de simetrik ve asimetrik düzlemlerin InGaN tabakasındaki In oranı daha net hesaplanabilir.

InGaN/GaN çoklu kuantum kuyulu yapılarda In oranı değiştirmek, görünür bölgede tek renk ve yüksek çözünürlükte kırınım deseni vermektedir. In oranının yüksek değerlerinde In öbekleri oluşur ve yapıdaki mozaik kusurları artırarak yapıyı olumsuz etkiler. Ancak düşük In oranı değerlerinde, yapının büyütme şartlarının iyi optimize olması ile HRXRD analizinde üst üste binmiş girişimler gözlemlenir. Bu tarz girişim yapan pikler nokta kusurları ile bozular. Örneğin kalınlık hesabı için kullandığımız girişimler olan uydu piklerin sayısı azalır ve bu değişim pürüzlülükten kaynaklı parmak pik girişimlerini etkiler.

Şekil 4.5’de, örneklerin yüksek çözünürlükte, (0002) ve (10-15) düzlemlerine ait 2θ - ω taramasının ters örgü uzay haritası verildi. Burada, InGaN, GaN ve AlGaN tabakaların pikleri geniş ofset değerleri ile taranmış, daha sonra bu ofsetler GaN’ın evrensel değerlerine göre elimine edilmiştir. Simetrik pikler (0002) düzleminde daha baskındır ve GaN ve InGaN’ın yoğunluk farklarından kaynaklı girişimden dolayı oluşan uydu pikleri, InGaN pikinin hemen altında iyice ayrılmış olarak görülmektedir. Bu uydu pik ayrımlarından basit olarak kalınlık hesabı için; $T = \lambda / (2 * \Delta\theta * \cos\theta)$ formülü kullanıldı [11]. Burada λ , X-Işınları kaynağının dalgaboyu, $\Delta\theta$ uydu pik ayrımı ve θ düzlemin Bragg açısıdır.



Şekil 4.5. Simetrik (0002) ve asimetric (10-15) düzlemlerde tüm numunelerin ters örgü uzayı haritası

Kuantum kuyu kalınlıkları sıcaklığa bağlı olarak sırasıyla Çizelge 4.2’nin son sütununda verildi. Artan büyütme sıcaklığına bağlı olarak bariyer ve InGaN kuantum kuyu kalınlığı azalmakta olduğu görüldü. Bu haritalamada sırasıyla azalan açıda; AlGaN, GaN ve InGaN

tabakaların pikleri görüldü. Simetrik (0002) düzleminde GaN ve InGaN pik yansımaları üstte binmiş olduğu, GaN ve AlGaN piklerinin ise buna göre biraz daha ayrılmış olduğu gözlemlendi. Asimetrik (10-15) düzleminde ise GaN ve InGaN pik girişimleri bir miktar ayrılmıştır. Ayrıca tabakalar dışında SL-1 ve SL-2 uydu pikleri görülmektedir. Bu uydu pikleri; Simetrik (0002) düzleminde B ve C örneğinde daha belirgin olarak görülürken, A örneğinde SL-1 uydu piki tam ayrılmamıştır ve SL-2 uydu piki yansıması görülmemektedir. Örnek B ve C'nin simetrik olmayan (10-15) düzlemlerinde ise uydu piklerinin birinin zayıf olduğu görüldü. Ters örgü uzayı haritalamasına göre verilen bu pik yansımaları, yukarıda Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilen InGaN, GaN ve AlGaN pik yansımaları ile uyum içindedir.

Çizelge 4.2. Numunelerin InGaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığına göre In (%) oranı ve kuantum kuyu kalınlığı (L) değerleri

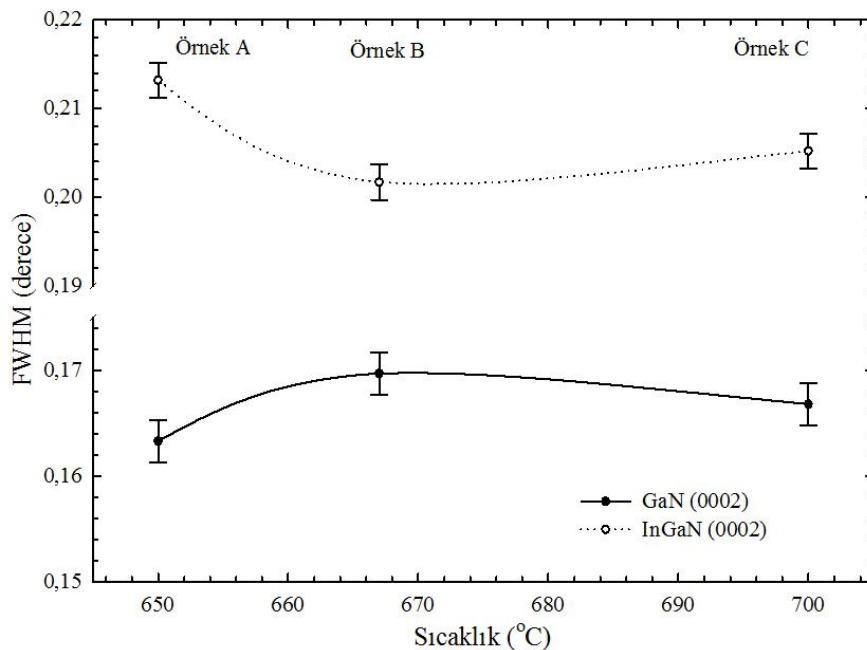
Numuneler	InGaN tabaka büyütme sıcaklığı	In oranı (%)	Kuantum kuyu kalınlığı
-	°C	-	nm
A	650	10,87	13,87
B	667	9,01	12,58
C	700	7,51	10,39

Ayrıca Şekil 4.5'deki ters örgü uzayı haritasında l [001] yönde simetrik düzlemde (0002), sırasıyla GaN, InGaN ve AlGaN için yaklaşık olarak l miller indisleri 2,00; 1,97 ve 2,25 olduğu görüldü. Ayrıca (10-15) asimetrik düzlemde ise sırasıyla GaN, InGaN ve AlGaN için l miller indisleri yaklaşık olarak 5,33; 5,28 ve 5,35 olarak gözlemlendi.

Ayrıca Çizelge 4.2'nin üçüncü sütununda görüldüğü gibi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 'daki x In oranı % değerleri de; aktif InGaN tabakanın büyütme sıcaklığının artmasıyla azalma eğilimi gösterdi.

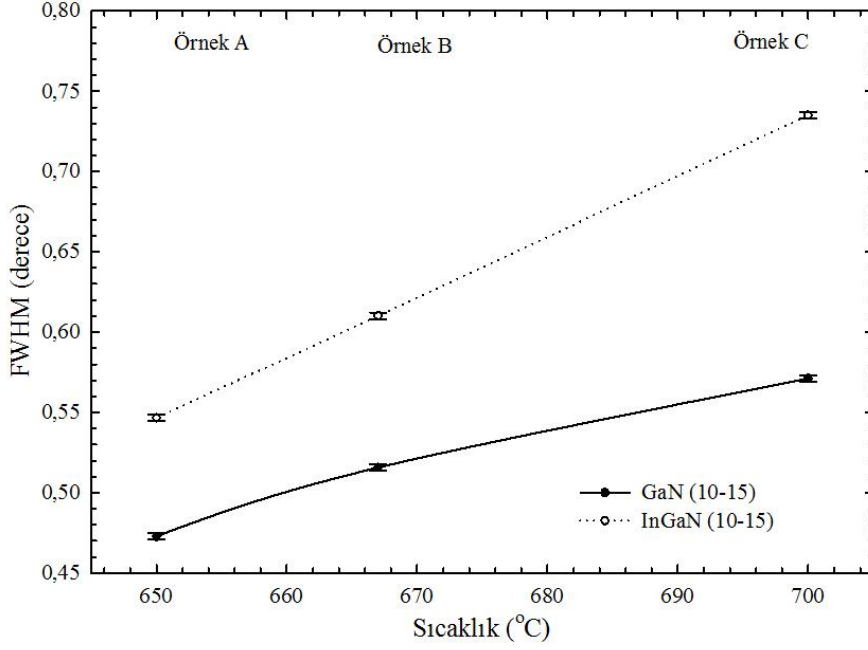
4.4. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin pik yüksekliği yarı genişliklerinin (FWHM) Sonuçları

A, B ve C örnekleri için, Şekil 4.6 simetrik (0002) düzleminde, Şekil 4.7 ise asimetrik (10-15) düzleminde, GaN ve InGaN tabakaların pik yüksekliği yarı genişliklerinin (FWHM), büyütme sıcaklığına bağlı olarak değişimi verildi. (0002) simetrik düzlemi için artan büyütme sıcaklıklarda GaN tabaka, InGaN tabakaya göre daha düşük FWHM değerlerindedir. Şekillerdeki eğri üzerinde ek ölçüm barları hata payı miktarlarını göstermektedir.



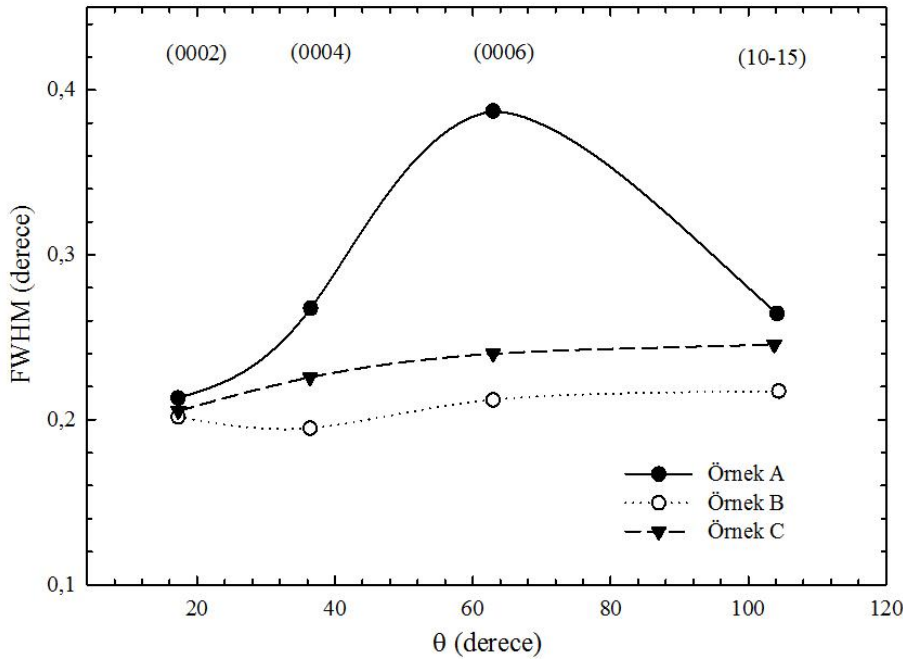
Şekil 4.6. (0002) simetrik düzleminde GaN ve InGaN tabakalar için büyütme sıcaklığına bağlı FWHM değişimi

GaN tabakanın FWHM değişimi artan sıcaklığa göre önce artıp (667 °C'de maksimum olmaktadır) sonra azalmakta, InGaN tabaka için bu durum tam tersi olarak önce azalıp (667 °C'de minimum olmaktadır) sonra artmaktadır. (10-15) asimetrik düzlemi için her iki tabakada da, FWHM değerleri ise artan büyütme sıcaklığıyla orantılı olarak artma eğilimi göstermektedir. InGaN tabaka için hesaplanan değerler, GaN tabakaya nispeten daha yüksek değerlerde olup, InGaN tabakası GaN'a göre (yaklaşık % 20 oranında) daha yüksek oranda artma eğilimindedir.



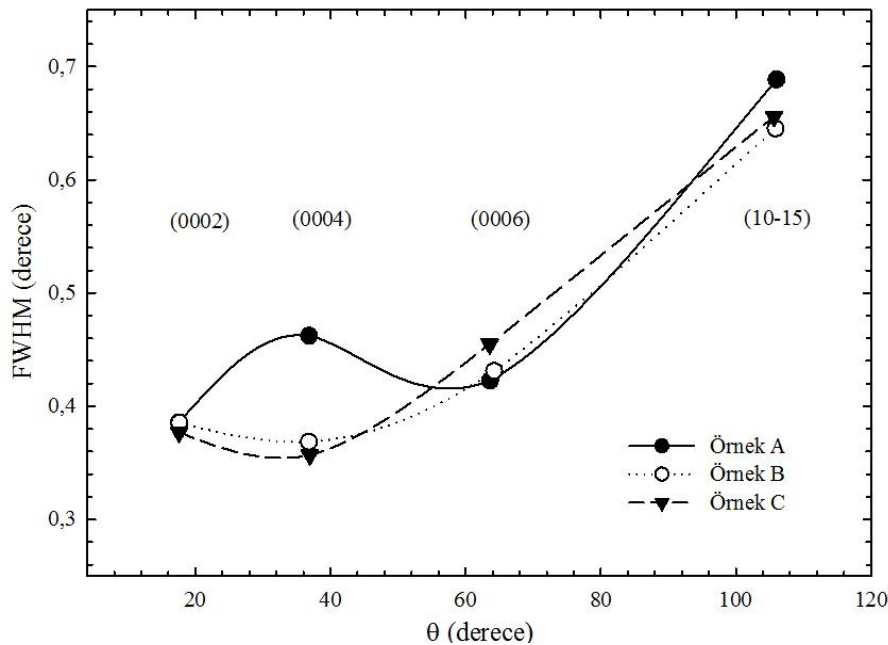
Şekil 4.7. (10-15) asimetrik düzleminde GaN ve InGaN tabakalar için büyütme sıcaklığına bağlı FWHM değişimi

Ayrıca tüm taramaları temsilen Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sırasıyla InGaN ve AlGaN tabakalarının, (0002), (0004), (0006) ve (10-15) düzlemlerinin pik pozisyonlarının ve pik yüksekliğinin yarı genişlikliği verildi. InGaN tabaka ile aynı ölçüm sıklasında değerlendirme yapabilmek amacıyla, AlGaN FWHM değerlerine $0,15^\circ$ eklendi.



Şekil 4.8. Örnek A, B ve C için InGaN tabakası (0002), (0004), (0006) ve (10-15) Bragg kırınım açılarında FWHM değerleri

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 kullanılarak üç örnek için aynı düzlemlere ait FWHM değerleri karşılaştırılabilir. InGaN tabakasında Şekil 4.8’de verildiği gibi, her üç örnek için (0002) simetrik düzleminde artan sıralamada B, C ve A örneklerinin FWHM değerleri birbirine çok yakındır. (0004) düzleminde (0002) düzlemine göre FWHM değerleri farkı daha fazladır ancak sıralama değişmemiştir. (0006) düzleminde B ve C örnekleri; (0002) düzlemine paralel bir şekilde sıralandı ancak Örnek C için FWHM değeri dramatik bir artışla diğerlerinden ayrıldığı görüldü. (10-15) asimetrik düzlemde artan sıralama tüm düzlemlerle aynıdır ve artış oranları (0004) düzlemine oldukça benzer bir eğilimdedir. AlGaN tabakası için Şekil 4.9’daki grafik incelenecek olursa, (0002) düzlemindeki FWHMdeğerleri; örnek A, B ve C için birbirine çok yakın değerlerdedir.



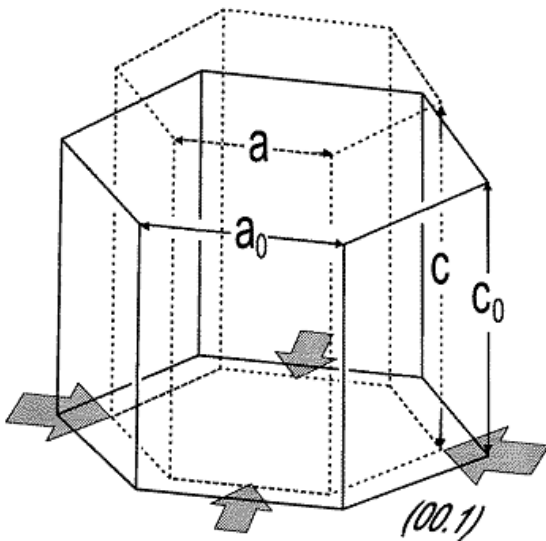
Şekil 4.9. Örnek A,B ve C için AlGaN tabakası (0002), (0004), (0006) ve (10-15) Bragg kırınım açılarına bağlı olarak FWHM değerleri

(0004) düzlemindeki Örnek A’dan kaynaklanan artış farkı istisna tutulursa, (0004) ve (0006) kırınım düzlemleri birbirlerine göre ters sıralamada fakat aynı değişim oranında bir karakter sergilerler. Bu değişimler ise (0002) düzlemine göre daha fazladır. Ayrıca asimetrik (10-15) düzlemi de bu değişim oranına uygunluk gösterir fakat sıralama diğerlerinden farklıdır.

4.5. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin In Alaşım Oranı (x) Değerlerin “Üçüncü Derece Denklem” ile Hesabı

InGaN temelli LED yapılarda In alaşım oranı x 'in kesin değerlerle ölçülememesi bu alanda yapılan çalışmalarda sıkça rapor edilen bir genel bir sorundur ve bu durum ölçülen In oranı değerlerinde zorlama katkısında mevcudiyetinden kaynaklanır [10]. HRXRD tekniği ile ölçülen örgü parametrelerine dayalı zorlama ve In oranı etkilerini birbirinden ayırt etmek için kübik denklem formu kullanılır. InGaN, bu tarz sorunların sıkça karşılaşıldığı bir malzemedir. Bu tez çalışmasında bu ayrımın yapılabilmesi için kübik denklem yöntemi kullanılmıştır.

Literatürde sıkça karşılaşılabileceği üzere; büyütülen kristallerin kalitesinin artırılması için; fonksiyonel grup III azot alaşım filmler ile safir (0001) altaş arasında GaN tampon tabaka büyütülür [10]. Bu sayede büyütülen kristal tabaka ile GaN tampon tabaka arasında c -yönünde iç düzlem yönelimi kurulur. Bunun sonucunda GaN tampon tabaka, altaş üzerine örgü rahatlamalı olarak biçimlenir ve kritik kalınlığın altındaki ince filmde, uyarılmış düzenli bir büyüme sağlanır [10]. Altıgen birim hücrelerin taban ve tavan düzlemleri çakışır ve bu çakışma düzleminde zorlama üretilir. Bu durum altıgen hücrenin bozulmasına neden olur ve c/a oranı değişir (Şekil 4.10) [10]. Brim hücrenin bozulması altıgen sistemlerin elastik modünün ifadesi kullanılarak genelleştirilmiş Hooke yasası ile tanımlanabilir.



Şekil 4.10. İki eksenli zorlama altında altıgen birim hücre

Bütün bu işleyişin sonucunda epitaksiyel sistemlerde birim hücrenin c eksenine, z eksenine veya üç yöne paraleldir. Bu durum altıgen birim hücreleri için elastik modül denkleminin daha sade hale gelmesini sağlar [10]. Zorlama ya da iki yönlü zorlama durumunda kristal yüzeyinin normaline doğrultusundaki gerilme $\sigma_{33} = 0$ ve taban düzleminde ε_{11} zorlaması ve büyütme yönünde ε_{33} zorlaması arasındaki oran, Eşitlik 4.1 ile verilir.

$$\varepsilon_{33} = -\frac{C_{13}}{C_{33}}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \quad (4.1)$$

Burada σ_{ij} gerilme ifadesi, C_{ij} Voigt's rotasyonunda elastik modül ifadesidir ve temel düzleminde $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{33}$ ile izotropiktir. Uyarılmış ve aynı zamanda kısmi örgü rahatlamalı filmlerde altıgen yapı korunur. Zorlamaların tanımlanmasıyla $\varepsilon_{33} = (c(L) - c_0(L))/c_0(L)$ ve $\varepsilon_{11} = (a(L) - a_0(L))/a_0(L)$ denklemleri Eşitlik 4.2 şeklinde yazılır.

$$\frac{c(L) - c_0(L)}{c_0(L)} = -2 \frac{\varepsilon_{11}(L)}{\varepsilon_{33}(L)} \frac{a(L) - a_0(L)}{a_0(L)} \quad (4.2)$$

Burada $c(L)$ ve $a(L)$ InGaN'ın zorlamalı örgü parametresidir. $c_0(L)$ ve $a_0(L)$ uygun rahatlamalı örgü parametreleridir. Zorlamalı örgü parametreleri $c(L)$ ve $a(L)$ XRD analizinden doğrudan ölçülür. Uyarılmış büyütme için $a(L) = a_0(S)$ dir ve burada S alttaşı ve GaN tampon tabakayı temsil eder. Elastik modül ε_{11} ve ε_{33} alışımın kimyasal kompozisyon değerine bağlıdır. Altıgen kristal sistemi için Poission oranı, iki yönlü ve (0001) düzlemine dik olan zorlama ilişkisi, Eşitlik 4.3 ile verilir.

$$\nu = 2 \frac{C_{13}}{C_{33}} \quad (4.3)$$

Birinci mertebe yaklaşım olarak Poission oranı için lineer ilişki Eşitlik 4.4 ile verilir.

$$\nu(L) = x\nu(K) + (1-x)\nu(M) \quad (4.4)$$

Burada K ve M, L kristal tabakasını oluşturan bileşenlerdir ve bizim çalışmalarımız için sırasıyla; InN, GaN ve InGaN a karşılık gelmektedir. $a_0(L)$, $c_0(L)$ ve $\nu(L)$ ifadeleri Eşitlik 4.2’de yazıldığında, Eşitlik 4.5 deki kübik denklem elde edilir.

$$Px^3 + Qx^2 + Rx + S = 0 \quad (4.5)$$

InGaN tabakasındaki In alaşım oranı x , Vegard yasasına göre InN ile GaN’ın pik pozisyonuna bağlı olarak bulunabilir. InGaN tabaka için hesaplanan değerlerin, InN ile GaN’a ait piklerinin olması gereken yüzde değerinden sapması örgülerde zorlamanın varlığını gösterir. InGaN’ın x değerinin, olması gerekenden farklı bir değere sahip olup olmadığı Vegard yasası ile hesaplanır. InGaN tabakada x değerindeki zorlamadan kaynaklı katkıyı ayırmak için Eşitlik 4.5 de verilen $Px^3 + Qx^2 + Rx + S = 0$ “küçük denklem” kullanılabilir [10]. Bu denklemin P, Q, R ve S katsayıları, InN, GaN’ın evrensel a - ve c -örgü parametreleri ile Poission oranlarını içerir ve çözümü; örgü parametreleri, Vegard Yasası ve Poission denklemi kullanılarak elde edilir. x oranı, bir yazılım yardımıyla çözülebilir. Bu bulunan x oranı ile zorlama, hidrostatik ve iki yönlü zorlama rahatlatma yüzdesi gibi değerler hesaplanabilir.

Ters örgü uzay haritasında GaN ile InGaN pik ayrımlarından In oranı yüzde değerleri kesin olarak belirlendi. Bu In alaşım oranlarını, zorlama değerlerinden ayırmak için kullanılan “küçük denklem” metodu önemli bir yöntemdir [10]. “Küçük denklem”; Eşitlik 4.6’de verilen x için Vegard yasasına dayalı a ve c -örgü denklemleri, Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8 ile verilir;

$$x = \frac{c_0(\text{InGaN}) - c_0(\text{GaN})}{c_0(\text{InN}) - c_0(\text{GaN})} \quad (4.6)$$

$$c_0(\text{InGaN}) = x c_0(\text{InN}) + (1-x) c_0(\text{GaN}) \quad (4.7)$$

$$a_0(\text{InGaN}) = x a_0(\text{InN}) + (1-x) a_0(\text{GaN}) \quad (4.8)$$

Vegard Yasasına göre; $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımının örgü parametreleri, $(1-x)$ kadar GaN ve x kadar da InN katkısıyla oluşur. Yine Vegard yasası temelli, Eşitlik 4.9'da verilen birinci mertebe Poisson oranı denklemi, Eşitlik 4.5'e uyarlanabilir [10].

$$\nu(\text{InGaN}) = x\nu(\text{InN}) + (1-x)\nu(\text{GaN}) \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.5'de verilen $Px^3 + Qx^2 + Rx + S = 0$ denkleminde ki P, Q, R ve S katsayıları sırasıyla; Eşitlik 4.10, Eşitlik 4.11, Eşitlik 4.12 ve Eşitlik 4.13 ile,

$$P = (\nu(\text{InN}) - \nu(\text{GaN}))((a_0(\text{InN})) - a_0(\text{GaN}))(c_0(\text{InN}) - c_0(\text{GaN})) \quad (4.10)$$

$$Q = (1 + \nu(\text{GaN}))(a_0(\text{InN}) - a_0(\text{GaN}))(c_0(\text{InN}) - c_0(\text{GaN})) + (\nu(\text{InN}) - \nu(\text{GaN})) \\ \left[(a_0(\text{InN}) - a_0(\text{GaN}))c_0(\text{GaN}) + (a_0(\text{GaN}) - a(\text{InGaN}))(c_0(\text{InN}) - c_0(\text{GaN})) \right] \quad (4.11)$$

$$R = (a_0(\text{InN}) - a_0(\text{GaN})) \left[(1 + \nu(\text{GaN}))c_0(\text{GaN}) - c(\text{InGaN}) \right] + \\ (c_0(\text{InN}) - c_0(\text{GaN})) \left[(1 + \nu(\text{GaN}))a_0(\text{GaN}) - \nu(\text{GaN})a(\text{InGaN}) \right] + \\ (\nu(\text{InN}) - \nu(\text{GaN}))(a_0(\text{GaN}) - a(\text{InGaN}))c_0(\text{GaN}) \quad (4.12)$$

$$S = (1 + \nu(\text{GaN}))a_0(\text{GaN}) - c_0(\text{GaN}) - \nu(\text{GaN})a(\text{InGaN})c_0(\text{GaN}) - \\ a_0(\text{GaN})c(\text{InGaN}) \quad (4.13)$$

şeklinde verilir. Bu denklemlerde kullanılan GaN, InN için sabitler sırasıyla $C_0^{\text{GaN}} = 0,51850 \text{ nm}$, $a_0^{\text{GaN}} = 0,31892 \text{ nm}$, $C_0^{\text{InN}} = 0,57033 \text{ nm}$, $a_0^{\text{InN}} = 0,35387 \text{ nm}$, GaN için $C_{13} = 103 \text{ GPa}$, $C_{33} = 405 \text{ GPa}$, InN için; $C_{13} = 92 \text{ GPa}$, $C_{33} = 224 \text{ GPa}$ olarak verilir [11].

Bu denklemin üç reel kökü vardır. Fakat yalnız biri fiziksel anlam taşır. x oranının değeri sıfır ile bir arasında değişir. InGaN için bulunan In alaşım değerleri oranı x ; artan büyütme sıcaklığına göre A, B ve C örnekleri için sırasıyla % 10,87; 9,01 ve 7,51 olarak hesap edildi. İndiyum'un yüzde olarak değeri artan büyütme sıcaklığına göre azalan davranış sergilediği anlaşıldı. Doğru In değeri hesaplandıktan sonra dik ve paralel zorlamalar çok

daha kesin değerlerle hesaplanır. Bu kesin değerlerin hesaplanmasında ters örgü uzayı haritalamanın önemi büyüktür. Standart ölçümlerde ortaya çıkan pik kaymaları veya ofsetler ters örgü uzayı haritası ile önlenmiş olur. GaN ve InGaN tabakalar için hesaplanan karışık zorlama değerleri Çizelge 4.3’de; üçüncü ve dördüncü sütunlarda artan sıcaklığa bağlı olarak verildi. Zorlama değerlerinin hesabı InGaN’ın evrensel değerlerine ve $\Delta x/x_0$ denkleminde göre yapıldı. Burada $\Delta x = x - x_0$ ve x, x_0 sırasıyla zorlamalı ve zorlamasız (evrensel) örgü parametreleridir. InGaN’ın evrensel değerleri ise InN ve GaN örgü parametreleri kullanılarak hesaplandı.

Çizelge 4.3. Numunelerin GaN ve InGaN aktif tabakanın büyütme sıcaklığına göre karışık zorlama değerleri

Numuneler	InGaN tabaka büyütme sıcaklığı °C	GaN Karışık zorlama ($\times 10^{-4}$)	InGaN Karışık zorlama ($\times 10^{-4}$)
-	°C	-	-
A	650	-5,88	-2,02
B	667	-6,15	-7,06
C	700	-5,51	-6,38

Azotlu malzemelerde, kristalize olarak büyümelerine rağmen sık sık mozaik yapı kusurları görülür. Bunlar; In öbeklerin oluşması, Al’lu tabakaların çabuk soğutulmasından kaynaklı gerilmeler, tabakalar arası örgü uyumsuzlukları ve safsızlıklar gibi nedenlerle oluşan nokta, çizgi ve hacimsel kusurlardır [87].

4.6. InGaN/GaN MQW Mavi LED’lerin Örgü Parametrelerinin Hesabı

HRXRD tekniğinde paralel demet içinde k_{a1} ve k_{a2} ’yi ayırıp k_{a2} ’yi elimine etmek için Ge 022 (+,-,-,+) monokromatörü göbel aynasıyla birlikte kullanıldı. Simetrik ve asimetrik yansımaların ölçümleriyle Bragg açısı θ ve örgü eğilme açısı τ ; $\theta = (\theta_+ + \theta_-)/2$ ve $\tau = (\theta_+ - \theta_-)/2$ eşitliklerinden hesaplanabilir [96]. InGaN bozulmuş altıgen birim hücresinin a- ve c- örgü parametreleri, (hkil) yansımasının uygun açısından hesaplanır. Örgü hesabını yapmak için üç farklı metod kullanılabilir;

İlk metod olarak Vegard Yasası'ndan InGaN'in örgü parametresi; x kadar InN örgü parametresi ile (1-x) kadarda GaN evrensel örgü parametresi toplamı ile bulunur (Eşitlik 4.7).

InGaN tabakası için hesaplanan değerler Çizelge 4.4'ün, AlGaN tabaka için ise Çizelge 4.5'in üç ve altıncı sütunlarında verildi. Artan büyütme sıcaklığında, Vegard Yasası'ndan bulunan değerlere göre; c - örgü parametreleri, InGaN tabakasında pikometre mertebesinde azalan, AlGaN tabakasında önce artıp sonra azalan bir davranış sergiler. a - örgü parametreleri ise artan büyütme sıcaklığıyla, InGaN tabaka için pikometre mertebede önce azalan sonra artan, AlGaN tabaka için sürekli artan bir davranış sergiler.

Çizelge 4.4. InGaN tabakanın tüm örnekler için Vegard Yasası, evrensel örgü parametreleri ve kübik denlem yöntemlerine göre bulunan örgü parametrelerinin büyütme sıcaklığına göre karşılaştırılması

Numuneler	T °C	c_{vegard} nm	c_o nm	c_{hata} nm	a_{vegard} nm	a_o nm	a_{hata} nm
A	650	0,5231	0,5228	0,5231	0,3207	0,3215	0,3139
B	667	0,5230	0,5226	0,5230	0,3202	0,3214	0,3097
C	700	0,5223	0,5225	0,5223	0,3217	0,3213	0,3248

Çizelge 4.5. AlGaN tabakanın tüm örnekler için Vegard Yasası, evrensel örgü parametreleri ve kübik denlem yöntemlerine göre bulunan örgü parametrelerinin büyütme sıcaklığına göre karşılaştırılması

Numuneler	T °C	c_{vegard} nm	c_o nm	c_{hata} nm	a_{vegard} nm	a_o nm	a_{hata} nm
A	650	0,5139	0,5141	0,5139	0,3168	0,3163	0,3222
B	667	0,5145	0,5147	0,5145	0,3171	0,3166	0,3219
C	700	0,5123	0,5129	0,5123	0,3176	0,3156	0,3373

İkinci metod olarak Kübik sistemi referans aldık. Asimetrik düzlemlerden a ve c örgü parametrelerini elde etmek için aşağıdaki denklemlerde paydada $\sin \tau$ ve $\cos \tau$ kullanılarak, Eşitlik 4.14 ve Eşitlik 4.15 aşağıdaki gibi elde edilir [11].

$$c = \frac{\lambda l}{2 \sin \theta \cos \tau} \quad (4.14)$$

$$a = \frac{\lambda \sqrt{4/3} \sqrt{h^2 + hk + k^2}}{2 \sin \theta \sin \tau} \quad (4.15)$$

İkinci metoda göre c değerleri artan büyütme sıcaklığına göre; InGaN tabaka için pikometre mertebede azalan, AlGaN tabaka için önce artan sonra azalan bir davranış sergilerken, Vegard yasasından yapılan hesaplarla oldukça paralel sonuçlar ortaya koyar. a - değerleri ise InGaN tabakada pikometre seviyede azalan, AlGaN tabaka için ise önce artan sonra azalan bir davranış gösterir. Ayrıca a - ve c - örgü parametreleri bu metodda, birbirleriyle aynı değişim seyrini gösterirler.

Üçüncü metod olarak Kübik sistemde hata fonksiyonunu kullandık. $(1 - D \cos^2 \theta) / (r \sin \theta)$ hata fonksiyonu ve Bragg Yasası kullanılarak bu parametreler Eşitlik 4.16 ve Eşitlik 4.17'deki gibi bulunur [85].

$$c = \frac{l \lambda}{2 \sin \theta} x (\text{Hata Fonksiyonu}) \quad (4.16)$$

$$a^{(hkl)} = c d_{hkl} \sqrt{\frac{(4/3)(h^2 + k^2 + hk)}{c^2 - l^2 d_{hkl}^2}} \quad (4.17)$$

Hata fonksiyonunda D ; asimetrik düzlemde (ekvator düzlemde) örneğin goniometer eksenine ile mümkün olan yerdeğiştirmesidir ve değeri 0,02'dir. R ; örneğin dedektöre olan uzaklığıdır ve 450 nm'dir. Üçüncü yöntemden bulduğumuz c - örgü parametre değerleri artan büyütme sıcaklığına göre; InGaN tabakada pikometre mertebesinde azalan, AlGaN tabakada önce artan sonra azalan davranış sergiler. Üçüncü yöntemdeki düzeltme

fonksiyonu a örgü parametresi için kullanılmaz ve artan büyütme sıcaklığına göre hem InGaN tabaka hem de AlGaN tabaka için önce azalan sonra artan davranış gösterir.

4.7. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Nokta Kusurları

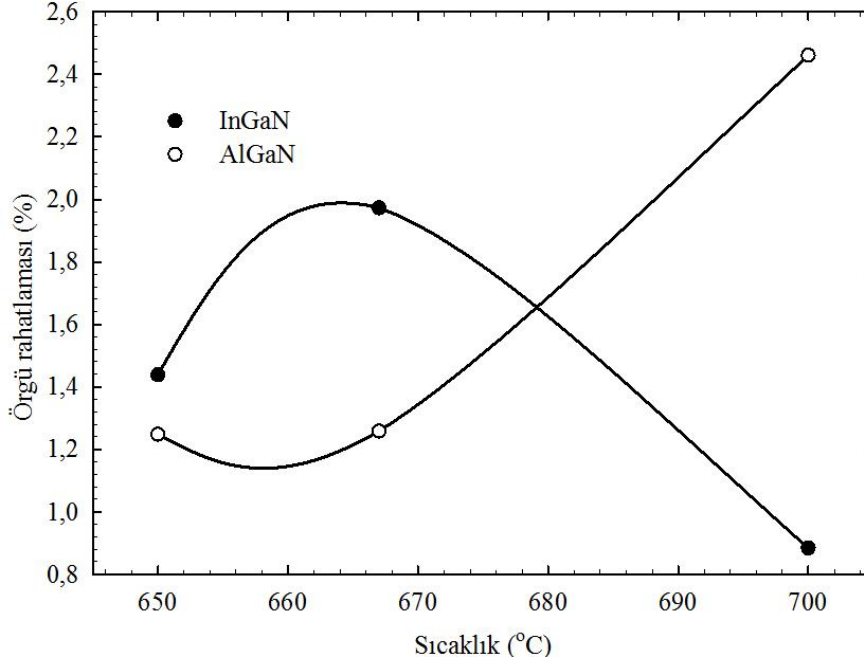
Bu bölümde nokta kusurları olarak ifade edilen örgü rahatlama değeri, a - ve c - zorlama (strain), tabakaları a - ve c - iki eksenli ve üç boyutta hidrostatik zorlama, gerilme (stress) faktörleri incelenecektir.

4.7.1. InGaN/GaN MQW mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakalarına ait örgü rahatlama değerinin hesabı

Alttaş ve büyütülen aktif tabakalar arasında rahatlamalı örgü uzunluğu farkının, rahatlamamış evrensel örgü uzunluklarının farkına göre oranının yüzdesi olarak tanımlanan örgü rahatlaması Eşitlik 4.18 ile verildi [11].

$$R_{\%} = \frac{a_{\parallel}^{L(\text{ortalama})} - a_{\parallel}^{S(\text{ortalama})}}{a_{\parallel}^{L(0)} - a_{\parallel}^{S(0)}} \times 100 \quad (4.18)$$

Hesaplanan örgü rahatlaması sıcaklığa bağlı olarak InGaN ve AlGaN tabakası için Şekil 4.11'da verildi. Örgü rahatlaması, artan büyütme sıcaklığıyla birlikte InGaN tabaka önce artıp sonra azalma gösterirken, AlGaN tabakada ise tam tersi bir davranış söz konusudur. 667 °C'ye kadar olan büyütme sıcaklıklarında InGaN tabakanın örgü rahatlama % değeri, AlGaN tabakanın örgü rahatlama değeri üzerinde olup, 667 °C'den yüksek sıcaklıklarda AlGaN tabaka rahatlama değerinin altında kalmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda rahatlama seviyesi; AlGaN tabaka için dramatik bir şekilde artarken (667-700 °C arasında kadar yaklaşık %50 artmıştır), InGaN tabaka için bu durum tam tersine bir davranışla ciddi bir düşüş sergiler (667-700 °C arasında kadar yaklaşık %50 azalmıştır). Sonuç olarak 700 °C'deki büyütülen C örneğinde, AlGaN tabaklardaki rahatlama yüzdesi InGaN'ın yaklaşık üç katı değerine ulaşmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki büyütülen tabakaların rahatlama değerleri arasında oluşan bu fark örgü uyumunu olumsuz yönde etkileyeceğinden bu sıcaklıklar LED örneklerinin büyütülmesi için uygun değildir. Sonuç olarak, 667 °C



Şekil 4.11. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm örnekler için sıcaklığa bağlı örgü rahatlaması

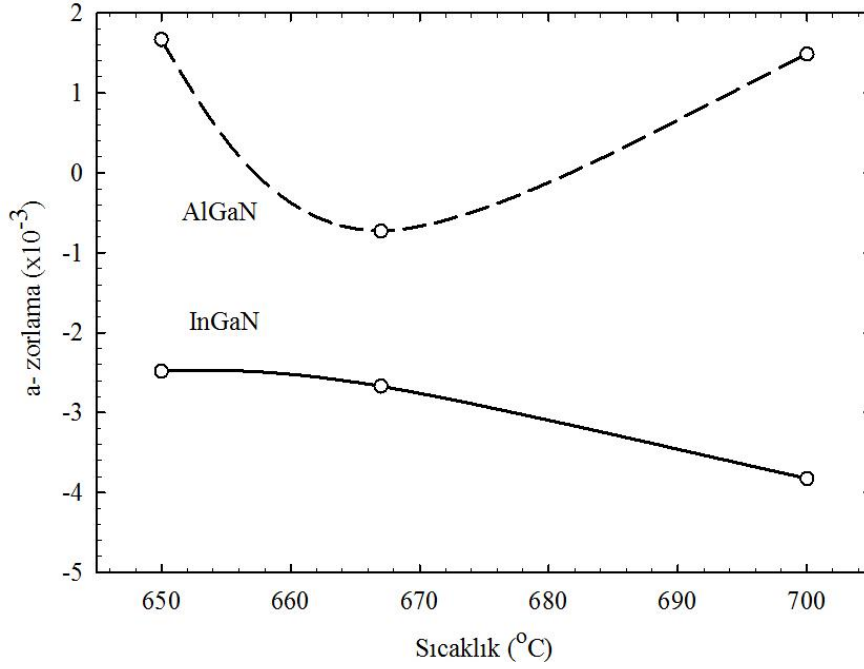
civarındaki büyütme sıcaklığının InGaN mavi LED yapılar için optimum büyütme sıcaklığı olduğu kanaatine varılmıştır.

4.7.2. InGaN/GaN MQW mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakalarına ait a - ve c -zorlama değerlerinin hesabı

GaN tabakasındaki nokta ve çizgi kusurları örgüde yönelimli olarak kaymaya sebebiyet verir. Bu kayma piklerde düşük değerlerde sapmaya neden olur. Zorlama düzlemler arası mesafe, örgü parametresi ve In oranıyla doğrudan alakalıdır. Hatta kutup açısının artmasıyla birlikte ortaya çıkan zorlama açısının sinüsünün karesi, örgüdeki gerilmelerin tanımlamasını verir. InGaN ve AlGaN tabakalarda oluşan zorlama biaksiyeldir (iki yönlü). Yüzeyle paralel baskılı ya da gerilmeli zorlamalar oluşabilir. Eğer bu zorlamalar değişken olursa, zorlama üç eksenli olmalıdır. Bu durumda yüzeyle normal yönde zorlamanın bir bileşeni vardır. Zorlama değerlerini, alttabakanın ya da aktif tabakanın kendi evrensel değerlerinden hesap edebiliriz. Bu tez çalışmasında incelediğimiz örneklerimizin zorlama değerlerini, InGaN ve AlGaN için kendi evrensel değerlerinden hesaplandı, zorlama denklemi hata fonksiyonu ile birlikte Eşitlik 4.19 ile verilir [11]:

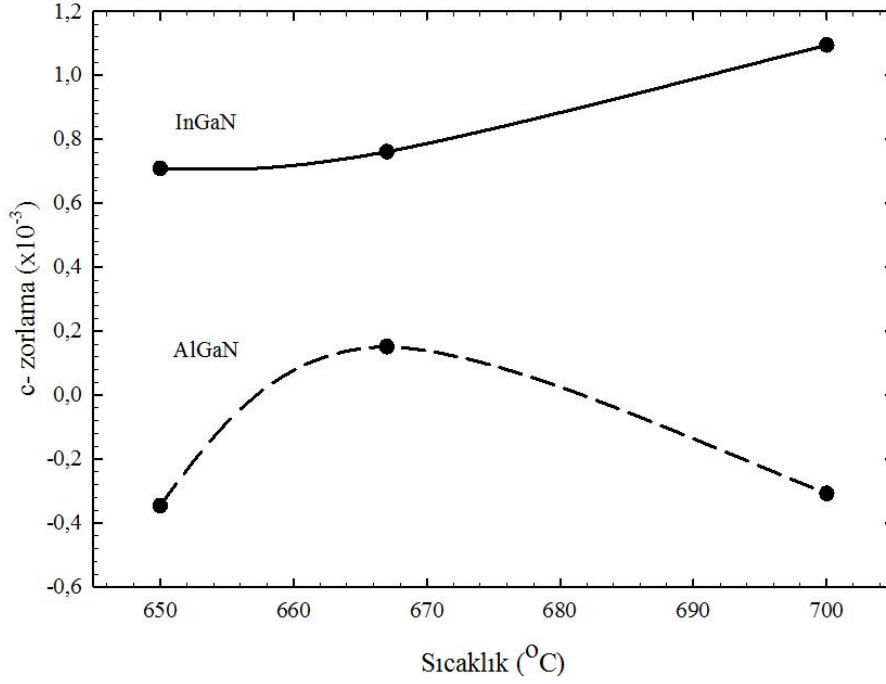
$$\frac{\delta d}{d}, \frac{\delta a}{a}, \frac{\delta c}{c} = -\delta \theta \cot \theta \quad (4.19)$$

InGaN ve AlGaN tabakaların a - zorlama değerleri; Şekil 4.12’de artan büyütme sıcaklığına göre verildi. a yönlü zorlama; Şekil 4.12’de görüldüğü gibi artan büyütme sıcaklığıyla birlikte AlGaN tabaka için, önce azalıp 667 °C için negatif bölgede minimum değere ulaştıktan sonra, ilk değer seviyesine artış gösterirken, InGaN tabakada ise negatif bölgede doğrusala yakın azalma eğilimi görüldü.



Şekil 4.12. InGaN ve AlGaN tabakaların a - örgü zorlaması

InGaN ve AlGaN tabakaların c - zorlama değerleri, Şekil 4.13’de artan büyütme sıcaklığına göre verildi. Şekil 4.13 incelendiğinde c yönlü zorlama; AlGaN tabakasında (a - zorlamayı tam tersi bir davranışla) negatif değerden artarak, 667 °C için pozitif bölgede maksimum değere ulaştıktan sonra yine negatif bölgede eski değeri seviyesine kadar azalma gösterirken, InGaN tabakada ise (a - zorlamayı tam tersi bir davranışla) pozitif bölgede yine doğrusala yakın artan bir eğilime sahip olduğu görüldü. Sonuç olarak hem InGaN hem de AlGaN tabakalardaki a - ve c - zorlama değerleri birbirlerine tamamen zıt yönlü davranışlar gösterdi. AlGaN tabakada geniş değerlerdeki artma-azalma veya azalma-artma davranışına, Al yapısının ani soğutulmasından kaynaklı gerginlikler neden olmaktadır [97,98]. InGaN tabakadaki zorlama değerlerinde görülen doğrusal olmaya yakın artış veya azalış davranışı, nokta kusurlarının bu tabakayı fazla etkilemediğini düşündürdü.



Şekil 4.13. InGaN ve AlGaN tabakaların c- örgü zorlaması

Ayrıca Şekil 4.12’de de görüldüğü gibi InGaN için asimetrik düzlemlerde daha düşük miktarda zorlama değerleri gözlemlendi. Bu durumun, kristal yapı kalitesinin oldukça iyi olmasından kaynaklı olduğu sonucuna varıldı.

4.7.3. InGaN/GaN MQW mavi LED’lerin InGaN ve AlGaN tabakaları a- ve c- iki eksenli ve üç boyutta hidrostatik zorlama değerlerinin hesabı

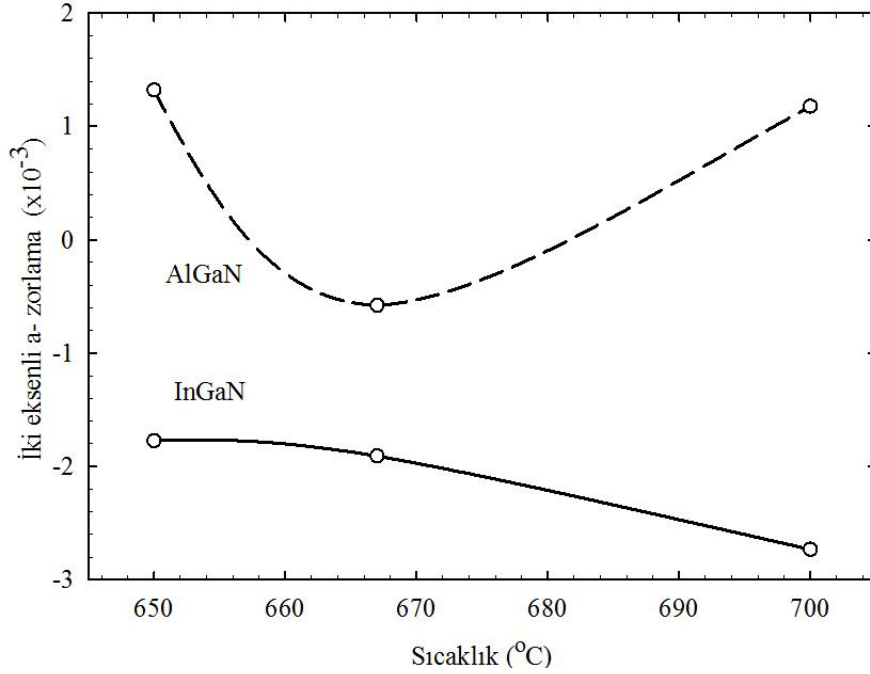
İki eksenli zorlama, iki boyutta örgü baskılı veya örgü gerilmeli olarak yorumlanır. Örgü zorlama; iki boyutta çift eksenli zorlama ve üç boyutta hidrostatik zorlama bileşenlerinin toplamıdır. Toplam örgü zorlama, İki eksenli ve hidrostatik zorlamayı birbirine bağlayan denklemler,

$$\varepsilon_h = \frac{c_{33}\varepsilon_c + 2c_{13}\varepsilon_a}{2c_{13} + c_{33}} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c^b + \varepsilon_h, \quad \varepsilon_a = \varepsilon_a^b + \varepsilon_h \quad (4.21)$$

şeklindedir [95,99,100,101]. Eşitlik 4.21’deki toplam örgü zorlama değerleri; Eşitlik 4.20’deki hesaplanan hidrostatik zorlama ve iki yönlü zorlama değerleri kullanarak elde

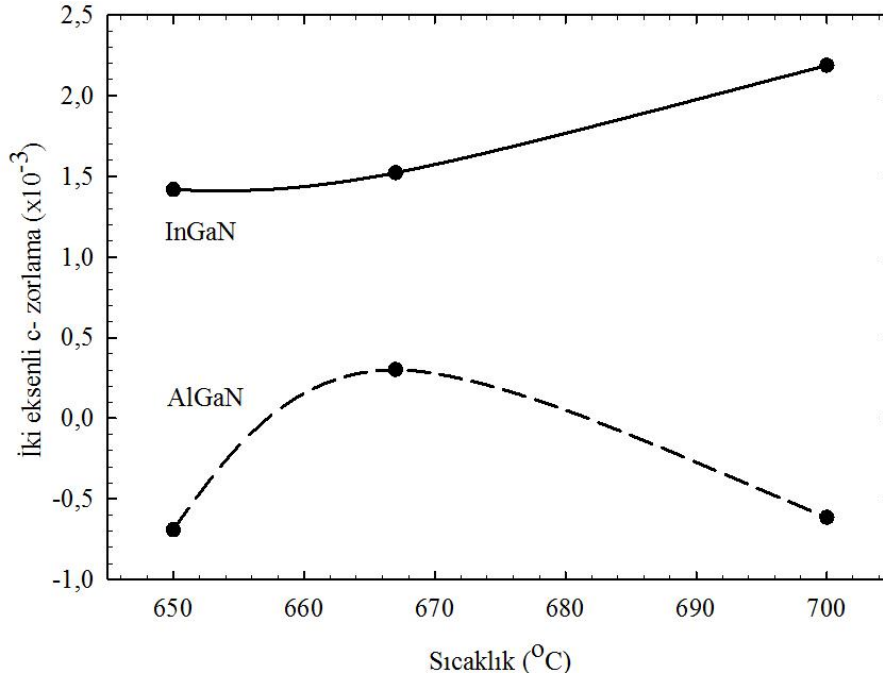
edilir. InGaN ve AlGaN tabakalardaki iki eksenli a ve c yönlü zorlamalar sırasıyla, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de artan büyütme sıcaklığına göre verildi.



Şekil 4.14. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm numuneler için sıcaklığa bağlı iki eksenli a -zorlama

İki eksenli a yönlü zorlamanın; artan büyütme sıcaklığıyla birlikte AlGaN tabaka için önce azalıp, negatif bölgede minimum değere ulaştıktan sonra, ilk değer seviyesine artış gösterdiği, InGaN tabakada ise negatif bölgede azalma eğiliminde olduğu Şekil 4.14’de görülmektedir.

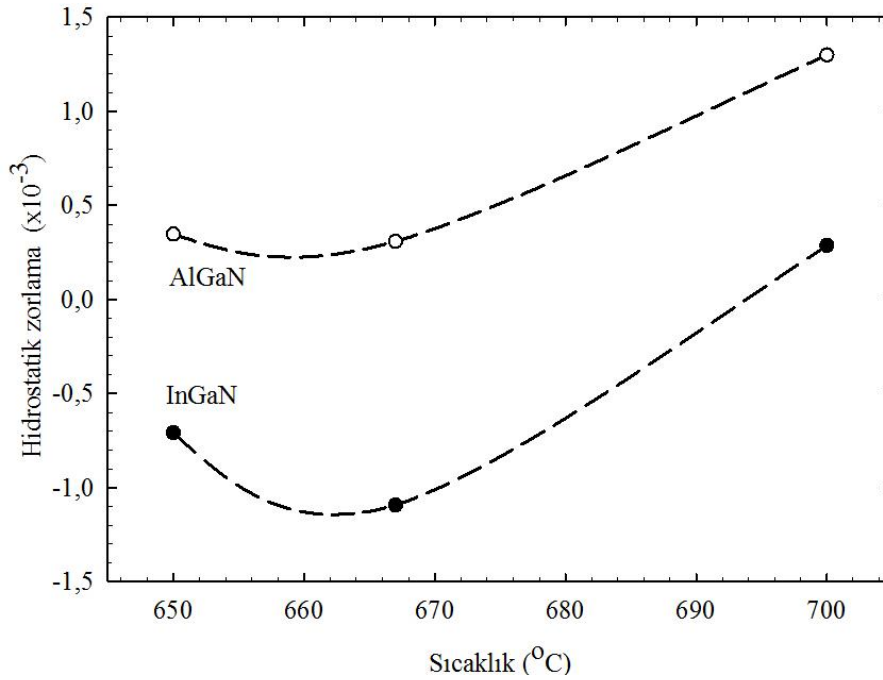
Şekil 4.15’de iki eksenli c yönlü zorlama incelendiğinde; AlGaN tabakasında negatif değerden artarak, pozitif bölgede maksimum değere ulaşmış ve yine negatif bölgede eski değeri seviyesine kadar azalma gösterirken, InGaN tabakada ise pozitif bölgede artan bir eğilime sahip olduğu görüldü. Sonuç olarak hem InGaN hem de AlGaN tabakalardaki iki eksenli a -ve c - zorlama değerleri birbirlerine tamamen zıt yönlü davranışlar gösterdi. Burada incelediğimiz iki yönlü a - ve c - zorlama sonuçları, Bölüm 4.7.2’de incelenen a - ve c - zorlama değerleri sonuçları ile minimum seviyedeki değer farklılığıyla, oldukça paralel davranış sergilemiştir.



Şekil 4.15. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm numuneler için sıcaklığa bağlı iki eksenli c -zorlama

Hidrostatik zorlama, alaşımlı yapılarda katkılama ve nokta kusurları ile etkilenir. Bu zorlama kusurların boyutlarına bağlı olarak örgü baskılı veya örgü gerilmeli olabilir. Değişik tipte nokta kusurları büyütme şartlarına bağlı olarak oluşabilir. Genelde GaN tabakada etkili hidrostatik zor; Al_{Ga} , Ga_N , N_{In} , Al_N , Ga_{In} , N_{Ga} ve Ga_N şeklinde yerine geçme tipi nokta kusuru, N_i , Ga_i , Al_i , ve In_i şeklinde araya girerek çatlatma tipi nokta kusurları ve V_{Al} , V_N , V_{In} , ve V_{Ga} şeklinde boşluk tipi nokta kusurlarından kaynaklanır [102]. Birçok yolla ve değişik kaynaklardan bulunabilen kovalent çap değerlerine göre; Al (1,43 Å), Ga (1,22 Å) ve In (1,63 Å)'un kovalent çapları N (0,70 Å)'un kovalent çapından daha büyüktür. Büyük kovalent çaplı atomun kendisinden küçük kovalent çaplı atomun yerine geçmesiyle (örneğin Al_{Ga} ; Ga atomunun yerine daha büyük kovalent çaplı Al atomunun geçmesi) kristal örgüde genişleme (gerilme) olur. Bu yüzden; Al_{Ga} , Ga_N , In_N , Al_N , In_{Ga} , In_{Al} , In_i , Ga_i , Al_i ve N_i tipi nokta kusurlar kristal örgüde genişlemeye sebebiyet verir. Buna paralel olarak Ga_{Al} , N_{Ga} , N_{In} , N_{Al} , Ga_{In} , Al_{In} , V_{Al} , V_{Ga} , V_{In} , ve V_N tipi nokta kusurları da örgüde baskıya sebebiyet verir. Şekil 4.16'da hidrostatik zorlama değerlerinin artan tabaka büyütme sıcaklığına bağlı olarak; InGaN tabaka için negatif değerden azalıp pozitif değere artan, AlGaN tabaka da ise pozitif değerde önce azalan sonra artan davranışlar sergilediği görüldü. Aynı grafikte, InGaN tabakada A ve B örnekleri için baskılı hidrostatik zorlama, C örneği için ise gerilmeli hidrostatik zorlama oluşurken, AlGaN tabakada her üç örnek

için de gerilmeli hidrostatik zorlama olduğu gözlemlenmiştir. Örnek C hem InGaN hemde AlGaN tabakalar için gerilmeli hidrostatik özellik göstererek paralel bir davranış sergilerken, A ve B örnekleri için InGaN ve AlGaN tabakalar zıt karakterli davranış gösterir. Bu yüzden büyütülen InGaN tabakalarda, Ga_{Al} , N_{Ga} , N_{In} , N_{Al} , Ga_{In} , Al_{In} , V_{Al} , V_{Ga} , V_{In} , ve V_N tipi örgü baskılı nokta kusurlar diğer tiplerine göre daha yoğundur. Ayrıca artan sıcaklıklarda InGaN tabakanın hidrostatik zorlaması örgü baskılıdan örgü gerilmeli karaktere yön değiştirir. AlGaN tabakada Al_{Ga} , Ga_N , In_N , Al_N , In_{Ga} , In_{Al} , In_i , Ga_i , Al_i ve N_i tipi (örgü gerilmeli) nokta kusurları daha baskındır ve AlGaN tabakasında bu zorlama tipi kusur bütünüyle örgü genişleme davranışı sergilediğinden boşlukları içeren diğer tip kusurlar karakteristik olarak daha sık görülür. Hidrostatik zorlamanın en yüksek mutlak değeri AlGaN tabakada $700\text{ }^\circ\text{C}$ ve InGaN tabakada $667\text{ }^\circ\text{C}$ 'de görülür.



Şekil 4.16. InGaN ve AlGaN tabkalarında tüm numuneler için sıcaklığa bağlı hidrostatik zorlama

Nokta kusurların mutlak büyük değerde olmasıyla ekstra deforme davranışlar görülür. Fakat örgü parametrelerine yakın, hidrostatik zorlamanın en küçük mutlak değerleri, yani sıfır çizgisine en çok yaklaştığı değerlerdeki büyütme şartları, tabakaların birbirleri ile uyumlu büyütülmesi için en avantajlı olan durumdur.

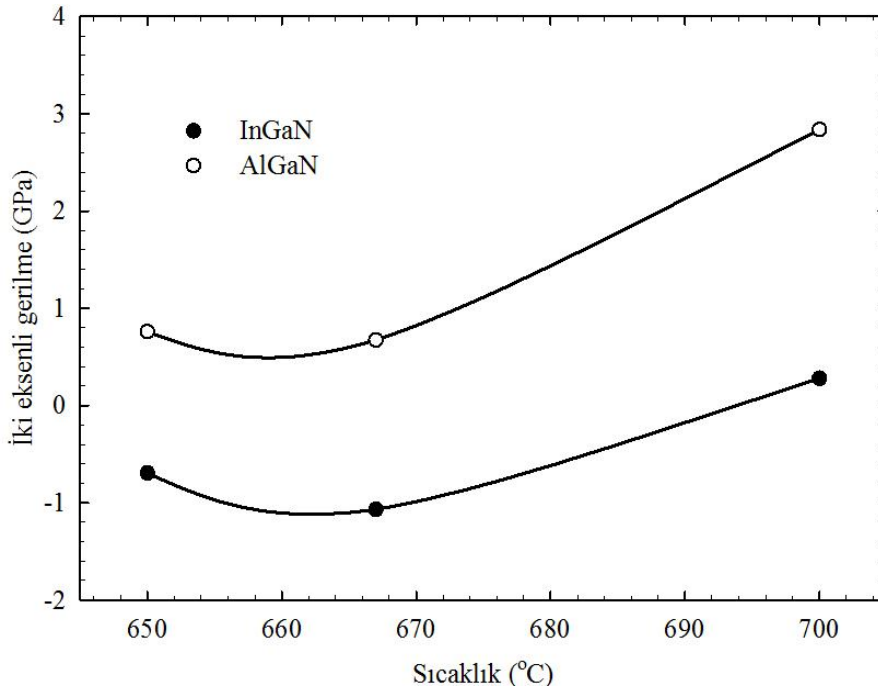
4.7.4. InGaN/GaN MQW mavi LED'lerin InGaN ve AlGaN tabakasının gerilme değerlerinin hesabı

Epitaksiyel tabakada iç düzlem iki eksenli gerilme; a yönündeki iki eksenli zorlama bilinirse malzemenin elastik sabitleri ile birlikte aşağıdaki Eşitlik 4.22 ile hesaplanabilir [100,103];

$$\sigma_f = \left(c_{11} + c_{12} - 2 \frac{c_{13}^2}{c_{33}} \right) \varepsilon_a^b \quad (4.22)$$

Burada parantez içi eksenli modül olarak adlandırılır (M_f). Bu yüzden iki eksenli gerilme $\sigma_f = M_f \varepsilon_a^b$ ile gösterilir [100].

Bütün örnekler için hesaplanan iki eksenli gerilmeler Şekil 4.17'de sıcaklığa bağlı olarak verildi.



Şekil 4.17. InGaN MQW mavi LED yapılarında InGaN ve AlGaN tabakalarının sıcaklığa bağlı iki eksenli gerilmesi

Ayrıca artan sıcaklığa göre iki eksenli gerilme özellikleri her iki tabakada da önce azalır sonra artarak oldukça benzer bir davranış sergilerken 667 °C'den itibaren artan sıcaklıkta her iki tabaka arasındaki değer farkı artmaktadır. İki eksenli gerilme değerleri; AlGaN

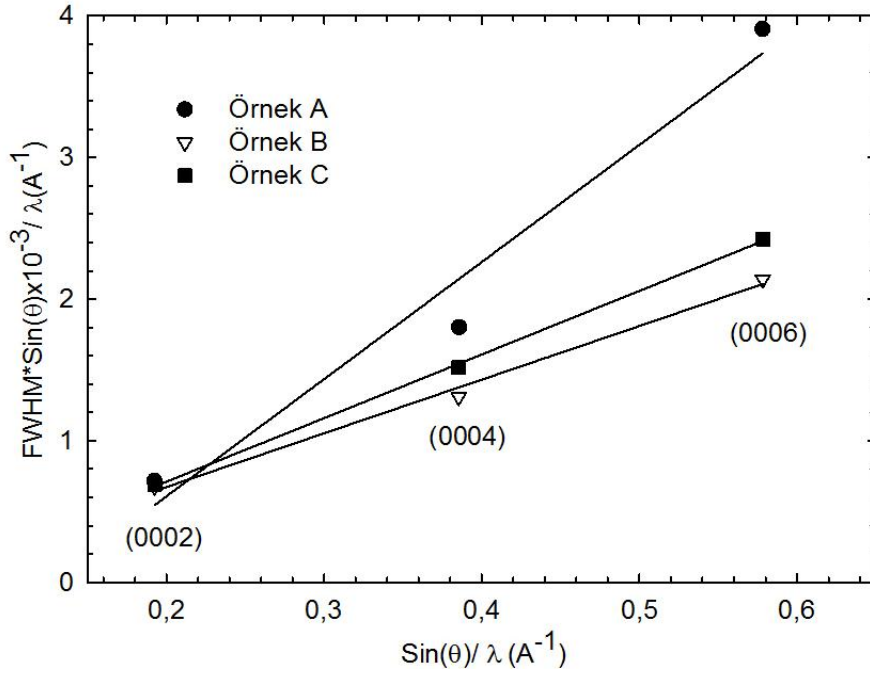
tabakada, InGaN tabakaya göre daha yüksektir. Bunun sebebi AlGaIn tabaka ile GaN tabaka arasındaki termal genleşme sabiti farkının, InGaN ve GaN tabakalar arasındakiine göre daha yüksek olmasıdır [87,88].

4.8. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Mozaik (Çizgi ve Hacim) Kusurları

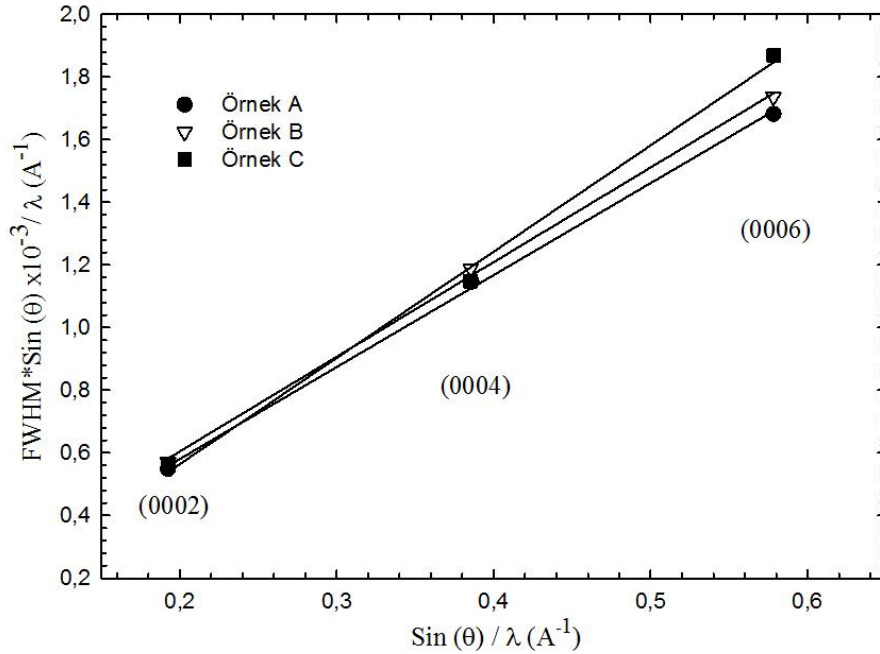
Bu bölümde mozaik kusur olarak ifade edilen çizgi ve hacim kusurları içinde etiketlenen; yanal ve dikey mozaik boyut, düzlem eğilme açısı, kenar ve vida tipi dislokasyonlar incelendi.

4.8.1. Williamson-Hall (W-H) grafiğinden yanal mozaik boyutu ve düzlem eğilme açısının hesabı

Simetrik yansımaların radyal yönde taranması; alt tabaka yüzeyine dik olacak şekilde dikey kristal boyut ve c- eksenine boyunca heterojen gerilme, Bragg yansımalarının genişlemesine neden olduğu gözlemlendi. Simetrik ve asimetrik taramaları için, gelen ve yansıyan dalga vektörleri saçılma düzlemi içeren z ekseninde bulunmaktadır. Simetrik kırılmalar ile elde edilen yanal kristal boyut ve mozaik blokların eğimi, z eksenine dik düzlemlerin HRXRD dönme pik eğrilerinin genişlemesine neden olur [104]. Bu iki etkinin katkısı yansıma düzleminin genişlemesi üzerinde doğrusal bir bağımlılığa neden olur ve bu durum herbirinin etkisini ayırmak için kullanılır. Bu amaçla, bir Williamson-Hall (W-H) çizimi kullanılabilir, bu yansıma mertebelerin fonksiyonu olarak dönme eğrilerinin FWHM'ları kullanılarak çizilen doğrusal eğridir ve $FWHM(\sin \theta)/\lambda$ fonksiyonunun, $(\sin \theta)/\lambda$ fonksiyonuna karşı grafiği çizilerek elde edilir [105,106]. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da sırasıyla InGaN ve GaN tabakaların (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde yanal mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri verildi. FWHM, ölçülen profilin toplam genişliğidir, λ ve θ sırasıyla X-ışınının dalga boyu ve gelme açısıdır. Düzlem eğim açısı, W-H çizimi doğrusal bağımlılığının eğiminden ve yanal mozaik boyutu uzunluğu ($L_{||}$) ise y ekseninin kesim noktasının tersinden elde edilir.



Şekil 4.18. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin InGaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde yanal mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri



Şekil 4.19. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin GaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde yanal mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri

GaN ve InGaN tabakalar için elde edilen yanal kristal boyutlar ve eğim açıları sırasıyla, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'nin üçüncü ve dördüncü sütunlarda verildi. Artan büyütme

sıcaklığı ve buna bağımlı olarak azalan *In* içerik oranıyla, eğim açısı GaN tabakada artarken InGaN tabakada önce azalıp sonra artma eğilimi gösterir.

Çizelge 4.6. A, B ve C numunelerinin, GaN aktif tabaka için HRXRD ve AFM sonuçları

Numuneler	T	Yanal Kristal Boyut	Eğilme Açısı ($\times 10^{-2}$)
-	$^{\circ}\text{C}$	nm	derece
A	650	64591	0,29
B	667	1852333	0,30
C	700	3918	0,34

Aynı zamanda, GaN tabakaları için yanal kristal boyut keskin bir şekilde artar ve daha sonra dramatik bir şekilde azalır, InGaN tabaka GaN tabakaya benzer ancak nispeten daha yumuşak artış ve sonrasında azalma davranışı sergiler. Buna ek olarak, yüzeye paralel mozaik blok boyutları GaN tabakaları için InGaN tabakadan daha büyüktür. Bu durum tabakaların hızlı soğuması kaynaklı olabilir. Bu durumun sonucu olarak tabakalar mozaikleşmiş bloklardan oluşur.

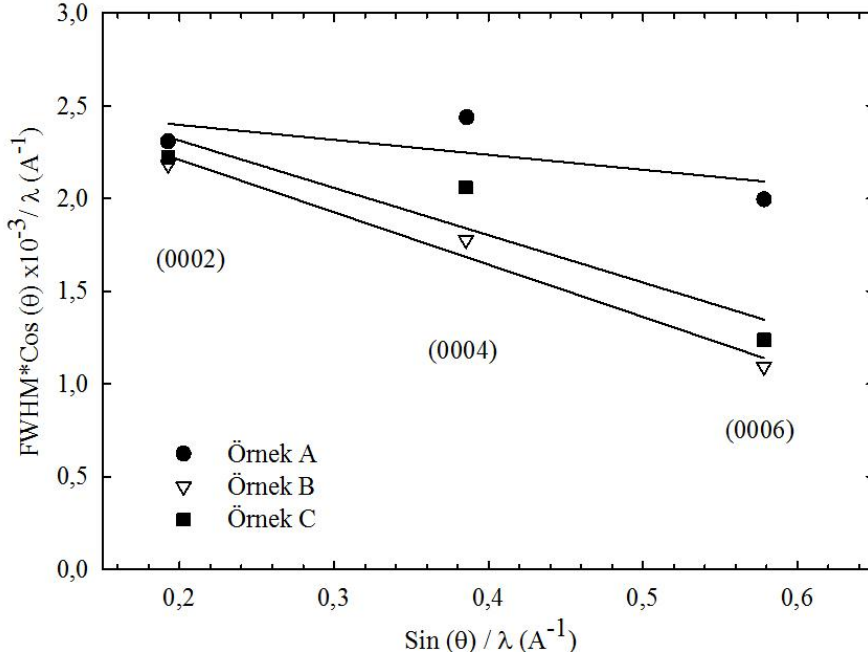
Çizelge 4.7. A, B ve C numunelerinin, InGaN aktif tabaka için HRXRD ve AFM sonuçları

Numuneler	T	Yanal Kristal Boyut	Eğilme Açısı ($\times 10^{-2}$)
-	$^{\circ}\text{C}$	nm	derece
A	650	429	0,82
B	667	5313	0,37
C	700	2392	0,44

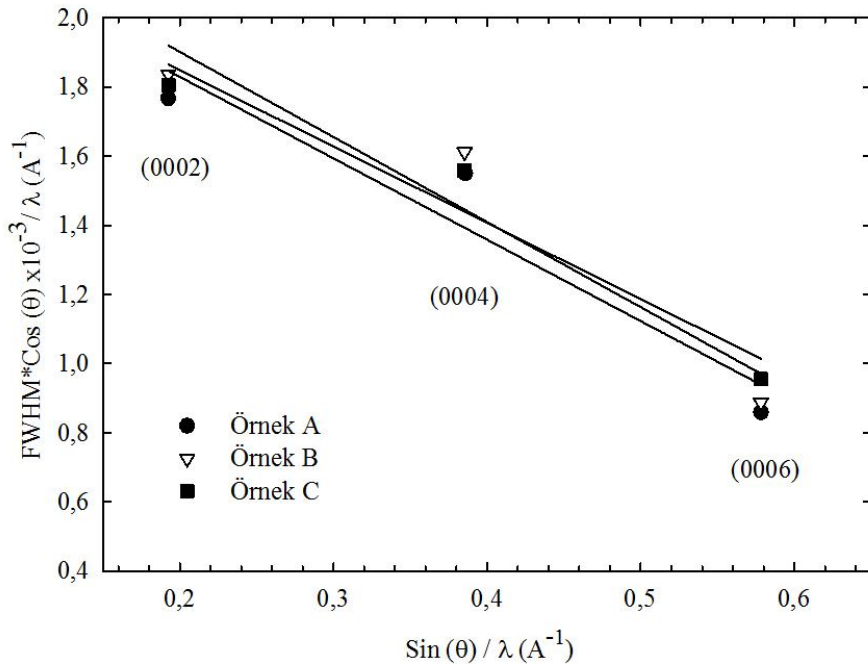
4.8.2. Williamson-Hall (W-H) grafiğinden dikey mozaik boyutun hesabı

Williamson-Hall çizimde, her bir $\text{FWHM} \cdot (\cos \theta) / \lambda$ yansıması için $(\sin \theta) / \lambda$ 'ye karşı çizilen grafik düz bir çizgidir. y eksenini kesim noktasından, y_0 dikey mozaik boyut uzunluğu

$L_{\perp} = 0,9 / (2y_0)$ denklemi ile ve zorlama (ε_{\perp}) değeri, doğrusal grafiğin fit eğiminden, $4\varepsilon_{\perp}$ olarak doğrudan hesaplandı [104,105]. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de sırasıyla InGaN ve GaN tabakaların dikey mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri verildi.



Şekil 4.20. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin InGaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde dikey mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri



Şekil 4.21. A, B, C InGaN/GaN numunelerinin GaN tabakasının (0002), (0004) ve (0006) düzlemlerinde dikey mozaik blokları için Williamson-Hall eğrileri

Dikey kristal boyut değerleri, GaN için Çizelge 4.8’de verildiği gibi artan büyütme sıcaklığı ve buna bağlı azalan In oranı için, önce azalır sonra artmaktadır. InGaN için dikey kristal boyut değerleri artan büyütme sıcaklığına karşın sürekli azalma eğilimi gösterdiği Çizelge 4.9’da verildi.

Çizelge 4.8. A, B ve C numunelerinin, GaN ve InGaN aktif tabaka için Dikey Kristal Boyut değerleri

Numuneler	T	GaN Dikey Kristal Boyut	InGaN Dikey Kristal Boyut
-	°C	nm	nm
A	650	195	175
B	667	187	162
C	700	196	159

4.8.3. InGaN/GaN MQW Mavi LED’lerin kenar ve vida dislokasyonları

10^8 - 10^{12} aralığındaki dislokasyonlar tedirgin edici dislokasyon (TD) olarak kabul edilir ve bilindiği üzere örgü uyumu olmayan safir, silisyum karbür ve silisyum gibi alttaş üzerine büyütülen azot temelli altıgen tabakalar tedirgin edici dislokasyon yoğunluğu sergiler [87,88,91,92]. Bu çalışmada, InGaN/GaN tabakaları yüksek tedirgin edici dislokasyon yoğunluğu gösteren safir alttaş üzerine büyütüldü. Bu tarz tabakalarda sunulan dislokasyonun üç tipi vardır [104,107]; Bunlar Burgers vektörü $\langle a \rangle$ ile verilen kenar tipi dislokasyon, Burgers vektörü $\langle c \rangle$ ile verilen saf vida tipi dislokasyon ve Burgers vektörü $\langle c + a \rangle$ ile ifade edilen karışık tip dislokasyondur. Bu tez çalışmasında kristalize seviyesinden ve burkulma mozaik kusurlardan kaynaklı eğilimleri gözlemek için iki metod kullanıldı.

İlk metod olarak; epitaksiyel tabakalarda kenar (D_{kenar}) ve vida (D_{vida}) tipi dislokasyon yoğunlukları,

$$D_{vida} = \frac{\beta_{(0002)}^2}{9b_{vida}^2}, \quad D_{kenar} = \frac{\beta_{(10-12)}^2}{9b_{kenar}^2} \quad (4.23)$$

eşitliği ile hesaplandı [105,108,109,110,111]. Burada β , FWHM değeridir ve HRXRD dönme eğrileri ile ölçülüp, örneklerin kristalize durumunu belirler (GaN için $b_{vida} = 0,5185$ nm, $b_{kenar} = 0,3189$ nm ve InGaN için $b_{vida} = 0,5198$ nm, $b_{kenar} = 0,3417$ nm).

İkinci metoda göre, kenar ve vida dislokasyon yoğunlukları; Burgers vektörü ile eğim açısı ve yanal mozaik boyut uzunluğuna bağlıdır. Dislokasyonların tüm tipleri, yanal mozaik boyut uzunluğu, eğilme ve burkulma açıları ile bağımlılık gösterir. Metzger ve arkadaşları tarafından rapor edildiği gibi [104], GaN (002) yörüngeli epitaksiyel filmler için, ortalama burkulma açısı, kenar Burgers vektörü ($b=1/3(11-20)$) tipi dislokasyon yoğunluğu ile alakalıdır. Ayrıca ortalama eğilme açısı, monoton olarak Burgers vektörlü $b=(0001)$ vida tipi dislokasyonla alakalıdır [87]. Burgers vektörü ($b=1/3(11-20)$) kenar tipi dislokasyon, yüzeyinin normal civarında kristalin azimutsal dönmesiyle bir araya gelir. Ölçülen burkulma $\alpha_{burkulma}$ açısından, kenar tipi dislokasyon yoğunluğu hesaplanabilir. Eğer dislokasyonlar küçük parçacık boyut sınırın da toplanırsa, kenar tipi dislokasyon yoğunlukları aşağıda verilen,

$$N_{Vida} = \frac{\alpha_{eğilme}^2}{4,35|b_{Vida}|^2}, \quad N_{Kenar} = \frac{\alpha_{\phi}}{2,1|b_{Kenar}|L_{\parallel}} \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.24 denklemleriyle hesaplanabilir [112-115]. Burada $\alpha_{eğim}$ açısı bir mozaik kusur eğim açısı, α_{ϕ} asimetrik düzlemlerin pik genişlemesi ve b_{vida} burgers vektör uzunluğudur.

GaN ve InGaN tabakaların birinci ve ikinci metoda göre hesaplanan vida ve kenar tipi TD yoğunlukları sırasıyla Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'un, son iki sütununda verildi. Çizelgelerdeki vida ve kenar tipi TD yoğunlukları için ilk değerler birinci metodla, ikinci değerler ise ikinci metodla hesaplandı. Birinci metoda göre; Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi, artan büyütme sıcaklığı ve azalan In % oranıyla birlikte, GaN tabakadaki vida tipi TD yoğunluğu sürekli artan bir karakter gösterirken, kenar tipi TD yoğunluğu ise önce azalıp sonra yüksek oranda bir artış sergilemektedir. Çizelge 4.10'da verildiği gibi; artan büyütme sıcaklığıyla beraber, InGaN tabakada hem vida hemde kenar tipi TD yoğunluğu, önce azalan sonra artan davranış göstermektedir. InGaN tabakaların birinci metoda göre vida ve kenar tipi TD yoğunluklarının daha büyük olması, MOCVD tekniğinde GaN tabakanın büyütme şartlarının, InGaN tabakaya göre çok daha iyi optimize olmasına atfedilmiştir.

Çizelge 4.9. A, B ve C numunelerinin, GaN aktif tabaka için artan büyütme sıcaklığına bağlı olarak In % oranı ve sırasıyla birinci ve ikinci metoda göre hesaplanan vida ve kenar tipi TD

Numuneler	T	In oranı %	Vida TD ($\times 10^8$)	Kenar TD ($\times 10^9$)
-	$^{\circ}\text{C}$	-	cm^{-2}	nm
A	650	10,87	2,18/33,64	109,82/74,82
B	667	9,01	2,34/36,19	3,42/89,01
C	700	7,51	3,00/34,96	1895,4/109,2

Çizelge 4.10. A, B ve C numunelerinin, InGaN aktif tabaka için artan büyütme sıcaklığına bağlı olarak In % oranı ve sırasıyla birinci ve ikinci metoda göre hesaplanan vida ve kenar tipi TD

Numuneler	T	In oranı %	Vida TD ($\times 10^8$)	Kenar TD ($\times 10^9$)
-	$^{\circ}\text{C}$	-	cm^{-2}	nm
A	650	10,87	1,78/5,69	336,91/8,57
B	667	9,01	0,37/5,09	189,57/10,86
C	700	7,51	0,52/5,28	456,10/15,72

Çizelge 4.9'un son iki sütununda verildiği gibi; ikinci metodla hesaplanan vida tipi TD yoğunluğu, artan büyütme sıcaklığı ve azalan In % oranıyla birlikte tüm örneklerin GaN tabakası için önce artıp sonra azalmaktadır. Yine ikinci metoda göre; InGaN tabaka için vida tipi TD yoğunluğunun, GaN tabakanın tersine önce azalan sonra artan bir davranış gösterdiği Çizelge 4.10'da verildi. Kenar tipi TD yoğunluğunun ise hem GaN hem de InGaN tabakalar için benzer bir davranışla artan büyütme sıcaklığı ve azalan In % oranıyla birlikte, artan bir karakteri sergilediği Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'in son iki sütununda görülmektedir.

Dislokasyon hareketi, tabakalarda plastik (esnek) deformasyona sebep olur. Ayrıca plastik hareketleri çatlaklara bile neden olabilir. Bu durumda, bir çekirdekleşme tabakası oluşmaz.

Bir kenar tipi dislokasyonda, sınırlandırılmış örgü bozulması atomların ekstra yarı düzlem sonu boyunca oluşur. Kenar tipi dislokasyon bir kesme stresine bağlı olarak hareket ettiğinde, bir vida dislokasyon hareketi aynı zamanda bir kesme gerilmesi ya da bir kesme bozulması meydana getirmektedir. Kristallerde, geniş açılı parçacık boyut sınırının karakteristik yapısı, ince bir kristal olmayan bir bölgesi ile ayrılır. Parçacık boyut sınırında atom bozukluğu kayma düzleminde süreksizliğe neden olur. Bu nedenle dislokasyon bir tane sınırı tarafından durdurulur ve buna karşın yığılma meydana gelir. Tane boyutu daha küçük ise, dislokasyon daha sıklıkla oluşur [105,110].

Artan büyütme sıcaklığında ve bunun sonucu olarak azalan *In* oranında; artan-azalan sonrasında azalan-artan davranış B örneği için optimize bir durum göstermiştir. Bölüm 4.8'deki Çizelgelere genel olarak bakıldığında iki yapısal kusurda yanal mozaik boyut uzunluğu ve kenar tipi tedirgin edici dislokasyon kusurları diğer kusurlara göre baskın davranış sergilediği görüldü. Yanal koherent uzunluğunun artması ile kenar dislokasyon azalmıştır. Buna bağlı olarak karışık zorlama, tilt (eğilme), vida tipi distakosyon hatta minimum değerlerde sürekli artan dikey mozaik boyut uzunluğu, B örneğindeki bu optimize durumu destekler.

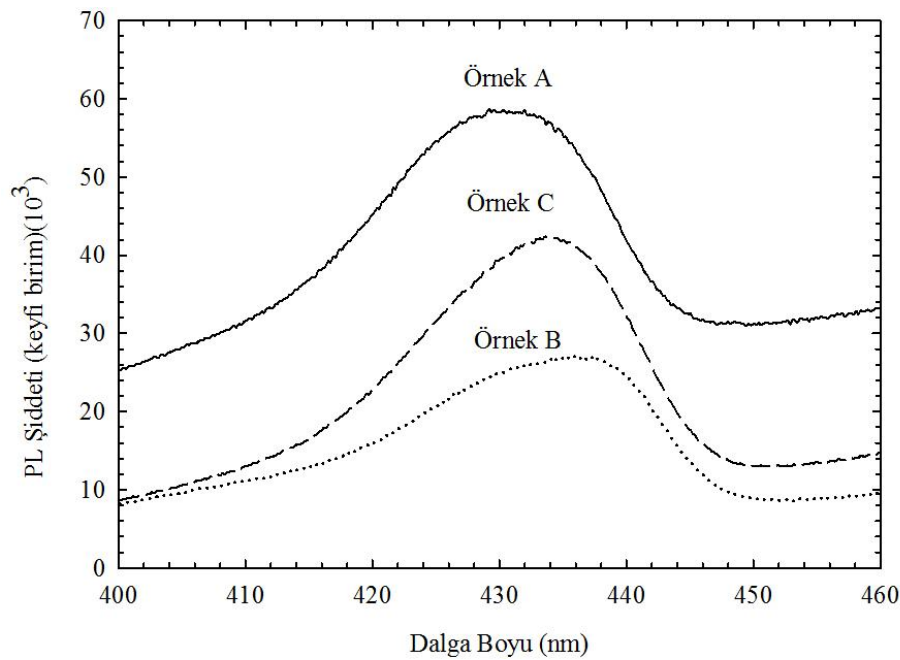
4.9. InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin Optik Karakterisliği

InGaN/GaN MQW Mavi LED'lerin fotoluminesans (PL) ölçümleri oda sıcaklığında He-Cd 50 mW lazer ($\lambda=325$ nm) ışık kaynağı ile Jobin Yvon Florong-550 PL sistemi kullanılarak yapıldı. Sistemde optik uyarma kaynağı olarak maksimum 200 mW gücünde 325 nm dalga boylu He-Cd lazer, dedektör olarak CCD kamera mevcuttur. Kırmızı-altı spektrumları (FTIR) ölçümü için, Bruker Vertex 80 IR spektrometresiyle ve PIKE MIRacle ATR aparatı kullanılarak 4000 - 550 cm^{-1} dalga sayısı aralığında çekildi.

Şekil 4.22'de farklı büyütme sıcaklıklarında üretilen A, B ve C örneklerinin, oda sıcaklığındaki fotoluminesans ölçüm sonuçları verildi. Şekildeki piklerin detaylı analizleri ile üretilen örneklerin yasak enerji band aralığı ve FWHM değerleri tayin edildi. Bu sonuçlar Çizelge 4.11'de sunuldu. Örneklerin yasak band aralığı geçiş enerjileri sırasıyla 2,88; 2,84 ve 2,86 eV'tur. Ana emisyon bandlarının merkez dalga boyları ve pik yüksekliklerinin yarı genişlikleri benzer davranış sergilemiş ve sıcaklığa bağlı olarak önce artış daha sonrada azalma görüldü. Sonuçlardan da açıkça görüldüğü gibi maviye en yakın

ışımına B örneğinde gerçekleşti [116]. InGaN/GaN mavi LED yapılarındaki mor emisyon InGaN aktif tabakanın optik uyarılma ile oluşturduğu elektron-deşik çiftlerinin tekrar birleşirken sebep olduğu ışımaya atfedildi [117].

Benzer sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarda da gözlenmiştir [118,119]. Örneklerin fotoluminesans analizlerinde gözlemlenen davranışlar optimize HRXRD ve diğer analiz sonuçları ile uyum içerisindedir.

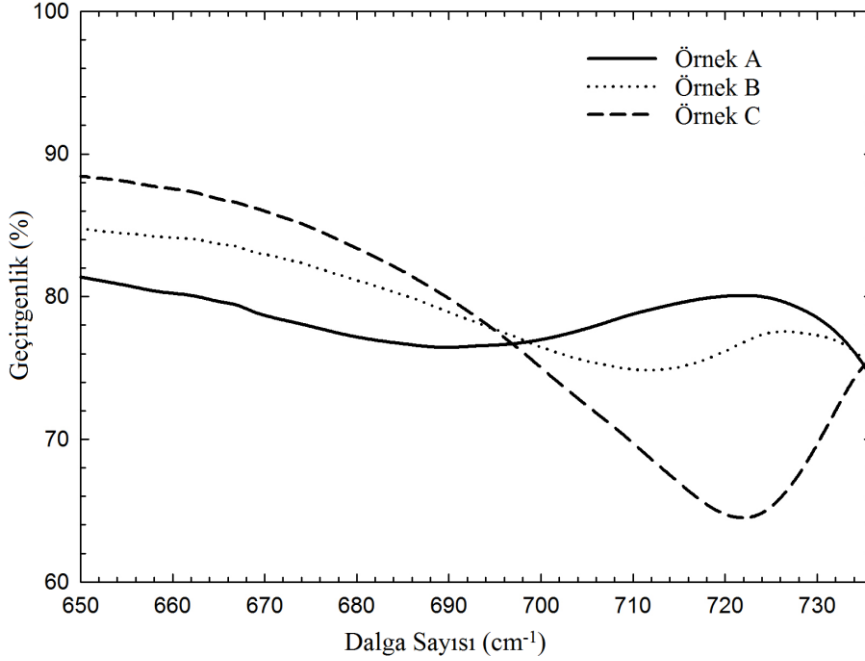


Şekil 4.22. InGaN/GaN mavi LED yapıların PL spektrumu

Çizelge 4.11. InGaN/GaN yapıların PL analizine göre hesaplanan, yasak enerji band aralığı ve FWHM değerleri

Numuneler	T	Yasak Enerji Band Aralığı	FWHM
	°C	(nm) (eV)	(nm)
A	650	430,12 (2,88)	20,80
B	667	436,43 (2,84)	21,20
C	700	433,82 (2,86)	19,70

Şekil 4.23 her bir örnek için InGaN tabakanın geçirgenlik (%) ve dalga sayısı sonuçlarını gösterir. A ve C örneklerinde artma azalma dalgalanması yüksek iken B örneğinin daha ortalama değerlere sahip olduğu görüldü.



Şekil 4.23. InGaN aktif tabaka için FTIR titreşim spektrumu

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ aktif tabakasının boyuna optik modu (LO), titreşim enerji spektrumu artan x oranına bağlı olarak orta infrared bölgede işaretlendi [120]. Aktif tabakanın enerji spektrum özellikleri Çizelge 4.12'de verildi.

Çizelge 4.12. InGaN/GaN yapıların FTIR analizine göre hesaplanan, dalga sayısı, FWHM ve PL şiddeti değerleri

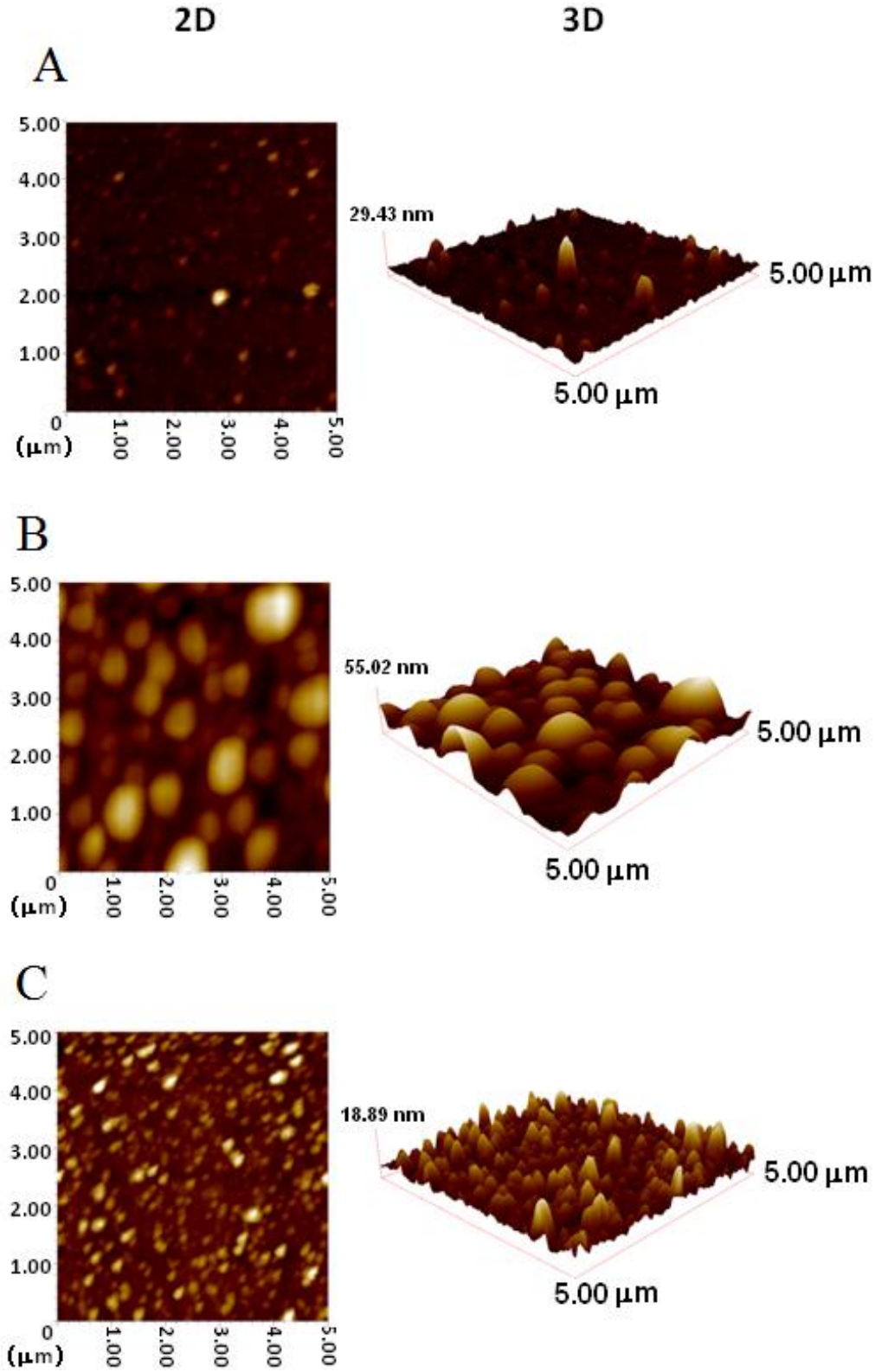
Numuneler	T	Dalga Sayısı	FWHM	PL Şiddeti
	°C	(cm^{-1})	(cm^{-1})	(keyfi birim)
A	650	690	34	29618,8
B	667	712	19	18324,0
C	700	722	22	30665,5

Aktif InGaN epitaksiyel tabaka için In oranı ve boyuna optik modun (LO) fonon titreşim enerjisi artarken spektranın FWHM değeri önce azalır sonra artar. Benzer bir davranışla PL yoğunluğunun artan büyütme sıcaklığına göre önce azalan sonra artan bir davranış gösterdiği Çizelge 4.12’de son sütunda verildi. Bu durum HRXRD ve PL sonuçlarını destekler.

4.10. InGaN/GaN MQW Mavi LED’lerin Yüzey Morfolojik Özellikleri

Yüzey morfolojik özellikleri, dinamik tarama modu kullanılarak yüksek performanslı atomik kuvvet mikroskobu (Nano Manyetik Instruments Ltd, Oxford, UK) ile karakterize edildi.

Şekil 4.24, sırasıyla 650, 667 ve 700°C büyüme sıcaklığına sahip A, B ve C numunelerinin $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama alanının iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntülerini göstermektedir. B numunesinin yüzeyi diğer iki numune ile karşılaştırıldığında oldukça homojendir. Üç numuneden A daha az, B ise daha fazla düzgün yüzey morfolojisine sahiptir. Tüm örneklerin yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde kullanılan Root Mean Square (RMS) değerleri sırasıyla 2,07 nm, 9,55 nm ve 2,31 nm olarak ölçüldü. RMS değerlerinin değişimi tane boyutu artışı ile ilişkilidir ve XRD sonuçları ile tutarlıdır. B numunesinin yüzey yapısı iri taneli üzüm şeklindedir ve daha serttir. A ve C numuneleri B ile karşılaştırıldığında herhangi bir silindirik ada oluşumu görülmemektedir. Ayrıca, A, B ve C numunelerinin yüzey görüntüleri literatürde MOCVD ile büyütülen GaN yapıların yüzeylerine benzer şekildedir [121]. AFM sonuçları, InGaN/GaN mavi LED yapıların yüzey morfolojisinin büyüme sıcaklığından büyük ölçüde etkilendiğini gösterdi. Uygun büyüme sıcaklığının (667°C civarı), kristal ve yüzey morfolojisinde iyileştirme sağladığı bu ölçümlerle anlaşılmış olup, bu durum HRXRD, PL, FTIR ile alınan diğer deney sonuçlarımızla uyuşmaktadır.

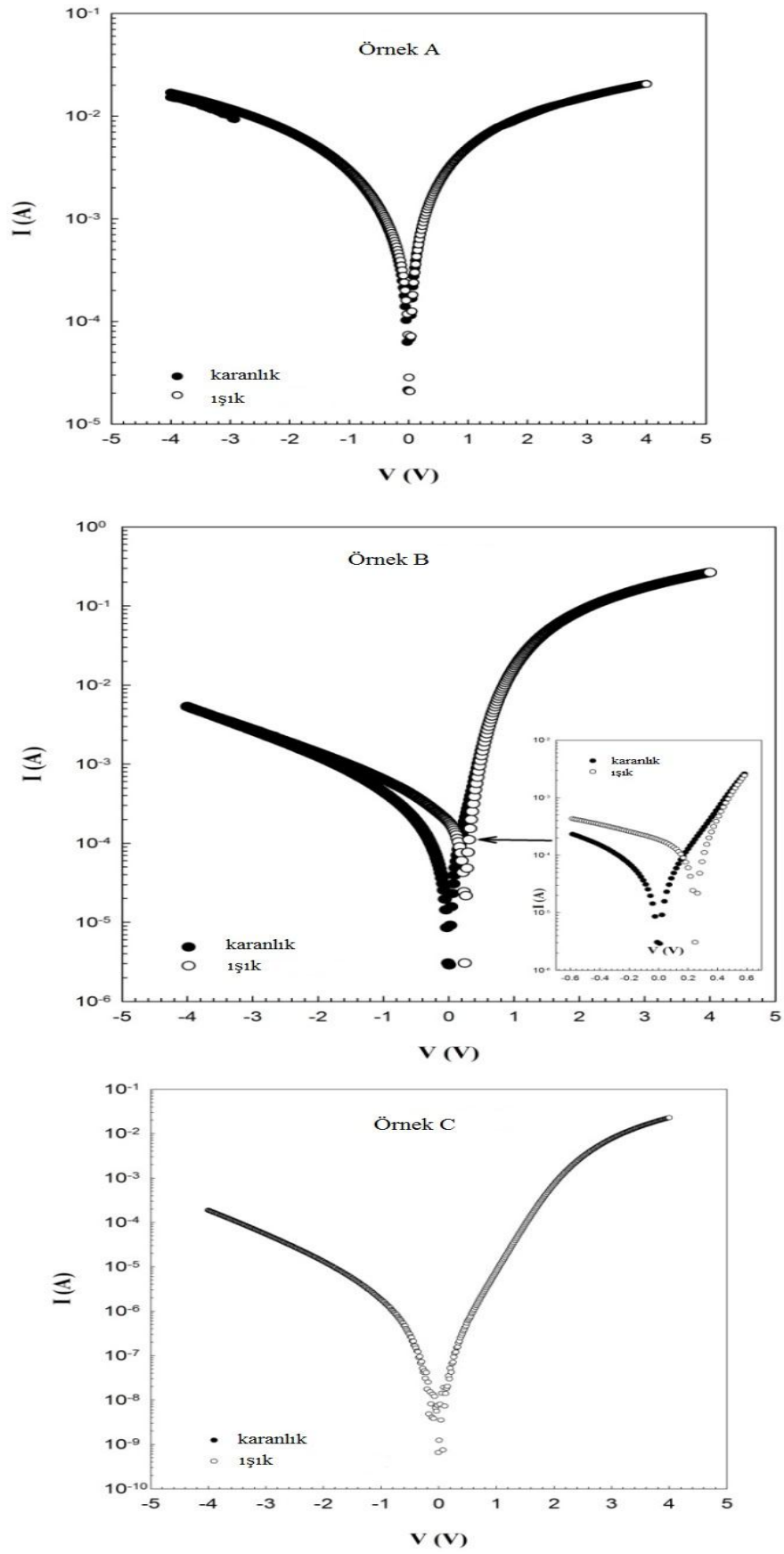


Şekil 4.24. Farklı büyüme sıcaklığındaki InGaN/GaN mavi LED yapılarının yapıları 2D ve 3D AFM görüntüleri; (a) 650 °C, (B) 667 °C, (C) 700 °C. Tüm görüntüler 5x5 μm^2 tarama alanındadır

4.11. InGaN MQW LED Yapının I-V Karakterisliği

Akım voltaj karakteristikleri, Keithly 4200 source-meter ve Oriel Soll A class AAA solar simulator kullanarak gerçekleştirildi.

Şekil 4.25 rnek A, B ve C nin oda Őartlarında, karanlık ve 200 mW/cm² ışık aydınlatması altında ileri ve ters besleme I-V karakteristiklerini gösterir. Şekilde grldği gibi bu yapılar arasında B rneği ileri beslemede ışığa karşı duyarlılık gösterirken diğer örnekler bu davranışı göstermemiŐtir. Ek olarak A, B ve C rneklerinin kapama-açma değerleri sırasıyla oda Őartlarında 10³, 10⁵ ve 10⁷ mertebelerinde hesaplanmıŐtır. İdealite faktörünün deneysel değerleri referans [122]'deki eşitlikler kullanılarak hesaplandı. A, B ve C rnekleri için idealite faktörü (n) değerleri oda Őartlarında sırasıyla 6,61; 3,10 ve 4,58 olarak bulundu. I-V deneysel sonuçları; B örneğinin diğer iki örnekle kıyaslandığında daha iyi LED karakteriŐiđine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu analizlerle hesaplanan sonuçlarımız tüm tez çalışmasında HRXRD, PL, FTIR ve AFM ile elde edilen diğer deney sonuçlarımızla uyuşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, 667 C büyütme sıcaklığında üretilen InGaN MQW LED yapının (B rneği) temel özellikleri ve Şartlarının aygıt uygulamaları için uygun olacağını göstermektedir.



Şekil 4.25. Karanlık ve aydınlık ortam için Akım-Voltaj ölçümleri

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

III –Azot bileşiklerine gösterilen ilgi; uzun ömürlü mavi ışık yayan diyot ve mavi lazerler ile 1990’ların öncesinde başladı [123,124]. O tarihten beri bu materyal sistemlerine olan ilgi gün geçtikçe arttı, böylece aygıt üretimi ve performanslarında hızlı gelişmeler görüldü. Bu alan günümüzde de cazibesini giderek arttırmaktadır.

III- Azot bileşiklerinin HRXRD analizi ile yapılan çalışmalarına literatürde sıkça rastlanmaktadır. XRD metodunu daha ayrıntılı incelemek için Bowen ve Tanner’ın son kitabına, HRXRD metodu için ise daha açıklayıcı olan önceki kitapları incelenebilir [11].

InN, GaN ve AlN tek kristali kolay veya ucuz büyütülemediğinden, çoğu III-Azot filmler ve aygıtlar safir, silikon veya Si-C alttaşlar üzerine büyütülür. Bu karışık epitaksiyel büyütme, genellikle filmin örgülerinin zorlamasına, istenmeyen safsızlıklar olan nokta kusurların ve distakosyanların veya paket hatalarının oluşmasına neden olur. HRXRD karakterizasyonu bağıl, düşük ve geniş kırınım pikleri, zararsız doğası, yüksek zorlama duyarlılığı, hızlı analiz ve açık sonuçlarından dolayı; III- Azot bileşiklerin kalınlık, örgü parametreleri, zorlama, kompozisyon oranı ve çoklu kusur tipleri ile küresel kristal tabaka burkulması tespiti için kullanılabilen vazgeçilmez bir tekniktir.

Bu çalışmada, üç tane beş peryotlu $In_xGa_{1-x}N/GaN$ MQW mavi LED yapısı MOCVD yöntemi ile 650, 667 ve 700 °C aktif tabaka sıcaklıklarında büyütüldü. LED’lerin mozaik parametreleri (örneğin yanal ve dikey mozaik boyutu, tabaka eğilme açısı ve tabaka burkulma açısı) ve yüzey özellikleri, karışık zorlama çizgi kusurları (kenar vida ve karışık dislokasyon), GaN ve InGaN tabakaları için HRXRD, AFM, FTIR, PL ve I-V ölçümleri kullanarak araştırıldı. Yapıların tüm HRXRD analiz sonuçları, bu teknikle elde edilen ters örgü uzayı haritalaması ile yapıldı. Bu sonuçlara göre, incelediğimiz $In_xGa_{1-x}N/GaN$ MQW mavi LED yapıların yanal ve dikey mozaik boyutu, tabaka eğilme açıları ve karışık zorlama değerlerinin; InGaN aktif tabakasının büyütme sıcaklığı ve İndiyum alaşım oranı ile etkilendiği ortaya koyulmuştur. InGaN aktif tabaka için optimize büyütme sıcaklığının 667 °C olduğu; yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerinin uyumlu ve ortak sonuçlarının neticesinde ortaya koyuldu. AFM sonuçları ise filmleri yüzey morfolojisinin İndiyum alaşım yüzdelere bağlılığını açıkça gösterdi. Ayrıca bu büyütme sıcaklığında AFM görüntülerinden; yüzeyin morfolojik yapısında topak yapıların büyüdüğü ve yüzey pürüzlülüğünün de arttığı gözlemlendi. PL analizlerinden yasak enerji band aralığının

maviye kaydığı tespit edildi. Işık altındaki I-V analizleri neticesinde; 667 °C civarı olan optimize sıcaklıkta büyütülen B örneğinin, ışığa tepki verdiği gözlemlendi. Ayrıca InGaN aktif tabakası için yasak enerji band aralığının 667 °C'ye kadar sıcaklıkla birlikte artıp sonra azaldığını, titreşim enerjisinin ise artan sıcaklığa bağlı olarak azalma gösterdiği gözlemlendi. Tüm bu analizlerinin sonucu olarak; yapısal optiksel, elektriksel ve morfolojik özelliklerin uyumlu ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görüldü. Ayrıca HRXRD ile ters örgü uzayı haritasından elde edilen yapısal kusurların, optik, elektriksel ve morfolojik sonuçları ile uyumluluğu açıkça ortaya konuldu. Ek olarak; 667 °C'de büyütülen B örneğinin InGaN tabakasının kristal özelliklerinin, pik yarı genişlikleri hesaplarına göre, diğer örneklerden daha iyi olduğu tespit edildi. FWHM değerleri karşılaştırıldığında, AlGaN tabakanın kristal kalitesinin, InGaN tabakaya göre daha düşük olduğu anlaşıldı.

Çalışmalarımızda, Kübik Denklem yöntemiyle InGaN tabakanın In alaşım oranı bulundu ve Vegard Yasası ile elde edilen In oranları ve sonrasında hesaplanan örgü uzunlukları karşılaştırıldı. x oranı değerlerinin; InGaN tabakası için sırasıyla, % 10,87; 9,01; 7,51 değerlerinde olup, artan sıcaklığa göre azaldığı görüldü. Vegard Yasası ve Kübik Denklemden hesap edilen örgü parametreleri genelde üçüncü ondalık basamakta farklılık gösterdi. Meydana gelen bu farklılık; In x oranına, zorlama değerinin katkısı olarak belirlendi. Hesaplanan In x oranı ile zorlama, hidrostatik zorlama ve iki eksenli zorlama ve gerilme değerleri benzer karakteristik davranış göstermiştir. InGaN tabakada hidrostatik zorlamanın, büyütme sıcaklığı 650 ve 667 °C olan örnek A ve B'de örgü baskılı iken, 700 °C olan örnek C'de ise örgü gerilmeli olup, AlGaN tabaka için tüm örneklerde örgü gerilmeli olduğu belirlenmiştir. Yani Ga_{Al} , N_{Ga} , N_{In} , N_{Al} , Ga_{In} , Al_{In} , V_{Al} , V_{Ga} , V_{In} , ve V_N tipi nokta kusurları InGaN tabakasında ilk iki büyütme sıcaklığı olan 650 ve 667 °C'de görülürken; Al_{Ga} , Ga_N , In_N , Al_N , In_{Ga} , In_{Al} , In_i , Ga_i , Al_i ve N_i tipi nokta kusurlar hem InGaN tabakanın 700 °C'deki büyütme sıcaklığında hemde AlGaN için tüm sıcaklıklarda büyütülen örneklerde daha baskın olduğu anlaşıldı. 667 °C sıcaklıkta InGaN tabakasının iki eksenli a- zorlama, iki eksenli gerilme, örgü rahatlatma ve hidrostatik zorlama parametrelerine bakıldığında daha az kusurlu olduğu görüldü. AlGaN tabakasının ise bu sıcaklıkta daha fazla rahatlamalı olmasına rağmen iki eksenli zorlama ve gerilme değerlerinin daha düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak 667 °C büyütme sıcaklığında incelenen B örneği, düşük boyutta görülen nokta kusur özelliklerinden dolayı

MQW mavi LED tasarımı için idealdir. Bu tip örnekler; güncel uygulamalarda da karşılaşılabileceği üzere, fosfor katkıları ile beyaz LED üretiminde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Morkoç, H. (2008). *Hand book of Nitride Semiconductors and Devices*. (1). Berlin: Wiley-VCH, 16.
2. Çörekçi, S. (2008). *Grup III-V Bileşik Yarıiletkenlerde AFM Yüzey Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10, 11, 39.
3. Bayrak, S. T. (2011). *InGaN/GaN Çoklu Kuantum Kuyulu Işık Saçan Diyotlar*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 7-11, 21-23, 31, 32.
4. Nakamura, S. (1998). The Roles of Structural Imperfections in InGaN-Based Blue Light-Emitting Diodes and Laser Diodes. *Science*, 281(5379), 956-961.
5. İnternet: Nakamura, S., Akasaki, I. and Amano, H. nobelprize. URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nobelprize.org%2Fnobel_prizes%2Fphysics%2Flaureates%2F2014%2F&date=2015-01-09, Son erişim tarihi: 09.01.2015.
6. Kapolnek, D., Wu, X. H., Heying, B., Keller, S., Keller, B. P., Mishra, U. K., Den Baars, S. P. and Speck, J. S. (1995). Structural evolution in epitaxial metalorganic chemical vapor deposition grown GaN films on sapphire. *Applied Physics Letters*, 67(11), 1541-1543.
7. Ponce, F. A., Krusor, B. S., Jr, J. S. M., Plano, W. E. and Welch, J. (1995). Microstructure of GaN epitaxy on SiC using AlN buffer layers. *Applied Physics Letters*, 67(3), 410-412.
8. Chichibu, S., Azuhata, T., Sota, T., Nakamura, S. (1996). Spontaneous emission of localized excitons in InGaN single and multiquantum well structures. *Applied Physics Letters*, 69(27), 4188-4190.
9. Lester, S. D., Ponce, F. A., Crawford, M. G., Steigerwald, D. A. (1995). High Dislocation Densities in High-Efficiency GaN-Based Light-Emitting-Diodes. *Applied Physics Letters*, 66(10), 1249-1251.
10. Schuster, M., Gervais, P. O., Jobst, B., Hosler, W., Averbeck, R., Riechert, H., Iberlkand, A., Stommer, R. (1999). Determination of the chemical composition of distorted InGaN GaN heterostructures from X-ray diffraction data. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 32(10A), A56-A60.
11. Moram, M. A., Vickers, M. E. (2009). X-ray diffraction of III-nitrides. *Reports on Progress in Physics*, 72(3), 036502-036541.

12. İnternet: Ozer, R. Functional Materials. utulsa. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fhttp%3A%2F%2Fwww.utulsa.edu%2Facademics%2Fcolleges%2Fcollege-of-engineering-and-natural-sciences%2Fdepartments-and-schools%2FDepartment-of-Chemistry-and-Biochemistry%2F+Research%2FFunctional%2520Materials.aspx&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2015.
13. Cristina, B., Ivan, P., and Kevin, R. (2007). Nanomaterials and Nanoparticles: Sources and Toxicity. *Biointerphases*, 2(4), MR17-MR172.
14. Taniguchi, N. (1974). On the Basic Concept of “Nanotechnology”. In *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 1(1), 18-23.
15. İnternet: temel malzeme bilgisi. muhendishane. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fmuhendishane.org%2Fkutuphane%2Ftemel-malzeme-bilgisi%2F&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2015.
16. İnternet: Göller, G., Keleş, Ö. ve Akın,. Atomik ve İyonik Düzenler. itu. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fweb.itu.edu.tr%2Fozgulkes%2Fdersler%2FMalzemeBilimi+_03_2010.pdf&date=2015-01-12, Son erişim tarihi:12.01.2015.
17. Oura, K., Lifshitsi, V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V., Katayama, M. (2003). *Surface science*. (1). Berlin: Springer, 166, 229, 378-382.
18. Liu, L., Edgar, J. H. (2002). Substrates for Gallium Nitride Epitaxy. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37(3), 61-128.
19. Kocan, M. (2003). *AlGa_N/Ga_N MBE 2DEG Heterostructures: Interplay between surface-interface-device properties*, Ph.D thesis, Pondicherry University, Pondicherry, 1-60.
20. Liang, C. T., Lin, L. H., Huang, J. Z., Zhang, Z. Y., Sun, Z. H., Chen, K. Y., Chen, N. C., Chang, P. H. and Chang, C. A. (2007). Electron-electron interactions in Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN high electron mobility transistor structures grown on Si substrates. *Applied Physics Letters*, 90(2), 022107(1-3).
21. Fieger, M., Erickelkamp, M., Koshroo, L. R., Dikme, Y., Noculak, A., Kalisch, H., Heuken, M., Jansen, R. H. and Vescan, A. (2007). MOVPE, processing and characterization of AlGa_N/Ga_N HEMTs with different Al concentrations on silicon substrates. *Journal of Crystal Growth*, 298(1), 843-847.
22. Dikme, Y. (2006). *MOVPE and charecterization of Ga_N-based structures on alternative substrates*, Doktora Tezi, Pondicherry University, Pondicherry, 1-24.
23. Maruska, H. P. and Tietjen, J. J. (1969). The preparation and properties of vapor-deposited single-crystalline Ga_N. *Applied Physics Letters*, 15(10), 327-329.
24. Ponce, F. A. (1998). *Structural defects and materials performance in the III-V nitrides*. (1). New York: Oxford University Press, 123-157.

25. Etzkorn, E. V., Clarke, D. R. (2001), Cracking of GaN films. *Journal of Applied Physics*, 89(2), 1025-1034.
26. Van Nostrand, J. E., Solomon, J., Saxler, A., Xie, Q. H., Reynolds, D. C. and Look, D. C. (2000). Dissociation of Al₂O₃(0001) substrates and the roles of silicon and oxygen in n-type GaN thin solid films grown by gas-source molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 87(12), 8766-8772.
27. Çetin, S. Ş. (2010). *GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik Ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2, 9, 10, 20-23, 42.
28. Brown, A. S., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Brown, T., May, G. (2006). Fundamental reactions controlling anion exchange during mixed anion heterojunction formation: Chemistry and kinetics of P-for-As Exchange reaction. *Applied Physics Letters*, 99(9), 093510(1-4).
29. Hudait, M. K., Lin, Y., Palmisiano, M. N., Tivarus, C., Pelz, J. P., Ringel, S. A. (2004). Comparison of mixed anion, InAs_yP_{1-y} and mixed cation, In_xAl_{1-x}As metamorphic buffers grown by molecular beam epitaxy on (100) InP substrates. *Applied Physics Letters*, 95(8), 3952-3960.
30. Nakamura, S. (1995). A bright future for blue/green LED's. *IEEE Circuits and Devices*, 11(3), 19-23.
31. Streetmann, B. G. (1995). *Solid State Electronics Devices*. (4). Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 13-63.
32. İnternet: Yarıiletkenlerin Elektronik Özellikleri. acikders. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.acikders.org.tr%2Fpluginfile.php%2F1073%2Fmod_resource%2Fcontent%2F&date=2015-01-12, Son erişim tarihi:12.01.2015.
33. Sze, S. M. (2002). *Semiconductor Devices, Physics and Technology*. (1). USA Danvers: John Wiley&Sons, 85-127, 288-294.
34. Hecht, J. (1991). *Understanding lasers: An entry level guide*. (1). New Jersey: IEEE Press, 272-276, 281-283.
35. Singh, J. (2003). *Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures*. (1). New York: Cambridge University Press, 386, 387.
36. İnternet: LED Lighting. 3esolition. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.3esoln.com.sg%2Ftechnology%2Fled-lighting.html&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2015.
37. Morthier, G., Vankwikelberge, P. (1997). *Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes*. (2). Boston, London: Artech House, 6-10.

38. Denizli, T. (2006). *GaInP/GaAs Kuantum Kuyulu Yapılarda Alaşım Düzensizliği ve Arayüzey Pürüzlülüğü Saçılması*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 5, 6.
39. Teke, A. (1997). *Hot electron light emission in GaAs/Al_xGa_{1-x}A heterostructures*, PhD thesis, Physics Department of Essex University, UK, 11.
40. Manasreh, O. (2005). *Semiconductor Heterojunctions and Nanostructures*. (1), New York: McGraw-Hill, 166, 503-510.
41. Gupta, M. C., Ballato, J. (2007). *The Handbook of photonic*. (2). Florida: CRC Press, 20.
42. Nakamura, S., Pearton, S., Fasol, G. (2000). *The blue laser diode, The complete story*. (2). Berlin: Springer-Verlag, 42, 43.
43. Paskova, T., Hanser, D. A. and Evans, K. R. (2010). GaN Substrates for III-Nitride Devices. *Proceedings of the IEEE*, 98(7), 1324-1338.
44. Denis, A., Goglio, G., and Demazeau, G. (2006). Gallium Nitride Bulk Crystal Growth Processes: A review. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 50(6), 167-194.
45. Pearton, S. J. (1997). *GaN and Related Materials*. (1). Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2,11.
46. Wurgaftman, I., Meyer, J. R., Ram-Mohan, L. R. (2001). Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 89(11), 5815-5875.
47. Pankove, J. I., Miller, E. I. and Berkeyheiser, J. E. (1971). GaN Electroluminescent Diodes. *RCA Review*, 32(3), 383-392.
48. Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., and Toyoda, Y. (1986). Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. *Applied Physics Letters*, 48(5), 353-355.
49. Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M. (1991). High-Power GaN p-n Junction Blue-Light-Emitting Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 30(12A), L1998-L2001.
50. Akasaki, I., Amano, H. (1994). Widegap Column-III Nitride Semiconductors for UV/Blue Light Emitting Devices. *Journal of The Electrochemical Society*, 141(8), 2266-2271.
51. Amano, H., Hiramatsu, K., Akasaki, I. (1988). Heteroepitaxial Growth and the Effect of Strain on the Luminescent Properties of GaN Films on (11-20) and (0001) Sapphire Substrates. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27(8), L1384-L1386.

52. Wang, W. K., Wu, D. S., Lin, S. H., Han, P., Horng, R. H., Hsu, T. C., Huo, D. T. C., Jou, M. J., Yu, Y. H., Lin, A. (2005). Efficiency improvement of near-ultraviolet InGaN LED's using patterned sapphire substrates. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 41(11), 1403-1409.
53. Bulun, G. (2010). *3D-Geçiş Metali Ni Katkılı Zn_{1-x}Ni_xO ve 4f Lantanit Gd Katkılı Zn_{1-x}Gd_xO Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 9-11,33-38.
54. Kittel, C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş*, (Çev. Bekir Karaoğlu). İstanbul: Güven Yayınevi, 302-310.
55. Wright, A. F. (1997). Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN. *Journal of Applied Physics*, 82(6), 2833-2839.
56. Holonyak, N., Bevacqua, S. F. (1962). Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P) junctions. *Applied Physics Letters*, 1(4), 82-83.
57. Nakamura, S., Senoh, M. & Mukai, T. (1993). P-GaN/N-InGaN/N-GaN Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 32(2), L8 -L11.
58. Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M. Nagahama, S and Iwasa, N. (1993). In_xGa_(1-x)N/In_yGa_(1-y)N superlattices grown on GaN films. *Journal of Applied Physics*, 74(6), 3911-3915.
59. Sah, C-T., Noyce, R. N. and Shockley, W. (1957). Carrier Generation and Recombination in p-n Junctions and p-n Junction Characteristics. *Proceedings of the IEEE*, 45(9), 1228-1243.
60. Tsao, J., Coltrin, M. E., Crawford, M. H., Simmons, J. A. (2010). Solid-State Lighting: An Integrated Human Factors, Technology, and Economic Perspective. *Proceedings of the IEEE*, 98(7), 1162-1179.
61. Humphreys, C. J. (2007). Solid state lighting. *MRS Bulletin*, 33(4), 459-470.
62. Chen, G., Craven, M., Kim, A., Munkholm, A., Watanabe, S., Camras, M., Götz, W., Steranka, F. (2008). Performance of high-power III-nitride light emitting diodes. *Physica Status Solidi (a)*, 205(5), 1086-1092.
63. Van de Walle, C. G., Mc Cluskey, M. D., Master, C. P., Romano, L. T., Johnson, N. M. (1999). Large and composition-dependent band bowing in In_xGa_{1-x}N alloys. *Materials Science and Engineering B*, 59(1-3), 274-278.
64. Chiu, S. Y., Anwar, A. F. M., Wu, S. (2000). Base transit time in abrupt GaN/InGaN/GaN HBT's. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 47(4), 662-666.
65. Liou, B. T., Lin, C. Y., Yen, S. H., Kuo, Y. K. (2005). First-principles calculation for bowing parameter of wurtzite In_xGa_{1-x}N. *Optics Communications*, 249(1-3), 217-223.

66. Tansley, T. L., Egan, R. J. (1993). Defects, optical absorption and electron mobility in indium and gallium nitrides. *Physica B: Condensed Matter*, 185(1-4), 190-198.
67. Nakamura, S. (1999). InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes. *Journal of Crystal Growth*, 201/202(1), 290-295.
68. Bayliss, S. C., Demeester, P., Flether, I., Maretin, R. W., Middleton, P. G., Moerman, I., O'Donnell, K. P., Sapelkin, A., Trager-Cowan, C., Van Der Stricht, W., Young, C. (1999). The optical and structure properties of InGaN epilayers with very high indium content. *Materials Science and Engineering B*, 59(1-3), 292-297.
69. Hanser, A. D., Banks, A. D., Davis, R. F., Jahn, B., Albrecht, M., Dorsch, W., Christiansen, S., Strunk, H. P. (2000). Growth and microstructure of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films grown on SiC substrate via low pressure metalorganic vapor phase epitaxy. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 3(3), 163-171.
70. Keller, S., Keller, B. P., Kopolnek, D., Abare, A. C., Mosui, H., Coldren, L. A., Mishra, U. K., Den Baars, S. P. (1996). Growth and characterization of bulk InGaN films and quantum wells. *Applied Physics Letters*, 68(22), 3147-3149.
71. Dussaigne, A., Damilano, B., Grandjean, N., Massies, J. (2003). In surface segregation in InGaN/GaN quantum wells. *Journal of Crystal Growth*, 251(1-4), 471-475.
72. Manasreh, O. (2000). *III Nitrides Semiconductors: Electrical, Structural and Defects Properties*. (5). Amsterdam/Holland: Elsevier Science BV, 4-13, 51-73.
73. İnternet: Ozan, S.. Fiziksel Metalurji. slideshare. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.slideshare.net%2Fhiyaka71%2Fkristal-yapda-noktasal-ve-izgisel-hatalar&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2015.
74. Yu, P. Y., Cardona, M. (2005). *Fundamentals of Semiconductors, Physics and Materials Properties*. (3). Berlin: Springer Berlin Heidelberg New York, 62, 87, 96-98.
75. Reshchikov, M. A., Morkoç, H. (2005). Luminescence properties of defects in GaN. *Applied Physics Reviews, Journal of Applied Physics*, 97(6), 61301(1-95).
76. Van de Walle, C. G., Neugebauer, J. (2004). First-principles calculations for defects and impurities: Application to III-nitrides. *Applied Physics Reviews Journal of Applied Physics*, 95(8), 3851-3879.
77. Hull, D., Bacon, D. J. (Editörler). (2001). *Introduction to Dislocations*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 11, 12, 14, 15, 17.
78. Davis, R. F., Roskowsky, A. M., Preble, E. A., Speck, J. S., Heying, B., Freitas, J. A., Glaser, E. R. and Carlos, W. E. (2002). Gallium Nitride Materials-Progress, Status, and Potential Roadblocks. *Proceedings of the IEEE*, 90(6), 993-1004.

79. Keller, S., Wu, Y., Parish, G., Ziang, N., Xu, J., Keller, B., Den Baars, S., Mishra, U. (2001). Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48(3), 552-559.
80. İnternet: AIX 200/4 RF-S. aixtron. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.aixtron.com%2Fen%2Fhome%2F&date=2015-01-12>, Son erişim tarihi:12.01.2015.
81. Flynn, J. S., Xin, H., Dion, J. A., Hutchins, E. L., Antunes, H., Fieschi-Corso, L., Egas, R. V. and Brandes, G. R. (2003). Delta doped AlGa_N and AlGa_N/Ga_N HEMTs: pathway to improved performance? *Physica Status Solidi (c)*, O(7), 2327-2330.
82. Frank, F. C. (1965). On Miller-Bravais indices and four-dimensional vectors. *Acta Crystallographica*, 18(5), 862-866.
83. Kızılkaya, K. (2012). *InGaAs/InP ve InGaAs/GaAs Kuantum Kuyulu Güneş Hücrelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37, 39-42.
84. Sundaram, M., Wang, S. C., Taylor, M. F., Reisinger, A., Milne, G. L., Rei, K. B., Rose, R. E., Marin, R. R. (2001). Two-color quantum well infrared photodetector focal plane arrays. *Infrared Physics & Technology*, 42(3-5), 301-308.
85. Suryanarayana, C., Norton, M. G. (1998). *X-Ray Diffraction: A practical Approach*. (98). New York/USA: Plenum Press, 125.
86. Zhou, D., Usher, B. F. (2001). Deviation of the AlGaAs lattice constant from Vegard's law. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(10), 1461-1465.
87. Öztürk, M. K., Yu, H., Sarıkavak, B., Korçak, S., Özçelik, S., Özbay, E. (2010). Structural analysis of an InGa_N/Ga_N based light emitting diode by X-ray diffraction. *Journal of Materials Science: Materials in Electronic*, 21(2), 185-191.
88. Öztürk, M. K., Altuntaş, H., Çörekçi, S., Hongbo, Y., Özçelik, S. and Özbay E. (2011). Strain-Stress analysis of AlGa_N/Ga_N heterostructures with and without an Al_N suffer and Interlayer. *Strain*, 47(s2), 19-27.
89. Çetin, S. S., Öztürk, M. K., Özçelik, S., Özbay, E. (2012). Strain analysis of InGa_N/Ga_N multi quantum well LED structures. *Crystal Research and Technology*, 47(8), 824-833.
90. Yıldız, A., Öztürk, M. K., Bosi, M., Özçelik, S., Kasap, M. (2009). Structural, electrical and optical characterization of InGa_N layers grown by MOVPE. *Chinese Physics B*, 18(9), 4007-4012.

91. Öztürk, M. K., Çörekçi, S., Tamer, M., Çetin, S. Ş., Özçelik, S., Özbay E. (2014). Microstructural properties of InGaN/GaN light-emitting diode structures with different In content grown by MOCVD. *Applied Physics A-Materials Science&Processing*, 114(4), 1215-1221.
92. Öztürk, M. K., Arslan, E., Kars, İ., Özçelik, S., Özbay, E. (2013). Strain analysis of the GaN epitaxial layers grown on nitridated Si(111) substrate by metal organic chemical vapor deposition. *Materials science in semiconductor processing*, 16(1), 83-88.
93. Cheal, R. L., Yong, J. P. (2003). Characteristics of UV photodetector fabricated by Al_{0,3}Ga_{0,7}N/ GaN heterostructure. *Journal of Crystal Growth*, 252(1), 51-57.
94. Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal Fiziği*. (1). Ankara: Nobel Yayınları, 221–499.
95. Kisielowski, C. (1999). Strain in GaN thin films and heterostructures. *Semiconductors and Semimetals*, 57(GaN II), 275-317.
96. Wassermann, G., Grewen, J. (1962) *Texturen metallischer Werkstoffe*. (2). Berlin: Springer, 754-759.
97. Çörekçi, S., Öztürk, M. K., Hongbo, Y., Çakmak, M., Özçelik, S., Özbay, E. (2013). Effects of high-temperature AlN buffer on the microstructure of AlGaIn/GaN HEMT's. *Semiconductors*, 47(6), 820-824.
98. Korçak, S., Öztürk, M. K., Çörekçi, S., Akaoglu, B., Hongbo, Y., Çakmak, M., Sağlam, S., Özçelik, S., Özbay, E. (2007). Structural and optical properties of an In_xGa_{1-x}N/GaN nanostructure. *Surface Science*, 601(18), 3892-3897.
99. Cho, S. I., Chang, K., Kwon, M. S. (2008). Growth Temperature Dependence of Strain in a GaN Epilayer, Grown on a c -Plane Sapphire Substrate. *Journal of Materials Science*, 43(1), 406-408.
100. Harutyunyan, V. S., Aivazyan, A. P., Weber, E. R., Kim, Y., Park, Y., Subramanya, S. G. (2001). High resolution x-ray diffraction strain-stress analysis of GaN/Sapphire heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(10A), A35-A39.
101. Cho, S. I., Chang, K., Kwon, M. S. (2007). Strain analysis of a GaN epilayer grown on a c-plane sapphire substrate with different growth times. *Journal of Materials Science*, 42(10), 3569-3572.
102. Kisielowski, C., Kruger, J., Ruvimov, S., Suski, T., Ager, J. W., Jones, E., Liliental-Weber, Z., Rubin, M., Weber, E. R., Bremser, M. D., Davis, R. F. (1996). Strain-related phenomena in GaN thin films. *Physical Review*, B54(24), 17745-17753.
103. Halliwell, M. A. G. (1997). X-ray diffraction solutions to heteroepitaxial growth problems. *Journal of Crystal Growth*, 170(1-4), 47-54.

104. Metzger, T., Höppler, R., Born, E., Ambacher, O., Stutzmann M., Stömmer, R., Schuster, M., Gobe, H., Christiansen, S., Albrecht M. and Strun, H. P. (1998). Defect structure of epitaxial GaN films determined by transmission electron microscopy and triple-axis X-ray diffractometry. *Philosophical Magazine A*, 77(4), 1013-1025.
105. Williamson, G. K., Hall, W. H. (1953). X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. *Acta metallurgica*, 1(1), 22-31.
106. Yu, H., Öztürk, M. K., Özçelik, S., Özbay, E. (2006). A study of semi-insulating GaN grown on AlN buffer/sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 293(2), 273-277.
107. Yam, F. K. Hassan, Z. (2008). InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms. *Superlattices and Microstructures*, 43(1), 1-23.
108. Arslan, E., Öztürk, M. K., Duygulu, Ö., Kaya, A. A., Özçelik, S., Özbay, E. (2009). The influence of nitridation time on the structural properties of GaN grown on Si (111) substrate. *Applied Physics A-Materials Science&Processing*, 94(1), 73-82.
109. Arslan, E., Öztürk, M. K., Teke, A., Özçelik, S., Özbay, E. (2008). Buffer optimization for crack-free GaN epitaxial layers grown on Si(111) substrate by MOCVD. *Japanese Journal of Physics D:Applied Physics*, 41(15), 155317-155326.
110. Vickers, M. E., Kappers, M. J., Datta, R., McAleese, C., Smeeton, T. M., Rayment F. D. G., and Humphreys, C. J. (2005). In-plane imperfections in GaN studied by x-ray diffraction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(A10), A99-A104.
111. Zheng, X. H., Chen, H., Yan, Z. B., Han, Y. J., Yu, H. B., Li, D. S., Huang, Q., Zhou, J.M. (2003). Determination of twist angle of in-plane mosaic spread of GaN films by high-resolution X-ray diffraction. *Journal of Crystal Growth*, 255(1-2), 63-67.
112. Gay, P., Hirsch, P. B., Kelly, A. (1953). The estimation of dislocation densities in metals from X-ray data. *Acta metallurgica*, 1(3), 315-319.
113. Dunn, C. G., Kogh, E. F. (1957). Comparison of dislocation densities of primary and secondary recrystallization grains of Si-Fe. *Acta Metallurgica*, 5(10), 548-554.
114. Fewster, P. F. (1989). A high-resolution multiple-crystal multiple-reflection diffractometer. *Journal of Applied Crystallography*, 22(1), 64-69.
115. Hordon, M. J., Averbach, B. L. (1961). X-ray measurements of dislocation density in deformed Copper and Aluminum single crystals. *Acta Metallurgica*, 9(3), 237-246.
116. Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Matsushita, T., Mukai, T. (2000). Blue InGaN-based laser diodes with an emission wavelength of 450 nm. *Applied Physics Letters*, 76(1), 22-24.
117. Nakamura, S., Senoh, M. and Mukai, T. (1993). High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 62(19), 2390-2392.

118. Lee, S. K., Kim, T.H., Lee, S.Y., Choi, K.C. and Yang, P. (2007). High-brightness gallium nitride nanowire UV-blue light emitting diodes. *Philosophical Magazine*, 87(14), 2105-2115.
119. Chitnis, A., Chen, C., Adivarahan, V., Shatalov, M., Kuokstis, E., Mandavilli, V., Yang, J. and Khan, M. A. (2004). Visible light-emitting diodes using a-plane GaN-InGaN multiple quantum wells over r-plane sapphire. *Applied Physics Letters*, 84(18), 3663-3665.
120. Coquillat, D., Vassor d'Yerville, M. L., Kazan, M., Liu, C., Watson, I. M., Edwards, P. R., Martin, R. W., Chong H. M. H. and De La Rue, R. M. (2008). Studies of the photonic and optical-frequency phonon properties of arrays of selectively grown GaN micropylamids. *Journal of Applied Physics*, 103(4), 044910:1-7.
121. Ma, Z. F., Zhao, D. G., Wang, Y. T., Jiang, D. S., Zhang, S. M., Zhu, J. J., Liu, Z. S., Sun, B. J., Yang, Hui and Liang, J. W. (2008). The effect of growth temperature on structural quality of GaN/AlN quantum wells by metal-organic chemical vapour deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(10), 105106-105110.
122. Kınacı, B., Çetin, S. Ş., Bengi A. and Özçelik, S. (2012). The temperature dependent analysis of Au/TiO₂ (rutile)/n-Si (MIS) SBDs using current-voltage-temperature (I-V-T) characteristics. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15(5), 531-535.
123. Nakamura, S., Mukai T. and Senoh M. (1994). Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 64(13), 1687-1689.
124. Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Yamada, T., Matsushita, T., Kiyoku, H., Sugimoto, Y., Kozaki, T., Umemoto, H., Sano, M. and Chocho, K. (1997). InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes with modulation-doped strained-layer superlattices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 36(2-12A), L1568-1571.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAŞ, Yunus
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.08.1976, Samsun
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (532) 202 10 83
 Faks : 0 (312) 219 80 55
 E-Posta : yunus@boren.gov.tr



Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Fizik
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik	2000
Lise	Samsun Ondokuzmayıs Lisesi	1993

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2012- ...	Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü	Laborant
2011-2012	İç İşleri Bakanlığı	Memur
2008-2011	MRD Bilişim A.Ş.	Gn. Md. Yrd.

Yabancı Dil

İngilizce

Tezle İlgili Yayınlar

Science Citation Index (SCI) Tarafından Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. **Baş, Y.**, Demirel, P., Akın, N., .Başköse, C., Özen, Y., Kınacı B., Öztürk, M.K., Özçelik, S. and Özbay, E. (2014). Microstructural defect properties of InGaN/GaN blue light emitting diode structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(9), 3924-3932.
2. **Baş, Y.**, Tamer, M., Gültelin, A., Öztürk, M.K., Altuntaş, H., Özçelik, S. and Özbay, E. (2014). Defect research of InGaN based blue LED structures using reciprocal space mapping. *Journal of Physics D: Applied Physics*, (İnceleme aşamasında).

Ulusal ve Uluslar Arası Kongre Tebliğleri

1. **Baş, Y.**, Öztürk, M.K., Tamer, M., Gültekin, A., Altuntaş, H., Özçelik, S. and Özbay, E. (2014, 17-21 Haziran). *Defect research of InGaN based blue LED structures with reciprocal lattice space mapping*. Uluslararası Nano TR-10, İstanbul. (Poster Sunum)
2. **Baş, Y.**, Akın, N., Başköse, Ü.C., Öztürk, M.K., Özçelik, S. and Özbay, E. (2014, 17-21 Haziran). *Structural, optical and morphological properties of InGaN/GaN blue light emitting diode structure*. Uluslararası Nano TR-10, İstanbul. (Poster Sunum)
3. **Baş, Y.**, Öztürk, M.K., Akın, N., Kınacı, B., Özçelik, S. ve Özbay, E. (2013, 20 Aralık). *InGaN temelli LED yapılar için ters örgü uzayı haritasından In oranı ve örgü zorların elde edilmesi*. 19. Yoğun madde fiziği Ankara Toplantısı, Ankara. (Poster Sunum)
4. **Baş, Y.**, Tamer, M., Öztürk, M.K., Özçelik, S. and Özbay, E. (2013, 2-5 Eylül). *InGaN temelli LED yapılar için Ters örgü uzay haritasından In alaşım yüzdesinin elde edilmesi*. Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, İstanbul. (Sözlü Sunum)
5. **Baş, Y.**, Murzakasymova, A., Tamer, M., Öztürk, M.K., Özçelik, S. ve Özbay, E. (2013, 2-5 Eylül). *InGaN temelli LED yapılar için ters örgü uzayı haritasından rahatlatma seviyesinin elde edilmesi*. Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, İstanbul. (Sözlü Sunum)
6. **Baş, Y.**, Tamer, M., Öztürk, M.K., Özçelik, S. and Özbay, E. (2013, 24-28 Haziran). *Reciprocal mapping of InGaN/GaN blue light emitting diode structures*. Uluslararası Nano TR-9, Erzurum. (Poster Sunum)

Tez Dışı Yayınlar

Science Citation Index (SCI) Tarafından Taranan Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Gültekin, A, Öztürk, M.K., Tamer, M., and **Baş, Y.** (2014). The Study of Structural, Electronic, Elastic and Optical Properties of $Be_{1-x}Zn_xSe$ Alloys Through X-Ray Machine and Ab-Initio Method Depending on Vegard's Law. *Chinese Physics B*, (İnceleme aşamasında).
2. Gültekin, A, Öztürk, M.K., Tamer, M., and **Baş, Y.** (2014). (2014). The Study of Structural, Electronic, Elastic and Optical Properties in $Be_{1-x}Zn_xTe$ Alloys. *Material Science in Semiconductor Processing*, (İnceleme aşamasında).

Ulusal ve Uluslar Arası Kongre Tebliğleri

1. Gültekin, A., Öztürk, M.K., Tamer, M., **Baş, Y.** (2014, 21-24 Temmuz). *$Cd_{1-x}Zn_xTe$ alaşımlarının yapısal, elektronik, elastik ve optiksel özelliklerinin Vegard yasası ve Ab-initio metotla incelenmesi*. Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum/Muğla. (Poster Sunum)

2. Gültekin, A., Öztürk, M.K., Tamer, M., **Baş, Y.** (2014, 21-24 Temmuz). *Structural and optical properties of an $In_xGa_{1-x}N/GaN$ nanostructure*. Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum/Muğla. (Poster Sunum)
3. Gültekin, A., Öztürk, M.K., Tamer, M., **Baş, Y.** (2014, 21-24 Temmuz). *Structural, electrical and optical characterization of InGaN layers grown by MOVPE*. Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum/Muğla. (Poster Sunum)
4. Gültekin, A., Öztürk, M.K., Tamer, M., **Baş, Y.** (2014, 21-24 Temmuz). *$Cd_{1-x}Zn_xSe$ alaşımlarının yapısal, elektronik, elastik ve optiksel özelliklerinin v Vegard yasası ve Ab-initio metodla incelenmesi*. Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum/Muğla. (Poster Sunum)
5. Gültekin, A., Öztürk, M.K., Tamer, M., **Baş, Y.** (2014, 21-24 Temmuz). *$Cd_{1-x}Hg_xS$ alaşımlarının yapısal, elektronik, elastik ve optiksel özelliklerinin Vegard yasası ve Ab-initio metodla incelenmesi*. Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum/Muğla. (Poster Sunum)
6. Tamer, M., **Baş, Y.**, Öztürk, M.K., Özçelik, S., Özbay, E. (2013, 2-5 Eylül). *X-ışınları kırımı ile yüksek elektron-hareketlilik litransistör (HEMT) AlInN'in mozaik kusur analizi*. Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, İstanbul. (Poster Sunum)
7. Tamer, M., **Baş, Y.**, Öztürk, M.K., Gültekin, A., Özçelik, S., Özbay, E. (2013, 2-5 Eylül). *X-ışınları kırımı ile yüksek elektron-hareketlilik litransistör (HEMT) AlInN'in yapısal analizi*. Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, İstanbul. (Poster Sunum)
8. **Baş, Y.**, Özer, M. (2003, 14 Kasım). *GaAs ile oluşturulan Schottky Engelli MIS yapılar da parametre tayini*. 10. Yoğun madde fiziği Ankara Toplantısı, Ankara. (Poster Sunum)
9. **Baş, Y.**, Özer, M. (2004, 03 Aralık). *GaAs ile oluşturulan Schottky Engelli MIS yapılar da sıcaklığa bağlı I-V, C-V analizleri*. 11. Yoğun madde fiziği Ankara Toplantısı, Ankara. (Poster Sunum)

Tez Dışı Projeler

1. **Baş, Y.**, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü Ar-Ge Laboratuvarında yürütülen; *Advanced Metallic alloys enabled by boron content (2013.Ç0377)* projesinde araştırmacı. Başlama - Bitiş Tarihi: 15.05.2013 - 14.05.2016.

Hobiler

Satranç, Tiyatro, Zeka oyunları, Seyahat