

**AlGaN TEMELLİ UV-LED YAPILARININ METAL ORGANİK
BUHAR FAZİ EPİTAKSİSİ YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Mustafa ÖZTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2011

ANKARA

Mustafa ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “AlGaN TEMELLİ UV-LED YAPILARININ METAL ORGANİK BUHAR FAZİ EPİTAKSİSİ YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Elif ORHAN

.....

Tez Danışmanı, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY

.....

Tez İkinci Danışmanı, Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

Fizik Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Elif ORHAN

.....

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Nurgül SEFEROĞLU

.....

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 07/10/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mustafa Öztürk

**AlGaN TEMELLİ UV-LED YAPILARININ METAL ORGANİK BUHAR
FAZI EPİTAKSİSİ YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Mustafa ÖZTÜRK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2011**

ÖZET

Bu çalışmada c-safir (0001) alttaş üzerine çatlaksız, AlGaN temelli 340 nm de ışıma yapan UV-LED yapıları Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksi (MOBFE) yöntemi ile büyütülmüş ve karakterize edilmiştir. AlGaN temelli UV-LED yapı büyütmelemlerindeki en önemli zorluk AlGaN tabakalarının safir alttaş (c-düzlem) ile yüksek örgü uyumsuzluğu nedeniyle kusurların üretilmesidir. Bu çalışmada kusurları azaltmak amacıyla AlN tampon optimizasyonu; çekirdeklenme, nitridasyon ve desorpsiyon adımları ile birlikte gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda diyot karakteristiklerinin de iyileştirilmesi ve aktif bölgede daha fazla taşıyıcı toplanabilmesi için n ve p tipi katkı tabakalar ile elektron bloklama tabakaları üzerinde çalışılmıştır. Güçlü iç soğurmayı en aza indirmek için p tipi katkı zarflama tabakaları ile p kontak metallerinin kalınlıkları düşürülmüştür. Sonuç olarak, 8mA giriş akımında 339 nm de güçlü ve keskin bir Elektro-luminesans (EL) şiddeti gözlenebilmiştir. EL sinyalinin FWHM değeri 13,7 nm olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 202.1.092
Anahtar Kelimeler : MOBFE, AlGaN,UV-LED
Sayfa Adedi : 61
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.Ekmele ÖZBAY, Doç.Dr.Elif ORHAN

**GROWTH AND CHARACTERIZATION OF AlGaN BASED UV-LED
STRUCTURES BY METAL ORGANIC VAPOR PHASE EPITAXY**

(M.Sc. Thesis)

Mustafa ÖZTÜRK

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2011

ABSTRACT

AlGaN based UV-LEDs emitting at 340 nm were grown on c-sapphire (0001) by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) method and characterized in this work. Generation of defects related to large lattice mismatch between c-plane sapphire substrate and AlGaN layers is the most important adversity in growing AlGaN based UV-LEDs. AlN buffer optimization is carried out with nucleation, nitridation and desorption parameters in order to reduce defects. At the same time a work is performed on n type and p type layers as well as electron blocking layers to get better diode characteristics and combine more carriers in active region. Thickness of p type doped cladding layers with p contact metals were decreased in order to reduce strong internal absorption. In summary, a strong and sharp Electro-luminescence (EL) peak observed at 339 nm with 8mA injection current. FWHM of EL peak is determined as 13,7 nm.

Science Code : 202.1.092

Key Words : MOVPE, AlGaN, UV-LED

Page Number : 61

Adviser : Prof.Dr.Ekmel ÖZBAY, Doç.Dr.Elif ORHAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Doç. Dr. Elif Orhan'a yine bu çalışma boyunca altyapı olanakları ile çalışmama destek olup her zaman çok değerli tecrübe ve yönlendirmelerini esirgemeyen Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi direktörü Prof.Dr. Ekmel Özbay Hocam'a , ayrıca laboratuvar çalışmalarımda olağan üstü yardımlarını gördüğüm çalışma arkadaşlarım Araştırma Mühendisi Pakize Demirel ve Araştırma Mühendisi Hüseyin Çakmak'a, elde edilen örneklerin mikrofabrikasyonunu ve elektriksel ölçümlerini gerçekleştiren değerli çalışma arkadaşım Araştırma Mühendisi M.Cihan Çakır'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ VE LED YAPILARININ TEMEL ÖZELLİKLERİ	6
2.1. Kimyasal Bağlanma ve Kristal Yapı Özellikleri	6
2.2. Bant Aralığı Enerjisi	8
2.3. Polarizasyon	9
2.4. p-n birleşimi	11
3. MOBFE YÖNTEMİ	16
4. EPİTAKSİYEL MALZEME BÜYÜTME	19
4.1. Temizlik ve Ön Hazırlıklar	20
4.1.1. Reaktör hazırlama	20
4.1.2. Alttaş hazırlama	20
4.2. AlN ve AlN/AlGaN Tampon Optimizasyonu ve Karakterizasyonu	21
4.3. AlGaN:Si Yapının Büyütülmesi	34
4.4. AlGaN:Si Karakterizasyonu	35
4.4.1. Optik geçirgenlik	36

	Sayfa
4.4.2. Hall etkisi ölçümü	36
4.4.3. Atomik kuvvet mikroskobu ile yüzey taraması	37
4.5. Çoklu Kuantum Kuyu Yapının Büyütülmesi	37
4.6. UV-LED Yapı Büyütmeleri	40
5. EPİTAKSİYEL MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU	47
5.1. X-Işını Difraksiyonu	47
5.2. Fotoluminesans Ölçümü (FL)	49
6. AYGIT MİKRO-FABRİKASYONU	51
7. AYGIT KARAKTERİZASYONU	53
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Nitrat yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi	2
Çizelge 2.1. GaN ve AlN için bazı fiziksel özellikler	7
Çizelge 3.1. MOCVD kaynakları avantaj ve dezavantajları	19
Çizelge 4.1. Optimizasyon için büyütülen AlN tabakalarına ait büyütme koşulları ve X- Işını kırınımı ölçüm sonuçları.	24
Çizelge 4.2. Çoklu Kuantum Kuyusu Büyütme Koşulları.....	38
Çizelge 4.3. UV-LED yapılarında standart olarak kullanılan tabakaların kalınlıkları	41
Çizelge 4.4. p-tipi kontak tabakalarının büyütme koşulları.	43
Çizelge 5.1. 1.test yapısı ve 2.yapı daki bazı tabakaların (002) düzlemi için rocking eğrisi ölçümü FWHM değerleri.....	47
Çizelge 5.2. Çoklu kuantum kuyusundan gelen ve n+AlGaIn'dan gelen sinyal tepe noktaları	50
Çizelge 6.1. Kontak metal kaplama kalınlıkları.....	51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. III grubu Nitratların dalgaboyu spektrumu	4
Şekil 2.1. (a)Wurtzite, (b) Zinc-blende, (c) Rock-salt,	6
Şekil 2.2. Yasak bant aralığı enerjisinin örgü sabiti ile değişimi.....	8
Şekil 2.3. Wurtzite yapısındaki GaN (sol) ve AlN'a (sağ) ait hesaplanmış bant yapıları.	9
Şekil 2.4. p-n eklem bölgesinde rekombinasyon olayı ve ışık yayınımlı.....	13
Şekil 2.5. Tasarlanan UV-LED yapısına ait aktif bölge bant yapısı	15
Şekil 3.1. MOCVD sistemi temel bileşenleri.....	16
Şekil 3.2. MOCVD yönteminde GaN ince filmlerin tabaka yapısının oluşumu.....	18
Şekil 4.1. Optimizasyon için büyütülen AlN yapısı şematik gösterimi.	22
Şekil 4.2. (002) ve (102) RC ω FWHM değerlerinin DS-AlN süresi ile değişimi ...	25
Şekil 4.3. (002) ve (102) RC ω FWHM değerlerinin DS-AlN büyütme süresi ile	26
Şekil 4.4. (002) ve (102) RC ω FWHM değerlerinin Desorpsiyon süresi ile değişimi	26
Şekil 4.5. RMS yüzey pürüzlülük değerinin DS-AlN çekirdek tabaka süresi ile değişimi	30
Şekil 4.6. RMS yüzey pürüzlülük değerinin Nitridasyon süresi ile değişimi	30
Şekil 4.7. RMS yüzey pürüzlülük değerinin Desorpsiyon süresi ile değişimi	31
Şekil 4.8. AlN/Al _{0.75} Ga _{0.25} N süper örgü tampon tabakası büyütme kaynak akışı.....	32
Şekil 4.9. Katkılı AlGaN da Silisyum aktivasyon enerjisinin Aluminyum oranı ile .	34
Şekil 4.10. AlGaN:Si ile tampon tabakalarının şematik gösterimi	35
Şekil 4.11. n+Al _{0.33} Ga _{0.67} N tabakasına ait optik geçirgenlik spektrumu	36
Şekil 4.12. n+AlGaN, bariyer ve kuyu AlGaN optik geçirgenlik ölçümü.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N} / \text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{N}$ MQW test büyütmesi için Fotoluminesans	40
Şekil 4.14. Yapılara ait p-tipi katkıli kontak tabakalarının yerleşimi	42
Şekil 4.15. İnce film-alttaş yapısında yansıma olayının oluşumu.....	44
Şekil 4.16. Yansımali geçiş ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi [6].	45
Şekil 4.17. 1.UV-LED yapısına ait büyütmenin Fabry-Perot osilasyonları.....	46
Şekil 4.18. 2.UV-LED yapısına ait büyütmenin Fabry-Perot osilasyonları.....	46
Şekil 5.1. 1.UV-LED yapısına ait $\Omega/2\theta$ ölçüm spektrumu	48
Şekil 5.2. 2.UV-LED yapısına ait $\Omega/2\theta$ ölçüm spektrumu	48
Şekil 5.3. p-kontak tabakaları ile büyütülen UV-LED yapılarının fotoluminesans spektrumu	49
Şekil 7.1. İlk yapıya ait I-V grafiği	53
Şekil 7.2. 1.UV-LED yapısına ait elektro-luminesans spektrumu	54
Şekil 7.3. 2. UV-LED yapısına ait I-V grafiği	54
Şekil 7.4. 2.UV-LED yapısına ait elektro-luminesans spektrumu	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. DS-AlN çekirdeklenme tabakası: 2 dk'lık tavlama öncesi	23
Resim 4.2. AlN tampon optimizasyonu AFM yüzey taramaları.....	29
Resim 4.3. AlN/AlGaN süper örgü tampon tabakası ara kesit SEM görüntüsü	33
Resim 4.4. $n+\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ AFM yüzey görüntüsü	37
Resim 6.1. Optik litografi ile fabrikasyonu tamamlanan UV-LED aygıtına ait mikroskop görüntüsü.	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

Sccm/dk

Standart kübik santimetre / dakika

Arc sec

Arc second (derece (°) x 3600)

mA

mili-Amper

nm

nanometre

µm

mikrometre

ppm

Milyonda bir parçacık

Ω

Ohm

Kısaltmalar

Açıklama

AFM

Atomik Kuvvet Mikroskobu

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

XRD

X-ışını Difraksiyonu

FL

Foto Luminesans

UV

Ultraviyole

LED

Işık Yayan Diyot

MOCVD

Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme

MOBFE

Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksi

DS

Düşük Sıcaklık

YS

Yüksek Sıcaklık

SÖ

Süper Örgü

EQW

Dışsal Kuantum Verimi

MQW,ÇKK

Çoklu Kuantum Kuyusu

Ud

Katkısız

RTA

Hızlı Isıl Tavlama

1. GİRİŞ

360 nm altı dalgaboylarında parlak ve yüksek verimli UV-LED ışık kaynakları tıbbi cihazlar, kısa mesafe gizli taktiksel iletişim, biyolojik-kimyasal ajan tespiti [25], saflaştırma ve sterilizasyon, katı hal beyaz aydınlatma ve yüksek kapasiteli veri depolama sistemleri gibi birçok uygulama alanında geleneksel UV-ışık kaynaklarına göre kompakt tasarımları, düşük ısı üretimleri, düşük güç tüketimi, yüksek performansları ve yüksek verimleri nedeniyle oldukça çekici bir alternatiftir. Dolayısı ile bu bölgede ışıma yapacak yüksek performanslı UV-LED yapılarının geliştirilmesi oldukça önemlidir. Nitrat temelli üçlü bileşiklerden olan $Al_xGa_{1-x}N$ geniş bant aralığı enerjisi sayesinde (3,4eV-6,2eV) 360 nm altında UV- ışıma verebilecek bir malzemedir. Geleneksel GaN/InGaN temelli görünür bölge LED ışık kaynaklarında olduğu gibi $Al_xGa_{1-x}N$ / $Al_yGa_{1-y}N$ çoklu kuantum kuyu (ÇKK) temelli UV-LED yapıları da Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksi (MOBE) yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bu amaçla GaN/AlGaN (<360 nm) [10,11,15,22], $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ (<300nm)[8], InGaN/AlInGaN (370 nm< λ <390nm) [13,16] tipinde kuantum kuyu yapıları geliştirilmiştir. Bir diğer çalışmada da Horng ve ark.[17] yüzeyi patern edilmiş ve edilmemiş safir üzerine InGaN/AlGaN kuantum kuyu yapıları LED elde ederek dışsal kuantum veriminde patern edilmiş safir üzerinde ~ %35 gibi bir artış gözlemişlerdir. Fujikawa ve ark. [19], ise $In_{x1}Al_{y1}Ga_{1-x1-y1}N$ / $In_{x2}Al_{y2}Ga_{1-x2-y2}N$ tipinde MQW yapısı ile 346 nm de 8.4mW gibi yüksek bir çıkış gücü elde etmişlerdir. $Al_xGa_{1-x}N$ / AlN tipindeki çoklu kuantum kuyu yapılarından da 280-290 nm aralığında ışıma alındığı Gautier ve ark. [24] tarafından rapor edilmiştir.

Safir üzerine GaN büyütülmesine yönelik çalışmalar ilk olarak 1969 yılında “Hydride Vapour Phase Epitaxy” (HVPE) yöntemi ile başladı. 1971 de ilk metal-yalıtkan-yarı iletken (MIS) ışık yayan diyot yapısı gösterildi ancak 1989 yılına kadar GaN üzerine çok az sayıda araştırma yayınlanabildi. 1992 den bu yana III grubu nitratları üzerine yapılan çalışmalar hızlı bir yükseliş gösterdi. Çifli heteroyapılı LED lerden HEMT'lere kadar birçok yapı bu nitratlı bileşikler ile elde edildi. GaN malzemesi elde etmede zaman içerisinde birden farklı yöntemler geliştirildi.

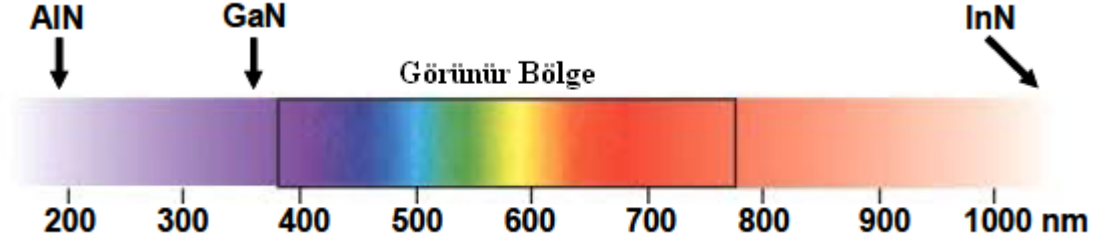
Çizelge 1. 1 Nitrat yarıiletkenlerin tarihsel gelişimi

Yıl	Gelişme	Araştırmacılar
1969	Safir üzerine GaN (HVPE yöntemi ile)	Maruska ve ark.
1971	Safir üzerine MIS LED (HVPE) Safir ve SiC üzerine GaN (MOCVD yöntemi ile)	Pankova ve ark. Mankova ve ark.
1983	Safir üzerine AlN aratabaka (MBE yöntemi ile)	Yoshida ve ark.
1986	Safir üzerine AlN tampon kullanılarak çok düzgün yüzeyli GaN elde edildi (MOCVD)	Amano ve ark.
1989	p-tipi GaN, Mg katkılı GaN, GaN p-n birleşimli LED (MOCVD)	Amano ve ark.
1992	Isıl işlem ile Mg aktivasyonu Safir üzerine AlGaIn/GaN iki boyutlu elektron gazı (2DEG) (MOCVD yöntemi ile)	Nakamura ve ark. Khan ve ark.
1993	AlGaIn /GaN heteroyapıda piezoelektrik etkinin teorik çalışmaları	Bykhovski ve ark.
1994	InGaIn/AlGaIn DH mavi LED Safir üzerine AlGaIn/GaN HEMT yapısı (MOCVD)	Nakamura ve ark. Khan ve ark.
1995	Safir üzerine AlGaIn/ GaN HEMT yapısı (MBE)	Özgür ve ark.
1996	Katkılı kanallı AlGaIn/GaN HEMT (MOCVD) İlk mavi renkli lazer diyot	Khan ve ark. Nakamura ve ark.
1997	Piezoelektrik etkinin deneysel sonuçları SiC üzerine AlGaIn/GaN HEMT yapısı LiAlO ₂ üzerine GaN (MBE yöntemi ile) LiAlO ₂ üzerine GaN (MOCVD yöntemi ile)	Asbeck ve ark. Binari ve ark. Hellman ve ark. Kryliouk ve ark.
1998	GaN/Al _{0.15} Ga _{0.85} N mor ve UV-LED (MBE)	Guha ve ark.
1998	Silisyum üzerine InGaIn/GaN LED (MBE)	Bojarceczuk ve ark.
1998	İlk GaN/AlGaIn MQW LED (353 nm)	Han ve ark.
1999	Silisyum üzerine InGaIn/GaN LED (MOCVD)	Tran ve ark.
2000	Silisyum üzerine AlGaIn/GaN -2DEG- (MOCVD)	Kaiser ve ark.
2001	Silisyum üzerine AlGaIn/GaN HEMT (MBE)	Semond ve ark.
2001	İlk 340 nm UV-A LED	Adivarahan ve ark.
2001	İlk 315 nm LED	Khan ve ark.
2001	İlk 305 nm UV-B LED	Khan ve ark.
2002	LiAlO ₂ üzerine GaN (HVPE yöntemi ile)	Chen ve ark.
2003	Silisyum üzerine InGaIn/GaN MQW yapısında optik pompalama yolu ile Lazer aktivitesi	Dikme ve ark.
2008	AlInN/GaN DBR üzerine mavi LED	Ishikawa ve ark.
2008	150 mm (001) Si üzerine InGaIn/GaN mavi LED	Schulze ve ark.
2004	ELO AlGaIn üzerine UV-LED	Amano ve ark.
2005	LiAlO ₂ üzerine InGaIn/GaN LED yapısından elektrolüminesans elde edildi. (MOCVD)	Dikme ve ark.
2006	İlk AlN deep UV -LED (210 nm)	Taniyasu ve ark.
2008	UV-LED için SiC üzerine AlN ve AlGaIn	Amano ve ark.

Bu yöntemlerin bir kısmı avantajları veya dezavantajları nedeni ile katı (bulk) GaN elde etmede kullanılırken bir kısımda ince film teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ince GaN filmleri elde etmede kullanılmaktadır.

Bu yöntemlerden bazıları Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi (MOVPE), Moleküler Demet Epitaksisi (MBE), Hidrat Buhar Fazı epitaksisi (HVPE), Kimyasal Buhar Briktirme (CVD), “Sublimation Sandwich Tekniği”dir. MOVPE tekniği Metal Organik Kimyasal Buhar biriktirme (MOCVD) ve Organik Metal Buhar Fazı Epitaksisi (OMVPE) adlandırmaları ile aynı anlamda kullanılmaktadır. Çizelge 1.1.’de GaN ve ilişkili nitrat yapılarının tarihsel gelişimi kısaca özetlenmiştir.

1990’lı yılların başından itibaren bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler büyük ölçüde yarı iletken malzemeler ve bu malzemeler ile uygulama bulmuş yarı iletken aygıtların geliştirilmesi ile paralellik göstermiştir. Günümüze kadar geçen süreçte GaN, Silisyum dan sonra muhtemelen en önemli yarı iletkenlerden biridir. Bu süreçte aynı zamanda GaN ve GaN ile ilişkili geniş bant aralıklı malzemelerin de araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde hızlı bir artış olmuştur. Geleneksel Silisyum ve kullanılagelen III-V grubu yarı iletkenleri ile karşılaştırıldığında III grubu nitrat bileşikleri özgün optik ve elektronik özellikler sunmaktadır. En popüler GaN tabanlı aygıtlar ultraviyole-mavi arası lazer diyotları (LD) ve Ultraviyole-yeşil arası ışık yayan diyotlardır (LED). Yüksek elektron mobiliteli transistörler (HEMT) ve güneş körü ultraviyole sensörler de ticarileşmek için sırada bekleyen diğer aygıtlardır. Nitrat tabanlı bu bileşiklerdeki wurtzite kristal modifikasyonu geniş bant aralıklarını kapsar. AlN için 6.2 eV, GaN için 3.4 eV olan bu değer InN da 0.7-1.0 eV’a kadar düşer. Geniş bant aralıklarından dolayı GaN gibi bu tip yarı iletken malzemeler güçlü bağ yapılarından dolayı yüksek sıcaklıkuygulamalarında da kullanılırlar. Şekil 1.1.’de nitrat yarı iletkenlerin bant enerjilerinin spektrumda dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.1. III grubu Nitratların dalgaboyu spektrumu [2].

AlGa_xN malzemesi ise direk geçişli geniş-bant aralıklı bir malzeme olması ile n-tipi ve p-tipi iletkenlik sağlanabilmesi nedeniyle özellikle 360 nm altı dalgaboylarında UV emisyon veren LED yapıları geliştirmede gelecek vaadeden bir malzeme olarak görülmektedir. Silisyum (111) ve SiC alttaş üzerine çeşitli UV-LED yapı büyütme çalışmaları da bulunmakla birlikte [1] c-düzlemlili (0001) safir alttaş büyük çaplarda alttaş üretilebilmesi ve pazar fiyatının ucuzlaması nedeniyle oldukça tercih edilen bir alttaş olmuştur. Katı GaN alttaş üzerine de 360 nm altı LED çalışmaları yapılmaktadır [14]. İyi optik ve elektriksel özelliklere sahip yüksek kaliteli Al_xGa_{1-x}N malzemesi elde edilebilmesi safir (0001) alttaş üzerine yüksek verimli AlGa_xN temelli UV-LED üretebilmek için oldukça önemlidir. AlGa_xN temelli LED lerdeki en önemli problem düşük verimlilikleridir. Bunun başlıca sebepleri arasında p-tipi katkı AlGa_xN tabakalarındaki görece düşük deşik taşıyıcı konsantrasyonudur. Bereberinde yüksek aygıt seri direnci ve p-AlGa_xN üzerinden limitli miktarda akım enjeksiyonudur. 340 nm de yayınım veren LED yapısında Mg katkı AlGa_xN/AlGa_xN süper örgü tipinde kontak tabaka yapısı kullanılarak 45-50 Ω seri direnç elde edilen çalışmalar yapılmıştır [7]. Ek olarak Mg katkı AlGa_xN tabakalarının p-tipi iletkenliğindeki değişim azot, hava veya oksijen atmosferindeki aktivasyon işlemleri ile gözlenmiş ve oksijen atmosferindeki aktivasyonlarda $2E+16 \text{ cm}^{-3}$ dolayında deşik konsantrasyonu elde edilmiş ve aynı çalışmada azot atmosferinde $\sim 5E+15 \text{ cm}^{-3}$ olarak elde edilmiştir [15].

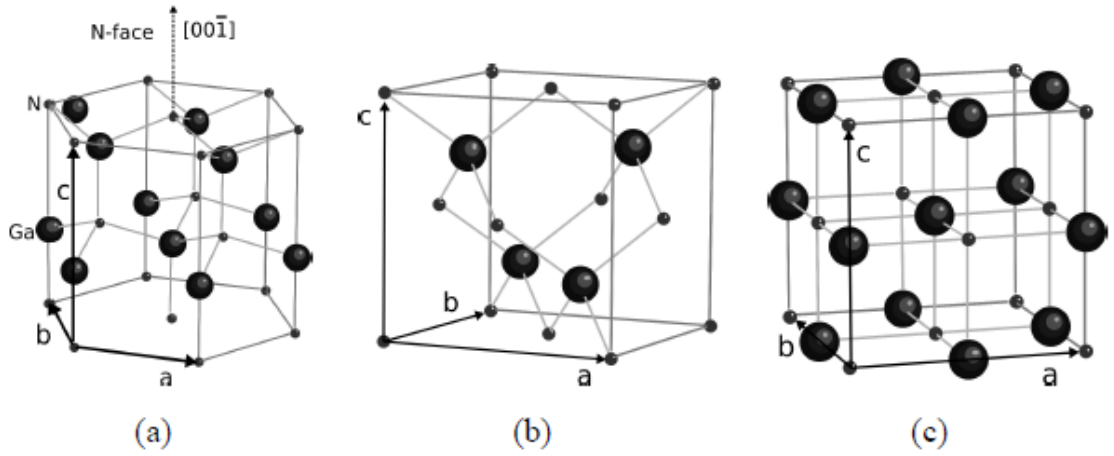
Bu çalışmada ise Safir (0001) üzerine elde edilen UV-LED epitaksiyel yapısı genellikle DS/YS (Düşük Sıcaklık/Yüksek Sıcaklık) AlN tampon ile AlN /AlGa_xN

süper örgü tampon yapısı üzerine büyütülen AlGaN:Si kontak tabakası ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ / $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ çoklu kuantum kuyu yapısından oluşan aktif bölge ve Mg katkılı p-GaN, p-AlGaN zarflama ve p-AlGaN elektron bloklama tabakalarının olduğu epitaksiyel UV-LED yapısı çalışılmış ve elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmiştir

2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ VE LED YAPILARININ TEMEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Kimyasal Bağlanma ve Kristal Yapı Özellikleri

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ nitrat kristaller geniş bant enerjisi ile orantılı olarak yüksek kimyasal stabiliteye, yüksek erime noktasına, yüksek ısı iletkenliğe ve yüksek piezoelektrik sabitine sahip bir malzemedir. GaN temelli kristaller 3 farklı kristal örgüsünde bulunabilir. Bunlar wurtzite, rock-salt ve Zinc blende biçimli kristal örgülerdir.



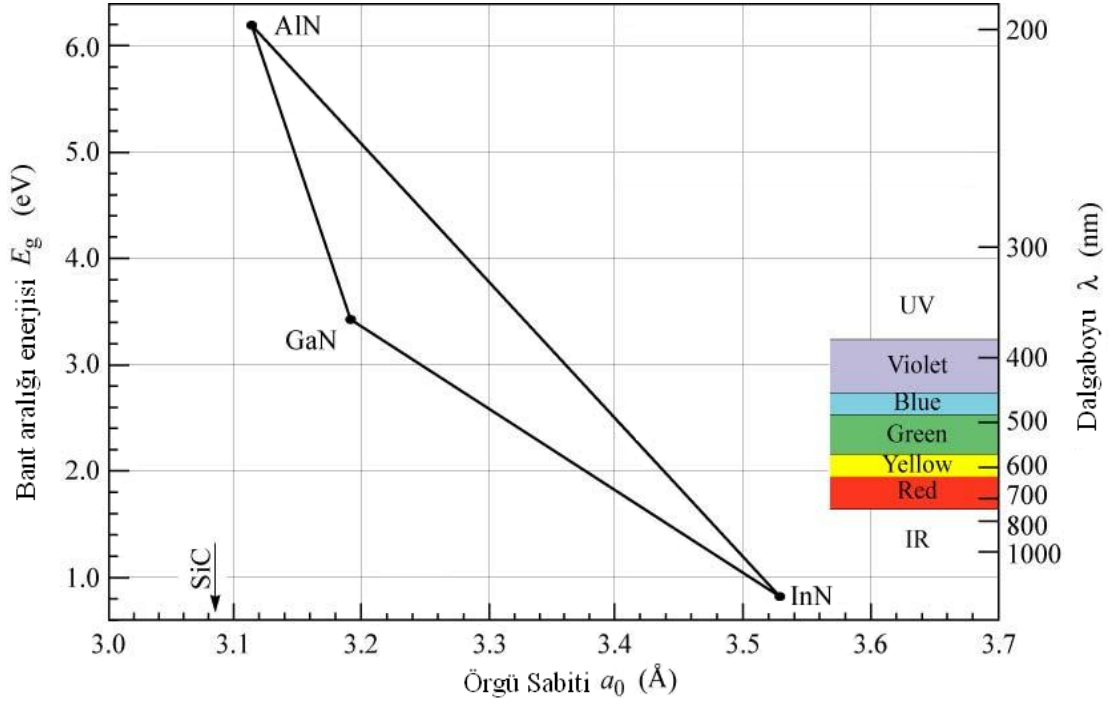
Şekil 2.1. (a)Wurtzite, (b) Zinc-blende, (c) Rock-salt, [6].

GaN ve diğer bir III-V bileşiği olan AlN'ın karşılaştırmalı olarak verilen fiziksel özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.1 de verilmiştir. GaN çok sert, mekanik dayanımı yüksek ve geniş bir ısı kapasitesine sahiptir. Saf halde iken kolay kırılğan değildir. Safir ve SiC gibi alttaşlar üzerine ince film olarak depozit edilebilir. Silisyum ile katkılanarak N tipi katkılı GaN elde etmek mümkündür ayrıca Magnezyum ile de katkılanarak P tipi katkılı bir GaN da elde edilebilir. Bununla birlikte GaN'a silisyum veya magnezyum ile katkılama yapmak farklı GaN elde etme yöntemleri gerektirebilir. Katkılama örgü yapısında kusurlara neden olabileceğinden oluşabilecek gerilme zorlanımları GaN'ı kırılğan hale getirebilir.

Çizelge 2.1 GaN ve AlN için bazı fiziksel özellikler [28], *[26].

Fiziksel Özellik	GaN	AlN
Kristal Yapısı	Wurtzite	Wurtzite
Enerji bant aralığı	3.39 eV	6.2 eV
Örgü sabiti $a_0(c_0)$ (300K)	$3.189 (5.185) 10^{-10}$ m	$3.112(4.982) 10^{-10}$ m
Erime noktası	2791 K	3487 K
Dekompozisyon sıcaklığı	800 °C (Ar + 5% H ₂ , 1000 hPa)	1250 °C Vakumda
Isıl genleşme katsayısı (α_a)	$5.59 10^{-6} K^{-1}$	$4.15 10^{-6} K^{-1}$
Isıl iletkenlik (300K)*	$4.1 (1.3) Wcm^{-1} K^{-1}$	$5.9 (3.19) Wcm^{-1} K^{-1}$
Statik dielektrik sabiti	8.9	8.5

GaN'ın örgü sabiti ve ısı iletkenliği gibi özellikleri safır (Al_2O_3), SiC ve silisyum gibi farklı alttaşlar kullanılarak ince film halinde büyütülmesine olanak verir. Şekil 2.2.'de bazı nitrat bileşiklerin örgü sabiti ile bant aralığı enerjisinin değişimi gösterilmektedir. GaN'ın yukarıda belirtilen alttaşlar ile örgü uyumu %100 değildir. Kristal örgü parametrelerindeki farklılıklar ince film olarak elde edilmek istenen $Al_xGa_{1-x}N$ ile alttaş arasına çeşitli tampon tabakalar kullanımını gerektirir. Bu tampon tabakalar ise genel olarak Şekil 2.2.'de görülen AlN ve GaN arasındaki $Al_xGa_{1-x}N$ tabakalarından seçilir. Çünkü bu bölgede AlGaN tabakaları ile GaN arasındaki gerilme zorlaması daha azdır. InN yönüne gittikçe örgü sabitindeki yüksek farklılık ısı ve elektrik özelliklerdeki farklılıkları da beraberinde getirir.



Şekil 2.2. Yasak bant aralığı enerjisinin örgü sabiti ile değişimi [29].

2.2 Bant Aralığı Enerjisi

III grubu nitrat yarı iletkenlerin elektronik bant yapılarının oluşumunu incelerken kimyasal bağ yapılarının anlaşılması gereklidir. III. grup nitratlarda bağ yapısı iyonik ve kovalent karışımı bir bağ yapısıdır. Karışık iyonik-kovalent bağlar iki sınır durumun süperpozisyonu şeklinde düşünülebilir. İyoniklik durumunda III grubundan azot (N)'a elektron transferi III^+N^- şeklinde bir iyonik yapı verir (Ga^+N^- gibi). Kovalent durumda ise dış kabukta N den III grubuna elektron transferi III grubu atomunu ve azotu $4 e^-$ ile bırakır. s- ve p- dalga fonksiyonlarının karışması ile sp^3 -hibrit orbitallerinin oluşmasına yol açar. Bant aralığı sıcaklığa güçlü biçimde bağlıdır. Sıcaklık arttıkça örgü parametreleri bozulmaya uğrar ve düzlem içi örgü parametreleri ısıl genleşmeden dolayı artar. Sonuç olarak bant aralığı sp^3 alt bant ayrışması nedeniyle daha küçük olacaktır. Üçlü bileşik bant yapısı durumunda $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bant aralığı; GaN ve AlN bant aralıklarının konsantrasyona bağlı değişimi karakterize eden ve bowing parametresi gibi lineer olmayan bir terimde içerecek şekilde verilir [1].

yanında AlGaIn malzemesinin InGaIn temelli geleneksel LED yapılarına göre kristal kusurlarına daha duyarlı olması da yayılım verimini düşüren diğer bir etkidir. Bu piezoelektrik polarizasyon;

$$P^{pz} = 2 \left(\frac{a - a_0}{a_0} \right) + \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilirse toplam polarizasyon piezoelektrik ve spontane polarizasyonun toplamı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P_{total} = 2 \left(\frac{a - a_0}{a_0} \right) + \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) + P^{sp} \quad (2.3)$$

P_{total} : Kuyudaki toplam polarizasyon

P^{pz} : Piezoelektrik polarizasyon

P^{sp} : Kendiliğinden polarizasyon

e_{31} , e_{33} : Elastik sabitler

C_{31} , C_{33} : Tabakanın piezoelektrik sabitleri

a , a_0 : tabaka ve alttaşın örgü sabitleri

(001) yönelimindeki elektrik alan;

$$F = - \frac{P_{total}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir.

Bariyer ve kuyu tabakalarındaki içsel elektrik alanlar;

$$F_w = \frac{l_b \left((P_b^{sp} + P_b^{pz}) - (P_w^{sp} + P_w^{pz}) \right)}{\epsilon_0 (l_w \epsilon_b + l_b \epsilon_w)} \quad (2.5)$$

$$F_b = \frac{l_w((P_w^{sp} + P_w^{pz}) - (P_b^{sp} + P_b^{pz}))}{\epsilon_0 (l_b \epsilon_w + l_w \epsilon_b)} \quad (2.6)$$

eşitlikleri ile tanımlanır. Burada ;

l : tabaka kalınlığı

w, b : kuyu ve bariyer

ϵ, ϵ_0 : tabaka ve boş uzayın dielektrik sabiti

olarak kullanılmıştır.

Aktif bölgede AlGaIn ince film kullanılan UV-LED yapılarında InGaIn malzemeli aktif bölgeye sahip LED'lere göre dışsal kuantum verimi (EQE) daha düşüktür. Bu farklılığın temelinde AlGaIn malzemesinin optik ve elektriksel kalitesinin düşük olması yatar. III-grubu nitrat malzemeleri wurtzite tipi kristal yapısına sahiptir ve bu yapı c-ekseni boyunca ve bu eksene dik yönde anizotropiktir. Bu anizotropi kendiliğinden elektrik polarizasyon, valans bandının ayrışması ve polarize spontane yayılım gibi birçok olgunun meydana gelmesine yol açar [1,26].

2.4 p-n Birleşimi

Işık yayan diyotların basit yapısı bir p-n birleşimidir. P-N birleşiminde P-tipi katkılı bölgedeki Fermi enerjisi N-tipi katkılı bölgedekinden çok daha düşük düzeydedir. Her iki bölgenin Fermi enerjisi N-tipi bölgeyi düşürüp, P-tipi bölgeyi yükselterek aynı enerji seviyesini almaya çalışırlar. N tipi kristalin birleşme yüzeyine yakın kısmındaki serbest elektronlar, p tipi kristaldeki pozitif (+) elektrik yüklerinin, yani pozitif elektrik yüklü atomların, çekme kuvveti etkisiyle birleşme yüzeyini geçerek, bu yüzeye yakın atomlardaki elektron boşluklarını doldururlar ve kovalent bağ kurarak P kristali içerisinde nötr (etkimesiz) bir bölge oluştururlar. N tipi kristalin belirli bir bölümündeki elektronların tamamı P tipi kristale geçtiğinden, N tarafında da nötr bir bölge oluşur. P kristali nötr bölgesinin gerisinde kalan pozitif elektrik yüklü atomların çekme kuvveti, N tipi kristalin nötr bölgesinin öbür tarafında kalmış

olan elektronları çekmeye yetmeyeceğinden belirli bir geçişten sonra elektron akışı duracaktır. Bu olay birleşim arayüzünde belirli bir kalınlıkta nötr bir bölgenin oluşmasına yol açar. Bu bölge tüketim bölgesidir. Karşıt yüklü iyonize dopantlar içsel bir elektrik alan oluştururlar. Bu nötr bölge boyunca difüzyon voltajı ;

$$V_D = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.7)$$

şeklinde verilir.

T : Sıcaklık

k : Boltzman sabiti

n_i : İletim bandı taşıyıcı yoğunluğudur

Rekombinasyon öncesi elektronların p-tipi katkılı bölge içinde aldıkları ortalama yol (difüzyon derinliği) ;

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (2.8)$$

olarak verilir.

Benzer şekilde pozitif deşik taşıyıcılar için aşağıdaki şekildedir.

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.9)$$

Elektron ve deşikler için difüzyon sabitleri D_n ve D_p ;

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n \quad (2.10)$$

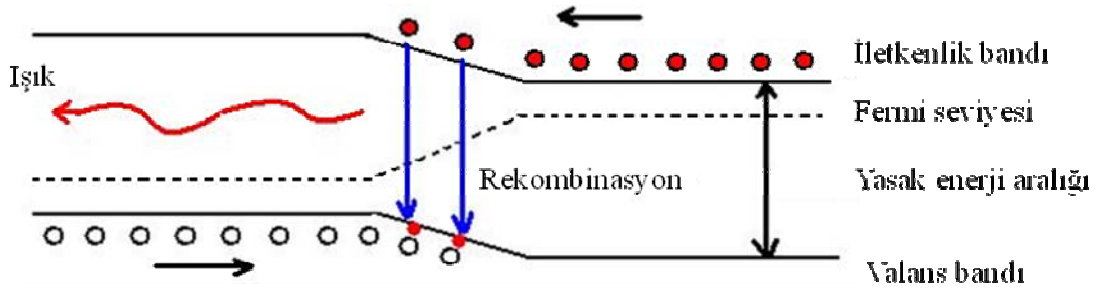
$$D_p = \frac{kT}{e} \mu_p \quad (2.11)$$

ifadeleri ile verilir. Burada ;

τ_n, τ_p : elektron ve deşik azınlık taşıyıcıları ömrüdür.

μ_n, μ_p : elektron ve deşik taşıyıcıları mobiliteleridir.

Diyotun doğru beslemesi durumunda p-tipi bölgedeki deşikler ve n-tipi bölgedeki elektronlar birleşim yüzeyine doğru itilir ve bu durum nötr tüketim bölgesinin daralmasına bir başka deyişle potansiyel bariyerin düşmesine neden olur. Daralmış nötr bölge elektron ve deşik taşıyıcıların eklemi kolayca geçip diğer bölgenin nötr bölgeye yakın kısımlarına gitmesine yol açar ve böylece elektriksel direnç düşer ve diyottan akım geçer. Elektron ve deşik taşıyıcılar eklem bölgesi civarında rekombine olarak ışık yaymaya başlarlar [1]. Rekombinasyon olayı Şekil 2.4. ile şematize edilmiştir. İçi dolu daireler elektronları, içi boş daireler ise deşikleri sembolize etmektedir. Yayınlanan ışığın dalga boyu bant aralığı enerjisine bağlıdır.



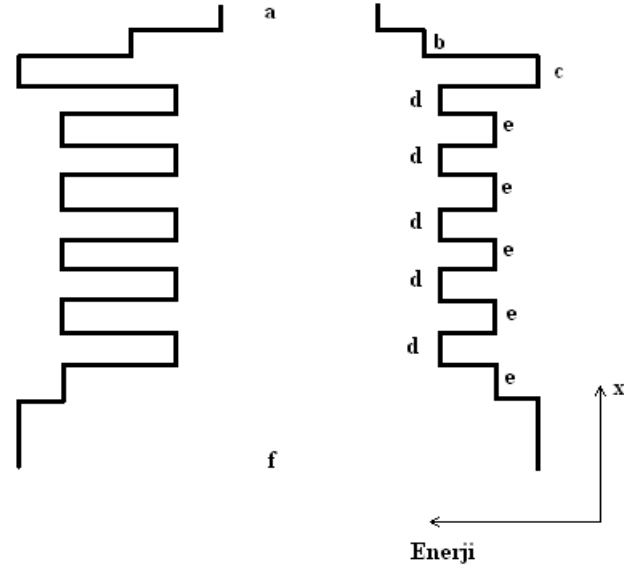
Şekil 2.4. p-n eklem bölgesinde rekombinasyon olayı ve ışık yayılımı.

2.5 Kuantum Kuyu Yapısı

III. grup nitrat yarı iletken kuantum kuyu yapılarındaki kendiliğinden ve piezoelektrik alanlar Arsenik temelli olanlara göre oldukça yüksektir. Daha kısa dalga boylu ışınım elde etmek için AlGa_N daki Alüminyum molar oranı artırıldıkça bu alanlar daha da fazla artar. Artan bu alanlar radyatif rekombinasyon verimini düşürerek “Quantum Confined Stark Effect”[9] olarak adlandırılan bir sınırlayıcı etki meydana getirir. Bu etki iletim bandı ve valans bandını bükerek elektron-deşik çiftlerinin fiziksel olarak ayrılmasına yol açar. Bu sebeple kuantum kuyularında tekrar rekombinasyon meydana gelme olasılığı ve buna bağlı olarak yayılım verimi de azalır. Bu etki nedeniyle UV-A bölgede $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ temelli yüksek verimli UV-LED tasarımı yapmak zorlaşmaktadır. Elektronların p-tipi bölgeye difüzyonunun önüne geçmek ve kuantum kuyu bölgesinde daha fazla elektron hapsedebilmek için genel olarak kuyu ve bariyer AlGa_N tabakalarından daha yüksek

Al konsantrasyonuna sahip p-AlGaN elektron bloklama tabakası kullanılır. Ayrıca literatürde kuantum kuyu bölgesi ile p-tipi katkılı tabakalar arasında çok ince ($\sim 1\text{nm}$) AlN aratabaka kullanılarak parazitik alt-bant yayınımlarının engellenebileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur.[8] Diğer önemli zorluk ilerleyen bölümlerde bahsedilecek olan yüksek Al konsantrasyonlu p-tipi katkılı tabakaların katkılaması ve deşik verici katkı atomlarının aktivasyonudur. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ tipi MQW yapılarında fotoluminesans özelliklerin kuyu genişliği ve bariyer yüksekliğine bağımlılığı da diğer önemli parametrelerdir. Kajitani ve ark. [18] $1,5\text{nm Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N} / 7\text{ nm Al}_{0,40}\text{Ga}_{0,60}\text{N}$ (kuyu/bariyer) MQW yapısında 2 nm, 3nm, 4 nm kuyu genişlikleri ve %20, %30 bariyer Al konsantrasyonlarına göre çok daha yüksek şiddetli bir fotoluminesans gözlemişlerdir.

Bu çalışmada Şekil 2.5. de gösterildiği gibi bir bant yapısına sahip LED büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil.2.5. (a) ile gösterilen tabaka p-tipi katkılı GaN kontak tabakasıdır. Şekil 2.5. (b) p-tipi katkılı AlGaN zarflama tabakasıdır. Şekil 2.5. (c) ise yine p-tipi katkılı ancak Al konsantrasyonu p-AlGaN zarflama tabakasından daha yüksek olan elektron bloklama tabakasıdır (EBT). Şekil 2.5. (d) ve Şekil 2.5. (e) ise sırasıyla kuyu ve bariyer AlGaN tabakalarıdır. Şekil 2.5. (f) ile gösterilen tabaka ise n-tipi katkılı kontak tabakasıdır ve Aluminyum konsantrasyonu EBT ile aynı tutulmuştur.



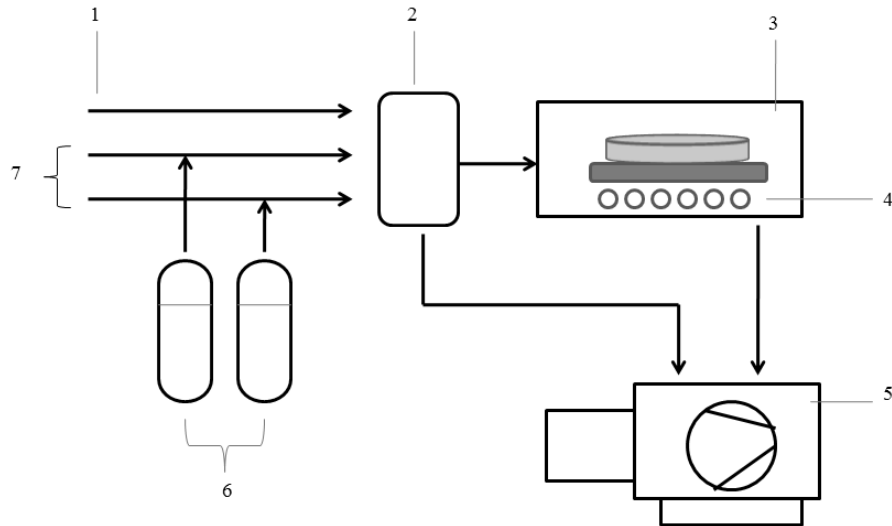
Şekil 2.5. Tasarlanan UV-LED yapısına ait aktif bölge bant yapısı
a. p-GaN b. p-AlGaN c. p-AlGaN EBT,
d. Kuyu AlGaN e. Bariyer AlGaN f. n+AlGaN

Bu çalışmada Safir (0001) üzerine elde edilen UV-LED epitaksiyel yapısı genellikle DS/YS (Düşük Sıcaklık/Yüksek Sıcaklık) AlN tampon ile AlN /Al_{0.75}Ga_{0.25}N süper örgü tampon yapısı üzerine büyütülen AlGaN:Si kontak tabakası ve Al_{0.11}Ga_{0.89}N /Al_{0.29}Ga_{0.71}N çoklu kuantum kuyu yapısından oluşan aktif bölge ve Mg katkılı GaN, Al_{0.18}Ga_{0.82}N ve Al_{0.33}Ga_{0.67}N p kontak tabakaları ve bunların çeşitli kombinasyonlarının olduğu epitaksiyel UV-LED yapısı çalışılmış ve elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmiştir

3. MOBFE YÖNTEMİ

Metal Organik Buhar Fazı Epitaksisi (MOVPE, OMVPE) yöntemi yarı iletken bileşiklerin metal-organik bileşiklerin ve hidratların değişik kombinasyonlarının pirolizi ile farklı alttaşlar üzerine ince film büyütme yöntemi yöntemidir. Safır (Al_2O_3), Silisyum, SiC, LiAlO_3 gibi alttaşlar yaygın olarak kullanılan alttaşlardır.

MOVPE yöntemi ve bu yöntem ile ince film büyütülmesine olanak sağlayan MOCVD (Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme) sistemleri dünyada GaN temelli nitrat ince film büyütme için kullanılan en yaygın yöntemdir. Elektronik ve optik aygıt pazarında görülen GaN temelli aygıtların çok büyük bir oranı bu yöntem ile büyütülmüş epitaksiyel filmlerden elde edilmiştir. Cep telefonları, optik iletişim ekipmanları, CD çalarlar, DVD çalarlar (mavi lazer), LED aydınlatmalı billboardlar (kuantum kuyulu ışık kaynakları) ve uydu güneş hücrelerinde MOVPE ile elde edilmiş GaN temelli filmler kullanılır. Ayrıca daha hassas teknolojiler olan güneş körü dedektörler, nanotransistörler, nanofotonik kristaller, nanoplazmonik sensörler, modülatörler ve farklı tiplerde sensörler GaN tabanlı malzemelerinden elde edilebilir. Şekil 3.1.'de MOCVD sisteminin temel bileşenleri görülmektedir.



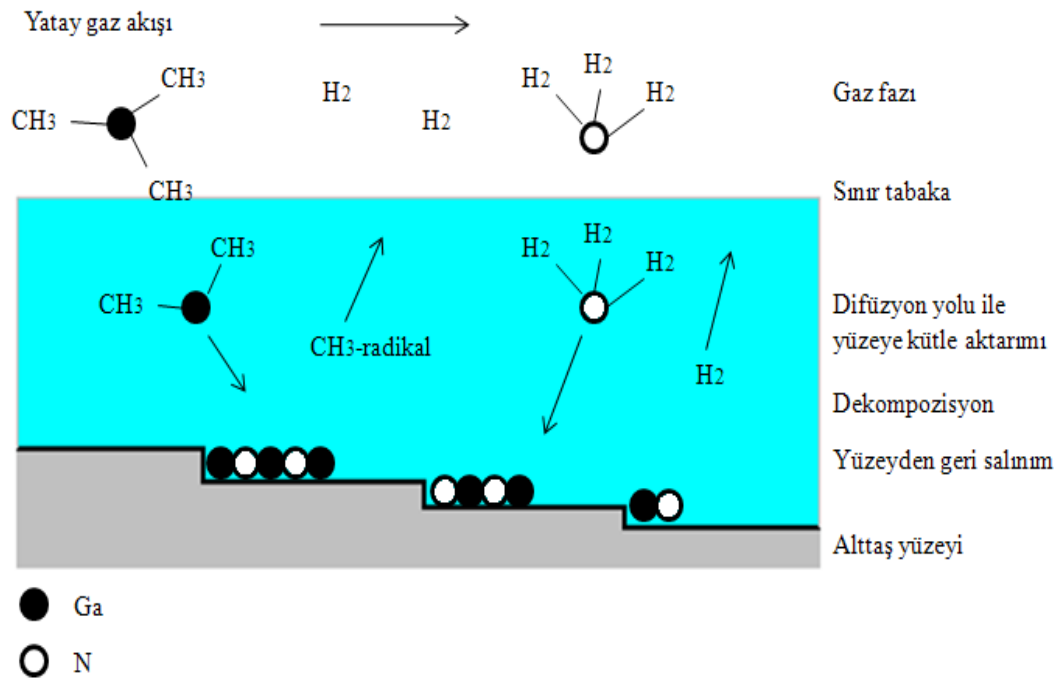
Şekil 3.1. MOCVD sistemi temel bileşenleri.

- 1.Hidrat hattı 2. Gaz karıştırma ve kontrol ünitesi 3. Reaksiyon odası,
4. RF ısıtıcı 5. Vakum pompası 6. Metal-Organik kaynaklar
- 7.Hidrojen ve azot hatları

MOCVD sistemlerinde yatay ve dikey reaktör tipleri bulunmaktadır. Yatay reaktör tiplerinde metal-organik kaynaklar, CVD de olduğu gibi ortama H_2 veya N_2 ile taşınarak alttaşın üzerinden geçmektedir. Burada alttaş ve alttaşın üzerinde konumlandığı grafit disk, homojen bir sıcaklık dağılımı ve homojen kalınlık sağlamak için döndürülmektedir. MOCVD sistemlerinde, $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığına kadar 20-900 mbar aralığındaki basınç değerlerinde büyütme yapılabilir. GaN ince filmleri bu yöntemde tipik olarak $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında ve 25-300 mbar basınç aralığında büyütülebilmektedir.

MOCVD yönteminde GaN büyütme prosesi adımları;

- 1- Alttaş ve reaktör film büyütme öncesinde hidrojen gazı ortamında 1100°C nin üzerine ısıtılarak temizlenir.
- 2- Belirlenen sıcaklık, basınç ve kaynak akış oranlarında TMGa ve NH_3 taşıyıcı gazlar vasıtası ile getirilerek ortama verilir.
- 3- Kaynaklar alttaşa ulaşmadan hemen önce karışırlar ve depozisyon alanına gelirler
- 4- Depozisyon alanında Metal-Organik (MO) kaynak yüksek sıcaklık nedeniyle bozunur. Diğer gaz fazı reaksiyonları sonucunda oluşan ilk GaN molekülleri alttaş üzerine yapışmaya başlarlar.
- 5- Bu ilk moleküller alttaş yüzey atomları ve örgüsü ile bağlar oluştururlar
- 6- Devam eden reaksiyon sürecinde oluşan GaN molekülleri alttaş yüzeyi ile bağ yapan bu ilk moleküllere tutunmaya başlarlar ve devamında küçük GaN adacıkları oluşur.
- 7- Bu adacıklar 2 boyutta büyümeye devam ederek ilk tek örgü tabakalarını oluştururlar
- 8- Oluşan ilk örgülerden sonra 3 boyutta büyüme modu ortama verilen kaynak molekölü miktarı ve sıcaklık arttırılarak sürdürülür.
- 9- MOVPE sistemlerinde büyütme anında yapılan reflektans ölçümleri ile elde edilen Fabry-Perot osilasyonları yardımıyla kalınlık kontrol edilebilir.



Şekil 3.2. MOCVD yönteminde GaN ince filmlerin tabaka yapısının oluşumu

MOVPE yönteminde önemli bazı parametreler;

- Mataryel kompozisyonu
- Arayüzey geçişleri
- Background safsızlıkları
- Katkı malzemesi konsantrasyonları ve profilleri
- Tabaka boyutları
- Yüzey morfolojisi ve kristal kalitesi
- Geniş alanlarda tekdüzelik
- Tekrarlanabilirlik
- Kalınlık kontrolü $< \%10$
- Kompozisyon kontrolü $< \% 1$
- Büyütme oranı genelde III grubu elemanlarının molar akış hızı ile orantılıdır.

Çizelge 3.1. MOCVD kaynakları avantaj ve dezavantajları

Reaktant	Sembol	Avantajları	Dezavantajları
TMGa (Tri-metil Galyum)	$(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$	Sıvı, yüksek buhar basıncı	--
TEGa (Tri-etil Galyum)	$(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{Ga}$	Sıvı, düşük karbon kirliliği, LP-MOCVD de kullanım	Düşük buhar basıncı, TMGa dan daha kararsız, güçlü parazitik reaksiyonlar
TMIn (Tri-metil İndiyum)	$(\text{CH}_3)_3\text{In}$	Bubbler içinde katı halde, Sıvı çözelti olarak ta kullanılabilir	Düşük buhar basıncı
TMAI (Tri-metil Alüminyum)	$(\text{CH}_3)_3\text{Al}$	Sıvı, yüksek buhar basıncı, uzun süreli kararlılık	Oksijen kirlenmesine karşı hassas
Amonyak	NH_3	Çok yüksek kararlılık, ucuz	Yüksek piroliz sıcaklığı
Silane (n-dopant)	SiH_4	Elektronik aygıtlar için n tipi katkılama	Gaz halde, yanıcı, yüksek piroliz sıcaklığı
Bis(cyclopentadienyl) magnesium (p-dopant)	Cp_2Mg	Katı halde	--

MOVPE sistemleri ile birkaç farklı alttaş üzerine GaN büyütülebilir. Bu alttaşlar; Safir (Al_2O_3), Silisyum, SiC, LiAlO_2 . Bunlar arasında GaN ile kristal örgü uyumluluğu en fazla olan alttaş SiC'dür ancak epitaksiyel büyütme için uygun şekilde elde edilme zorlukları nedeniyle çok pahalıdır ve sadece bazı özel uygulamalar için kullanılır. Silisyum ise oldukça ucuzdur ama GaN ile arasındaki yüksek örgü uyumsuzluğu ve yüksek ısı iletkenlik farkları bu alttaşın kullanımını zorlaştırmaktadır. Elektronik uygulamalarda en çok kullanılan alttaş safirdir ve (0001) yönelimli safir alttaşlar kullanılır. Bu yönelimdeki safir ile GaN arasındaki uyumsuzluk %13.8'dir. Safirin yüksek örgü kararlılığı GaN, AlN ve AlGaIn'ın yüksek sıcaklıklarda bu alttaş üzerine büyütülmesine olanak verir. MOCVD ile büyütülmüş iyi GaN kristallerinde kusur yoğunluğu 10^8 cm^{-2} mertebesinde.

4. EPİTAKSİYEL MALZEME BÜYÜTME

4.1 Temizlik ve Ön Hazırlıklar

MOCVD sistemi reaksiyon odasında herbir büyüme öncesinde uygulanan bazı standart temizlik işlemleri vardır.

4.1.1 Reaktör hazırlama

Reaktör içi parçaların temizlenmesi adımı MOCVD reaktöründe bulunan ve laminar bir gaz akışı sağlayan kapalı kuvars parçalar önceki büyütmelerden kalan depozisyonun ortadan kaldırılması için % 2 'lik HF (Hidroflorik asit) çözeltisine bırakılmaktadır (minimum 4 saat). Üzerindeki parazitik kaplamalar çözüldükten sonra DI (de-iyonize) su ile yıkanıp durulandıktan sonra 105°C de bekletilen kurutma fırınına koyulup en az 2-4 saat boyunca üzerindeki nem'in kaybolması için bekletilmektedir.

Kuruyan parçalar önce eldivenli kutuya oradan da reaktör içine alınıp yerlerine yerleştirilir. Eldivenli kutu sürekli olarak azot atmosferinde tutulmaktadır ve oksijen oranı < 10 ppm, H₂O (nem) oranı < 200 ppm olacak şekilde filtrelenmiş temiz azot vardır. Kuvars parçalar yerleştirildikten sonra reaktörün sökülemeyen iç parçalarının ve varsa kuvarslar üzerindeki organik veya inorganik kirliliklerin yüzeylerden uzaklaştırılması amacı ile MOCVD reaktörü 1100°C ye ısıtılıp 10 lt/dk 'lık Hidrojen gazı ve 300 sccm/dk 'lık NH₃ akışı altında 1 saat bekletilmektedir. Daha sonra soğumaya bırakılmaktadır.

4.1.2 Altaş hazırlama

Bu çalışmada AlGaIn UV-LED yapılarının elde edilmesinde ve ara tabakaların optimizasyonu sırasında 2" (50,8 mm) çapında her iki yüzüde epitaksiyel büyüme için parlatılmış c-düzlem (0001) safir (Al₂O₃) altaş kullanılmıştır. Safir altaş

reaktöre yüklenip büyütme öncesinde ısı temizlik işlemine tabi tutulmaktadır. Reaktör sıcaklığı yine 1100°C ye çıkarılıp burada 14 lt /dk 'lık H₂ akışı altında 10 dk bekletilmektedir. Daha sonra yapılan incelemelerle bu hazırlık aşamasının ince film kristal kalitesine etkisi de tartışılmıştır.

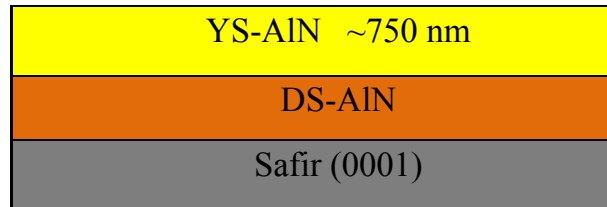
4.2 AlN ve AlN/AlGaN Tampon Optimizasyonu ve Karakterizasyonu

Belirtildiği üzere UV-LED büyütmelerinde safir (0001) alttaş kullanılmıştır. UV bölgesi için geçirgen olması gereken önemli bir avantajdır. Bu çalışmada kullanılan safir alttaşlar daha önce belirtildiği gibi c-düzlemli (0001) yönelimlidir. 50,8 mm çap ve 330 µm kalınlığa sahiptir. Her iki yüzü de parlatılmıştır ve büyütme yapılan yüzeyin RMS pürüzlülüğü 0,2 nm den küçüktür. Avantajların yanında üzerine büyütülecek olan III-grubu nitratlar ile örgü uyumsuzluğu en önemli dezavantajdır. Örgü uyumsuzluğunun temelinde AlN ve safirin birim hücre sabitleri arasındaki fark yatar. AlN için “a” ve “c” sabitleri sırasıyla 3,112.10⁻¹⁰m ve 4,982.10⁻¹⁰m iken bu değerler safir için 4,759.10⁻¹⁰m ve 12,991.10⁻¹⁰m dir. Örgü uyumsuzluğu % -13,3 tür. AlN molekülleri safir yüzeyinde en kararlı ve en düşük enerjili yere yerleşip büyümeyi tercih ettiği için AlN ile safir arasında düzlem içi yönelimlerde 30°'lik bir fark oluşur.[5]

Örgü uyumsuzluğu safir ve ilk tampon tabaka olan AlN arayüzeyinde kristal kusurlarının üretilmesine yol açmaktadır. Bu arayüzeyde oluşan kristal kusurları (lif, çizgi tipinde kusurlar) epitaksiyel ince filmin üst tabakalarına kadar devam edebilmektedir. Örgüdeki gerilim bu kusurlar üzerinden boşalmaktadır. AlN tabakasındaki kusurlar radyatif olmayan rekombinasyon merkezleri olarak davranarak dışsal kuantum verimini önemli ölçüde düşürebilmektedir. Geleneksel AlN tampon teknolojisi ile birlikte gözenekli AlN tampon teknolojisi ile UV-LED yapısının optik ve elektriksel özelliklerinin iyileştirilebileceği gösterilmiştir [12].

AlGaN temelli UV-LED yapısında kullanılan çeşitli tampon ve aktif tabakaların optimizasyonu; kristal ve yüzey kalitesi, optik geçirgenlik dalga boyu, n ve p tipi katkılama seviyelerinin belirlenmesi amaçları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Büyütülen tüm LED yapılarında ortak olarak yüksek sıcaklık AlN (YS-AlN) ve AlN / AlGaIn süper örgü (SÖ) tampon tabakaları kullanılmıştır. AlN tampon için bir dizi büyütme gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma esnasında X-ışını difraksiyonu ile AlN'a ait simetrik (002) ve asimetrik (102) düzlemleri incelenmiştir. Bu düzlemler için yapılan “rocking eğrisi” ölçümleri ile elde edilen sinyal genişlikleri karşılaştırılmış ve uygulanan büyütme parametrelerinin etkileri gözlenmiştir. Ayrıca Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile AlN epitaksiyel ince filmin yüzey morfolojisi incelenmiştir. YS-AlN ince filminin kalitesi, büyüme başlangıç koşullarına oldukça bağlıdır. Bu nedenle YS-AlN öncesinde uygulanan düşük sıcaklık AlN (DS-AlN) çekirdeklenme tabakasına ait parametreler ile alttaşa uygulanan temizlik adımlarına ait parametreler değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Çekirdek tabaka koşulları ve başlangıç koşullarının yanında AlN kalitesini etkileyen bir çok parametre vardır. Kristal kalitesinin DS-AlN ve YS-AlN'a ait V/III oranı, sıcaklık, basınç gibi parametereler ile ilişkisini inceleyen çalışmalar literatürde mevcuttur [4,5]. Bu çalışmalarda ayrıca çekirdeklenme tabakasına ait NH_3 ve TMAI akışını etkisi incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü 0,18 nm dolayına ve (002) düzlemi için FWHM değeri 11,5 arcsec'a kadar düştüğü rapor edilmiştir [4]. Ayrıca özel olarak tasarlanmış fotomaskeler ile ELOG (Epitaxial Lateral Overgrowth) veya SAR (Selective Area Regrowth) tarzı özel büyütme yöntemleri ile kristal kalitesi arttılmaya çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında UV-LED optimizasyonu öncesinde AlN kalitesinin daha çok alttaş yüzey özellikleri ve DS-AlN çekirdek tabakasının büyütme süresine bağımlılığı incelenmiştir. Optimizasyon aşamasında büyütülen yapıyı gösterir Şekil 4.1 aşağıdadır.

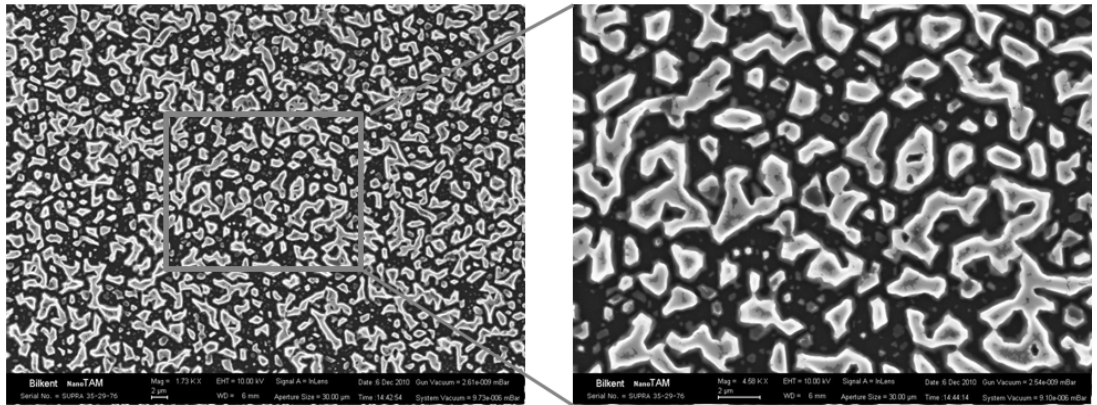


Şekil 4.1. Optimizasyon için büyütülen AlN yapısı şematik gösterimi.

DS-AlN büyütme aşamasında ilk olarak reaktör temizlik koşulları sağlanmış ve büyütmeye hazır hale getirilmiştir. 2" c-düzlem safır alttaş reaktöre yüklendikten sonra desorpsiyon işlemi uygulanmıştır ve sonra sıcaklık 790°C ye ve basınç 50 mbar'a getirilmiştir. Bu koşullarda NH₃ kaynağı 1000 sccm/dk/m'lik akışla açılmış ve nitridasyon işlemi uygulanmıştır. Nitridasyon süresi optimizasyon sırasında farklı sürelerde denenmiştir. Nitridasyondan sonra DS-AlN tabakası 5 sccm/dk/m TMAI ve 1000 sccm/dk/m NH₃ akışı altında örnekten örneğe değişen farklı süreler için büyütülmüştür. Reaktör basıncı ise 50 mbar'da tutulmuştur. Bu sürede toplam H₂ akışı 3,7 lt/dk olmuştur. Düşük sıcaklık AlN çekirdeklenme tabakası bitiminde, reaktör koşulları yüksek sıcaklık (YS) AlN büyütmek üzere değiştirilmiştir.

Reaktör basıncı tüm büyütmelerde 35 mbar'da tutulmuştur. TMAI akışı 40 sccm/dk'e NH₃ akışı 25 sccm/dk' ya çekilmiştir. Toplam H₂ gazı akışı ise 10,9 lt/dk olmuştur. Reaktör sıcaklığı 1100°C ye çıkarılmıştır. Bu koşullarda DS-AlN tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Örneklerde AlN çekirdeklenme tabakası için tavlama süresi 2 dk olarak uygulanmıştır.

B-2339 nolu AlN örneğin çekirdeklenme tabakası 2 dk'lık tavlama adımından önce Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Resim 4.1.'de alınan SEM görüntüsü yer almaktadır. Düşük sıcaklıkta büyüyen AlN adacıkları net şekilde görülebilmektedir.



Resim 4.1. DS-AlN çekirdeklenme tabakası: 2 dk'lık tavlama öncesi

DS-AlN tavlama işleminden sonra belirtilen koşullarda TMAI ve NH₃ kaynakları açılarak tüm örneklerde tabaka kalınlığı 750 nm olacak şekilde YS-AlN büyütülmüştür. Optimizasyonlar sırasında örnekler X-Işını kırınımı ve Atomik Kuvvet Mikroskobu(AFM) ile yüzey taraması ölçümlerine tabi tutulmuştur. Çizelge 4.1. ve Resim 4.2.'de bu ölçümlere ait veriler yer almaktadır.

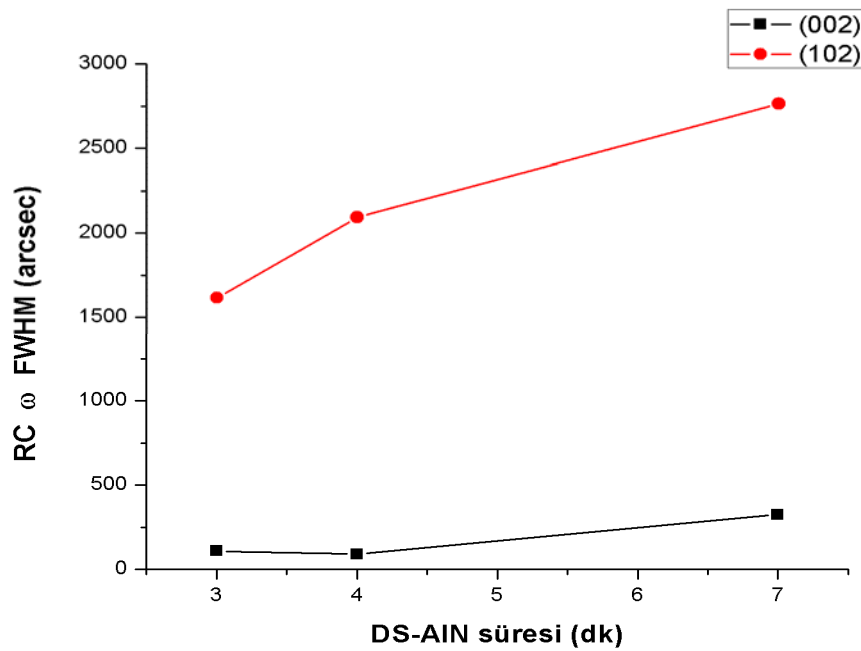
Çizelge 4.1. Optimizasyon için büyütülen AlN tabakalarına ait büyütme koşulları ve X- Işını kırınımı ölçüm sonuçları.

Örnek No	Parametre değişimi	Yüzey pürüzlülüğü (nm) (RMS)	XRD FWHM (arcsec)
B-2330 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:20 s Çekirdek tabaka: 5 dk	0.26	ω (002) : 255 ω (102) : 2635
B-2331 YS -AlN	Desorpsiyon : 5 dk Nitridasyon:20 s Çekirdek tabaka:5 dk	0.28	ω (002) : 453 ω (102) : 9720
B-2332 YS -AlN	Desorpsiyon : 10 dk Nitridasyon:20 s Çekirdek tabaka:5dk	0.17	ω (002) : 155 ω (102) : 3978
B-2333 YS -AlN	Desorpsiyon : 15 dk Nitridasyon:20 s Çekirdek tabaka:5dk	0.36	ω (002) : 1152 ω (102) : 4727
B-2334 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:10 s Çekirdek tabaka:5dk	0.71	ω (002) : 194 ω (102) : 1940
B-2335 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:40 s Çekirdek tabaka:5 dk	10.86	ω (002) : 507 ω (102) : 1598
B-2336 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:6 s Çekirdek tabaka:5dk	0.69	ω (002) : 371 ω (102) : 1785
B-2337 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:8 s Çekirdek tabaka: 4 dk	0.23	ω (002) : 90 ω (102) : 2095

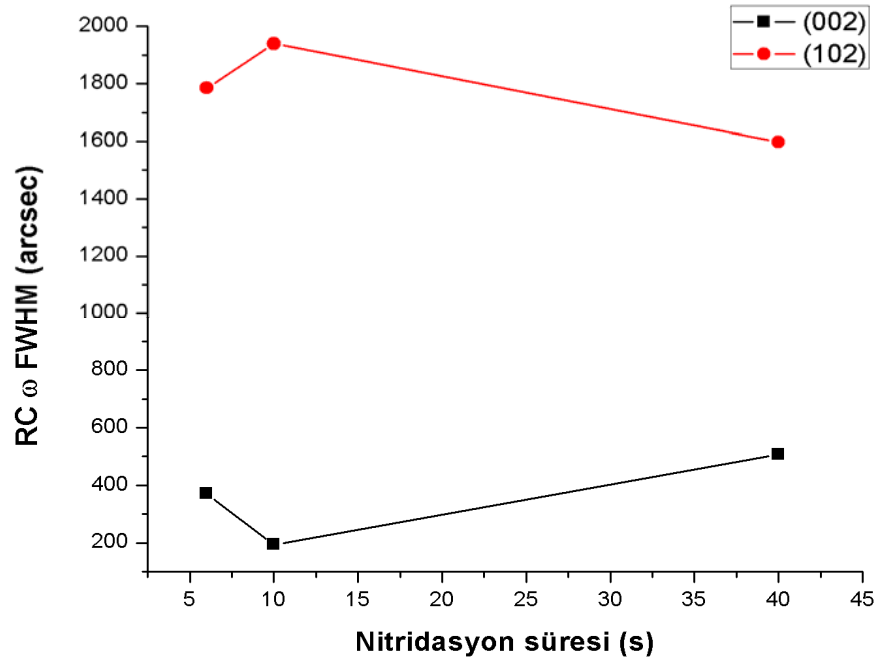
Çizelge 4.1. (Devam) Optimizasyon için büyütülen AlN tabakalarına ait büyütme koşulları ve X-Işını kırınımı ölçüm sonuçları.

B-2338 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:8 s Çekirdek tabaka: 7 dk	0.39	ω (002) : 324 ω (102) : 2765
B-2339 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon:8 s Çekirdek tabaka: 3 dk	0.35	ω (002) : 108 ω (102) : 1616
B-2340 YS-AlN	Desorpsiyon : 0 dk Nitridasyon: 40 s Çekirdek tabaka: 4 dk	0.32	ω (002) : 158 ω (102) : 2228
B-2362 YS-AlN	B-2339 'un tekrarı AlN sıcaklığı 1150 °C	0.61	ω (002) : 79 ω (102) : 1854

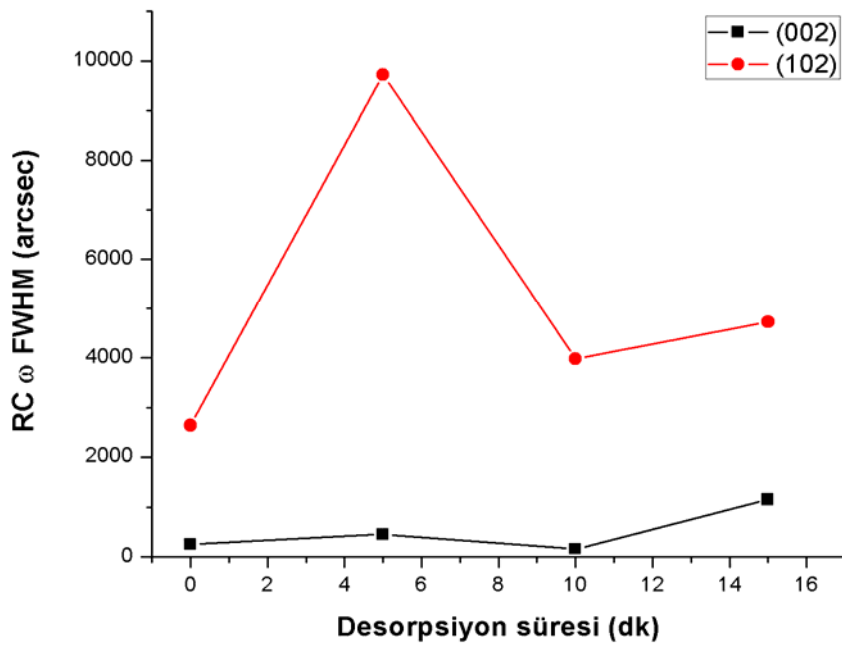
Yukarıdaki Çizelge 4.1.'de yer alan veriler Rigaku-Smartlab Yüksek Çözünürlüklü X-Işını difraktometresinde $\text{CuK}\alpha$ 'e ait $\lambda = 0,154$ nm dalgaboylu demet ile alınmıştır. Simetrik (002) ve asimetrik (102) düzlemlerine ait yarı maksimumdaki tam genişlik (FWHM) değerleri arcsec birimiyle verilmiştir.



Şekil 4.2. (002) ve (102) RC ω FWHM değerlerinin DS-AlN süresi ile değişimi

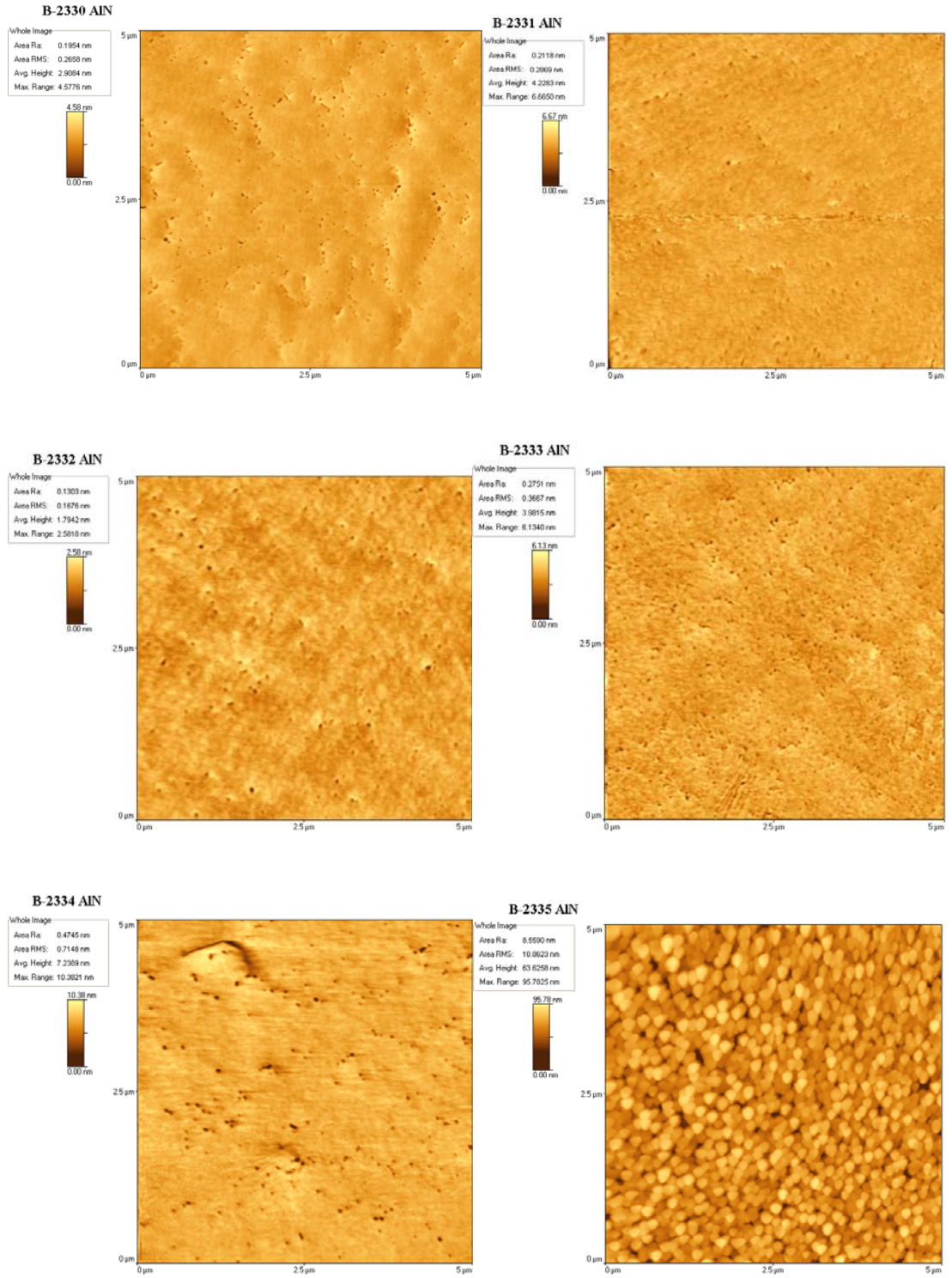


Şekil 4.3. (002) ve (102) RC ω FWHM değerlerinin DS-AlN büyüme süresi ile değişimi

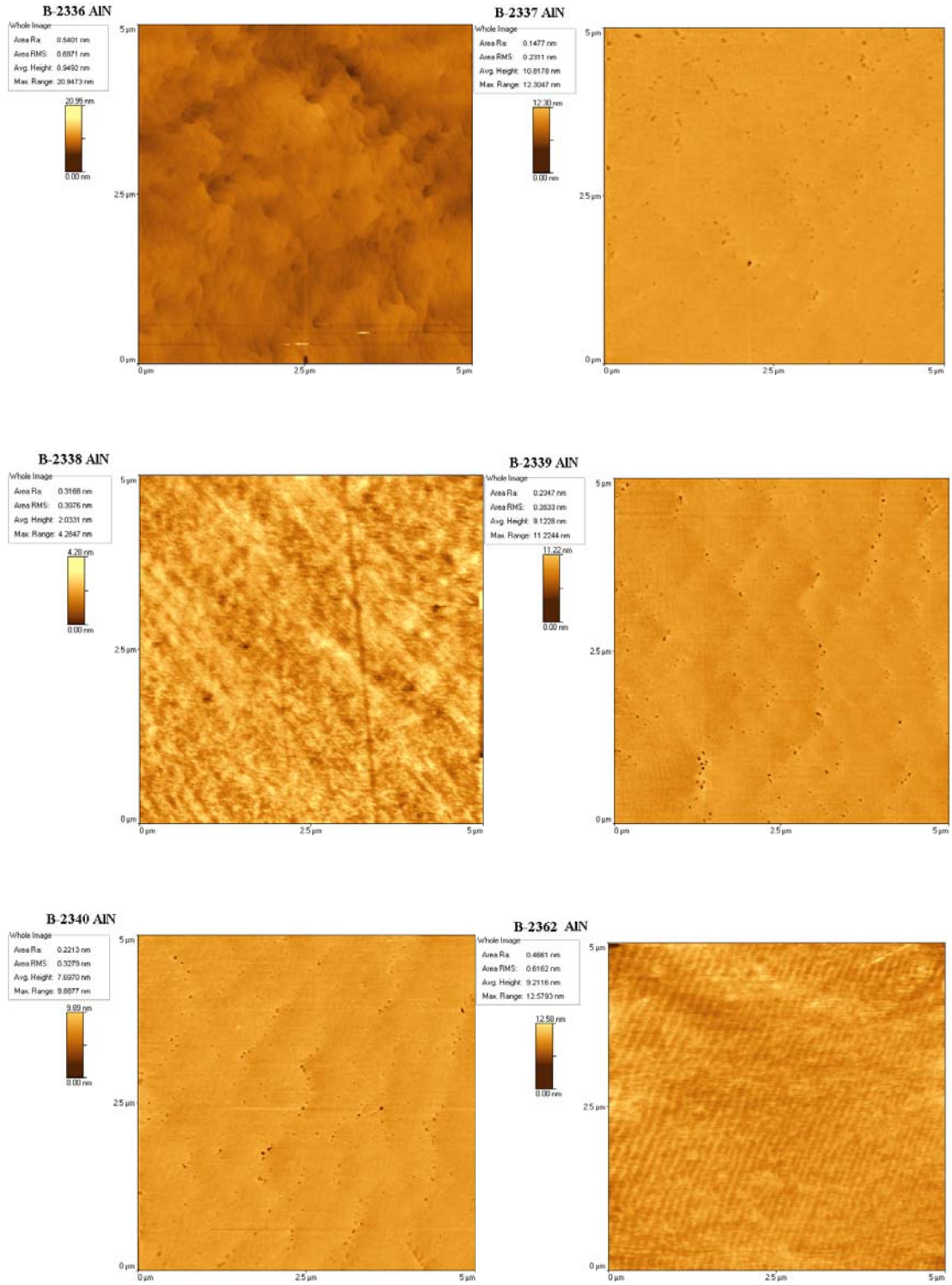


Şekil 4.4. (002) ve (102) RC ω FWHM değerlerinin Desorpsiyon süresi ile değişimi

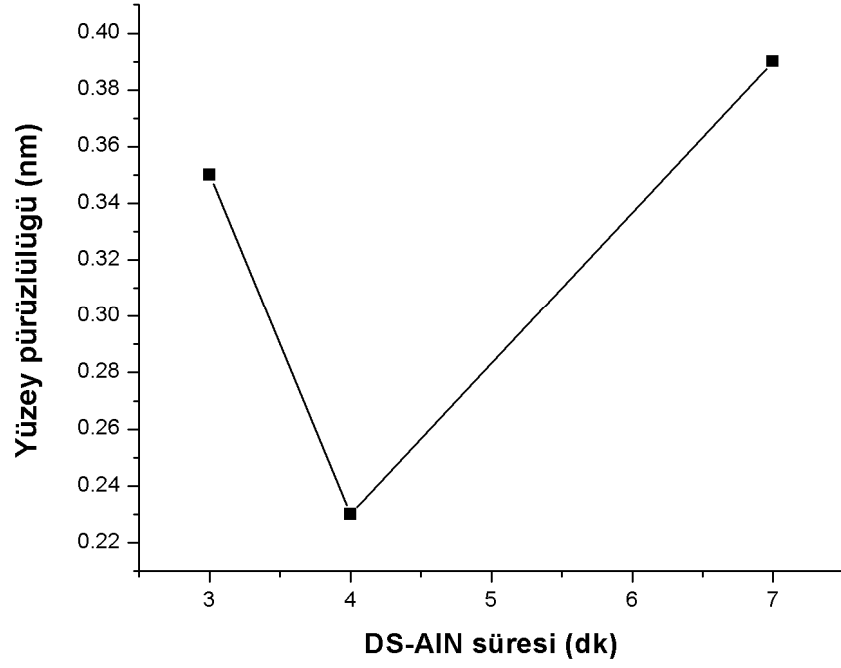
X-ışını kırınımı ile alınan ölçümlerde simetrik (002) ve asimetrik (102) düzlemlerine ait sinyallerin FWHM değerleri, DS-AlN çekirdeklenme tabakası büyütme süresi, nitridasyon süresinin ve desorpsiyon süresinin değişimine göre incelenmiştir. DS-AlN çekirdeklenme tabakası büyütme süresi arttıkça hem (002) hem de (102) düzlemleri için FWHM değerlerinde artış, kristal kalitesinde düşüş gözlenmiştir. Çekirdeklenme süresi 3 dk olduğunda (002) ve (102) için 108 arcsec ve 1616 arcsec olarak gözlenmiştir. 4 dk olduğunda ise bu değerler sırasıyla 90 arcsec ve 2095 arcsec olmuştur. Aynı koşullarda (desorpsiyon 0 dk, nitridasyon 8 s, DS-AlN tavlama süresi 2 dk) çekirdek tabaka büyütme süresi 7 dk olduğunda (002) ve (102) için FWHM değerleri artarak sırasıyla 324 arc sec ve 2765 arcsec olmuştur (Şekil 4.3). Daha uzun süre büyütülen AlN çekirdeklenme tabakasının 3D adacık birleşimini arttırarak burkulma düzlem içi kristal yönelim kaybını (düzlem içi yanlış yönelme) arttırdığı düşünülmektedir. DS-AlN çekirdeklenme tabaka büyütme süresi 3 dk olarak seçildikten sonra nitridasyon süresi ile kristal kalitesinin değişimi incelenmiştir. Aynı koşullarda (desorpsiyon 0 dk, DS-AlN çekirdeklenme süresi 5 dk) nitridasyon süresi 6 s, 10 s ve 40 s olarak değiştirilmiştir. Nitridasyon süresi 10 s iken (002) için en düşük FWHM değeri 198 arcsec olarak elde edilmiştir. Nitridasyon süresi 40 s yapıldığında ise asimetrik (102) düzlem için en küçük FWHM değerine ulaşılmıştır (1598 arcsec). Diğer adımda ise desorpsiyon süresi değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Desorpsiyon süresi 0, 5, 10, 40 dk'lık farklı sürelerde uygulanmıştır. 10 dk desorpsiyon uygulandığında (002) için FWHM 155 arc sec ve 0 dk uygulandığında (102) için FWHM 2635 arc sec olarak en düşük değerlerini vermiştir. Optimizasyon amacıyla yapılan son büyütmede B-2339 nolu örnek temel alınmış ve AlN büyütme sıcaklığı 1150°C ye çıkartılarak diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Bu örnekte 79 arc sec ile en düşük simetrik düzlem FWHM değeri elde edilmiştir. Yüzeyde çukursuz ve atomik adım tipi morfoloji açıkça görülebilmektedir. Resim 4.2.'de yer alan yüzey taramalarına ait görüntüler Veeco CP-II Atomik Kuvvet Mikroskobu ile alınmıştır.



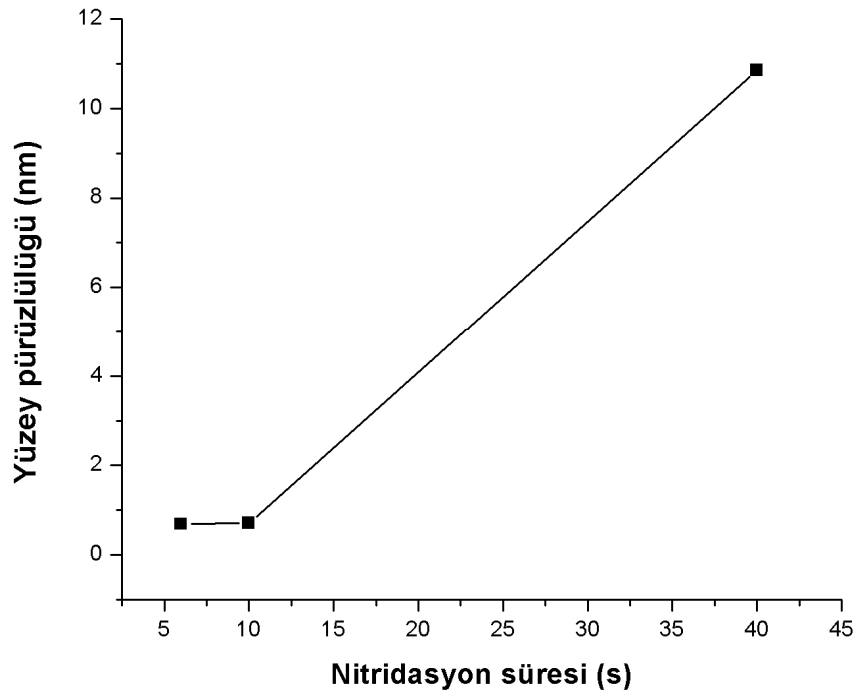
Resim 4.2 AIN tampon optimizasyonu AFM yüzey taramaları



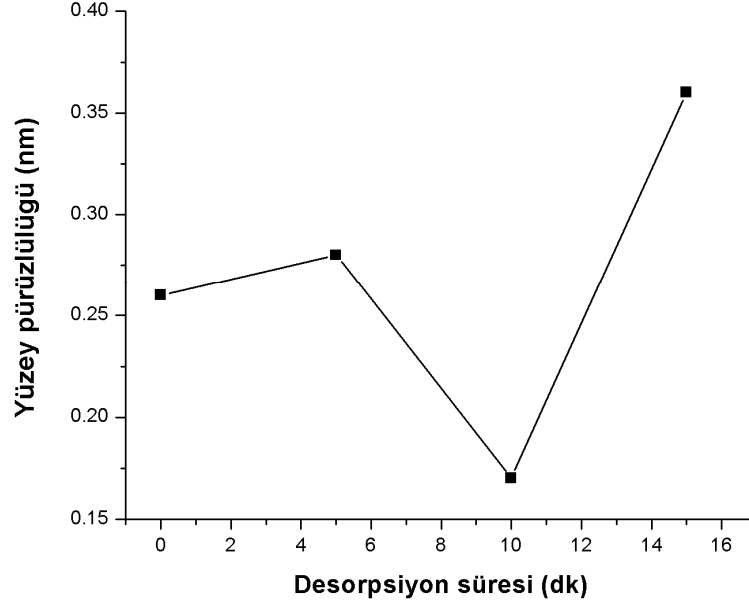
Resim 4.2. (Devam) AlN tampon optimizasyonu AFM yüzey taramaları



Şekil 4.5. RMS yüzey pürüzlülük değerinin DS-AlN çekirdek tabaka süresi ile değişimi



Şekil 4.6. RMS yüzey pürüzlülük değerinin Nitridasyon süresi ile değişimi



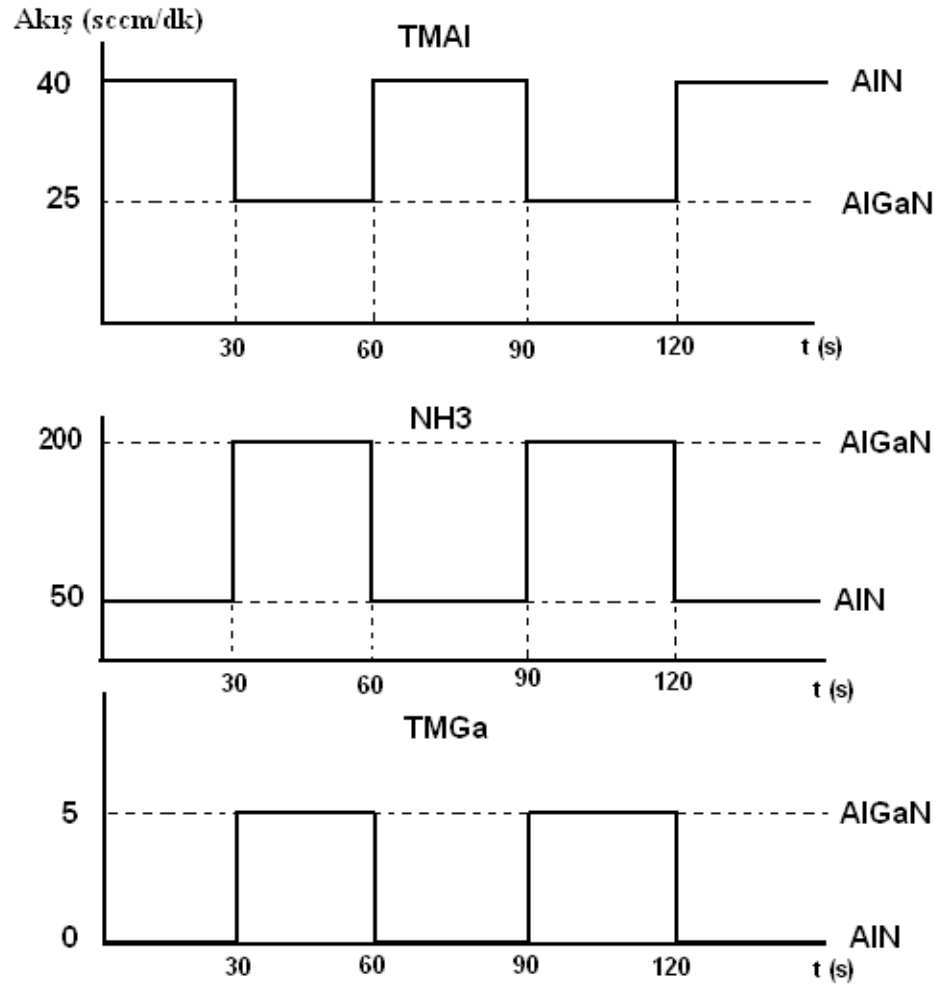
Şekil 4.7. RMS yüzey pürüzlülük değerinin Desorpsiyon süresi ile değişimi

Atomik kuvvet mikroskobu ile gerçekleştirilen AlN yüzey taramalarında DS-AlN çekirdeklenme tabakası büyütme süresi 4 dk, nitridasyon süresi ≤ 10 s ve desorpsiyon süresi 10 dk iken en düşük yüzey pürüzlülük (RMS) değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).

YS-AlN tabaka optimizasyonundan sonra hem AFM yüzey pürüzlülüğünün düşük çıktığı parametreler kullanılarak hem de XRD Rocking Curve taraması FWHM değerlerinin simetrik (002) ve asimetrik (102) için düşük çıktığı parametreler kullanılarak iki farklı AlN tampon büyütülmüş ve her iki tampon üzerine farklı AlGaIn tabaka kalınlıklarına sahip UV-LED yapıları büyütülmüştür.

AlN ve GaN arasındaki yüksek çekme deformasyonu nedeniyle (tensile strain) Al zengin AlGaIn/GaN veya AlN/AlGaIn süper örgü tampon tabakaları epi-tabakada çatlak oluşumunu engellemesi, relaksasyon sonrası kusur oluşumuna ve buna bağlı olarak optik güç, taşıyıcı ömrü gibi aygıt özelliklerinin kötüleşmesine karşı kullanılmaktadır. [5,18,21]. Aynı şekilde AlN/GaN süper örgü tipinde de tampon

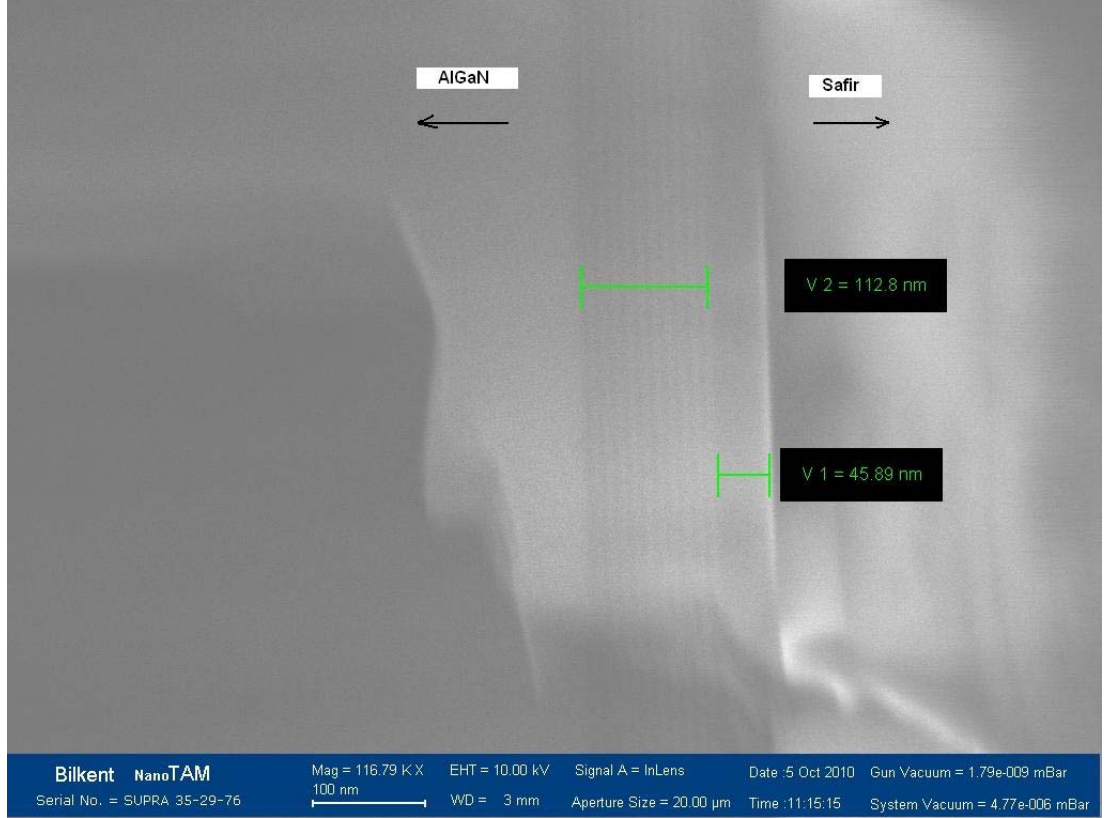
çalışmaları yüksek verimli UV-LED yapıları için rapor edilmiştir [22]. Kusur ve stres kontrolünde oyuklu biçimde patern edilmiş tamponlar da rapor edilmiş ve özellikle katkılı tabakaların kalitesini arttırdığı rapor edilmiştir [23]. Bu çalışmada farklı AlN tamponlar üzerine 10 periyot halinde AlN/Al_{0.75}Ga_{0.25}N süper örgü tampon tabakası büyütülmüştür. Büyütmede reaktör basıncı 50 mbar'a ve sıcaklık 1120°C ye çıkarılmıştır. 10 periyotluk büyütme dizisi içinde AlN tabakası ve AlGa_{0.25}N tabakası 30 s lik sürelerde büyütülmüştür.



Şekil 4.8. AlN/Al_{0.75}Ga_{0.25}N süper örgü tampon tabakası büyütme kaynak akış diyagramı

Büyütmede TMAI, TMGa ve NH₃ akışlarını gösterir diyagram yukarıdaki Şekil 4.4. de verilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmalarında kullanılan AlN/AlGa_{0.25}N süper

örgü tampon yapısının hem kristal kusur yoğunluğunu azalttığı hem de stresi kontrol ederek 2” lik örneğin her yerinde çatlaksız bir yüzey elde edilmesini sağladığı görülmüştür. $Al_xGa_{1-x}N$ / $Al_yGa_{1-y}N$ tipindeki süper örgü tampon tabakaları çeşitli gruplar tarafından denenmiştir.

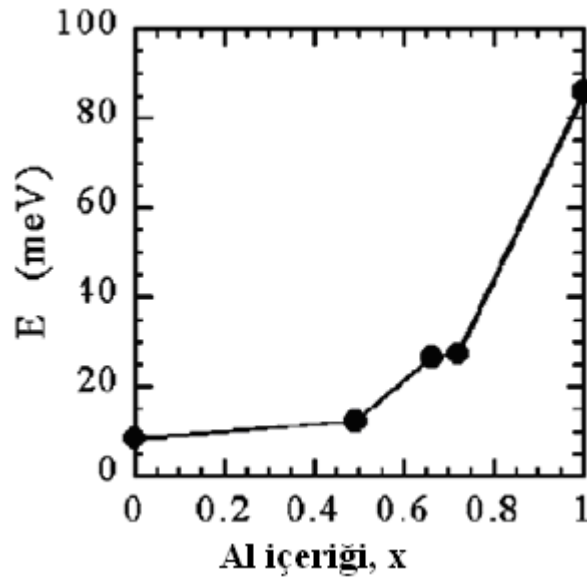


Resim 4.3. AlN/AlGaN süper örgü tampon tabakası ara kesit SEM görüntüsü

AlN/AlGaN optimizasyonu sırasında yaklaşık 45 nm’ lik YS-AlN tampon üzerine büyütülmüş 10 periyotluk AlN/AlGaN süper örgü tabakasının Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile alınmış kesit görüntüsü Resim 4.3.’de gösterilmektedir. Burada AlN/AlGaN süper örgü tabakasının toplam kalınlığının yaklaşık 113 nm olduğu anlaşılmıştır.

4.3 AlGa_xN:Si Yapının Büyütülmesi

UV-LED yapısındaki molar Al oranı ve katkılama seviyesi tasarıma uygun biçimde optimize edilmiştir. N-tipi katkılı AlGa_xN kontak tabakasında katkı malzemesi olarak silisyum kullanılmıştır. Al_xGa_{1-x}N da molar Al oranı arttıkça ($0 < x < 1$) Silisyum katkı atomu için iyonizasyon enerjisi bir başka deyişle aktivasyon enerjisi Şekil 4.9 da görüldüğü gibi artar. Tasarımda n-tipi katkılı AlGa_xN tabakasında molar Al oranı ~% 35 olarak hedeflenmiştir. n+Al_{0.35}Ga_{0.65}N tabakası öncelikle optimize edilen AlN üzerine koyulan AlN/AlGa_xN süper örgü tampon üzerine büyütülmüş ve optik geçirgenlik ile Hall etkisi ölçümlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.9. Katkılı AlGa_xN da Silisyum aktivasyon enerjisinin Alüminyum oranı ile değişimi [16].

Al_xGa_{1-x}N da Al oranı arttıkça hem aktivasyon enerjisinin artması hem de Si katkı atomlarının kristal içinde noktasal kusurlar oluşturup elektronlar için tuzak noktaları meydana getirmesi etkilerinden dolayı homojen ve yüksek oranda katkılama yapmak zorlaşmaktadır. Bu tez çalışmasında da hem AlN büyütme safhasında hem de n-tipi katkılı AlGa_xN tabakası büyütme safhasında Indium yardımcı-katkılama işlemi uygulanmıştır. N-tipi AlGa_xN için test olarak büyütülen epitaksiyel yapı Şekil 4.10.'da gösterildiği gibi tasarlanmış ve büyütülmüştür.

YS-AlN ve AlN/AlGa_N süper örgü tampon tabakaları tamamlandıktan sonra reaktör koşulları AlN/AlGa_N ile n+AlGa_N arasında bir geçiş tabakası büyütmek üzere değiştirilmiştir. AlN/Al_{0.75}Ga_{0.25}N ile katkısız-Al_{0.35}Ga_{0.65}N arasındaki yaklaşık 100 nm lik geçiş tabakasında sıcaklık 1120°C den 1100°C ye ve TMGa akışı 5 sccm/dk'den 10 sccm/dk'e çıkarılmıştır. Burada TMAI akışı 25 sccm/dk'de tutulmuştur. Geçiş tabakasında 100 nm lik kalınlıkta Al oranı %50 den %35 'e düşmüştür. Daha sonra bu koşullarda yaklaşık 110 nm katkısız Ud-Al_{0.35}Ga_{0.65}N tampon tabakası büyütülmüştür. Epitaksiyel yapıdaki stresi kontrol altında tutabilmek için Al oranının giderek azaldığı bir yapı elde edilmiştir. Elde edilen katkısız Al_{0.35}Ga_{0.65}N üzerine 1000 nm Silisyum katkılı Al_{0.33}Ga_{0.67}N tabakası aynı koşullarda büyütülmüştür. N-tipi katkılı tabaka 15 sccm/dk'lik SiH₄ akışı ile elde edilmiştir.



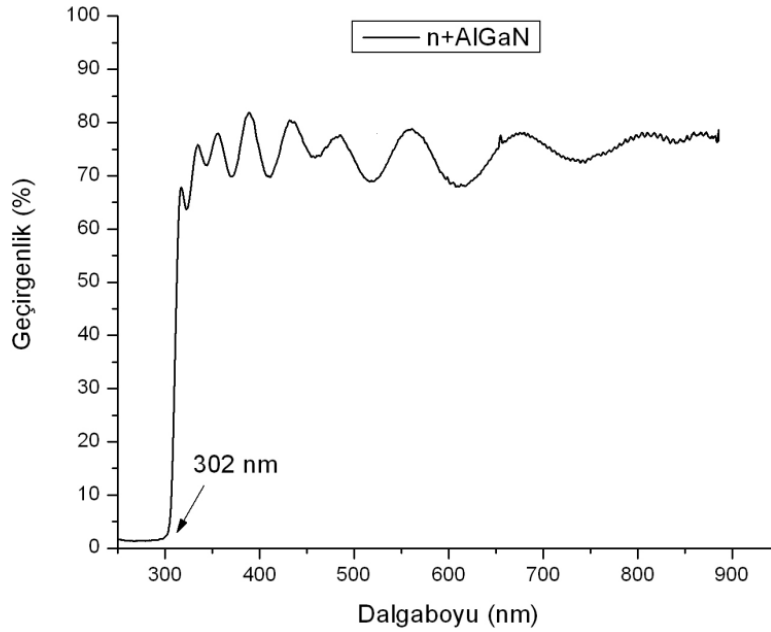
Şekil 4.10. AlGa_N:Si ile tampon tabakalarının şematik gösterimi

4.4 AlGa_N:Si Karakterizasyonu

Elde edilen yapının istenilen ve tasarlanan yapıya uygunluğunun anlaşılması için optik geçirgenlik ölçümü, Hall etkisi ölçümü, fotoluminesans ve Atomik Kuvvet mikroskobu ile yüzey morfolojisinin incelenmesidir.

4.4.1 Optik geçirgenlik

Elde edilen yapıya öncelikle optik geçirgenlik ölçümü uygulanıp n+AlGaN 'ın kesim dalga boyu belirlenmeye çalışılmıştır. Optik geçirgenlik ölçümüne ait spektrum Şekil 4.11'de görüldüğü gibidir. Kesim dalgaboyu 302 nm olarak belirlenmiştir. Bu değer bowing parametresi 1 eV alınırca %32.6 (~% 33) aluminyum oranına karşılık gelmektedir. Yapılan tasarımla tutarlı sonuçlar alınmıştır.



Şekil 4.11. n+Al_{0.33}Ga_{0.67}N tabakasına ait optik geçirgenlik spektrumu

Optik geçirgenlik ölçümleri Ocean Optics USB-ISS-UV/VIS ışık kaynağı ile Ocean Optics USB-4000 spektrometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

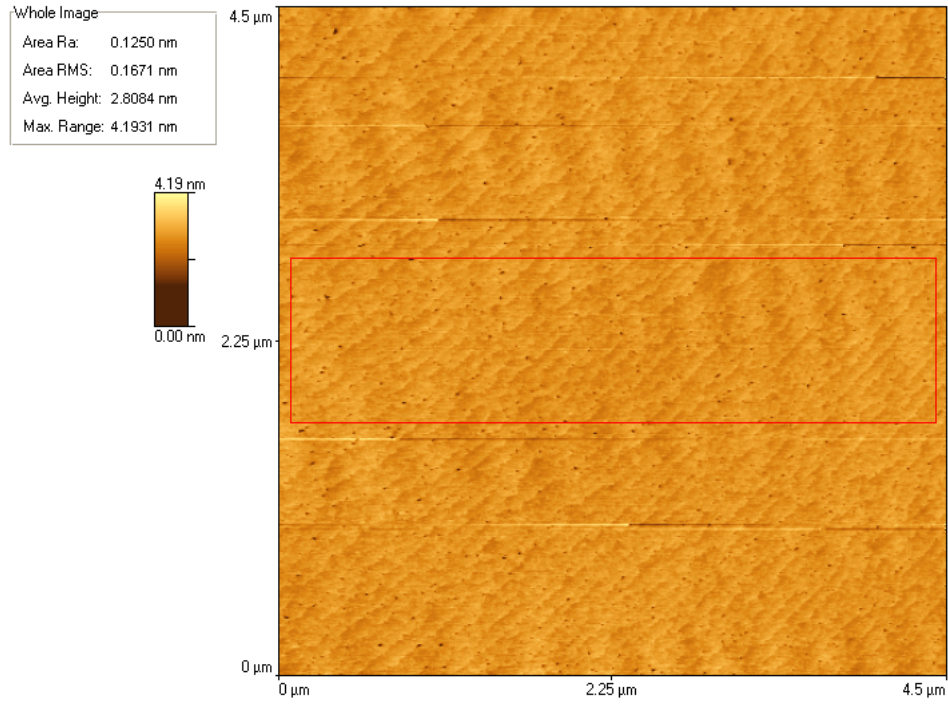
4.4.2 Hall etkisi ölçümü

Büyütme sonrasında 6mm x 6mm 'lik örnek parçasına standart Van der Pauw geometrisinde ohmik metal kaplaması uygulanmıştır. Ti/Al/Ni/Au metal kaplaması elektron demetli buharlaştırma yöntemi (OERLIKON LEYBOLD-UNIVEX 350) ile sırasıyla 20 nm/200 nm/40 nm/50 nm kalınlıklarında kaplanmıştır. Kontakın ohmik

olması için metal kaplanan örnek 830°C de 30s RTA (SSI-SOLARIS 75 model) işlemine tabi tutulmuştur. Oda sıcaklığında (300K) Hall etkisi ölçümleri uygulanan örnekte elektron taşıyıcı konsantrasyonu $\sim 2.0E+18 \text{ cm}^{-3}$ dir.

4.4.3 Atomik kuvvet mikroskobu ile yüzey taraması

Ayrıca örneğin Atomik Kuvvet Mikroskobunda kontak modunda (VEECO CPII-kontak mod) ile yüzey taraması gerçekleştirilmiştir. $4.5\mu\text{m} \times 4.5\mu\text{m}$ 'lık tarama alanında $\sim 0.17 \text{ nm}$ RMS pürüzlülük değeri elde edilmiştir (Resim 4.4). Yüzeyde basamak tipi morfoloji ve düşük çukur yoğunluğu gözlenmiştir.



Resim 4.4. $n+\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ AFM yüzey görüntüsü

4.5 Çoklu Kuantum Kuyu Yapının Büyütülmesi

N-tipi katkılı AlGa_xN tabakasının ardından $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ çoklu kuantum kuyusu için tasarlanan yapıya uygun olacak şekilde optimizasyon çalışması yapılmıştır. Büyütülen test yapısında p-tipi katkılı kontak ve elektron bloklama

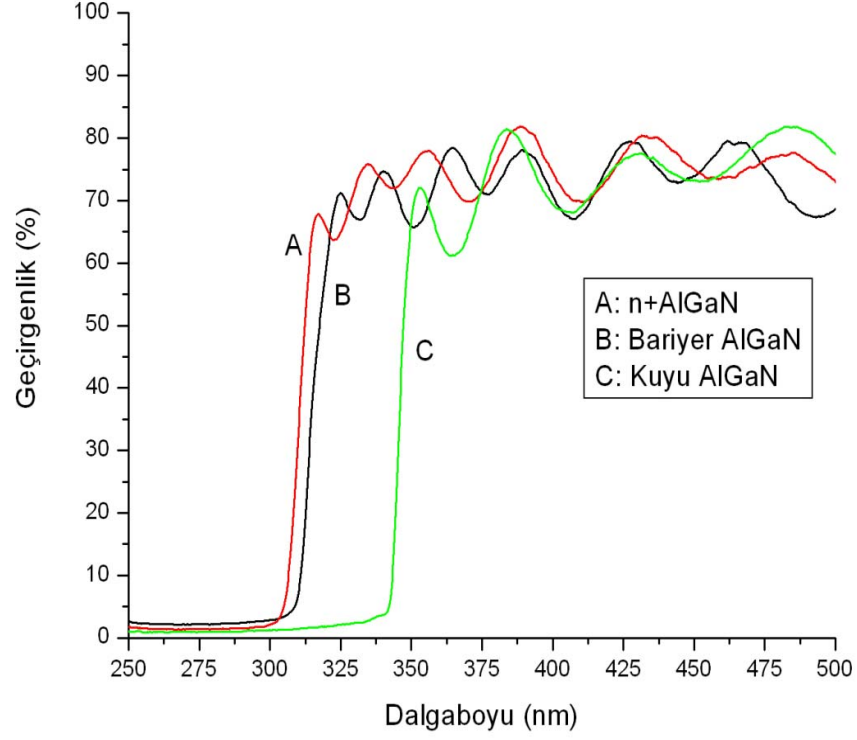
tabakaları yer almamaktadır. Daha düşük Al içerikli p-AlGaN tabakalarının ve p-GaN tabakalarının içsel soğurma durumu göz önüne alınarak öncelikle kuantum kuyu bölgesinden gelen yayını gözlenmiştir. Katkılı AlGaN tabakalarının fotoluminesans özellikleri literatürden bulunabilir [27].

Çizelge 4.2. Çoklu Kuantum Kuyusu Büyütme Koşulları

Tabaka	Akışlar (sccm/dk)	Sıcaklık (°C)	Basınç (mbar)
Al _{0.29} Ga _{0.71} N / Al _{0.11} Ga _{0.89} N MQW (8 nm / 3 nm)	TMAI : 25 / 2,5 (bariyer/kuyu) TMGa : 6 / 10 (bariyer/kuyu) NH ₃ : 1300 / 1300 (bariyer/kuyu)	1080	65
n + Al _{0.33} Ga _{0.67} N tampon	TMAI : 25 TMGa : 10 NH ₃ : 950	1100	50
ud-Al _{0.33} Ga _{0.67} N tampon	TMAI : 25 TMGa : 10 NH ₃ : 950	1100	50
Al _{0.5} Ga _{0.5} N/AlN tampon	TMAI : 25 (AlGaN) / 40 (AlN) TMGa : 5 (AlGaN) / 0 (AlN) NH ₃ : 200 (AlGaN) / 50 (AlN)	1120	50
YS-AlN tampon	TMAI : 40 NH ₃ : 25	1100	35
DS-AlN çekirdek tabakası	TMAI : 5 NH ₃ : 1000	790	50
Safir(0001)			

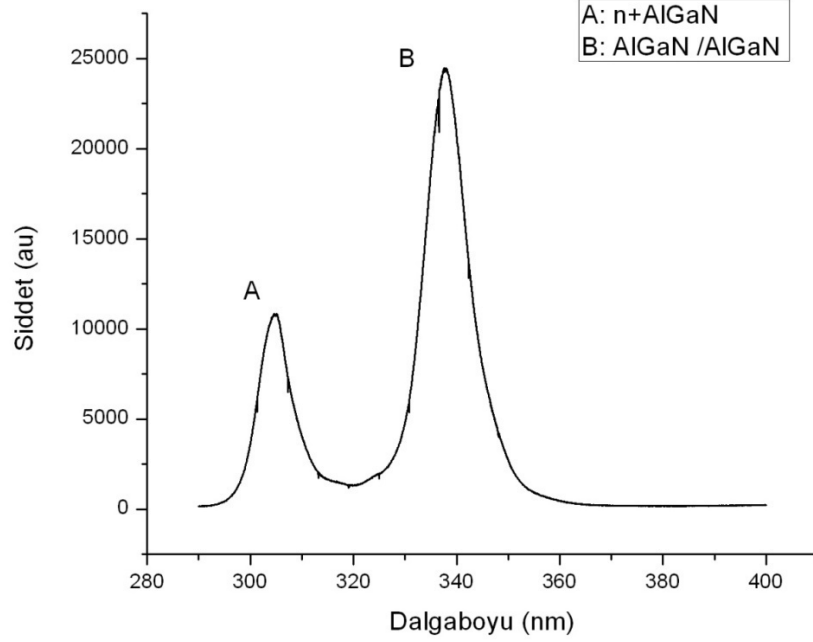
n+AlGaN ile birlikte bariyer ve kuyu AlGaN tabakaları test amaçlı ayrı büyütülüp optik geçirgenlik ölçümüne tabi tutulmuştur. n+AlGaN'a ait geçirgenlik spektrumunu da içerecek şekilde verilen karşılaştırmalı spektrum aşağıdaki Şekil 4.12 de görülmektedir. Kesim dalgaboyu n+AlGaN için 302 nm, bariyer AlGaN için

309 nm ve kuyu AlGaIn için ~341 nm dir. Bowing parametresi 1 eV alındığında Alüminyum oranı bariyer ve kuyu için sırasıyla yaklaşık %29 ve %11 dir.



Şekil 4.12. n-AlGaIn, bariyer ve kuyu AlGaIn optik geçirgenlik ölçümü

Çizelge 4.2.'de gösterilen koşullar altında bir test büyütmesi gerçekleştirilmiş ve bu yapının üzerine herhangi bir p tipi katkılı kontak tabakası büyütülmemiştir. Elde edilen örnek 266 nm Nd:YAG lazer (sinyal genişliği 10 ps, çıkış gücü 0,5W) ile uyarılarak fotoluminesans (HORIBA-Jobin Yvon TRIAX 550 Symphony CCD dedektör) ölçümüne tabi tutulmuştur.



Şekil 4.13. $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N} / \text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{N}$ MQW test büyütmesi için Fotoluminesans spektrumu

Şekil 4.13’de p-tipi katkılı kontak tabakaları olmaksızın büyütülen test yapısında n-tipi katkılanmış AlGaN tabakasının ve $\text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{N} / \text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ çoklu kuantum kuyu tabakalarından gelen ışıma spektrumu görülmektedir. “A” ile gösterilen n+AlGaN sinyal tepe noktası ~ 305 nm olarak belirlenmiştir.”B” ile gösterilen sinyal tepe noktası ise 337.5 nm olarak belirlenmiştir. Bu sinyal kuantum kuyulu yapıdan gelmektedir.

4.6 UV-LED Yapı Büyütmeleri

Test çalışmalarının ardından farklı p-tipi katkılı kontak tabakalarına ve farklı tampon tabaka kalınlıklarına sahip 2 adet UV-LED yapısı büyütülmüş ve karakterize edilmiştir. İlk yapıda ayrıca safir alttaş üzeri tabaka büyütmesi öncesinde geleneksel desorpsiyon işlemi uygulanmıştır. Tasarlanan ve büyütülen bu yapılardaki tabakalara ait kalınlık değerleri Çizelge 4.3.’te yer almaktadır. 2. yapıda $\text{AlN} / \text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ süperörgü tabakası ile katkısız $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ tampon tabakası arasında geçiş tabakası

büyütülmemiştir. Bunun yerine yapıda yaklaşık 15-20 nm kalınlığında katkısız GaN tabakası, $\text{AlN}/\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ ile $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ tampon arasında kullanılmıştır. GaN ara tabakasının, safirden itibaren gelen tabakalarda ipliksi dislokasyonlarının sayısını azaltması ve yukarıdaki tabakalara doğru yayılmasını önlemesi beklenmektedir. Ancak iç soğurmayı engellemek için oldukça ince tutulmuştur. GaN ara tabakasının elektro-luminesans ışıma şiddetini arttırdığını belirten çalışmalar literatürde mevcuttur [10,11].

Çizelge 4.3. UV-LED yapılarında standart olarak kullanılan tabakaların kalınlıkları

Tabaka	Kalınlıklar	
	1.Yapı	2.Yapı
$\text{Al}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{N} / \text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ MQW	8 / 3	8 / 3
n + $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ tampon	700	1100
Ud- $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ tampon	110	900
$\text{A}_x\text{I}\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ geçiş tabakası (x : 0.75 den 0.32'ye)	100	-
GaN (katkısız)	-	20
$\text{AlN} / \text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ tampon	113	113
YS-AlN tampon	300	420
AlN çekirdek tabakası	10	10
Safir(0001)	330μm	

Çizelge 4.3.'te verilen tabaka kalınlıkları incelendiğinde 1. yapıda YS-AlN tampon kalınlığı 300 nm dir. 2. yapıda ise 420 nm olmuştur. AlN/AlGa_N süper örgü tampon her iki yapıda da aynı sürede ve aynı koşullarda büyütülmüştür. Kalınlığı 113 nm olarak ölçülmüştür. Katkısız GaN ara tabakası 2. yapıda ~20 nm bulunmaktadır. Molar Aluminyum konsantrasyonunun 0.75 den 0.33 'e düştüğü geçiş tabakası ise 1. yapıda uygulanmış ancak 2. örnek de yapıya koyulmamıştır. Bu geçiş tabakasının kalınlığı ~100 nm dir. n+AlGa_N kontak tabakasından hemen önce büyütülen katkısız Al_{0.33}Ga_{0.67}N ise 1.örnekte 110 nm, 2. örnekte ise 900 nm yapılmıştır. Silisyum katkılı n+ Al_{0.33}Ga_{0.67}N ise örnekte 700 nm son iki örnekte 1100 nm dir. Silisyum katkılama için kullanılan SiH₄ akış miktarı kaynak / injeksiyon akışı 15 / 25 sccm/dk dır. Tasarlanan yapılarda p tipi katkılı tabakalar aynı koşullarda büyütülmüş ancak, kalınlıkları bakımından farklılık göstermektedir. P-tipi katkılı tabakaların yapıdaki yerleşimleri Şekil 4.14. de gösterilmiştir.

p-GaN
p-Al _{0.18} Ga _{0.82} N
p-Al _{0.33} Ga _{0.67} N EBT
MQW
Tampon
Safir alttaş

Şekil 4.14. Yapılara ait p-tipi katkılı kontak tabakalarının yerleşimi

Çizelge 4.4. de yapılarda kullanılan p-tipi katkılı ince film tabakaların büyütme koşulları verilmiştir. p-Al_{0.33}Ga_{0.67}N EBT her iki yapıda da aynı sürede büyütülürken, p-GaN ve p-Al_{0.18}Ga_{0.82}N tabakaları büyütme süreleri ilk yapıda ikincisine göre ~ %50 daha fazladır. Bu süreler çizelgede ayrıca gösterilmiştir. Silisyum katkılı n+AlGa_N kontak tabakasında olduğu gibi yine sadece 2. örnekte p-Al_{0.33}Ga_{0.67}N

elektron bloklama tabakasında Cp2Mg akışı %20 arttırılmıştır. 1. yapıda 100 sccm/dk iken 2. Yapıda 120 sccm/dk'e çıkarılmıştır. 1. ve 2. örnek arasındaki farklardan biri de budur. p-Al_{0.33}Ga_{0.67}N EBT ile p-Al_{0.18}Ga_{0.82}N yelek (cladding) tabakasındaki Cp2Mg akışı 1. örnekte 100 sccm/dk iken 2.örnekte 120 sccm/dk yapılmıştır. Standart p-AlGa_{0.33}N kontak ve EBT tabakalarının kullanımı yanında AlGa_{0.33}N/AlGa_{0.33}N MQB “Çoklu Kuantum Bariyeri” tipindeki elektron bloklama tabakası kullanımının dış kuantum verimini önemli ölçüde arttırdığını gösteren çalışmalar mevcuttur [7,20]. Hirayama ve ark. [20] yaptığı çalışmada bu sayede 10.4 mW gibi oldukça yüksek çıkış gücü elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. p-tipi kontak tabakalarının büyütme koşulları.

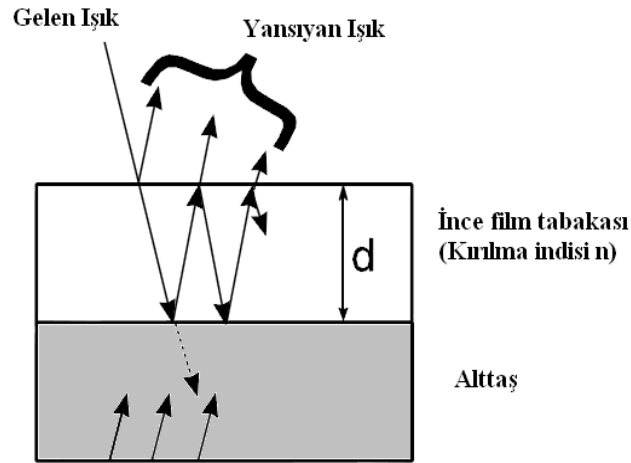
Tabaka	Büyütme Koşulları						
	T (°C)	P (mbar)	TMGa (sccm/dk)	TMAI (sccm/dk)	NH ₃ (sccm/dk)	Cp2Mg (sccm/dk)	Süre (s)
p-GaN	1030	100	10	-	1350	120	60 (1) 40 (2)
p-Al _{0.18} Ga _{0.82} N	1080	50	9	25	1600	100 (1) 120(2)	75 (1) 45 (2)
p-Al _{0.33} Ga _{0.67} N EBT	1080	50	6	30	1600	100 120 (2)	20

Epitaksiyel film büyütmelerinde büyütme anında güncel bilgi alabilmek oldukça önemlidir. Optik reflektans, tabakalar hakkındaki bazı bilgilere büyütme esnasında doğrudan erişim sağladığı için genellikle tercih edilen bir metoddur. Reflektans ölçümlerinden elde edilen bilgi yalnızca büyütme oranı ile sınırlı değildir. Optik sistemin gelişmişliğine göre yüzey pürüzlülüğü ve özellikle üçlü bileşiklerin tabaka kompozisyonu hakkında bilgiler alınabilmektedir. Bu sayede lazer diyotları ve DBR (Distributed Bragg Reflector) gibi karmaşık yapıların büyütülmesi de kontrol edilebilir [2]. Reflektans ölçümü sırasında belirli bir dalgaboyundaki ışık, büyüyen

tabaka yüzeyine çarpar ve bu ışığın belirli bir kesri geri yansır. Yansıyan ışığın şiddeti bir fotodiyot yada CCD yardımıyla ölçülür. Işğın yansıyan kesri reflektans “R” olarak adlandırılır. Vakum ve katı malzeme arasındaki tekli bir arayüz için n-kırılma indisi ve k-sönüm katsayısı olmak üzere, reflektans ;

$$R = I_{\text{yansıyan}} / I_{\text{gelen}} = \{(n-1)^2 + k^2\} / \{(n+1)^2 + k^2\} \quad (4.1)$$

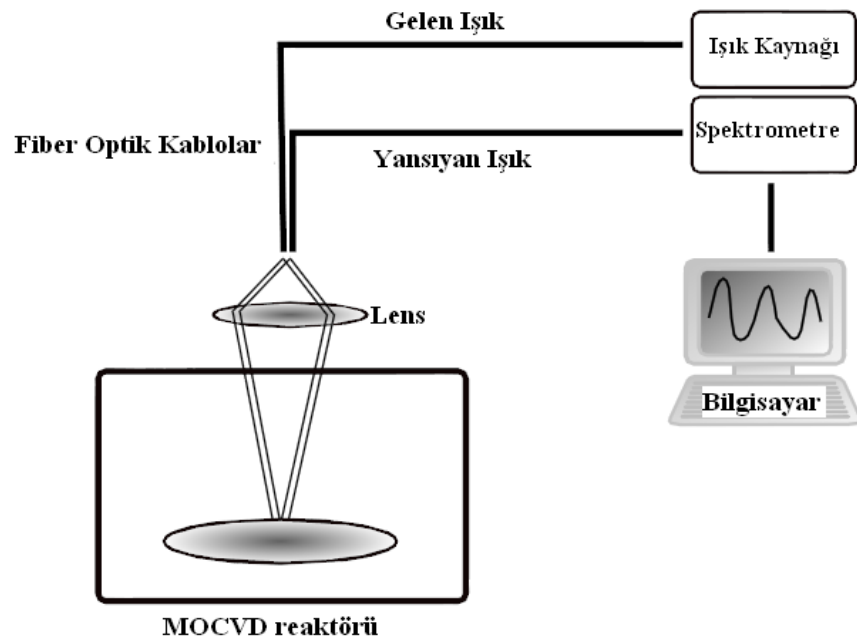
şeklinde verilir. n ve k indisleri ışğın dalgaboyuna bağıdır. Tabakaların kompozisyonu ve büyütme anındaki alttaş sıcaklığı ile de değışir. Epitaksiyel büyüme sırasında reflektans ölçümlerinden bilgi kazanmanın en pratik yolu yansımali geçiş ölçmektir. Bu durumda alttaş-ince film yapısından yansıyan ışğk şiddeti zamanın fonksiyonu olarak tek bir dalga boyunda ölçülür. Eđer büyüyen tabaka gelen ışğın dalga boyu için tamamen veya kısmen geçirgen ise bu geçen dalğanın şiddetinde girişim etkilerinden dolayı bir modülasyon oluşumu görölür. Modülasyon periyodu ince filmin kalınlık ve büyütme oranını ölçmede kullanılır.



Şekil 4.15. İnce film-alttaş yapısında yansıma olayının oluşumu

Şekil 4.15’de gösterilen yansıma olayında gelen ışğın ancak belirli bir kısmı yüzeyden yansır ve belirli bir kesri ince film içine nüfuz eder. İçeri nüfuz eden ışğın da belirli bir kesri ince film-alttaş arayüzünden geri yansıtılır. Yansıyan bu kısım tekrar ince film yüzeyine döner. İnce film yüzeyine gelen bu ışğın bir kısmı ince

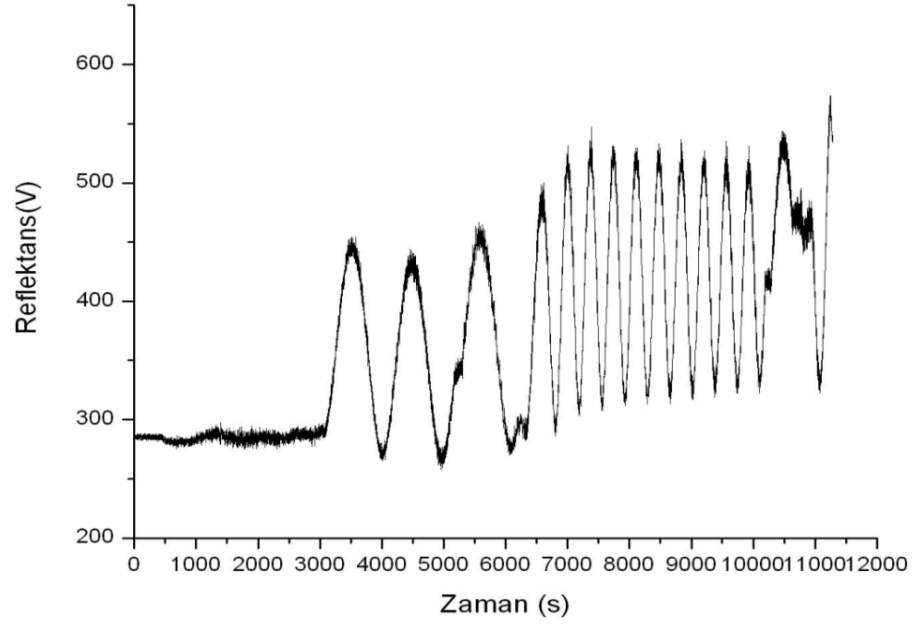
film–vakum arayüzünden dışarı çıkarken bir kısmı tekrar geri döner ve bu olay tekrarlanarak devam eder. Böylece yansıyan her bir demet faz farkından dolayı yapıcı yada yıkıcı girişim oluşturur. Bu da Fabry-Perot osilasyonları olarak bilinen şiddet modülasyonu eğrisini oluşturur. Yansımali geçiş ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi aşağıdaki Şekil 4.16’da verilmiştir.



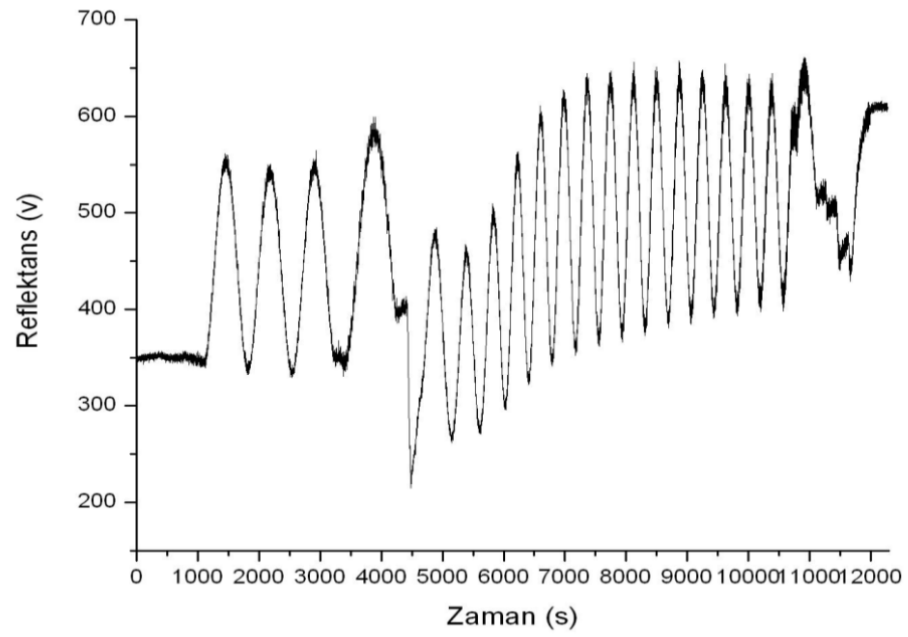
Şekil 4.16. Yansımali geçiş ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi [6].

P-tipi kontak tabakaları ile birlikte büyütülen 2 yapının büyütme esnasında eşzamanlı olarak alınan reflektans spektrumları aşağıdaki şekillerdedir. Zamana bağlı Fabry-Perot osilasyonlarının gözlemlendiği yansıma ölçümünde 566 nm’lik ışık kaynağı kullanılmıştır.

Çizelge 4.3.’te verilen kalınlıklar bu yansıma grafiklerinden hesaplanmıştır. Osilasyonların sıklığı büyütme oranı hakkında bilgi vermektedir. Katkısız $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ ve $n+\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ tampon tabakaları için büyütme oranı 1,170 $\mu\text{m}/\text{h}$ olarak hesaplanmıştır. YS-AlN tampon için bu oran 0,710 $\mu\text{m}/\text{h}$ olarak hesaplanmıştır. Bütün yapılarda bu tabakalar aynı koşullarda büyütüldüğünden büyütme oranları tüm yapılarda aynıdır.



Şekil 4.17. 1.UV-LED yapısına ait büyütmenin Fabry-Perot osilasyonları



Şekil 4.18. 2.UV-LED yapısına ait büyütmenin Fabry-Perot osilasyonları

5. EPİTAKSİYEL MALZEMENİN KARAKTERİZASYONU

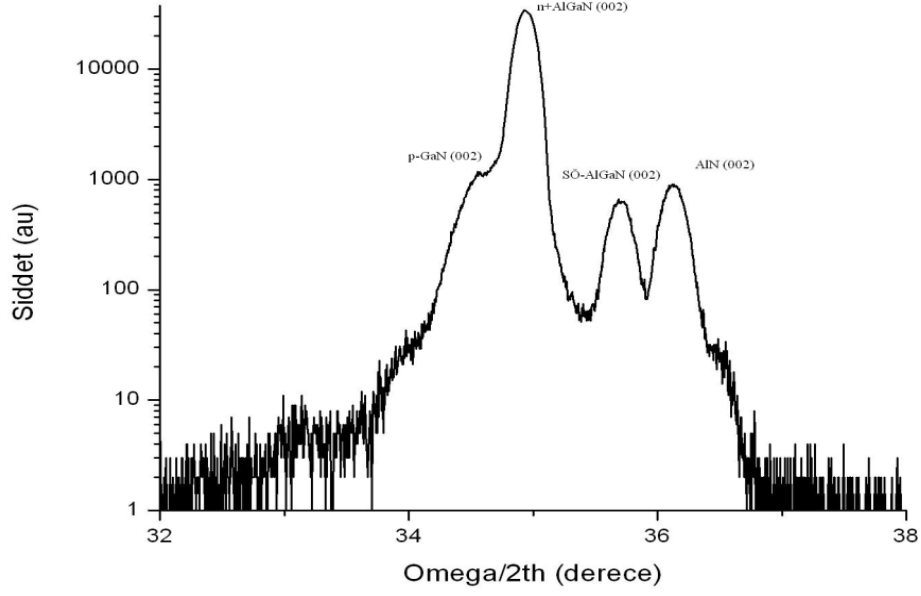
5.1. X-Işını Difraksiyonu

Büyütmeler sonrasında UV-LED yapıları yüksek çözünürlüklü X-Işını difraktometresi ile yapısal analize tabi tutulmuştur. Her örnek için 33° - 37° aralığında $\Omega/2\Theta$ ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Rigaku Smartlab X-Işını difraktometresinde $K\alpha 1$ demeti ile ölçülmüştür. Ge (220)x4 monokromatör kullanılmıştır.

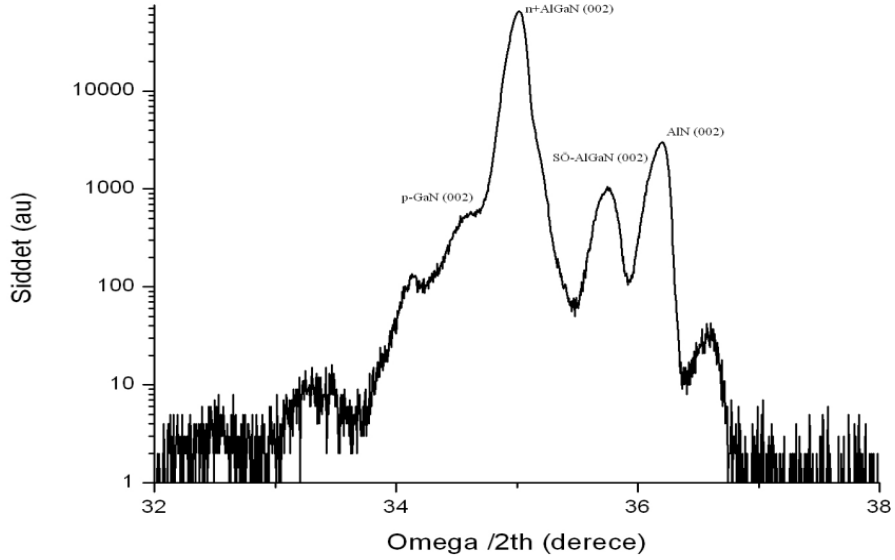
Çizelge 5.1. 1.test yapısı ve 2.yapı daki bazı tabakaların (002) düzlemi için rocking eğrisi ölçümü FWHM değerleri

Tabaka	RC $\omega(002)$ FWHM (Arc sec)	
	1.Yapı	2.Yapı
p-GaN (+ GaN aratabaka_2.yapı)	1055	590
N+Al _{0.33} Ga _{0.68} N	1019	338
Al _{0.75} Ga _{0.25} N (SÖ)	1595	475

X-Işını difraksiyonu ölçümlerinde (002) düzlemine ait spektrumda p-GaN (ve GaN ara tampon _2.Yapı) , n+Al_{0.33}Ga_{0.67}N + Katkısız Al_{0.33}Ga_{0.67}N tampon tabakaları, süper örgü tabakasında bulunan AlGa_{0.25}N tampon ve YS-AlN tabakalarının (004) düzlemlerine ait sinyaller net biçimde görülmektedir.



Şekil 5.1. 1.UV-LED yapısına ait Omega/2theta ölçüm spektrumu



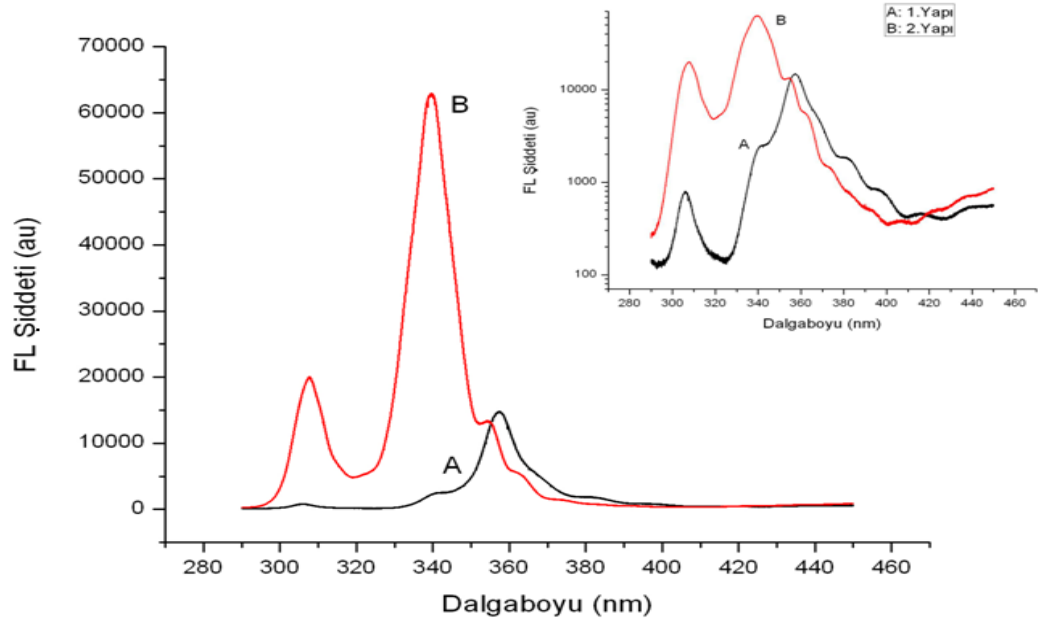
Şekil 5.2. 2.UV-LED yapısına ait Omega/2theta ölçüm spektrumu

Ölçümlerde düşük yüzey pürüzlülüğü veren AlN tampon üzerine büyütülen tabakaların sinyal genişliklerinin 2. yapıya göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Belirtildiği üzere 2. yapıda desorpsiyon adımı kaldırılmıştı ve DS-AlN çekirdeklenme tabaka süresi 3 dk dır. İlk yapıda desorpsiyon 10 dk ve DS-AlN süresi 4 dk olarak belirlenmişti.

5.2. Fotoluminesans Ölçümü (FL)

Şekil 5.3.'te 1.yapının 266 nm UV-Lazer uyarımı ile alınmış fotoluminesans spektrumu görülmektedir. "A" etiketli örnek test olarak büyütülen 1. UV-LED yapısına ait fotoluminesans spektrumudur. 1. yapıda p-tipi katkılı kontak tabakaları kullanıldığında çoklu kuantum kuyu yapısından gelen sinyalin oldukça bastırıldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni kuantum kuyu yapısından yayınlanan UV ışımanın p-kontak tabakaları tarafından soğurulması olduğu düşünülmektedir. 360 nm dolayında oldukça şiddetli bir yayılım gözlenmektedir. Bunun engellenmesi için 2.yapıda p-tipi katkılı kontak tabakalarının süresi oldukça azaltılmıştır. 1.yapıda AlN ve AlGaN tampon tabakasının düşük kristal kalitesi ve düşük kalınlığına bağlı olarak tampon AlGaN'a ait sinyal oldukça düşük şiddetlidir.



Şekil 5.3. p-kontak tabakaları ile büyütülen UV-LED yapılarının fotoluminesans spektrumu. (Sağ üst resim logaritmik skalada verilmiştir)

Çizelge 5.2. Çoklu kuantum kuyusundan gelen ve n+AlGaIn'dan gelen sinyal tepe noktaları

Tabaka	1.yapı	2.yapı
n+AlGaIn	306	308
MQW	341	339

Çizelge 5.2.'de n+AlGaIn kontak tabakası ve çoklu kuantum kuyusundan gelen fotoluminesans yayınımlarının sinyal pozisyonları verilmiştir. Bunlar dışında 360 nm dolayında GaN uyarılmasına ait geçişler görülmektedir.

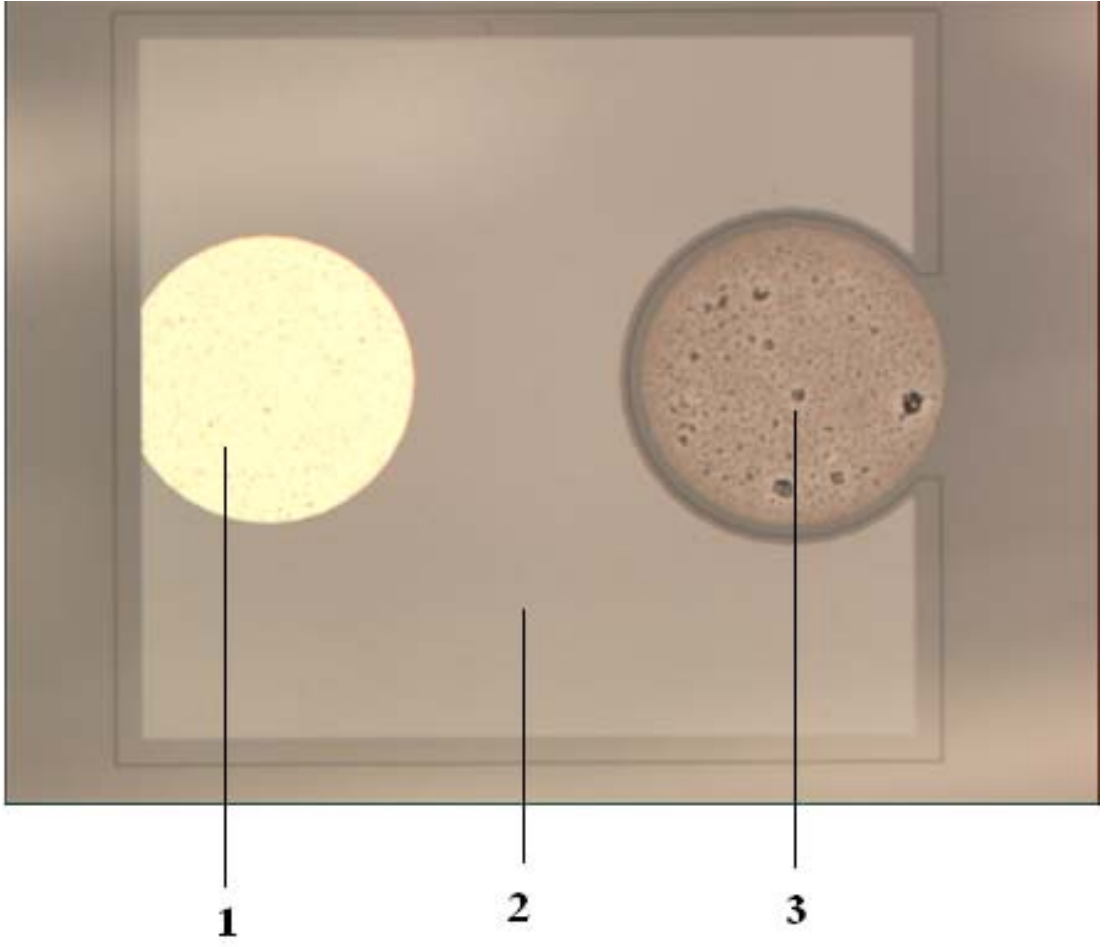
6. AYGIT MİKRO-FABRİKASYONU

Büyütülen 2 yapı temiz odada (100 Sınıf) optik litografi işlemlerine tabi tutularak aygıt haline getirilmiştir. Yapılarda uygulanan kontak metalleri ve bu metal kaplamaların kalınlıkları aşağıdaki Çizelge 6.1.'de verilmiştir. Metal kaplama işlemi elektron demeti ile buharlaştırma tekniği kullanılarak Leybold marka Univex 350 model elektron demetli buharlaştırma sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1. Kontak metal kaplama kalınlıkları

Tabaka	Kalınlıklar (Å)	
p-kontak Ni / Au	100/2500	100/2500
p-transparan metal Ni / Au	50/50	30/30
N kontak Ti / Al	100/1000	100/1000

Aygıt fabrikasyonu adımları aşağıdaki gibidir. Fabrikasyon adımları ile ilgili proses parametreleri literatürde mevcuttur. Resim 6.1. de fabrikasyonu tamamlanıp ölçüme hazır hale gelen aygıt ait mikroskop görüntüsü yer almaktadır.

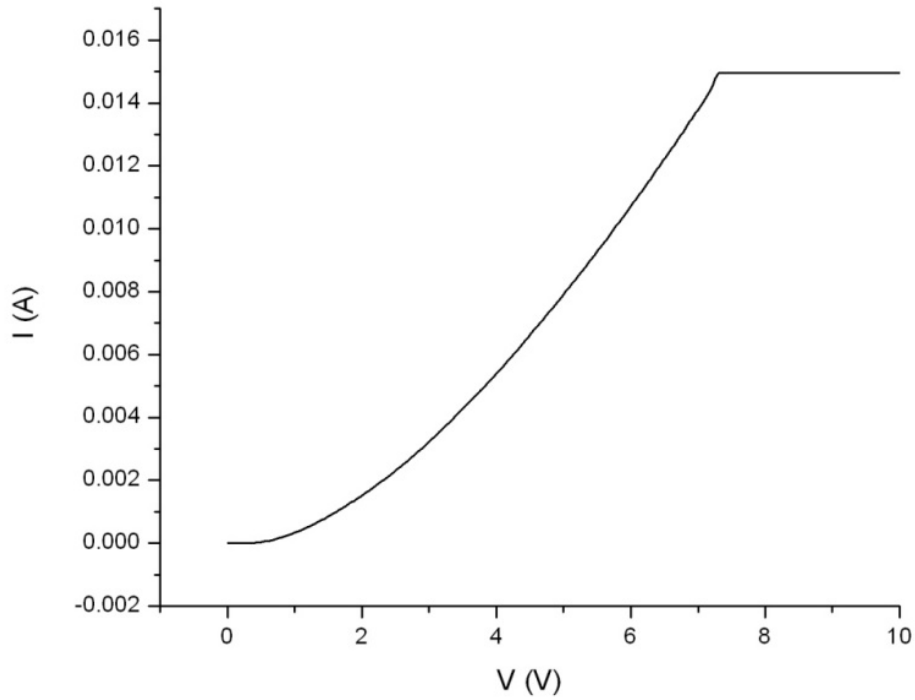


Resim 6.1. Optik litografi ile fabrikasyonu tamamlanan UV-LED aygıtına ait mikroskop görüntüsü. 1.P-touch, 2. P-Transparan kontak metali, 3. N-kontak

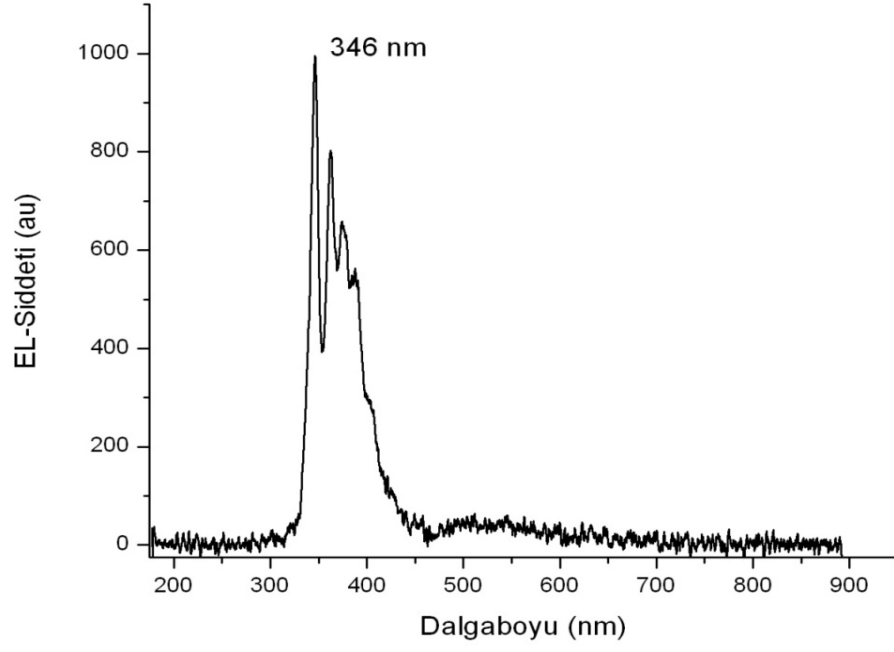
7. AYGIT KARAKTERİZASYONU

Optik litografi ile yapılan aygıt farbikasyonundan sonra örnekler I-V ile birlikte Elektro-Luminesans (EL) ölçümüne tabi tutulmuştur. Örneklere ait I-V ve EL spektrumları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

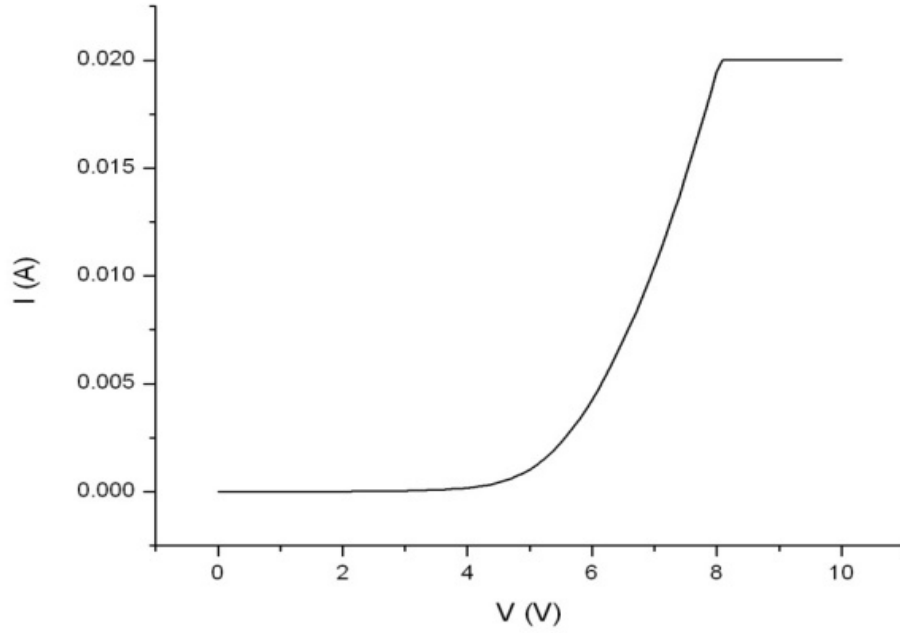
2.yapıda sadece kuantum kuyularından kaynaklanan ışıma gözlemlenmiştir. P-kontak ve örtü tabakalarından gelen ışımlar oldukça düşük şiddette kalmıştır. Önceki örnekten farklı olarak ışımının p kontağı üzerinde homojen dağıldığı gözlemlendi. Bunda, p tipi kontak tabakalarındaki katkı miktarının arttırılması, p-kontak tabakalarının daha ince büyütülmesi ile p kontak metalinin daha da inceltilmesinin rolü olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.1. İlk yapıya ait I-V grafiği

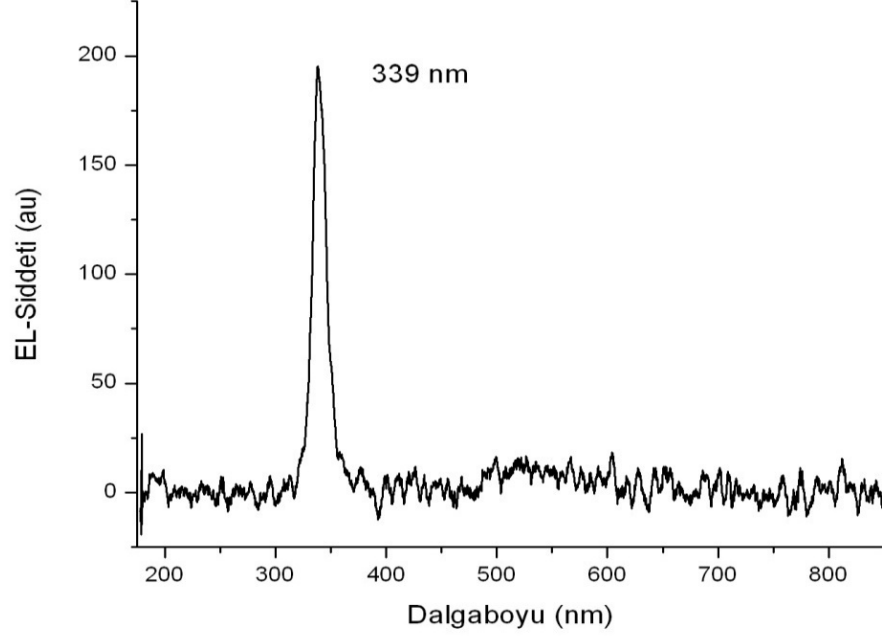


Şekil 7.2. 1.UV-LED yapısına ait elektro-lüminesans spektrumu



Şekil 7.3. 2. UV-LED yapısına ait I-V grafiği

Elektro-Lüminesans ölçümü 7.0V - 8.5V gerilim aralığında 8 mA akım sürülerek alınmıştır.



Şekil 7.4. 2.UV-LED yapısına ait elektro-lüminesans spektrumu

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada c-Safir (0001) alttaş üzerine çatlaksız AlGaIn temelli UV-LED yapılarının Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksisi (MOBFE) yöntemi ile büyütülmesi konusu incelenmiş ve deneysel çalışmalar ile bunların sonuçları sunulmuştur. Birçok uygulama alanı bulunan UV-LED yapılarının temel olarak UV-A denilen (320-400nm) aralığındaki spektrumuna odaklanılmış ve özellikle biyokimyasal toksik gaz algılanmasında kullanılabilecek 340 nm dolayında UV-emisyonu veren AlGaIn temelli UV-LED yapısı tasarlanarak MOCVD sisteminde büyütülmüştür. Hedeflenen dalgaboyunda ışımaya yapan UV-LED epitaksiyel yapısının başarılı biçimde büyütüldüğü, yapısal, elektriksel ve optik karakterizasyonlar ile ortaya konulmuştur. Büyütülen AlGaIn tabakaları iyi optik kalite göstermektedir. Ayrıca X-Işını difraksiyonu ile alınan simetrik düzlem sinyali FWHM değerleri literatürle karşılaştırılabilir değerlerdedir. İlk yapıda homojen bir p-tipi iletkenlik elde etmek adına bu tabakaların kalınlıkları yüksek tutulmuştur. Bununla birlikte bu yapıların hem foto-luminesans (FL) hem de Elektro-Luminesans (EL) spektrumlarında iç soğurmanın oldukça kuvvetli bir şekilde gözlemlendiği belirlenmiştir. Bu sebeple 2. yapıda bu tabakaların kalınlıkları azaltılmıştır. 2. yapının FL spektrumunda p-tipi tabakaların kalınlıklarının azaltılması ve daha yüksek film kalitesi dolayısıyla daha yüksek şiddette bir UV emisyonunun epitaksiyel yapı dışına alınabildiği gözlenmiştir. Ancak bu durumun her zaman yüksek FL emisyonu şiddetinin yanında yüksek EL şiddetini vermediği ve enjeksiyon akımının artırılması için daha fazla elektron ve deşik taşıyıcılarının n-tipi ve p-tipi tabakalara yüklenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. 2. yapıda n ve p tipi katkılı tabakalar için donör ve akseptör atomlarının katkısı artırılmıştır. Sonuç olarak 2. yapıda oda sıcaklığında 8mA giriş akımında 339 nm de keskin ve test örneğine göre yüksek şiddetli bir EL sinyali gözlenmiştir. EL sinyalinin FWHM değeri 13,7 nm olarak belirlenmiştir. Turn-on voltajı 1. yapıda yaklaşık 0.8 V ve 2. yapı için ~4.5 V dolayındadır. İlk yapıda 362 nm civarında baskın bir yakın UV emisyonu gözlenmiştir. Bu yapılardaki düşük UV-emisyonu taşıyıcıların çoklu kuantum kuyu (MQW) bölgesinde sınırlı miktarda hapsedilebilmesi ve UV ışığın bir kısmının p-GaN örtü tabakalarında soğurulması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bir diğer neden ise kuantum kuyu bölgesinden p-

bölgesine doğru elektron kaçıının olması ve bu durumun ince $p\text{-Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ elektron bloklama tabakası tarafından tamamen kontrol altına alınamaması olabilir. Elektron kaçıını engellemede aktif kuantum kuyu bölgesi ile p-tipi tabakalar arasında çok ince (~ 1 nm) AlN filmin elektron bloklama tabakası olarak kullanıldığı araştırmalar literatürde mevcuttur.

KAYNAKLAR

1. Saengkaew, P., "Epitaxial growth and properties of AlGaIn-based UV-LED on Si (111) substrates", Yüksek Lisans Tezi, **Fakultät für Naturwissenschaften der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**, Magdeburg, Almanya, 527,(2010)
2. Dikme, Y., "MOVPE and Characterization of GaN-based Structures on Alternative Substrates", Doktora Tezi, **Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen**, Aachen, Almanya, 1,40-44 (2006)
3. Ren, Z., "Heteroepitaxy of AlGaIn on bulk AlN substrates for deep ultraviolet light emitting diodes", **Applied Physics Letters**, (91); 051116 (2007)
4. Xi, Y.A., "Optimization of High-Quality AlN Epitaxially Grown on (0001) Sapphire by Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy", **Journal of Electronic Materials**, 36, (4); 533-537 (2007)
5. Chen, H.C., "Structural and Morphological Analyses of AlN and AlGaIn Layers", Yüksek Lisans Tezi, **Electrical Engineering College of Engineering and Computing University of South Carolina**, South Carolina, ABD,8-10 (2010)
6. Grzegorzczak A.P., "GaN grown on sapphire by MOCVD", Doktora Tezi, **Radboud Universiteit Nijmegen**, Nijmegen, Hollanda, 11-15,34-35 (2006)
7. Zhu, T.G., "AlGaIn/AlGaIn UV light-emitting diodes grown on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition", **Journal of Crystal Growth** (248); 548-551 (2003)
8. Sumiya, S., "AlGaIn-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Grown on Epitaxial AlN/Sapphire Templates" **Japanese Journal of Applied Physics**, 47, (1); 43-46 (2008)
9. Khan, A., "Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides", **Nature Photonics**, (2);77-84 (2008)
10. Airey, R.J., "Temperature dependent behaviour of 340nm light emitting diodes incorporating a gallium nitride interlayer", **Journal of Physics D: Applied Physics**, (41); 094004 (2008)
11. Wang, T., "The 310-340nm ultraviolet light emitting diodes grown using a thin GaIn interlayer on a high temperature AlN buffer", **Journal of Physics D: Applied Physics**, (41); 094003 (2008)

12. Ranalli, F., “Improved AlN buffer layer technologies for UV-LEDs”, *Physica Status Solidi C* 4,(1); 120–124 (2007)
13. Crawford, M.H., “Design and Performance of Nitride-based UV LEDs”, *Mat. Res. Soc. Symp. Materials Research Society*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, (622); T3.6.1-T3.6.11 (2000)
14. Zhang, DU X., “UV Light-Emitting Diodes at 340nm Fabricated on a Bulk GaN Substrate”, *China Physics Letters*, 27, (8); 088105 (2010)
15. Nagata, K., “High-output-power AlGaIn/GaN ultraviolet-light-emitting diodes by activation of Mg-doped p-type AlGaIn in oxygen ambient”, *Physica Status Solidi A* 207, (6); 1393–1396 (2010)
16. Taniyasu, Y., “Intentional control of n-type conduction for Si doped AlN and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.42 \leq x \leq 1$)”, *Applied Physics Letters* 81 (7); 1255 (2002).
17. Horng, R.H.,” Growth and characterization of 380-nm InGaIn/AlGaIn LEDs grown on patterned sapphire substrates”, *Journal of Crystal Growth*, (298);219–222 (2007)
18. Kajitani, R., “Barrier-height and well-width dependence of photoluminescence from AlGaIn-based quantum well structures for deep-UV emitters”, *Materials Science and Engineering B*, (139);186–191 (2007)
19. Fujikawa, S.,” Realization of 340-nm-Band High-Output-Power ($>7\text{mW}$) InAlGaIn QuantumWell Ultraviolet Light-Emitting Diode with p-Type InAlGaIn”, *Japanese Journal of Applied Physics* 47, (4) ; 2941–2944 (2008)
20. Hirayama, H., “Marked Enhancement in the Efficiency of Deep-Ultraviolet AlGaIn Light-Emitting Diodes by Using a Multiquantum-Barrier Electron Blocking Layer”, *Applied Physics Express* (3); 031002 (2010)
21. Zhang, J., “AlGaIn Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes” *Japanese Journal of Applied Physics* 44, (10); 7250–7253 (2005)
22. Bai, J., “Optical properties of AlGaIn/GaN multiple quantum well structure by using a high-temperature AlN buffer on sapphire substrate”, *Journal of Applied Physics* (99); 023513 (2006)
23. Amano, H., “AlN and AlGaIn by MOVPE for UV Light Emitting Devices”, *Materials Science Forum* (590); 175-210 (2008)
24. Gautier, S.,” AlGaIn/AlN multiple quantum wells grown by MOVPE on AlN templates using nitrogen as a carrier gas”, *Journal of Crystal Growth* (310); 4927–4931 (2008)

25. Sakai, Y., " Demonstration of AlGa_N-Based Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes on High-Quality AlN Templates", *Japanese Journal of Applied Physics* (49); 022102 (2010)
26. Manasreh, M.O., " III-V Nitride Semiconductors Applications and Devices, Volume 16", Yu, E.T., Manasreh, M.O., *Taylor&Francis*, Newyork, London, 529 (2003)
27. Manasreh, M.O., "Ga_N and Related Materials", Volume 2", Manasreh, M.O., Stephen J.Pearson, *Gordon and Breach Science Publishers*, India, 68-70 (1997)
28. O. Ambacher, O., "Growth and applications of Group III-nitrides", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31 ,2653-2710 (1998)
29. Internet: E.F.Schubert "Light-Emitting Diodes, Bandgap energy versus lattice constant of III-V nitride semiconductors at room temperature"
<http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap12/chap12.htm>
30. Christensen, N.E., "Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure", *Phys. Rev. B* (50); 4397-4415 (1994)
31. Suzuki, M, T. Uenoyama, A. Yanase, First-principles calculations of effective-mass parameters of AlN and GaN, *Phys. Rev. B* (52); 11, 8132-8139 (1995)
32. Hadis Morkoc, "Handbook of nitrides semiconductors and devices volume 1: materials properties, physics and growth", *Wiley-VCH Verlag*, Weinheim, 269 (2008)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZTÜRK, Mustafa
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 29.03.1982 Turgutlu
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (531) 467 9774
 Faks : 0 (312) 290 1015
 e-mail : mozturk3@gmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Ü. /İleri Teknolojiler A.B.D.	2011
Lisans	Hacettepe Ü./ Fizik Müh. Bölümü	2008
Lise	Aydın Ortaklar Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-2011	Bilkent Üniversitesi-NANOTAM	Araştırma Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Astronomi, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol