



**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GaN İNCE
FİLMLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ
YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Asim MANTARCI

**Doktora Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı
Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI
2017
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GaN İNCE FİLMLERİNİN
BÜYÜTÜLMESİ YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Asim MANTARCI

NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI
Nanomalzeme Bilim Dalı

ERZURUM
2017

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GaN İNCE FİLMLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ
YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında, Asim MANTARCI tarafından hazırlanan bu çalışma 28/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı – Nanomalzeme Bilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan :Prof. Dr. Enise AYYILDIZ

İmza :

Üye : Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

İmza :

Üye : Doç.Dr. Memet Ali YILDIRIM

İmza :

Üye : Doç. Dr. Özlem BARIŞ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 11./.../ 01./.../ 2018 tarih ve 2 ./.../ 26
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GaN İNCE FİMLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Asim MANTARCI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nanomalzeme Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Bu tez çalışmasında, n-Si, p-Si, safir, cam, ITO alttaşlar üzerine GaN ince filmleri farklı RF gücü, argon gazı ve azot gazı büyüme koşullarında, RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. Elde edilen GaN ince filmlerinin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu ölçümlerden biri olan XRD analizinden, ince filmlerin hegzagonal kristal yapıya sahip olduğu ve malzemenin kristal tanecik boyutu, yönelimleri, örgü sabitleri belirlenmiştir. Atomik kuvvet mikroskopu ölçümlerinin değerlendirilmesinden, ince filmin morfolojik özellikleri ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. SEM resimleri, büyütülen ince filmlerin hemen hemen homojen olduğunu ve tanecikli, periyodik yapıda büyüdüğünü XRD sonuçlarını da destekleyerek göstermiştir. Soğurma ölçümleri analizinden, optoelektronik aygıtlar için çok önemli bir parametre olan optik bant aralığı enerji değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra yüzdelik yansıma ölçümü alınmıştır ve bunların değerlendirilmesinden, ince filmlerin ultraviyole ve görünür bölgedeki yansıma oranları büyütme koşullarına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Raman spektroskopisinden büyütülen ince filmlerin, E_2 (yüksek) ve E_1 (TO) optik fonon modlarına sahip olduğu bulgusuna varılmıştır. Ayrıca, E_2 (yüksek) pikinin Raman kaymasındaki sapma miktarından yararlanarak, aygıt uygulamaları için önemli bir mekanik parametre olan kalıcı gerilim (residual stress) değerleri, gerilim şekilleri bulunmuştur ve bu gerilimlerin sebepleri açıklanmıştır. Elde edilen veriler literatür ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, büyütme koşullarının değiştirilmesi ve farklı alttaş kullanılması ile malzemenin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkileri değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir.

2017, 163 sayfa

Anahtar Kelimeler: GaN, İnce Film Teknolojisi, III-Nitrürler, RF Saçtırma Tekniği,

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

GROWTH OF GaN THIN FILMS BY RF SPUTTER, INVESTIGATION OF STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND OPTICAL PROPERTIES

Asim MANTARCI

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nano Science and Nano Engineering
Nano Materials Department

Supervisor: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

In this thesis, GaN thin films on n-Si, p-Si, sapphire, glass, ITO substrates were grown using RF magnetron sputtering method under different RF power, argon gas and nitrogen gas growth conditions. The structural, optical and morphological properties of the obtained GaN thin films were investigated by experimental measurement techniques. From the XRD analysis, GaN thin films have a hexagonal crystal structure and the crystal grain size, orientations and lattice constants of the material were determined. Thanks to evaluation of AFM measurements, thin films of morphological properties and average surface roughness values were obtained. SEM images proved that materials have almost homogeneous and granular, periodic behavior of structure. Optical band gap energy values of thin films, being a very important parameter for optoelectronic devices, were calculated from UV/Vis absorption measurements. The reflectance ratios of the thin films in the ultraviolet and visible regions were compared according to the growth conditions. It has found that the materials have E_2 (high) and E_1 (TO) optical phonon modes by Raman measurements. Residual stress in GaN thin films were calculated by analysis of Raman measurements. Also, reasons of this stress in thin films were explained by helping with literature studies. In summary, the effects of different growth conditions and the use of different substrates on the structural, optical and morphological properties of the material have been evaluated and analyzed.

2017, 163 pages

Keywords: GaN, Thin Film Technology, III-Nitrides, RF Sputtering Technique

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışması, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) ve Fizik Bölümünde icra edilmiştir. Öncelikle, araştırmam boyunca desteğini, ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, gittiğim yolda bana yol gösteren ve gereken çalışma alanını/malzemeleri bana sağlayan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesi Başkanı değerli hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM'a çalışmamda gereken desteği ve bilgiyi sağladığından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Bana çalışmalarım aşamasında teorik ve deneysel olarak yardım eden değerli hocam Sayın Doç. Dr. Emre GÜR'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmanın deneysel aşamalarında bilgisini paylaşan Uzman Sayın Ahmet EMRE KASAPOĞLU'na ve Sayın Dr. Sevda SARITAŞ'a teşekkür ederim. Tüm Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim dalı Öğretim Üyesi/Elemanlarına ve DAYTAM personeline deneysel çalışmam boyunca gösterdikleri yardımlardan dolayı şükran olduğumu belirtmek isterim.

Bu tezi, bana desteğini/sabrını ve sevgisini esirgemeyen sevgili eşim Fatma MANTARCI ve oğlum Ege Alp MANTARCI' ya ithaf ediyorum.

Asim MANTARCI

Aralık, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	14
2.1. III-Nitrür Malzemelerinin Özellikleri	14
2.2. GaN Malzemesi.....	16
2.2.1. Temel fiziksel özellikleri.....	16
2.2.2. Yapısal özellikler.....	17
2.2.3. Elastiki özellikler.....	19
2.2.4. Optik ve elektronik özellikler.....	21
2.3. İnce Filmlerde Kalıcı Gerilime (Residual Stress) Sebep Olan Faktörler	26
2.4. İnce Film Büyütme Teknikleri	29
2.4.1. Radyo frekans magnetron saçtırma tekniği (RF-Sputter).....	30
2.5. Sıçratma Mekanizması	32
2.5.1. Sıçratma verimi	33
2.6. X Işını Kırınımı (XRD).....	39
2.7. Soğurma ve Yansıma Spektroskopisi.....	41
3. MATERYAL ve YÖNTEMLER.....	43
3.1. Materyal Özellikleri	43
3.2. Büyütmede Kullanılan RF Magnetron Saçtırma Sistemi	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	51
4.1. Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyon	51
4.1.1. X-Işını kırınımı (XRD) ölçümleri	51
4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri	82
4.1.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri	94

4.2. Optik Karakterizasyon.....	120
4.2.1. Raman spektroskopisi ölçümleri	120
4.2.2. Soğurma (UV/Vis) ve yansıma (Reflectance) ölçümleri	129
5. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	135
KAYNAKLAR	156
ÖZGEÇMİŞ	164



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\%R$	Yüzdelik Yansıma
D_i	Deformasyon potansiyeli
E_{c0}	İletkenlik bandının bant sınırı enerjisi
ω_{LO^2}	Boyuna optik fonon frekansı
ω_{TO^2}	Enine optik fonon frekansı
Δ_{cr}	Kristal alan yarıлма enerjisi
$E_1 (TO)$	Enine optik fonon modu
$E_2 (high)$	Optik fonon modu (yüksek)
P_{SP}	Kendiliğinden polarizasyon
R_a	Ortalama pürüzlülük
m_0	Elektronun durgun kütlesi
b	Eğrilik parametresi
d	Kristal düzlemleri arasındaki mesafe
e	Elektronun yükü
$h\nu$	Foton enerjisi
Y	Sıçratma verimi
α	Optik soğurma katsayı
λ	Dalga boyu
μ	İndirgenmiş kütle
σ	Kalıcı gerilim
$\hbar$	Plank sabiti
s	Spin açısal momentum

Kısaltmalar

H_2O_2	Hidrojen Peroksit
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
DAYTAM	Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi

DC	Doğru Akım
DI	Deiyonize Su
FWHM	Yarı Yükseklik Genişliği
GaN	Galyum Nitrür
HCl	Hidrojen Klorür
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
ITO	İndiyum Kalay Oksit
MBE	Moleküler Demet Epitaksi
MFM	Manyetik Kuvvet Mikroskobu
N-Si	N tipi Silisyum
P-Si	P tipi Silisyum
RCA-1	Amerika Radyo Kurumu-1
RCA-2	Amerika Radyo Kurumu -2
RF	Radyo Frekans
RFPA-MBE	Radyo Frekans Plazma Destekli Moleküler Demet Tek Çekirdek Kaplama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
STM	Taramalı Tünelleme Mikroskopu
XPS	X – Işını Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	X – Işını Kırınımı
SCCM	Dakikada Standart Kübik Santimetreden Geçen Akış

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. a) 2005-2015 yılları arasında Dünya solar PV kapasitesi ve yıllık eklenen değerler b) Bölgelere ve ülkelere göre Dünya solar PV kapasitesi ve toplam değeri.....	2
Şekil 2.1. a) Çinko sülfür yapısının birim hücre şekli b) $3\times 3\times 3$ kafes şekli c) Wurtzite kristal yapısının birim hücre şekli d) Wurtzite kristal yapı gösterimi e) GaN için Wurtzite yapısı. Beyaz atomlar polariteye bağlı olarak Ga ve N olabilirler	14
Şekil 2.2. III-Nitrür yarıiletken malzemelerin bant aralığı enerjisine karşılık örgü sabiti grafiği	16
Şekil 2.2. GaN, AlN, InN malzemeleri için wurtzite ve çinko sülfür kristal yapılarında örgü parametresi a ile bant aralığı enerjisi ilişkisi.....	17
Şekil 2.3. a) Çinko sülfür b) wurtzite c) kayatuzu (NaCl) yapılarının çeşitli düzlemler için gösterimi	18
Şekil 2.4. Temel örgü vektörleri a) Ters örgü vektörü b) Hegzagonal (0001) düzlemi	22
Şekil 2.5. GaN malzemesinin detaylı bant yapısı gösterimi	23
Şekil 2.6. Wurtzite ve çinko sülfür yarıiletkenler için valans bandının üstü şematik enerji diyagramı	26
Şekil 2.7. İnce filmlerde basınç gerilimi gösterimi.....	27
Şekil 2.8. İyon- madde etkileşimi ve sıçratma mekanizması	32
Şekil 2.9. İyon–atom çarpışması.....	34
Şekil 2.10. Bakırın Ar + iyonlarıyla bombardımanında iyon enerjisine bağlı sıçratma verimi.....	36
Şekil 2.11. Hg + iyonlarıyla bombardıman edilen çeşitli hedef malzemeleri için eşik iyon enerjileri	37
Şekil 2.12. Sıçratma veriminin çarpışma açısına bağlılığı.....	38
Şekil 2.13. Kristal düzlemlerinin sıçratma verimine etkisi.....	38
Şekil 2.14. Bragg kırınımının temsili gösterimi.....	40

Şekil 3.1. Kullanılan Radyo Frekans Magnetron Saçtırma (RF sputter) sisteminin şematik gösterimi.....	47
Şekil 4.1. 50 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği	51
Şekil 4.2. 75 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği	52
Şekil 4.3. 100 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği	52
Şekil 4.4. 125 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği	53
Şekil 4.5. Farklı RF güçleri altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği	53
Şekil 4.6. 50 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu	55
Şekil 4.7. 75 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu	56
Şekil 4.8. 100 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu	56
Şekil 4.9. Tüm uygulanan RF güçleri için, n-tipi silisyum üzerine GaN ince filminin XRD spektrumu	57
Şekil 4.10. P tipi silisyum altlığının üzerine GaN ince filminin 50 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği	58
Şekil 4.11. P tipi silisyum altlığının üzerine GaN ince filminin 75 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği	59
Şekil 4.12. P tipi silisyum altlığının üzerine GaN ince filminin 100 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği	59
Şekil 4.13. P tipi silisyum altlığının üzerine GaN ince filminin 125 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği	60
Şekil 4.14. Bütün uygulanan Radyo Frekans güçleri için, p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği.....	60
Şekil 4.15. 50 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu.....	62

Şekil 4.16. 75 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu.....	62
Şekil 4.17. 100 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu.....	63
Şekil 4.18. 125 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu.....	63
Şekil 4.19. 50, 75, 100, 125 Watt RF güçleri uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu.....	64
Şekil 4.20. N tipi silisyum alt taş üzerine 0 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	66
Şekil 4.21. N tipi silisyum alt taş üzerine 1 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	66
Şekil 4.22. N tipi silisyum alt taş üzerine 2 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	67
Şekil 4.23. N tipi silisyum alt taş üzerine 3 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	67
Şekil 4.24. N tipi silisyum alt taş üzerine 4 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	68
Şekil 4.25. N tipi silisyum alt taş üzerine tüm azot gazı değerlerinde büyütülen GaN ince filmlerinin XRD spektrumu	68
Şekil 4.26. P tipi silisyum alt taş üzerine 3 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	70
Şekil 4.27. P tipi silisyum alt taş üzerine 4 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrum	70
Şekil 4.28. P tipi silisyum alt taş üzerine tüm azot gazı değerleri için büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	71
Şekil 4.29. 2 sccm azot gaz akışında ITO altlık üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	72
Şekil 4.30. 3 sccm azot gaz akışında ITO altlık üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu	73
Şekil 4.31. Bütün azot gazı değerleri için ITO üzerine GaN ince filmlerinin XRD spektrumu	73

Şekil 4.32. 50 sccm argon gazı varlığında N tipi silisyum altlığının üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği.....	75
Şekil 4.33. 75 sccm argon gazı varlığında N tipi silisyum altlığının üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği.....	76
Şekil 4.34. Uygulanan bütün argon gazı değerleri için n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiği	76
Şekil 4.35. 50 sccm argon gaz akışında p-tipi silisyum üstüne büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği.....	78
Şekil 4.36. 75 sccm argon gaz akışında p-tipi silisyum üstüne büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği.....	78
Şekil 4.37. Uygulanan tüm argon gaz değerleri için p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiği	79
Şekil 4.38. 100 sccm argon gazı varlığında ITO üzerine GaN ince filminin XRD grafiği	80
Şekil 4.39. 25, 75 ve 100 sccm argon gazı varlığında ITO üzerine GaN ince filminin XRD grafiği.....	81
Şekil 4.40. Cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 60000X büyütmedeki a) 50 Watt RF gücündeki b) 75 Watt RF gücündeki c) 100 Watt RF gücündeki d) 125 Watt RF gücündeki SEM resimleri.....	84
Şekil 4.41. N tipi Si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 40000X büyütmedeki a) 50 Watt RF gücündeki b) 75 Watt RF gücündeki c) 100 Watt RF gücündeki d) 125 Watt RF gücündeki SEM resimleri.....	86
Şekil 4.42. Safir alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ~30000X büyütmedeki a) 50 Watt RF gücündeki b) 125 Watt RF gücündeki SEM resimleri	87
Şekil 4.43. N tipi Si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ~60000X büyütmedeki a) 0 sccm azot gazı b) 1 sccm azot gazı c) 2 sccm azot gazı d) 3 sccm azot gazı e) 4 sccm azot gazı varlığındaki SEM resimleri	88

Şekil 4.44. Cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ~40000X büyütmedeki a) 0 sccm azot gazı b) 1 sccm azot gazı c) 2 sccm azot gazı d) 3 sccm azot gazı e) 4 sccm azot gazı varlığındaki SEM resimleri.....	89
Şekil 4.45. P tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ~50000X büyütmedeki a) 25 sccm argon gazı b) 50 sccm argon gazı c) 75 sccm argon gazı d) 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri	90
Şekil 4.46. N tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 50000X büyütmedeki a) 25 sccm argon gazı b) 50 sccm argon gazı c) 75 sccm argon gazı d) 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri.....	91
Şekil 4.47. ITO alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 100000X büyütmedeki a) 25 sccm argon gazı b) 75 sccm argon gazı c) 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri.....	92
Şekil 4.48. Cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 100000X büyütmedeki a) 25 sccm argon gazı b) 50 sccm argon gazı c) 75 sccm argon gazı d) 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri.....	93
Şekil 4.49. Cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 2 mikronluk alandaki a) 50 Watt b) 75 Watt c) 100 Watt d) 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri	95
Şekil 4.50. N tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 2 mikronluk alandaki a) 50 Watt b) 75 Watt c) 100 Watt d) 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri	97
Şekil 4.51. P tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 2 mikronluk alandaki a) 50 Watt b) 75 Watt c) 100 Watt d) 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri.....	99
Şekil 4.52. ITO alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 2 mikronluk alandaki a) 50 Watt b) 75 Watt c) 100 Watt d) 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri	101

Şekil 4.53. Safir alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin a) 50 Watt b) 75 Watt c) 100 Watt d) 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri.....	103
Şekil 4.54. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazında cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri	106
Şekil 4.55. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazında n si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri.....	108
Şekil 4.56. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazında p si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri.....	110
Şekil 4.57. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazında ITO alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri	112
Şekil 4.58. a) 25 sccm b) 75 sccm c) 100 sccm argon gazı varlığında ITO alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri.....	114
Şekil 4.59. a) 25 sccm b) 50 sccm c) 75 sccm d) 100 sccm argon gazı varlığında n si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri	115
Şekil 4.60. a) 25 sccm b) 50 sccm c) 75 sccm d) 100 sccm argon gazı varlığında p si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri	117
Şekil 4.61. a) 25 sccm b) 50 sccm c) 75 sccm d) 100 sccm argon gazı varlığında cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri	118
Şekil 4.62. ITO alt taşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman Spektrumu	121
Şekil 4.63. Cam alt taşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman spektrumu	122

Şekil 4.64. Safir alt taşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman spektrumu	123
Şekil 4.65. ITO alt taş üzerine farklı 2 ve 3 sccm azot gazı uygulanarak büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu	124
Şekil 4.66. Cam alt taş üzerine farklı azot gazı değerleri uygulanarak büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu	125
Şekil 4.67. ITO alt taş üzerine farklı argon gazı uygulanarak büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu	126
Şekil 4.68. Farklı RF güçlerinde safir alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$ değerine karşı enerji (E) grafiği	130
Şekil 4.69. Farklı RF güçlerinde cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$ değerine karşı enerji (E) grafiği	131
Şekil 4.70. Farklı azot gazı ortamında büyütülen n tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin yüzdelik yansımaya (%R) karşılık dalga boyu grafiği.....	133
Şekil 4.71. Farklı azot gazı ortamında büyütülen p tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin yüzdelik yansımaya (%R) karşılık dalga boyu grafiği.....	134

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. III-Nitrür malzemelerin ikili, üçlü ve dörtlü bileşiklerine örnekler.....	15
Çizelge 2.2. a, c (A0) ve u wurtzite yapısının, aZB (A0) çinko sülfür yapısının, aRS (A0) kayatuzu örgü sabitini göstermektedir. GaN malzemesinin örgü sabitleri ile ilgili değerlerin gösterimi	19
Çizelge 2.3. T=300 ve 700 K0 için wurtzite tipi GaN malzemesinin ısı genleşme katsayıları	19
Çizelge 2.4. GaN malzemesinin wurtzite (WZ) ve çinko sülfür (ZB) yapıları için esneklik-sertlik (elastic stiffness coefficient) katsayıları	20
Çizelge 2.5. Wurtzite tipi GaN malzemesinin kendiliğinden (spontane) polarizasyon (PSP) ve piezoelektrik modülleri (ϵ_{ij}) (C m2) değerleri	21
Çizelge 2.6. Çinko sülfür ve Wurtzite yapısındaki GaN malzemesinin belli sıcaklıklarda E_g (eV) bant aralığı enerjisi, Varshni parametreleri α (meVK) ve β (K) değerleri	24
Çizelge 2.7. Wurtzite tipi GaN için hol ve elektron etkin kütle değerleri	25
Çizelge 2.8. Wurtzite tipi GaN için deformasyon potansiyeli (eV).....	25
Çizelge 4.1. Farklı RF gücünde cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	54
Çizelge 4.2. Farklı RF gücünde n tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	58
Çizelge 4.3. Farklı RF gücünde p tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	61
Çizelge 4.4. Farklı RF gücünde safir alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	65
Çizelge 4.5. Farklı RF güçlerinde yapılan büyütmede, tüm alt taşlar (n-si, p-si, cam, ITO ve safir) için uygulanan büyüme koşulları	65
Çizelge 4.6. Uygulanan farklı azot gazlarında N tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	69

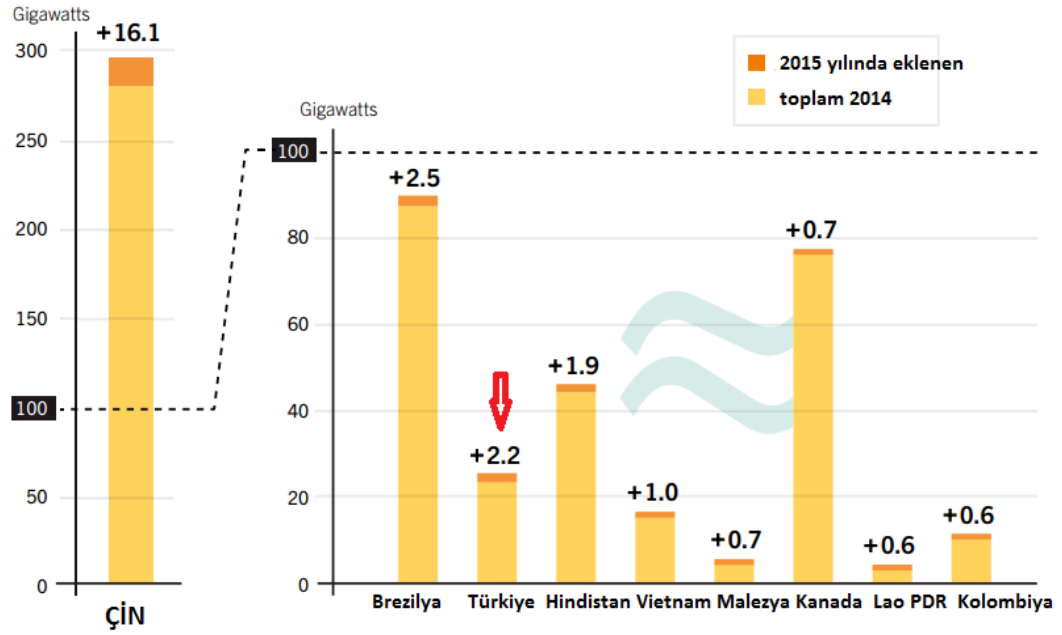
Çizelge 4.7. Farklı azot gazı değerlerinde p tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	72
Çizelge 4.8. Farklı azot gazı varlığında ITO alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	74
Çizelge 4.9. Farklı azot gazında yapılan büyütmede, tüm alt taşlar(n-si, p-si, cam, ITO) için uygulanan büyüme koşulları.....	75
Çizelge 4.10. Farklı argon gazı varlığında n si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	77
Çizelge 4.11. Farklı argon gazı varlığında p si alt taş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	80
Çizelge 4.12. 100 sccm argon gazı varlığında ITO alt taş üzerine büyütülen GaN ince filminin bazı yapısal parametreleri	82
Çizelge 4.13. Farklı argon gazı değerlerinde yapılan büyütmede, tüm alt taşlar (n-si, p-si, cam, ITO) için uygulanan büyüme koşulları	82
Çizelge 4.14. Farklı RF gücü değerlerinde cam, n si, p si, safir ve ITO altlıklarının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri.....	104
Çizelge 4.15. Farklı azot gazı değerlerinde cam, n si, p si ve ITO altlıklarının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri.....	113
Çizelge 4.16. Farklı argon gazı değerlerinde cam, n si, p si ve ITO altlıklarının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri.....	119
Çizelge 4.17. Uygulanan farklı RF güç değerlerinde safir altlığının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri	127
Çizelge 4.18. Uygulanan farklı RF güç değerlerinde cam altlığının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri	128
Çizelge 4.19. Uygulanan farklı RF güç değerlerinde ITO altlığının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri	128
Çizelge 4.20. Uygulanan farklı argon gazı değerlerinde ITO altlığının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri	129

Çizelge 4.21. Farklı RF güçleri için safir üstüne GaN ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri	131
Çizelge 4.22. Farklı RF güçleri için cam altlığın üzerine GaN ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri	132
Çizelge 5.1. Üretilen ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri	135
Çizelge 5.2. Uygulanan büyütme koşullarına göre GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülük değerleri	143
Çizelge 5.3. Uygulanan büyütme koşuluna göre elde edilen GaN ince filmlerinin bazı optik parametreleri.....	149
Çizelge 5.4. Uygulanan farklı büyütme koşullarında çeşitli alt taşlar üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı mekanik parametreleri.....	151
Çizelge 5.5. Farklı RF güçlerinde cam ve safir altlığının üzerine büyütülen filmlerinin optik bant aralığı enerjileri	154

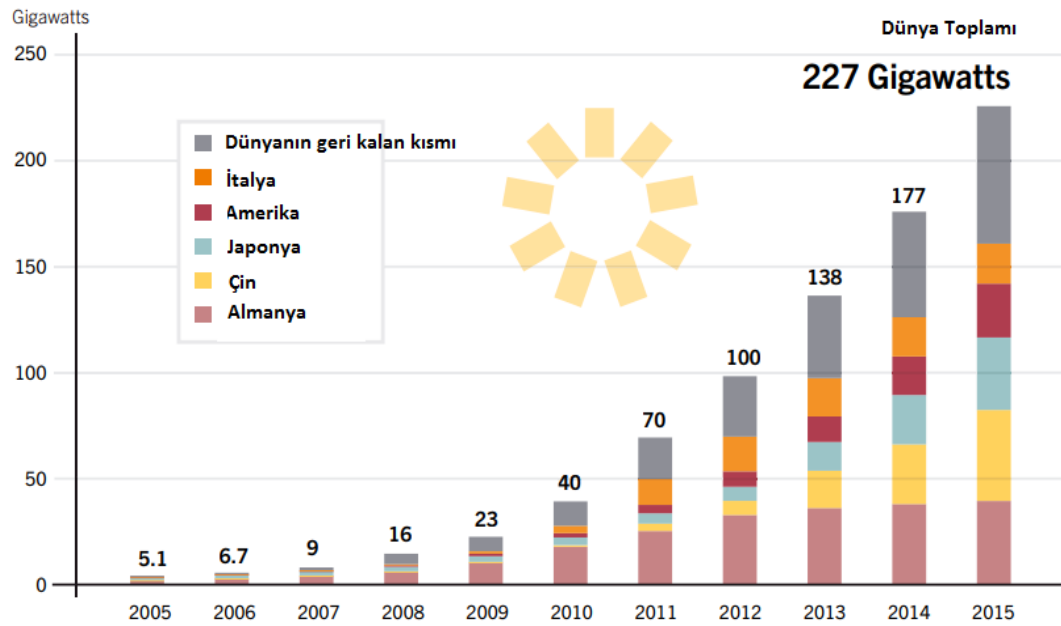
1. GİRİŞ

Dünyamızda en temel ihtiyaçların başında enerji gelmektedir ve bu ihtiyacın konforlu hayat koşullarının artmasına paralel olarak ileri teknoloji gereksiniminden dolayı daha da artacağı öngörülmektedir. Dünyamızdaki enerji kaynakları temelde yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak ikiye ayrılabilir. Yenilenemez enerji kaynakları şu şekilde sıralanabilir; kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisi ve biokütle enerjisidir. Dünyamızdaki doğalgaz, kömür gibi enerji kaynakları sınırlıdır ve belli bir süre sonra tükeneceği açıktır. Her ne kadar nükleer enerji çok verimli olmasına karşın, nükleer enerjideki güvenlik tartışmaları da nükleer enerji konusunda dünya kamuoyunda şüpheler barındırmaktadır. Ayrıca fosil yakıtları karbondioksit ortaya çıkarır bu ise küresel ısınma ile birlikte çevresel kirlilik ve iklim değişiklikleriyle sonuçlanır. Bu bizi kaçınılmaz olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Bu kaynakların en önemlilerinden biri güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin en temel parçası güneş panelleridir ve bu paneller ise fotovoltaik (PV) hücrelerinden oluşmaktadır. Uluslararası dünya yenilenebilir enerjiler toplantısı 2016 raporuna göre (RENEWABLES 2016 -GLOBAL STATUS REPORT (REN21)), 2015 yılında toplam dünya solar PV kapasitesi 227 GigaWatt olarak verilmiştir. 2015 yılında ise sadece toplamda tüm ülkeler 50 GigaWatt enerji elde edebilecek solar fotovoltaik yatırımı yaptılar. Bu ülkeler arasında Türkiye 2,2 GigaWatt solar PV yatırımı yaparken, Çin 16,1 GigaWatt, Malezya 0,7 GigaWatt güneş enerjisi yatırımı yaptılar (Sawin 2016). Şekil 1.1' de bu grafikler gösterilmiştir.

a)



b)



Şekil 1.1. a) 2005-2015 yılları arasında Dünya solar PV kapasitesi ve yıllık eklenen değerler b) Bölgelere ve ülkelere göre Dünya solar PV kapasitesi ve toplam değeri (Sawin 2016)

Bu rapordan anlaşıldığı üzere ülkemizde kapasitenin çok altında solar PV sistemlerine yatırım yapılmaktadır. Bundan dolayıdır ki bilim insanları olarak ülkemizde daha

yüksek verimli solar fotovoltaik güneş hücresi üretmemiz elzemdir. Bunun için öncelikle daha yüksek kalitede ince filmleri üretmemiz lazım ve sonrada çeşitli litografi yöntemleriyle solar hücresi üretme aşamasına gelinsin. Niçin ince filme gereksinim duyarız sorusu akla gelmektedir. İnce filmler yarıiletken aygıt teknolojisi için çok önemli yer teşkil etmektedir. 1900’lü yıllarda ince filmler dekorasyon için seramik ve cam üzerine kaplanıyordu. Yıllar içerisinde nanoteknolojinin bilim dünyasının ilgisini çekmesiyle birlikte, ince filmler sensör, diyot, transistor ve güneş pili aygıtlarının üretiminde kullanılmıştır. İnce film teknolojisiyle üretilen bu daha verimli aygıtlar endüstride de yaygın hale gelmiştir. Hacimli yapı ile ince filmin farkı, ince filmde seçilen alttaşın üzerine atom veya moleküllerin dizilimiyle ince bir tabakanın ortaya çıkmasıdır. Bu tür ince filmler, kuantum mekanik kuramlarıyla açıklanan hacimli yapılardan farklı fiziksel özelliklere sahip olurlar. Bu sayede araştırmacılar bu farklı özelliklerden yararlanarak aygıtlar tasarlamaya çalışmıştır ve bu türden çalışmalar halen sürmektedir. Bu tez çalışmamızda GaN ince filmler radyo frekans (RF) magnetron saçtırma tekniği ile üretilmiştir ve yapısal, optik ve morfolojik özellikleri araştırılmıştır. Konuyla alakalı uluslararası yayınlarda birçok çalışma mevcuttur.

Büyütülen III-V grubu yarıiletkenlerin en önemli özelliklerinden biri, geniş bant aralığına sahip yapılar olmasıdır. Bu yapılar direk bant aralığına sahiptir ve *InGaN*, *InAlN*, *AlGaInN* gibi üçlü ve dördü bileşiklerin enerji bant aralıkları 0,7 eV den 6,2 eV’ye kadar elektromanyetik spektrumun çok geniş bir aralığını tarar. Örneğin; *InN* enerji bant Aralığı 0,7 eV iken, GaN için bu değer 3,4 eV dir, *AlN* için ise 6,2 eV dir (Vurgaftman 2001). GaN, genellikle wurtzite kristal yapısı şeklinde kristalleşebilen geniş bant aralığına sahip (3,4 eV) yarıiletken malzemedir. Bu tür büyütme hegzagonal ya da $\alpha - GaN$ da denmektedir. Fakat bazı özel koşullarda GaN çinko sülfür yapı yapısında da büyütülebilir ve bu tür malzeme $\beta - GaN$ denilmekte ve altlık olarak *ZnS* kullanılmaktadır (Vurgaftman 2001). GaN malzemesi son yıllarda LED’ler, lazerler gibi optoelektronik aygıtların üretilmesinde kullanılmaktadır (Recent Progress in GaN-Based Light-Emitting Diodes)(By Haiqiang Jia 2009). Ayrıca GaN tabanlı LED’lerin çıkış ışık gücünü arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmış ve bu yönde ilerlemeler de kaydedilmiştir (Se-Yeon Jung 2012). *Ni - Au* kontakların $p - GaN$

yapısına etkileri araştırılarak bu durumdaki GaN yapısı incelenmiştir. Bu araştırmada, GaN (0001) yüzey morfolojisine bağlı olarak 2 tip kontak yapısı ortaya çıkabilir. Birincisi, parmak şeklinde (finger-like) yüzeyden elde edilen görelî olarak daha az özdirence sahip kontak. İkincisi ise çizgisel kusurlar (dislokasyonlar) içeren tepe kayalarla kaplı yüksek özdirence sahip kontaklardır. Bu sonuçlar SEM, AFM, XPS, TEM ölçümleri kullanılarak gösterilmiştir (Julita Smalc-Koziorowska 2010). GaN malzemesinin büyütülmesi çalışmaları, çeşitli teknikler kullanılarak yapılmıştır ve bu sistemlerden biri kullanışlı bir teknik olan Saçtırma tekniğidir. Radyo Frekans Magnetron Saçtırma Tekniğı kullanılarak GaN ince filmlerinin büyütülmesi ile ilgili bilimsel yayınlarda birçok çalışma mevcuttur. Düşük enerjili Ar^+ iyon bombardımanı altında saçtırma ile büyütülen wurtzite GaN ($w - GaN$) ve çinko sülfür yapı GaN ($z - GaN$) yüzeyleri incelenmiştir. Bu araştırmada statik moleküler dinamik benzetim kullanılmış ve iyon yansıması ve fiziksel saçtırma mekanizmasının, numunenin yapısına etkisi araştırılmıştır. Bulunan bulgular sonucunda ise iyon yansıma olasılığının, $w - GaN$ fazında ve θ_i geliş açısının artmasıyla azaldığı ortaya konulmuştur. $w - GaN$ ve $z - GaN$ malzemelerinin yüzeyinden maksimum saçtırmanın $\theta_i = 45^\circ$ geliş açısında olduğu bulunmuştur. %87 den %100 saçılan atom oranından dolayı, atomik nitrojen saçtırmanın tercih edilmesi gerektiğı değerlendirilmiş (Chabert 2010). GaN malzemesi birçok yönden araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bunlardan birisi bu malzemeyi kullanarak $InGaN$ aygıtını diyot olarak üretmeye çalışmak ve bunun fiziksel parametrelerine bakmaktır. Yapılan bir araştırmada, RF saçtırma metodu kullanılarak $Si(100)$ altlığının üzerine Mg ile katkılanmış $In_xGa_{1-x}N$ ($x = 0,025, 0,05, 0,075$ ve $0,1$) filmi büyütülmüş. Bu çalışma, saçtırma metodu kullanılarak büyütülen ilk $p - InGaN$ film olacaktır. Ayrıca RF saçtırma metoduyla Mg ile katkılanmış $p - InGaN / n - GaN$ yani $p - n$ diyodu araştırmacılar tarafından üretilmiştir. Malzemelerde yüksek elektron hareketliğı ve yüksek elektron iletkenliğı bulunmuştur (Kuo 2015b). Diğer bir çalışmada, Mg katkılanmış $InGaN$ filmi $Si(100)$ altlığı üzerine RF saçtırma metoduyla büyütülmüş ve Mg katkısının aygıt performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Düşük maliyetli ve çevre dostu $p - n$ diyotlarının üretilmesi için $p - InGaN$ filminin başarılı şekilde üretilmesi gerekliliğı vurgulanmıştır (Kuo 2015a). GaN malzemesinin opto-elektronik aygıtlarda kullanılması bu malzemenin popüler olmasını

sağlamış ve malzemenin yapısal, elektronik özelliklerinin araştırılmasını tetiklemiştir. Bu tür bir çalışmada, wurtzite GaN malzemesinin saf galyuma göre X ışını yayınlama ve soğurma spektrumlarına bakılarak, wurtzite GaN malzemesinin kimyasal bağları ve elektronik yapısı araştırılmış. Alınan ölçümler, yoğunluk fonksiyon teorisi (DFT) kullanılarak hesaplanıp yorumlanmıştır (Magnuson 2010). Bir başka çalışmada, karışım film büyütülmüş ve ortam gazının etkileri araştırılmış. $ZnO:GaN$ karışım filmi RF Saçtırma Metoduyla Ar gazı ve karışım O_2 , N_2 ortam gazında incelenmiştir. Ar ortam gazında bant aralığı enerjisi daralmazken, karışım O_2 , N_2 ortam gazında büyütme yapıldığında bant aralığı enerjisinin azaldığı ve kristalleşmenin arttığı bulunmuştur. Sonuç olarak, karışım $ZnO:GaN(O_2/N_2)$ filminin fotoakım değerlerinin arttığı bulunmuş ve bu sayede solar etkiyle hidrojen üretiminin yapılabilceği gösterilmiştir (Shet 2013). Başka bir çalışmada, paladyum (Pd) hedef kullanılarak, çekirdek kabuklu nano teller üretilmiş ve ısısal tavlama etkileri araştırılmıştır. Isısal tavlama ile üretilen nano tellerin yüzeyleri pürüzlü, küme tipi yapılanmalar oluşturduğu gözlenmiştir. XRD, yüksek çözünürlüklü geçirgen elektron mikroskobu (HR-TEM) ve belirli alanlar için elektron kırınımı ölçümleri alınmıştır ve kabuk tabakalarının Ga_2Pd_5 fazı ihtiva ettiği bulunmuştur (Kim 2010). Ayrıca, GaN/Cu çekirdek kabuk nano teller de üretilmiş ve bunların tavlama fiziksel özelliklerine etkisi çalışılmıştır. Isısal tavlamanın, Cu kabuk tabakalarından oluşan kümelenme tipi yapılanmaların yığılmasından dolayı, hetero nano tellerin yüzey pürüzlülüğünü azalttığı görülmüş. XRD ölçümleri, 800 °C deki ısısal tavlamalarda Cu_3O_4 fazının oluştuğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, çekirdek GaN nanoteller 5 K’de zayıf ferromanyetik özellik göstermiş ve mıknatıslığının giderme kapasitesi Cu saçtırma ile arttığı gözlenmiştir (Kim 2010). GaN malzemesi ile nano adacıklar üretme ve bunların fiziksel özelliklerinin incelenmesi son yılların araştırma konularından biri olmuştur. Altın ile kaplanmış $LiGaO_2$ (010) altlığının üzerine tek kristal kaplama ile üçgen şeklinde GaN nano adacıklar başarılı şekilde büyütülmüştür. Oda sıcaklığında şiddetli ultraviyole eksiton piki, sentezlenen GaN nano adacıkların yüksek optiksel kaliteye sahip olduğunu göstermiştir. Bu sayede nano malzeme Galyum Nitrürlerin aygıt uygulamalarında kullanılabilirliği vurgulanmıştır (Chen 2014). İnorganik aygıtların yerini organik aygıtların alabileceği fikri bilim insanlarının bu yönde çalışmasını sağlamıştır. Bu tür çalışmalara bir örnek

olarak, $MEH - PPV / n - GaN$ (0001) heteroeklem aygıt üretilmesi ve karakterize edilmesi verilmiştir. $n - GaN$ (0001) üzerine spin kaplama metodu kullanılarak $MEH - PPV$ ince filmi kaplanmış ve $MEH - PPV / n - GaN$ (0001) heteroeklem aygıt üretilmiştir. Buradaki $MEH - PPV$, *Poly[2-methoxy-5-(2-ethyl)hexoxy-1,4-phenylenevinylene]* formülüne sahip organik bir malzemedir. Akım voltaj karaktersitliği (I-V), AFM, optiksel ölçümleri alınarak fiziksel özelliklerine bakılmıştır. Sonuçta, $n - GaN$ (0001) üzerine büyütülen, $MEH - PPV$ organik filmin yüksek kalite Shottky diyod özelliklerine sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır (Soylu 2012). GaN çalışmalarına baktığımızda nanotel üretimi de karşımıza çıkmaktadır. Plantinyum (*Pt*) kabuk ile kaplı GaN nanoteller saçtırma metodu ile üretilmiştir ve tavlama özelliklerine bakılmıştır. Bu çalışma 2 aşamada yapılmıştır. Birincisi, silisyum alttaş üzerine kaplanmış GaN nanoteller hazırlanmıştır. İkincisi ise dakikada 4,5 nm yığılma hızında *Pt* kabuk tabakalarının yığılması sağlanmıştır. İzleyen işlem ise ısısal tavlama (Yang 2010). GaN malzemesinin aygıt uygulamalarının bir çok yararı vardır. Bunlardan birisi nükleer reaktör sistemindeki hidrojen detektör sistemidir. Acil durumlarda bu detektör çok önemlidir. Yapılan bir çalışmada, GaN nanotüp malzemesi üretilmiştir. Bu malzemenin oda sıcaklığında hidrojeni detekte ettiği gözlenmiştir. Bu çalışmada düşük aktivasyon enerjisine sahip GaN nanotüp üretimi başarılmıştır. Bu sayede oda sıcaklığında hidrojenin detekte edilmesi ve bunun düşük güç uygulamaları için yararı vurgulanmıştır. Wurtzite tipi GaN nanotüpler kimyasal buharlaştırma tekniği ile üretilmekte ve dağıtılan *Pt* nano kümelenmiş malzeme katalizör etkisi göstermektedir. Diğer GaN sistemleri ile karşılaştırıldığında bu $wz - GaN$ nanotüpler hidrojen detektesi açısından daha düşük aktivasyon enerjisi göstermektedir (Sahoo 2013). GaN malzemesi kullanılarak çeşitli aygıtları fiziksel özellikler açısından daha verimli yapmak mümkün olabilmektedir. Bunlardan biri, $TiN/AlO/GaN$ metal oksit yarıiletkenlerin O_2/Ar gazında reaktif saçtırma metodu ile elde edilmiş olmasıdır. Yığılan *AlO* filmi, en iyi dielektrik davranışı göstermiştir. Burada üretilen aygıt hetero yapıli alan etkili transistördür ve 600° C de 1 dakika tavlanan bu metal oksit yarıiletken yapının, daha küçük histerezis ve ters sızıntı akımı gösterdiği belirlenmiştir (Li 2015). GaN malzemesinin aşındırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü analizleri, malzemenin farklı tekniklerdeki fiziksel davranışını betimlemek açısından yararlı olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada, MOCVD ile büyütülmüş olan

GaN tabakasının Cl_2/Ar bazlı endüktif eşleşmiş plazma aşındırması, (Inductively coupled plasma (ICP)) fotoresist maske kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada seçilen bazı platoların aşınması incelenerek, aşınma oranının ve yüzeyin pürüzlülüğünün büyütme parametreleri ile ilişkisine bakılmıştır. Ayrıca Ga zengin yüzeyin hangi şartlarda arttırılacağı da analiz edilmiştir. (Rawala 2012). Büyütme metotlarının $AlGaN/GaN$ bazlı yüksek elektron hareketlilik transistörde GaN başlık tabakalarının özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Kullanılan büyütme metotları, moleküler demet epitaksi (MBE) ve metal organik buhar fiziksel epitaksidir (MOVPE). GaN tabaka kalınlıkları, büyütme metotlarına göre, X ışını foto elektron spektroskopisi (XPS) ve ikincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS) ile bulunmuştur (Gutt 2011). GaN malzemesi ile ZnO malzemesi, $n - ZnO/n - GaN$ (0001) izotip heteroeklem yapmak için kullanılmıştır. Üretilen aygıtın elektriksel ve optik özelliklerine bakılmış ve aygıtın kusurlarının, uzay yükü bölgesi ile iletim mekanizması özelliklerini değiştirdiği bulunmuştur (Soylu 2014). GaN ince filmin fiziksel özellikleri, büyütme metoduna göre çeşitlilik gösterir ve metotlar kusur yoğunluğu gibi aygıtlar için çok önemli bir parametreyi de önemli ölçüde etkiler. Yapılan bir çalışmada, Al_2O_3 altlığının üzerine direk olarak GaN büyümesi yüksek güç puls reaktif magnetron saçtırma (HiPIMS) kullanılarak yapılmıştır. İki tane domain elde edilmiş, bir tanesi yüksek noktasal kusur yoğunluğuna sahipken, diğeri ise daha az noktasal kusur yoğunluğuna sahip bölge olarak bulunmuştur. Çalışma aygıt uygulamaları için son derece önemlidir. Çünkü kaliteli GaN malzemesi üretme ve kusuru kontrol etme noktasında hangi metotların nasıl kullanılacağı ile ilgili bilgi vermektedir (Junaid 2011). Alkol sensörleri, günlük yaşamımızda kazaları azaltma ve diğer güvenlik kontrolleri açısından çok yararlı aygıtlardır. Bu tür aygıtların üretilmesinde GaN nano teller çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu tür bir çalışmaya, *hibrit GaN(nano tel) / SnO₂(nano kristal)* aygıtının üretilmesi örnek olarak verilebilir. Üretilen bu aygıt, oda sıcaklığında çeşitli miktardaki alkolü detekte edebilmekte ve alkol sensörü olarak kullanılmaktadır. Bu tür aygıtlar gelecekte laboratuvar güvenliğinden tutun da şoför denetimine kadar birçok alanda kullanılabilecektir (Bajpai 2012). GaN bazlı ultraviyole ışık yayan diyotların (LED) çıkış gücünü arttırmaya yönelik çalışmalar, araştırmacılar tarafından yapılmaya çalışılmıştır. Saçtırma tekniği ile elde edilen AlN çekirdek katman (nucleation layer) ile oluşturulan GaN bazlı LED'lerin elektronik ve optik özelliklerine bakılmıştır. HRXRD

ölçümleri, saçırma tekniği ile elde edilen AlN 'nın, GaN bazlı ultraviyole LED'lerin kristal kalitesini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca LED'in ışık çıkış gücünün %30 oranında arttırıldığı gösterilmiştir (Chiu 2015). Malzeme üretiminde GaN çeşitli nedenlerle altlık olarak da kullanılmaktadır. ZnO nano çubuklar, ince film GaN altlığının üzerine kimyasal banyo çökeltme (CBD) yöntemiyle büyütülmektedir. Burada GaN altlığının kullanılmasının sebeplerinden biri, GaN yüzeyinin çekirdeklenme işlemini engelleyen yüzey difüzyonuna sahip olması buda çekirdeklenme merkezlerinin yoğunluğunu azaltmasıdır. Ayrıca, kusurların kontrol edilebilmesi avantajından dolayı tercih edilmiştir (Nandi 2014). İyon demet destekli MBE tekniğiyle tek çekirdek büyütülen ince film GaN'ın kusur analizi yapıldığı çalışmalar da mevcuttur. Külçe katman kullanmaksızın parlatılmış $6H - SiC(0001)$ altlığının üzerine iyon demet destekli MBE tekniğiyle (IBA-MBE) ince film GaN büyütülmüş ve yapısal kusurlara bakılmıştır. Sınırlardaki ve bölgelerdeki istif uyumsuzluğu kusurları bulunmuş ve bunların nedenleri rapor edilmiştir (Poppitz 2015). Başka bir çalışmada, florine tin oksit (FTO) altlığının üzerine radyo frekans magnetron saçırma (RFMS) metoduyla ZnO ve karışım $GaN (ZnO:GaN)$ ince filmleri büyütülmüştür. Karışım $GaN (ZnO:GaN)$ ince filmi ZnO filmine göre daha kaliteli kristal özellik gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, karışım $GaN (ZnO:GaN)$ ince filmi ZnO 'ya göre daha yüksek verimli fotoakım özellikleri gösterdiği bulunmuştur. Sonuçta karışım yaklaşımının, malzemenin foto elektrokimyasal performansını arttırdığı vurgulanmıştır (Sheta 2013). GaN tabanlı ışık yayan diyotların performansını arttırmaya yönelik çalışmada, nano tarak şekilli safir altlık üzerine birçok yöntem sırasıyla kullanılarak aygıt elde edilmiştir. Sonuçta, sızıntı akımları azaltılmış ve çıkış ışık gücü arttırılmıştır. Elektriksel ve optik özellikler, yüksek performanslı bu tür aygıtların üretilmesinin sağlanabileceğini göstermiştir (Liou 2014). Aygıt uygulamaları için yapılan başka bir çalışmada, GaN mikro mekanik rezonatör aygıtı üretilmiştir. Metal kafes elektrotların üzerine kalın GaN tabakası büyütülmüştür. Litografi ve aşındırma teknikleri de kullanılarak yüksek performanslı GaN mikro mekanik rezonatör elde edilmiştir (Ansari 2015). Başka bir aygıt çalışması ise gaz sensörleri ile alakalıdır. Yapılan bu çalışmada, GaN nano teller ve $GaN - çekirdek /WO_3 - kabuk$ nano teller Radyo Frekans magnetron saçırma tekniği ile sentezlenmiştir. Üretilen bu aygıtın, metal oksit bir boyutlu nano yapıları aygıtlardan daha

yüksek bir verime sahip olduğu gösterilmiştir (Park 2014). Tavlama sıcaklığının, Puls Lazer Biriktirme (Pulsed Laser Deposition (PLD)) tekniğiyle büyütülen GaN ince filmine etkisi üç aşamada araştırılmıştır. Bunlar şu şekildedir: 900°C üzerindeki tavlamalarda kaya tuzu fazındaki GaN filminin geçiş fazı tamamlanır. Sonra, tavlama sıcaklığı 900°C-1000°C arasında olduğunda, kalıcı gerilme (residual stress) sıkıştıran gerilimden çekme gerilim durumuna geçer. Eğer tavlama sıcaklığı 1000°C aşması durumunda, GaN filmi ısısal olarak ayrışmaya başlayacağı sonucuna ulaşılmıştır (Cheng 2015). Yüksek elektron hareketlilikli transistor (HEMT) olan *InAlGa*N/*GaN* malzemesinin ultra ince *SiN* ile yüzey pasife edilerek yapıldığında aygıt performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Tekrardan soğutulduğunda, aygıtın karakteristiğinde bozulma meydana gelmeden, çok iyi malzeme kalitesi gösterdiği bulunmuştur. Bu sayede, GaN tabanlı HEMT aygıtların yüzey pasife edilmek suretiyle yüksek performansta olabileceği gösterilmekle beraber, yeni aygıt tasarımlarının yolu açılmıştır (Alexewicz 2013). Başka bir çalışmada, elektrokimyasal aşındırma (ECE) ve arka taraf elektrokimyasal aşındırma (PECE) birleştirilerek gözenekli GaN şablonlar oluşturulmuş ve bu yapının üstüne GaN filmi ve *InGa*N/*GaN* çoklu kuantum kuyu ışık yayan diyot (MQW-LED) yapıları büyütülmüştür. Bu malzemelerin yapısal, optik, elektriksel özelliklerine bakılarak, aynı şartlarda fakat PECE ve ECE büyütme metodunun olmadığı koşullarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak PECE ve ECE metodlarının, gerilimler, çatlama gibi kusurları azalttığı ve bu sayede malzemelerin kuantum verimliliğinin arttığı, yani ışık yayan diyotların çıkış ışık verimliliğinin arttığı gösterilmiştir (Jang 2014). Buna benzer bir *InGa*N/*GaN* çoklu kuantum kuyu (MQW-LED) aygıtı çalışmasında, tavlama etkisinin aygıt verimliliğine etkisi araştırılmıştır. Aygıt saf N_2 ortam gazında 800 °C de ve saf O_2 ortam gazında 500 °C de tavlansmıştır. N_2 tavlaması ile kıyaslandığında O_2 tavlaması LED in ışımsal verimliliğini, ileri gerilimini, verimliliğini arttırdığı bulunmuştur. Sonuç olarak ısısal O_2 tavlamasının, *InGa*N/*GaN* çoklu kuantum kuyu ışık yayan diyotların (MQW-LED) elektriksel ve optik performansını arttırdığı vurgulanmıştır (Sun 2014). Bu tür aygıtların kimyasal bileşiminin bilinmesi önemlidir. *InGa*N/*GaN* çoklu kuantum kuyu (MQW) yapısının kimyasal bileşimine ve ısıl kararlılığına XPS tekniği ile bakılmıştır. *In* ve *Al*'in numune yüzeyine doğru içeri difüzyonu, gelişimi gözlenmiştir. Bu sayede derinliğe bağlı

dağılım malzeme katmanları için belirlenmiştir. Sonuç olarak, en ideal büyüme parametreleri bu çalışma sayesinde belirlenebileceği vurgulanmıştır (Lisowski 2014). Doğru akım magnetron saçtırma (DCMS) tek çekirdek büyütmesinde, büyüme şekli ile büyüme stres gelişimi arasındaki ilişki araştırmaların konusu haline gelmiştir. GaN (0001) filminin Al_2O_3 (0001) altlığının üzerine doğru akım magnetron saçtırma ile büyütülürken gerçek zamanlı stres gelişimi ölçümleri alınmıştır. Gözlenen stres gelişimi ve büyüme şekli, DCMS ile büyütülürken yüksek yüzey hareketliliği açıklamıştır (Junaid 2014). Saçtırma büyütme metodundaki ortam gazının GaN malzemesinin yapısına etkisi de araştırma konularından biridir. Yapılan bir çalışmada, radyo frekans saçtırma ile büyütülen GaN filmini azot/hidrojen karışım ortam ve sadece azot ortam gazındaki yapısına bakılmıştır. Sonuç olarak, 0,53 *Pascal* değerinden daha düşük basınçlarda azot ortam gazında radyo frekans saçtırma ile büyütülen GaN yapısının polikristal özellik gösterdiği ve 1,07 *Pascal* ve üstündeki basınçlarda amorf özellik gösterdiği bulunmuştur. Diğer yandan, azot/hidrojen karışım ortam gazı durumunda radyo frekans saçtırma ile büyütülen GaN yapısının amorf özellik sergilediği görülmüştür (Miyazaki 2005). Yapısal analiz çalışmasına örnek olarak, radyo frekans plazma destekli moleküler demet tek çekirdek kaplama (RFPA-MBE) ile büyütülen nano duvar ağı morfolojiye sahip GaN malzemesinin XPS tekniği ile elektronik yapısındaki değişime bakılan çalışma verilebilmektedir. Sonuç olarak, bu yapılardaki yüksek yayılım, yapının yüksek bağlanma gücünü yansıttığı vurgulanmıştır (Thakur 2015). Gaz basıncının büyütülen GaN ince filminin yapısal özelliklerine etkisi, araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu çalışmada, Si (100) altlığının üzerine, GaN ince filmi radyo frekans magnetron saçtırma metodu kullanılarak büyütülmüş ve saf N_2 gazının basıncının, büyütülen ince filmin yapısına etkileri araştırılmıştır. Bulunan sonuç ise; N_2 gazının basıncı 50 *mTorr* dan 7 *mTorr*'a düşürüldüğünde, GaN filminin kristal yapısı, wurtzite yapıdan çinko sülfür yapısına dönüştüğü gözlenmiştir. Bu yapı değişiminin, mikro yapısal değişim, yüzey topolojisi değişimi, GaN filmin iç stres değişimi ile kuvvetli ilişkili olduğu ileri sürülmüştür. Sonuçta; N_2 gaz basıncının, saçtırma ile büyütülen GaN malzemesinin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde can alıcı rol oynadığı vurgulanmıştır (Cho 2014). Kullanılan altlığın özelliklerinin, büyütülen GaN malzemesinin yapısına etkileri son yıllardaki çalışmalarda yer almıştır.

Bu çalışmaların birinde, gözenekli Si altlığın üzerine radyo frekans saçtırma metodu ile direk olarak GaN büyütülmüştür. XRD ölçümleri; gözenekli Si altlığın büyük örgü uyumsuzluklarını minimuma indirdiğinden dolayı, GaN tabakasının kristal özelliklerini arttırdığını göstermiştir. Bu yarıiletken temelli nano aygıtlarda çok daha fazla keşiflere yol açacağı vurgulanmıştır (M.E.A. Samsudin 2014). Büyütme sıcaklığı, kaliteli film büyütülmesi açısından çok önemli bir parametredir. Büyütme sıcaklığı ile ilgili bir çalışmada, *AlN/Si* altlığın üzerine *Cu* ile katkılanmış *p - tipi GaN* ince filmi belli büyütme sıcaklıklarında (100°C – 400°C) radyo frekans saçtırma metodu ile büyütülmüş ve büyütme sıcaklığı film kalitesi ilişkisine bakılmıştır (Kidus Yohannes 2015). Başka bir çalışmada, GaN (0001) tabakası *Al₂O₃* altlığının üzerine sıvı *Ga* saçtırma hedefi kullanılarak reaktif DC magnetron saçtırma tek çekirdek kaplama (DCMSE) tekniği ile direk olarak büyütülmüştür. Yapılan ölçümlerde optik ve yapısal olarak kaliteli malzeme elde edilmiştir. Sonuç olarak, DCMSE metodu üretilmiş GaN tabakası yüksek optik ve yapısal özelliklere sahip olduğu ve bu tarz yüksek performanslı aygıtların üretiminde DCMSE metodunun hiçbir ara tabaka kullanmaksızın iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir (C.-L. H. M. Junaid 2011). Chao-Wei Ting ve arkadaşları *Sn – GaN* ince filminin Radyo Frekans Saçtırma (RF-sputter) ve reaktif saçtırma yoluyla *Ar* ve *N₂* gazı altında tek seramik hedefi kullanılarak ürettiklerini bildirdi. $\frac{Sn}{(Sn + Ga)}$ molar oranını, $x = 0, 0,03, 0,07$ ve $0,1$ olduğu *Sn – GaN* ince filminin kristal yapısını wurtzite olarak bulmuşlardır. *Sn* içeriğine bağlı olarak elektriksel, optik ve yapısal özellikler araştırılmıştır ve bu özelliklerin *Sn* değerinin değiştirilmesiyle değiştiği gözlenmiştir (Ting *et al.* 2017). Wu ve arkadaşları GaN nano çubukları RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak Si (111) alttaş üzerinde üretmişlerdir. Malzemeyi karakterize etmek için, yüksek çözünürlüklü geçirgenlik elektron mikroskobu (HRTEM), X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve Taramalı Elektron mikroskobunu (SEM) kullanmışlardır. Ölçüm analizleri GaN nano çubukların yapısının tekli kristal altıgen wurzite yapısında ve bunların çapları 100 nm ila 400 nm arasında olduğunu göstermiştir (Wu *et al.* 2006). Kim ve arkadaşları GaN filmini, RF magnetron saçtırma tekniği kullanılarak *ZnO* alttaş üzerine büyütmüşler ve özelliklerini incelemişlerdir. GaN film yapısının *ZnO* kalınlığıyla etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, Atomik

Kuvvet Mikroskopisi (AFM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ölçüm sonuçlarını yorumlayarak analizini yapmışlardır (Kim and Kim 2004). Samsudin ve arkadaşları gözenekli *Si* alttaş üzerine RF magnetron saçtırma ile GaN büyütmüş ve büyütülen filmin kalitesi üzerine gözenekli *Si* 'nin etkisini araştırmışlardır. (Samsudin 2014). Bir diğer çalışmada, Kikuma ve arkadaşları, GaN filmini RF düzlemsel magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak kuartz alttaş üzerine büyütmüşler ve sonuçlarını tartışmışlardır. Hedefin ve kafesin arasındaki mesafenin 30 mm olduğu durumun kristalin en iyi yerleşimi bulgusuna varmışlardır (Kikuma *et al.* 2002). Li ve arkadaşları Radyo Frekans Saçtırma tekniği ile *p - CuS/n - GaN* hetero yapısını üretmişlerdir. Tavlama sıcaklığının filmin kalitesinin değişimine etkisi incelenmiş, diyotun karakteristik parametrelerinde iyileşme belirlenmiştir. Elde edilen diyotun açılma voltajı (turn-on) 1,2 V olarak ölçülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), Raman Spektroskopisi ölçümleri ile aygıtı karakterize etmişlerdir (Li *et al.* 2016).

Yukarıda verilen çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, fotovoltaik güneş hücrelerinin üretiminde karşılaşılan en önemli sorunlar şunlardır:

- Malzeme edinme ve üretme maliyetlerinin yüksek olması
- Daha yüksek verimliliğe sahip hücrelerin üretimi

Araştırmamızda bu sorunlara karşılık şu şekilde çözümlemelere varıldı:

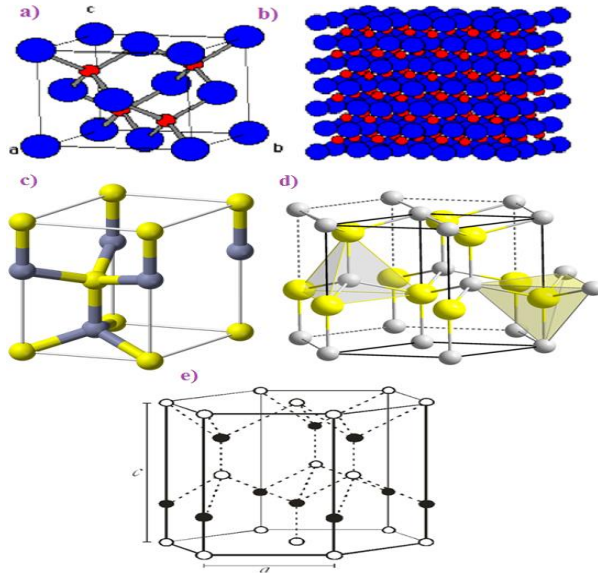
- GaN film büyütmeleleri RF magnetron saçtırma yöntemi ile yapıldı. Bunun nedeni bu tekniğin diğer bazı tekniklere (MBE) göre daha az masraflı olmasıdır.
- Kaliteli kristal yapıya sahip GaN ince filmler üretilmeye çalışıldı. Ayrıca bu tezde yer almamasına rağmen, bu yapıların üzerine başka yapılar büyütülerek daha da verimli hale getirilmeye çalışıldı.

Araştırmanın temel amacı, farklı büyütme koşullarının, Radyo Frekans (RF) Magnetron Saçtırma tekniği ile büyütülen GaN ince filmlerinin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkisini detaylı bir şekilde incelemektir. Ayrıca, farklı argon gaz akışı, farklı azot gaz akışı ve farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filmlerinin uygulanan büyütme koşullarındaki en uygun koşullar belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra farklı alttaşlar üzerine büyütme yapılmış ve alttaşın malzeme kalitesine etkisi de incelenmiştir. Yapılan büyütmelemlerden sonra, morfolojik özellikleri incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), yapısal özellikleri incelemek için X ışını kırınımı (XRD) ölçümleri, optik özellikleri incelemek için yansıma, soğurma ölçümleri (UV/Vis) ve Raman spektroskopisi ölçümleri alınmış ve analiz edilmiştir. Gelecekteki projemiz, elde edilen filmler üzerine farklı yapılar büyütme ve çeşitli litografi, kontak aşamaları da uygulayarak güneş pili aygıt çalışmaları yapmaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. III-Nitrür Malzemelerinin Özellikleri

Periyodik tablonun 3 ve 5 gruplarından seçilerek oluşturulan yarıiletken malzemelere III – V grubu yarıiletkenler denmektedir. Bu tür yarıiletkenler III – Nitrür malzemeler olarak da bilinmektedir ve bu malzemelere örnek AlN , GaN , InN gibi yarıiletkenler verebilmektedir. III – V grubu yarıiletkenler, hem wurtzite hem de çinko sülfür (ZnS) hem de kaya tuzu ($NaCl$) kristal yapılarında kristalleşebilirler. Fakat yüksek kristal kalitesi ve kolay büyütme açısından wurtzite daha tercih edilen kristal yapıdır. Kristal yapıları hakkında temel bilgiler şu şekilde verilebilir: ZnS yapısında, her atomun karşıt türden dört atomla düzenlendiği iç içe girmiş örgülerdir. Bu yapılar sıkı paketlenmiş yapılardır. Wurtzite kristal yapısı ise, hegzagonal kübik yapı (hcp) kafes sistemindedir. Çinko sülfür, wurtzite ve GaN malzemesinin kristal yapıları Şekil 2.1’de aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.1. a) Çinko sülfür yapısının birim hücre şekli b) 3×3×3 kafes şekli c) Wurtzite kristal yapısının birim hücre şekli d) Wurtzite kristal yapı gösterimi e) GaN için Wurtzite yapısı. Beyaz atomlar polariteye bağlı olarak Ga ve N olabilirler (Sarı 2007).

ZnS kristal yapısı elmas yapısı ile aynı olduğu söylenebilir ancak, elmas yapıda tek tip atom kristal yapıyı oluştururken, ZnS yapıda iki tip atom kristal yapıyı oluşturmuştur. Yapının ilkel hücresinde 4 tane ZnS molekülü bulunur. Sanki bu kristal yapı iç içe girmiş iki yüzey merkezli kübik yapı (fcc) olarak görülebilir. Wurtzite yapısı, z-ekseninde birbirinden $3/8c$ kadar uzaklıkta bulunan, farklı atomlardan oluşmuş iç içe geçmiş iki sıkı paketlenmiş yapıdır. Z-ekseni boyunca kutuplaşma etkileri gözlenmektedir. III – Nitrür malzemeler, ikili, üçlü ve dörtlü bileşiklerden oluşabilir. Örnek Çizelge 2.1’de verilmiştir.

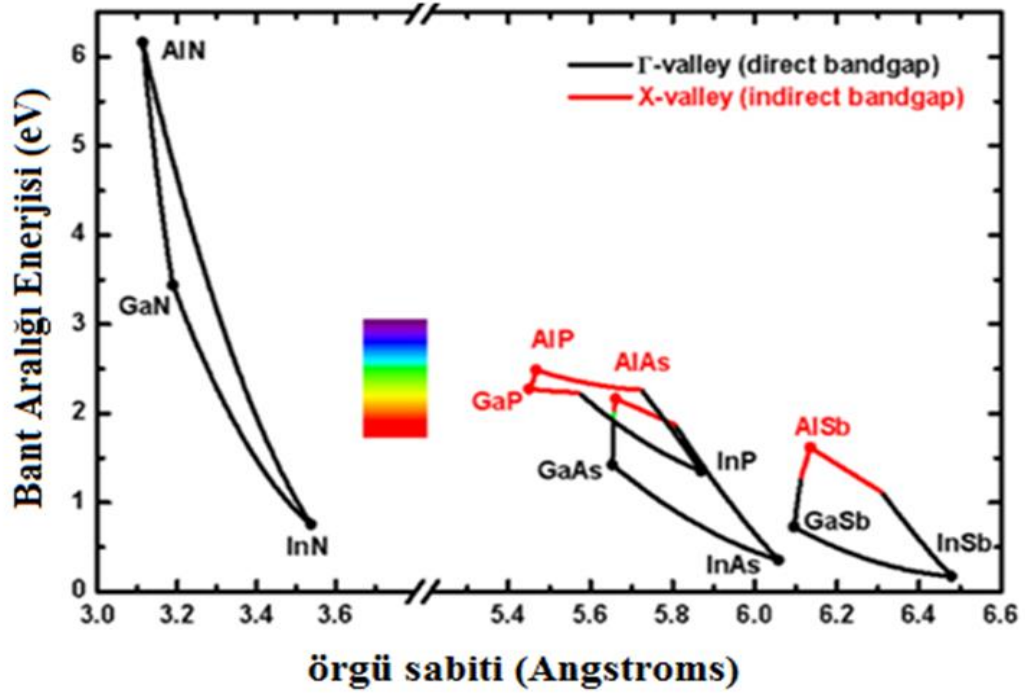
Çizelge 2.1. III-Nitrür malzemelerin ikili, üçlü ve dörtlü bileşiklerine örnekler

İkili Bileşikler	Üçlü bileşikler	Dört bileşikler
InSb	$Al_xGa_{1-x}As$	$Al_xGa_{1-x}As_{1-y}$
GaN	$Al_xIn_{1-x}As$	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$
AlSb	$Ga_xIn_{1-x}As$	$Ga_xIn_{1-x}P_ySb_{1-y}$
GaP	$InAs_xSb_{1-x}$	$Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$
InP	InP_xAs_{1-x}	$In(P_xAs_{1-x})_ySb_{1-y}$

Optik bant aralığı opto-elektronik aygıtların uygulamalarında önem arz etmektedir. III – Nitrür yarıiletken malzemelerin üçlü bileşiğinin $E_g(x)$ bant aralığı enerjisi aşağıda verilen bağıntı ile hesaplamak mümkündür.

$$E_g(x) = E_g(0) + bx + cx^2 \quad (2.1)$$

Bu formülde $E_g(0)$ bant aralığı enerjisi $x = 0$ değeri için geçerli olan enerjidir ve bu formülden eğrilik parametresi c değeri teorik olarak hesaplanabilmektedir. Örneğin; **$Al_xGa_{1-x}As$** üçlü bileşiği için $E_g(x) = 1,424 + 1,247x$ ve **$Al_xIn_{1-x}As$** bileşiği için ise $E_g(x) = 0,360 + 2,012x + 0,698x^2$ olarak verilmektedir. III – Nitrür grubuna sahip bazı malzemelerin örgü sabitine karşılık optik bant aralığı grafiği aşağıda verilmiştir.



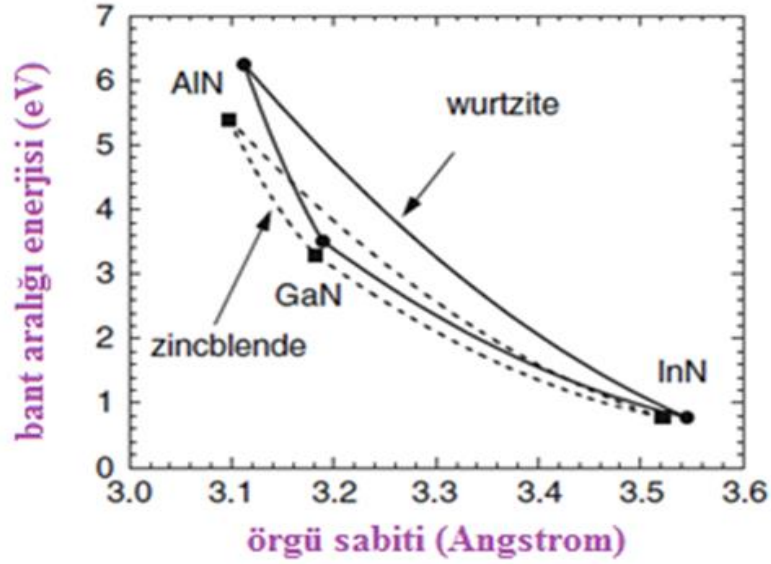
Şekil 2.2. III-Nitrür yarıiletken malzemelerin örgü sabitine karşılık bant aralığı enerjisi grafiği (Zhu 2013)

2.2. GaN Malzemesi

2.2.1. Temel fiziksel özellikleri

GaN malzemesi opto-elektronik aygıtlarda ve yüksek güç elektroniği aygıtlarında kullanılan bir malzeme olması nedeniyle popüler bir malzemedir. Bu uygulama alanlarından dolayı önemli olmaktadır ve bizimde kullanmamızın nedenidir. Bu bölümde araştırılan malzememizin yapısal, elastiki, optik ve elektronik özelliklerinden bahsedilecektir. GaN, wurtzite tipi kristal yapısına sahip olduğundan dolayı tek eksenli anizotropiye (uniaxial anisotropy) sahiptir. GaN malzemesi III – Nitrür bir malzemedir, direk bant aralığı enerjisine sahiptir ve bu bant aralığı enerjisi ultraviyole bölgeden kızılötesi bölgeyi kapsayan elektromanyetik spektrumda bulunur. Geniş bant aralığından dolayı kısa dalga boyu ışık yayan diyot (LED) ve yüksek güç aygıtları üretimi için uygun bir malzemedir. Aşağıdaki şekilde *GaN*, *AlN*, *InN* malzemeleri için

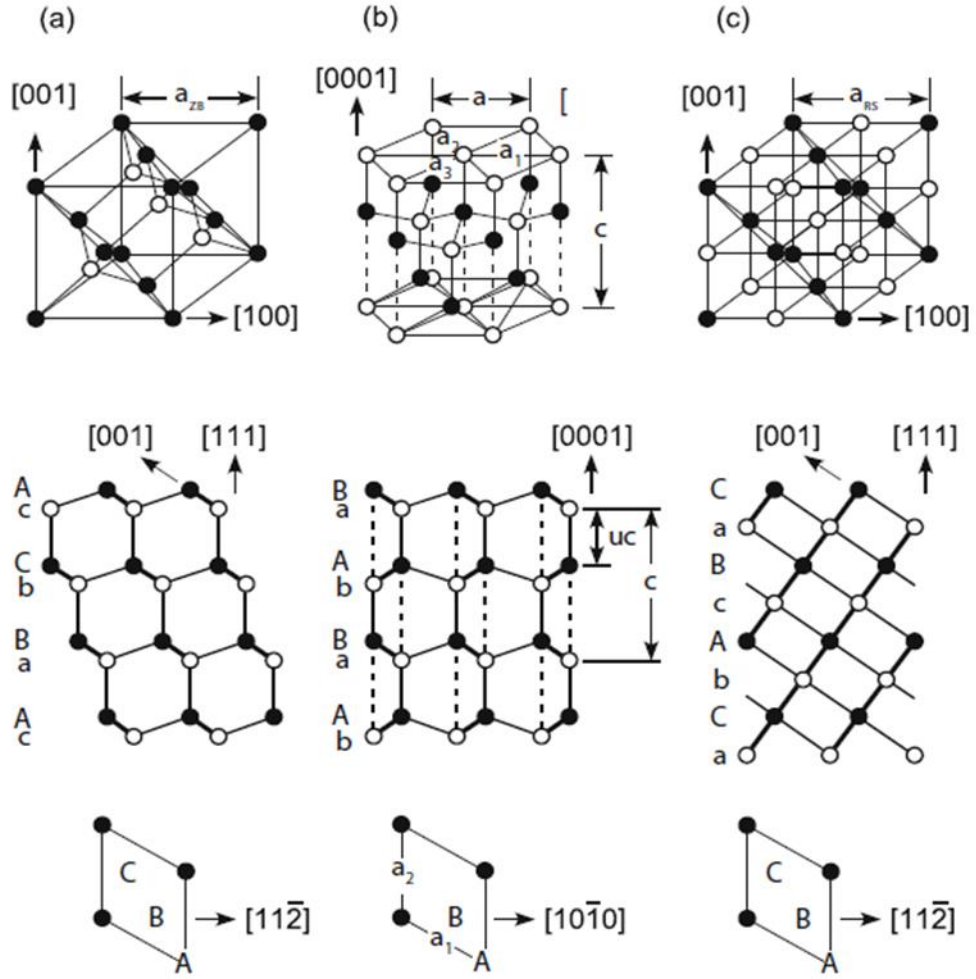
wurtzite ve çinko sülfür kristal yapılarında örgü parametresi a ile bant aralığı enerjisi ilişkisi gösteren grafik Şekil 2.2’de verilmiştir (Meyer 2003).



Şekil 2.2. GaN, AlN, InN malzemeleri için wurtzite ve çinko sülfür kristal yapılarında örgü parametresi a ile bant aralığı enerjisi ilişkisi (Vurgaftman 2001)

2.2.2. Yapısal özellikler

GaN'ın kristal yapısı, kübik çinko sülfür (ZB) yapısındakine benzer şekilde yakın komşu atom koordinatları tetrahedral olan, hegzagonal wurtzite (WZ) tipidir. WZ yapısı [0001] doğrultusunda boyunca AaBbAaBbAaBbAaBb... istiflenirler. Buna karşın ZB yapısı [111] doğrultusu boyunca AaBbCcAaBbCcAaBbCc... şeklinde istiflenmektedir. Şekil 2.3’de bunlar detaylı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. a) Çinko sülfür **b)** wurtzite **c)** kayatuzu (NaCl) yapılarının çeşitli düzlemler için gösterimi (Yao 2009)

WZ yapısı için örgü sabiti a ve c arasındaki ilişki $c/a = \sqrt{8/3} = 1,633$ ve $[0001]$ paralel olan bağların uzunluğu uc ile gösterilsin. Buradaki u iç parametre olarak adlandırılır ve değeri $u = 3/8 = 0,375$ olarak verilir. $[0001]$ doğrultusundaki katyon ve anyon atomları elektrostatik kuvvetle birbirlerini çekerler. Bu elektrostatik etkileşim GaN malzemesini daha kararlı yapmaktadır çünkü bu malzemedeki iyonlaşma daha büyüktür. Aslında c/a değeri yani 1,633 ideal bir değerdir ve gerçekte bu değer daha küçüktür. Ayrıca $A - a$ ve $B - b$ katmanlar arası, uzaklık bağ çiftlerinin açılı deformasyonundan ötürü çoğu zaman daha küçük olmaktadır. Bu tür yapısal deformasyonlar, kendiliğinden (spontane) polarizasyonlar ortaya çıkarmaktadır, katyon

[000 $\bar{1}$] ve anyon [0001] ideal yapılardan nispi yer değiştirmeler, buna örnek olarak verilebilmektedir. Çizelge 2.2’de bu değerler verilmektedir.

Çizelge 2.2. a, c (Å) ve u wurtzite yapısının, a_{ZB} (Å) çinko sülfür yapısının, a_{RS} (Å) kayatuzu örgü sabitini göstermektedir. GaN malzemesinin örgü sabitleri ile ilgili değerlerin gösterimi

	a	c	u	c/a	a_{ZB}	a_{RS}
GaN	3,189	5,185	0,376	1,626	4,50	

(Finger 1986; Morkoç 1994; Karzel 1996; Bernardini 1997; Park 1999; Limpijumrong 2001; Takeuchi 2002; Özgür *et al.* 2005;)

Katılarda ısı genleşme katsayısı önem arz eden bir parametredir çünkü malzemenin aygıt uygulamalarında, aygıtın sıcaklığa karşı boyutundaki değişimin hesaba katılması gerekir. Bu sayede aygıtın işlevi ve kullanılacağı alan ile ilgili bir karar verilir. Araştırmada kullanılan GaN malzemesinin *c* eksenine normal ve paralel olan sıcaklığa bağlı ısı genleşme katsayısını gösteren değerler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.3. T=300 ve 700 K⁰ için wurtzite tipi GaN malzemesinin ısı genleşme katsayıları

	T	$\alpha^\perp$	$\alpha^\parallel$
GaN	300	3,43	3,34
GaN	700	4,91	4,05

($\alpha^\perp$ [10⁻⁶ K⁻¹], c-eksenine normal olan ısı genleşme katsayısını ve $\alpha^\parallel$ [10⁻⁶ K⁻¹], c-eksenine paralel ısı genleşme katsayısını göstermektedir) (Takeuchi 2000)

2.2.3. Elastiki özellikler

Kullanılan malzemenin elastik özellikleri, malzemenin gerilim (stress) ve zorlanma (strain) parametreleri hakkında bilgi vermektedir ve özellikle aygıt uygulamaları açısından önemlidir. Wright ve arkadaşları ünlü Hooke yasasını temel alarak, wurtzite ve çinko sülfür yapısına sahip GaN kristallerinin sıfır olamayan ve bağımsız esneklik-sertlik katsayıları (c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{33} , c_{44} ve $c_{66} = (c_{11} - c_{12}) / 2$) aşağıda verilen matris yardımıyla hesaplamışlardır. Bu matriste, gerilim (stress) bileşeni olan $T_{\alpha\beta}$, uzama bileşeni olan $\epsilon_{\alpha\beta}$ ’nın lineer fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Burada x,y,z [2 $\bar{1}\bar{1}0$],

$[01\bar{1}0]$, $[0001]$ doğrultularına dik (ortogonal) olduğunu gösterir. 1,2,3,4,5,6 altlıkları ise xx, yy, zz, yz, zx, xy i göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} T_{XX} \\ T_{YY} \\ T_{ZZ} \\ T_{YZ} \\ T_{ZX} \\ T_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{XX} \\ \epsilon_{YY} \\ \epsilon_{ZZ} \\ \epsilon_{YZ} \\ \epsilon_{ZX} \\ \epsilon_{XY} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Çizelge 2.4. GaN malzemesinin wurtzite (WZ) ve çinko sülfür (ZB) yapıları için esneklik-sertlik (elastic stiffness coefficient) katsayıları (Polian 1996) (Wright1 1997)

	Yapı	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}
GaN	Wurtzite	390	145	106	398	105
GaN	Çinko sülfür	293	159			155

Kutuplaşma (polarizasyon) GaN malzemesinin opto-elektronik aygıt uygulamaları için son derece önemlidir. Çünkü polarizasyon sayesinde yapıda ekstra bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan sebebiyle optik bant aralığı değişmektedir. Optik bant aralığı değeri, opto- elektronik aygıtlar için can alıcı bir parametredir. Polarizasyon kontrolü sayesinde arzu edilen opto-elektronik aygıt tasarlamak mümkün olabilmektedir. Yapının kendisinden kaynaklanan polarizasyon kendiliğinden (spontane) polarizasyon olarak adlandırılırken, malzemenin üzerine başka bir yapı üretildiğindeki zordan dolayı oluşan polarizasyon, piezo polarizasyon olarak adlandırılmaktadır. Bernardini ve arkadaşları, Wurtzite (WZ) tipi GaN malzemesinin kendiliğinden (spontane) polarizasyon (P_{SP}) ve piezoelektrik modüllerini hesapladılar. WZ kristal yapısında c – eksenine paralel kendiliğinden (spontane) polarizasyon P_{SP} ile gösterilsin. Dış gerilme C/a ve u değerlerini değiştirir ve bu da piezo polarizasyon ortaya çıkarır. WZ tipi malzemelerin piezo elektrik katsayılarının bileşenleri e_{31} , e_{33} , e_{15} ile gösterilsin. Piezo polarizasyonun bileşenleri x, y, z şu şekilde verilmektedir.

$$P_x = e_{15}\epsilon_{zx} \quad (2.3)$$

$$P_Y = e_{15}\epsilon_{YZ} \quad (2.4)$$

$$P_Z = e_{31}(\epsilon_{XX} + \epsilon_{YY}) + e_{33}\epsilon_{ZZ} \quad (2.5)$$

P_x , P_y WZ yapısının simetrisini bozan kayma zorlanmasında ortaya çıkar. Eğer

$\epsilon_{\alpha\beta}$ parametresi, $T_{\alpha\beta}$ 'nin yerine geçtiğinde ve ϵ_{ij} de d_{ij} ile yer değiştirdiğinde

ϵ_{ij} 'ler aşağıdaki gibi elde edilirler;

$$\epsilon_{31} = d_{31}(c_{11} + c_{12}) + d_{33}c_{13} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_{33} = 2d_{31}c_{13} + d_{33}c_{33} \quad (2.7)$$

$$\epsilon_{15} = d_{15}c_{44} \quad (2.8)$$

Wurtzite tipi GaN malzemesinin kendiliğinden polarizasyon değeri (P_{sp}) ve piezoelektrik modülleri (ϵ_{ij}) Çizelge 2.5'de aşağıda verilmiştir.

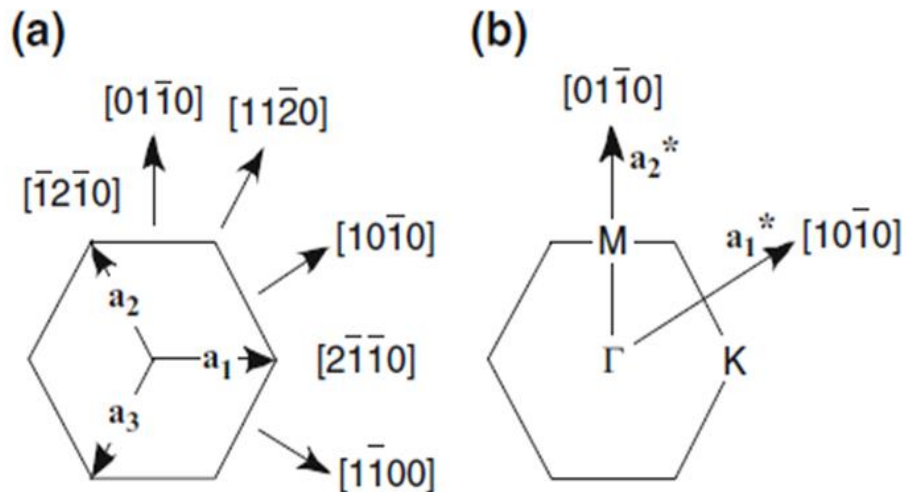
Çizelge 2.5. Wurtzite tipi GaN malzemesinin kendiliğinden (spontane) polarizasyon (P_{sp}) ve piezoelektrik modülleri (ϵ_{ij}) (C/m_2) değerleri (Bernardini 1997) (Duffy 1973)

	P_{sp}	e_{33}	e_{31}	e_{15}
GaN	-0,029	0,73	-0,49	-0,3

2.2.4. Optik ve elektronik özellikler

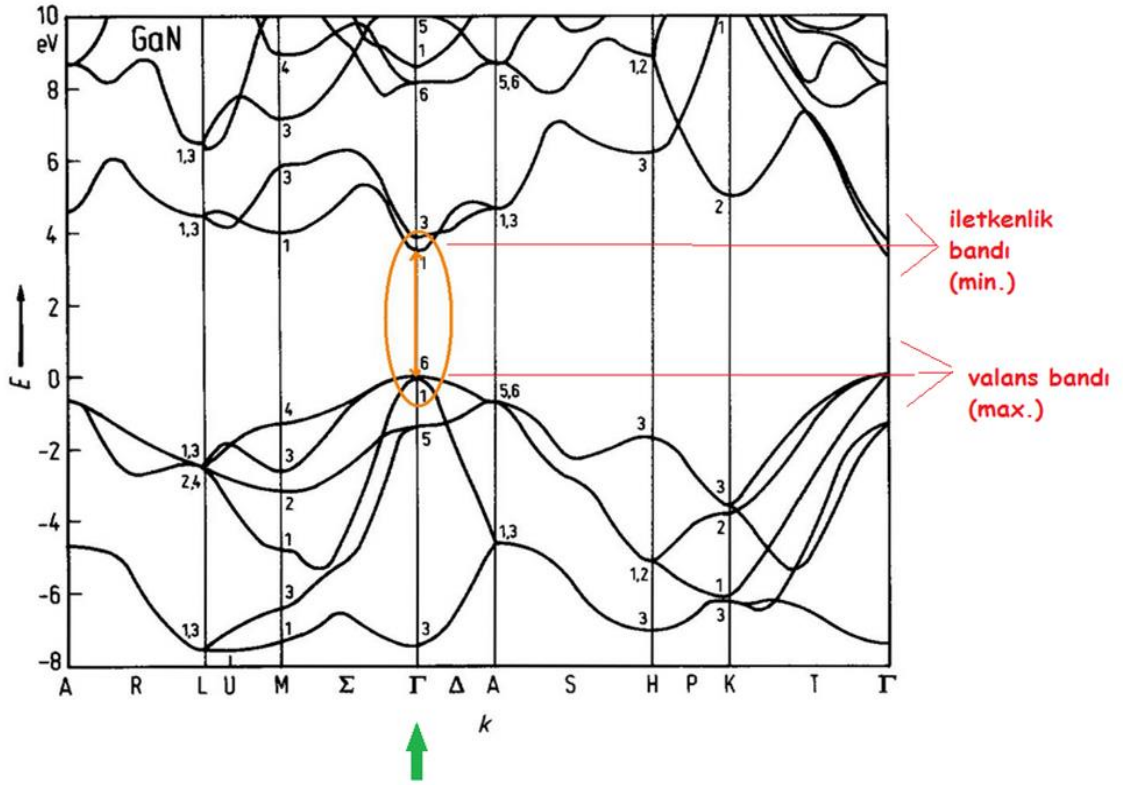
GaN malzemesi önceleri, mavi ve Ultraviyole (UV) ışık yayıcı aygıtların üretimi için bir potansiyel olarak görülmekteydi. Bundan dolayıdır ki bu malzemenin optik ve elektronik özelliklerini araştırmaya yıllarca birçok emek harcanmıştır. Maruska ve

Tietjen ilk defa GaN materyalinin direk bant aralığı enerjisini 3,39 eV olarak doğru bir şekilde ölçmüşlerdir. Bir süre sonra, Pankove ve arkadaşları düşük sıcaklık (1,6 K°) foto lüminesans ölçümü sonucunda, güçlü yayınım pikini 3,477 eV ve zayıf yayınım pikini ise 3,37 eV olarak bulmuşlardır. Sonraları, Dingle ve arkadaşları yüksek kalitede GaN için 2 K° sıcaklığında detaylı olarak optik spektrum analizi yaptılar. Polarize edilmiş yansıma spektrum sonuçlarında 3,474 eV, 3,480 eV, 3,49 eV üç adet eksiton piki buldular. Düşük sıcaklık foto lüminesans piki 3,467 eV ile birlikte yarı yükseklik genişliği 5 meV olarak rapor edildi. Malzemenin optik çalışmalarında bilim insanlarının bazıları geçirgenlik, yansıma ve soğurma spektrumları kullanırken, diğerleri ise katoda lüminesans ve foto lüminesans ölçüm sonuçlarını kullandılar. Fonon modları çalışmaları ise Raman spektroskopisi keşfedildikten sonra grup teorisi kullanılarak yapılmaya başlandı. Hegzagonal kristal yapıya sahip GaN malzemesi kararlı yapıdadır ve C_{6v}^4 uzay grubuna aittir. Grup teorisine göre, hegzagonal GaN altı tane Raman aktif moduna sahiptir bunlar ise; $1A_1 (TO) + 1A_1 (LO) + 1E_1 (TO) + 1E_1 (LO) + 2E_2$ dir. Hegzagonal kristalin birinci brillion bölgesi $2\pi/c$ yüksekliğindeki hegzagonal prizmadır. $k_z = 0$ daki (c –eksenine paralel k dalga vektörünün bileşeni) sınır bölgesi Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Temel örgü vektörleri **a)** Ters örgü vektörü **b)** Hegzagonal (0001) düzlemi

GaN, bant sınırı Γ noktasına yerleşmiş direk bant aralığına sahip bir yarıiletkenidir. S. Bloom ve arkadaşları tarafından detaylı bant yapısı rapor edilmiştir ve aşağıdaki Şekil 2.5’de verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere, GaN malzemesinin direk optik bant aralığı Γ vadisindedir. Optik bant aralığı enerjisi iletkenlik bandının minimumdaki noktası ile valans bandının maksimumdaki noktası arasındaki enerji farkı olarak tanımlanmaktadır. Buradan elde edilen GaN malzemesinin optik bant aralığı enerjisi (oda sıcaklığında) yaklaşık 3,4 eV olarak verilmektedir.



Şekil 2.5. GaN malzemesinin detaylı bant yapısı gösterimi (Bloom 1974)

Bant aralığı enerjisi sıcaklıkla değişkenlik göstermektedir. Bant aralığı enerjisinin sıcaklığa bağlı denklemi Varshni formülü ile verilmektedir;

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (2.9)$$

Bant aralığı enerjisi, sıcaklık ve α , β parametreleri Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Çinko sülfür ve Wurtzite yapısındaki GaN malzemesinin belli sıcaklıklarda E_g (eV) bant aralığı enerjisi, Varshni parametreleri α (meV/K) ve β (K) değerleri (Roessler 1969; Chichibu 2003; Meyer 2003)

	Yapı	T	E_g	α	β
GaN	Wurtzite	0	3,510	0,909	830
GaN	Çinko sülfür	0	3,299	0,593	600

$A_xB_{1-x}C$ alaşımların bant aralığı enerjisi x in quadratik formülüyle temsil edilir.

$$E_g(x) = (1 - x)E_g^{AC} + xE_g^{BC} - bx(1 - x) \quad (2.10)$$

Burada b eğrilik parametresi olarak isimlendirilir. Bazı malzemelerin Wurtzite ve Çinko sülfür kristal yapısı için önerilen eğrilik parametreleri değerleri şöyledir; örneğin, $AlGaN$ için b eğrilik değeri $0,7 \text{ eV}$ iken; $GaInN$ malzemesi için $b = 1,4 \text{ eV}$ ve $AlInN$ için $b = 2,5 \text{ eV}$ olarak elde edilmektedir (Meyer 2003). İletkenlik bandının tabanının etrafındaki enerji dağılımı aşağıda ifade edilmiştir.

$$E_c(k) = E_{c0} + \frac{\hbar^2}{2m_0m_e^{\parallel}}(k_x^2 + k_y^2) + \frac{\hbar^2}{2m_0m_e^{\perp}}(k_z^2) + a_2(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + a_1\epsilon_{zz} \quad (2.11)$$

E_{c0} iletkenlik bandının bant sınırı enerjisini, $\hbar$ plank sabitinin 2π 'ye bölümünü, m_0 vakumdaki elektronun durgun kütleini, $m_e^{\parallel}$ c eksenine paralel elektronun etkin kütleini, $m_e^{\perp}$ c eksenine dik elektronun etkin kütleini, a_1 ve a_2 iletkenlik bandının deformasyon potansiyelini, k_x , k_y , k_z dalga vektörünün bileşenlerini göstermektedir. Wurtzite tipi malzemeler için elektron ve hol etkin kütle değerleri Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Wurtzite tipi GaN için hol ve elektron etkin kütle değerleri (m_0 cinsinden verilmiştir) (Ching 1993; Walter R. L. Lambrecht, 2002; Masakatsu Suzuki, 1995; Y. C. Yeo, 1998)

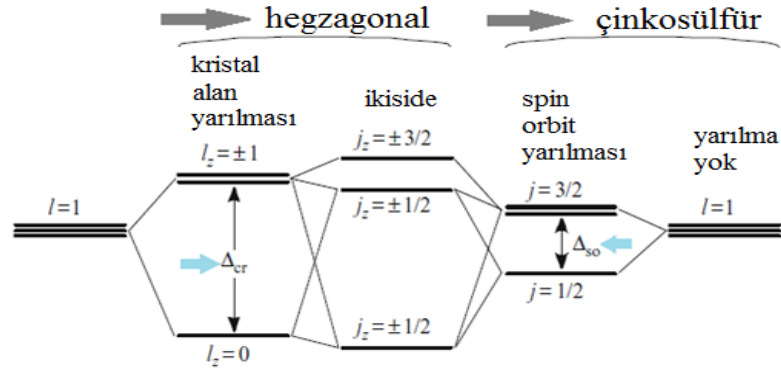
	$m_e^{\parallel}$	$m_e^{\perp}$	$m_A^{\parallel}$	$m_B^{\parallel}$	$m_C^{\parallel}$	$m_A^{\perp}$	$m_B^{\perp}$	$m_C^{\perp}$
GaN	0,20	0,18	1,10	1,10	0,15	1,65	0,15	1,10

Wurtzite tipi malzemeler için deformasyon potansiyeli değerleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Wurtzite tipi GaN için deformasyon potansiyeli (eV) (Fröhlich 1997; Meyer 2003)

	a_1	a_2	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
GaN	-4,9	-11,3	-3,7	4,5	8,2	-4,1	-4,0	-5,5

WZ (Wurtzite) ve ZB (Çinko sülfür) yapıya sahip yarıiletkenler için anyon p elektronlarının oluşturduğu valans bandının üstünde enerji seviye yarılmaları oluşmaktadır. l orbital açısal momentum, s spin açısal momentumu gösterebilir. $l.s = (j^2 - l^2 - s^2)/2$ ifadesi ile orantılı olan spin –orbit kuplajı (coupling) j' ’ye göre enerji seviyesine yarılır. WZ yapısında c eksenine normal ve paralel arasındaki yapısal anizotropiden dolayı kristal alan yarılmaları (crystal-field splitting) oluşur. l_z ve j_z , l ve j nin c eksenini bileşenleridir. Aşağıdaki şekilde WZ, ZB yarıiletkenlerde valans bandı üstü için spin-orbit yarılmaları (spin-orbit splitting) ve kristal alan yarılmaları (crystal-field splitting) gösterilmiştir. GaN malzemesi için spin-orbit yarıлма (Δ_{so}) ve kristal alan yarıлма (Δ_{cr}) değerleri sırasıyla 15,5 meV ve 72,9 meV olarak verilmiştir (Suzuki 1995; Reynolds 1999; Meyer 2003).



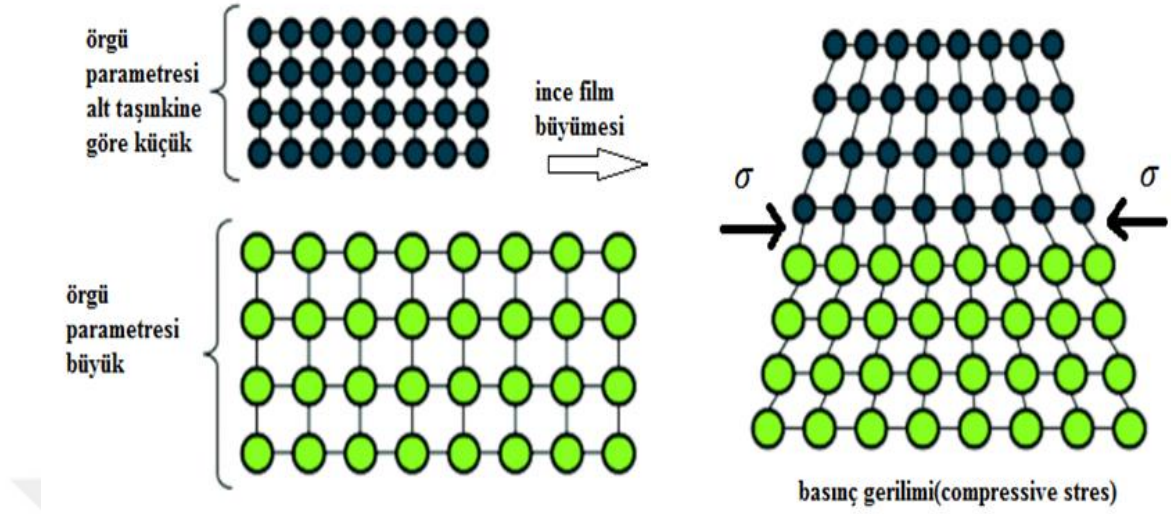
Şekil 2.6. Hegzagonal (wurtzite) ve çinko sülfür yarıiletkenler için valans bandının üstü şematik enerji diyagramı

2.3. İnce Filmlerde Kalıcı Gerilime (Residual Stress) Sebep Olan Faktörler

İnce filmlerde kalıcı gerilimin (residual stress) anlaşılması ve kontrol edilmesi opto-elektronik aygıtların uygulamaları için çok önemlidir. Çekme gerilimi aygıtta çatlama, tabaka kullanılabilir kalınlığının sınırlanması (Mizushima *et al.* 2006) gibi sorunlara yol açmaktadır. Basınç gerilim ise burkulma, kabarcıklanma ve katmanlara ayrılma (Moon *et al.* 2002) sorunlarına yol açmaktadır ve bu sorunlar aygıtta kısa devre oluşumuna (Chason *et al.* 2013) sebep olmaktadır. İnce filmlerde kalıcı gerilim birçok sebepten oluşmaktadır ve bunlar aşağıda sıralanmaktadır.

a) Örgü uyumsuzluğu (Misfit) kaynaklı gerilim

Filmin örgü sabitleri ile üzerine büyütüldüğü alttaşın örgü sabitleri arasındaki fark gerilime sebebiyet vermektedir. Bu ise büyütülen filmin kalıcı gerilimini etkileyen faktörlerden biridir. Aşağıda ince filmlerdeki basınç gerilim Şekil 2.7' de verilmektedir.



Şekil 2.7. İnce filmlerde basınç gerilimi gösterimi (Sneed *et al.* 2015)

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere, büyütülecek olan malzemenin örgü sabiti altlığın örgü sabitinden küçük olduğunda, küçük örgü sabiti diğerini kendi değerine uydurmak için içeriye doğru bir gerilim oluşacaktır. Bu gerilim basınç gerilim (compressive stress) olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan, eğer büyüteceğimiz malzeme alt taş malzemesinin örgü parametresinden daha büyük örgü sabitine sahipse bu durumda alt taşın örgüsünü dışarı doğru çekmeye çalışacaktır. Bu ise çekme gerilimi (tensile stress) oluşmasını sağlayacaktır.

b) Termal kaynaklı gerilim

İnce film büyütülürken sıcaklığa maruz kaldığında altlık ve film termal genleşme katsayıları oranında termal genleşme olayı gerçekleşmektedir. Bu durum ince filmde gerilim oluşmasına yol açacaktır. RF saçırma metodunda ince film büyütülürken alt taş belli bir sıcaklıkta olacak şekilde büyütme yapılmaktadır. Bu ise ince filmin kalıcı gerilimi etkileyen faktörlerden birisi olarak verilmektedir.

c) Büyüme aşamasından kaynaklanan gerilim

Sıklıkla ince filmlerde büyüme sırasında gerilim oluştuğu gözlenmiştir. Bu gerilim örgü veya termal genleşme uyumsuzluğuna bağlı değildir ve büyüme gerilimi olarak adlandırılmaktadır. Genelde ince filmler dengede olmama durumunda (non-equilibrium) biriktirilirler ve bu ise büyüme geriliminin ortaya çıkmasını sağlar.

d) Yüzey etkilerinden kaynaklı gerilim

Malzemenin sonlanan kenarında ortaya çıkan ve filmi dengede tutmak için oluşan gerilim türüdür.

e) Tane sınırlarının birleşmesinden dolayı gerilme oluşumu

Filmin büyümesinin ilk aşamalarında film küçük kristallerden oluşur. Bu tanecikler birleştiğinde çekme gerilmesi üretilmektedir. Bu tanecikler büyüdükçe birleşmeye çok yakın olana kadar aralarındaki boşluklar azalır. Böylece tanecikler gelişmeye başlamaktadır. Tanecikler arası etkileşimler elastik deformasyon boşluklarını kapatacak kadar güçlü olduğu noktaya kadar etkileşirler. Sonunda taneciklerin birleşme sınırlarından dolayı çekme (tensile stress) ortaya çıkmaktadır.

f) Fazla boşluk yok oluşundan kaynaklanan gerilim

Eğer ince film düşük sıcaklıkta biriktiriliyorsa yüzey yayını az olmaktadır. Boşluk yoğunluğunun denge değerinden daha büyük olması beklenebilmektedir. Bu fazla boşluklar yok olduğunda ilgili hacim değişikliği filmde bir gerilme ile sonuçlanmaktadır. Bu gerilim değeri, boşlukların hacmine, boşluk bölge özelliklerine (tanecik sınırları, kenar çıkıkları, film altlık arası bölge) bağlı olmaktadır.

g) Safsızlıklar etkisinden kaynaklı gerilim

Literatür çalışmalarına bakıldığında kirliliklerin gerilime etkisi çok iyi anlaşılmamış olduğu gerçeğiyle karşılaşılmaktadır (Doerner and Nix 1988). Bunun yanı sıra, oksijen genellikle ince filmlerde gerilim üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir ve çekme gerilimini azaltmaya eğilimli olduğu kanısı oluşmuştur. Saçtırma yöntemiyle büyütülen ince filmlerde gerilim kaynakları yukarıdaki verilen etmenlere ek olarak büyütme koşullarının da kalıcı gerilime etkileri olduğu bilgisi literatürdeki çalışmalarda belirtilmektedir (Thornton and Hoffman 1989).

2.4. İnce Film Büyütme Teknikleri

Giriş bölümündeki literatür bilgisinden de görüldüğü üzere, ince filmler yarıiletken aygıt teknolojisinin geliştirilmesinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Nano bilim ve nano teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte önceleri süsleme ve dekoratif amaçlı kullanılan ince filmler, şimdilerde yüksek hareketliliğe sahip transistör ve çoklu kuantum kuyulu güneş pilleri gibi yüksek teknolojik aygıt üretiminde kullanılmaktadır ve bilimsel eğilim daha da yaygınlaşacağı izlenimini vermektedir. İnce filmler sayesinde malzeme maliyetlerinin düşmesi ve yüksek verimlilik elde etme olanağı endüstri dünyasını bu alanda Ar-Ge faaliyetlerine daha çok yatırıma itmiştir. İnce filmin hacimli malzemeden temel farkı, bir alt taş üzerine atom ve/veya moleküllerin atomik boyutlarda ince bir tabaka olarak çeşitli tekniklerle yerleştirilmesidir. Atomik boyutlara inilmesi sebebiyle malzemenin fiziksel özellikleri, kuantum mekanik kuramlarıyla açıklanmakta ve hacimli malzemeden farklı fiziksel özellikleri karşımıza çıkarmaktadır. İnce filmler büyütülürken çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Her tekniğin avantajı da dezavantajı da mevcuttur. Genel olarak ince film büyütme teknikleriyle ilgili birçok sınıflandırma mevcuttur ve bu anlamda çeşitlilik göstermektedir. Burada araştırmacının kendi istek ve ihtiyaçları bu sınıflandırma çeşitliliğini doğurmaktadır. Eğer depolanacak olan malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre tasnif edilirse, buhar, katı ve sıvı fazda büyütme olarak üçe ayrılır ve Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. İnce film büyütme teknikleri

İnce Film Büyütme Teknikleri	
Buhar Fazda Büyütme	• Kimyasal Buhar Biriktirme • Fiziksel Buhar Biriktirme
Sıvı Fazda Büyütme	• Sol-Jel • Kimyasal Banyo • Elektrokimyasal Yöntem
Katı Fazda Büyütme	• Mekanik Aşındırma • Devitrifikasyon

Bu araştırmada kullanılan teknik, fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition (PVD)) tekniğinin bir alt dalı olan Radyo Frekans (RF) Magnetron Saçtırma tekniğidir.

2.4.1. Radyo frekans magnetron saçtırma tekniği (RF-Sputter)

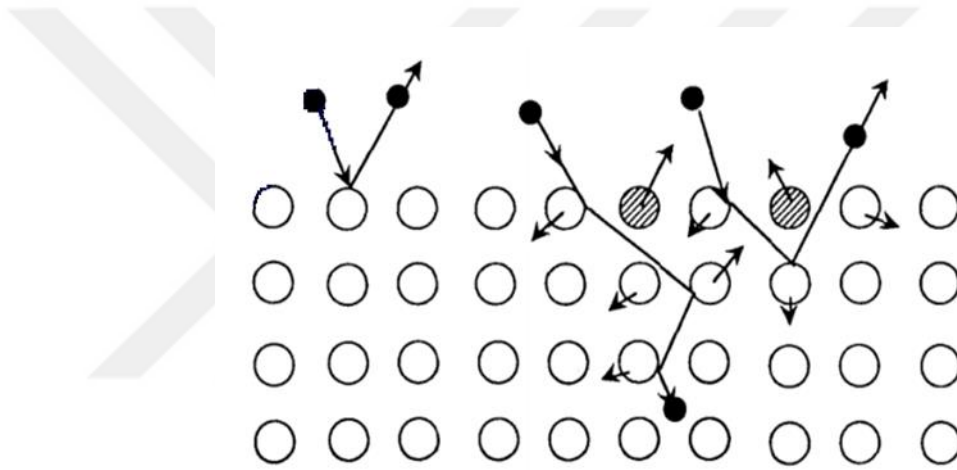
Bu tekniğin ismi İngilizce “Sputtering” kelimesinde gelmekte olup sıçratma manasına gelmektedir. Bu teknikte altlık olarak kullanılan alttaş mevcuttur ve film bunun üzerine kaplanmaktadır. Ayrıca sıçratmaya maruz kalacak kaynak malzemeye hedef denmektedir. Enerjisi yüksek parçacıklar kullanılarak hedefin yüzeyi bombardımana maruz kalır ve hedeften sıçratma meydana gelmektedir. Hedef malzemenin atom ve/veya molekülleri buhar fazına geçer ve ilk etapta hedef ile altlık arasındaki bölgeye doğru hareket eder. Sıçratmayı sağlamada kullanılan gaz, ağır asal gaz iyonlarıdır ve çalışma gazı ismini almaktadır. Yaygın olarak kullanılan Argon gazıdır, bu çalışmada Argon ve Azot gazı beraber kullanılmıştır. Öncelikle sistemin içerisi 10^{-7} torr başlangıç basıncına alınır. Buradaki amaç kirliliğe sebep olabilecek oksijen ve diğer parçacıkların, gazların sistemden atılmasıdır. Daha sonra, sisteme çalışma gazı verilir, bu gaz yalnız argon gazı olabildiği gibi argon ve azot birlikte de verilebilir. Burada gaz verildiğinden ortam basıncı 10^{-3} torr seviyesine inmesi beklenmektedir. Bunu izleyen aşamada sisteme güç verilir, çalışmada kullanılan güç radyo frekans gücüdür. Bunu izleyen süreçte, sistemin içerisini gözlemlenebildiği pencere vasıtasıyla plazma yani

ışılta huzme olup olmadığına bakılır. Burada eğer plazma var ise bir sonraki aşamaya geçilebilir fakat plazma yok ise sistemde veya deney aşamalarında bir sorun var demektir. Eğer sistemde örneğin güç kaynakları çalışmıyorsa, sistemin satın alındığı şirketten servis mühendisleri çağrılmaktadır. Fakat bazı durumlarda hedef ile hedefin üzerine takılan ve plazmanın doğrultu boyunca gitmesini sağlayan alet birbirine değebilir ve bu durumda kısa devre oluşur. Bundan dolayı plazma oluşmaz. Kısa devre durumunda sistem kapatılır ve bu malzemeler aseton ve zımpara ile güzel bir şekilde temizlenmektedir. Plazmada artı ve eksi iyonlar, atomlar, moleküller, elektronlar ve birçok parçacık bulunmaktadır. Plazma elde edilmesinden sonra büyütmeden önce hedef 5 dakika boyunca bombardıman edilmelidir. Çünkü buradaki işlem ön saçtırma adını alır ve hedef yüzeyin üzerindeki kirliliklerin temizlenmesi manasında yapılmaktadır. Sonra perde (shutter) adı verilen altlığın yüzeyini kapatan aparat açılır ve ince film büyütmesi başlamış olur. Burada plazmadaki uygun atomların altlığa doğru harekete geçmesi şu şekilde olmaktadır. Hedef malzemeye negatif voltaj uygulanır ve hedef pozitif iyonlarla bombardıman edilir. Yani bu durumda hedef malzeme sistemin katodu olur. Bu voltaj ile ivmelenen iyonlar hedefe vurarak hedef atomlarının sıçratılmasına neden olmaktadır. Kaplanmak istediğimiz malzeme sıçratılan malzeme yolunun üstünde olduğundan, sıçratılan malzeme altlık üzerine büyümektedir. Hedeften sıçratılan atomlar büyümekten evvel yolları üzerinde çalışma gazı molekülleriyle çarpışarak saçılırlar. Büyüme devam ederken ara sıra pencereden plazmanın gidip gitmediği kontrol edilmelidir. Çünkü bazı durumlarda plazma gidebilmektedir. Plazma gitmesi durumunda güç derhal kapatılmalıdır. Aksi halde hedef malzeme zarar görebilmektedir. Güç kapandıktan sonra çalışma gazı yeniden verilerek plazma tekrardan oluşturulmaya çalışılmalıdır. Altlık, homojen büyümeyi sağlayabilmek için altındaki aparat sayesinde devamlı dönmektedir. Burada dönme hızını ayarlayarak büyüme koşulları istenilen şekilde olabilmektedir.

Tekniğin dayandığı temel mekanizma, mekanik bir çarpışma ve momentum transferi olarak verilmektedir. Bir sonraki bölümde kullanılan tekniği kavrama açısından sıçratma mekanizmasının fiziğine yer verilecektir.

2.5. Sıçratma Mekanizması

Alttaş üzerine kaplanmasını istediğimiz malzemeye, M denildiği varsayalım. Enerjili iyon bombardımanının hedefi bu malzeme olacaktır. Fizik açısından bakıldığında, iyon madde etkileşime girerse ancak yeterli enerji maddeye aktarımı olduğunda, M atomları sıçratılabilecektir. Burada gerçekleşmesi beklenen fiziksel kavram, çarpışma durumundaki momentum transferi olmaktadır. Hedef iyonlarla bombardıman edildiğinde hangi olaylar oluşabilir? Bu sorunun cevabı Şekil 2.8’de görülebilmektedir.



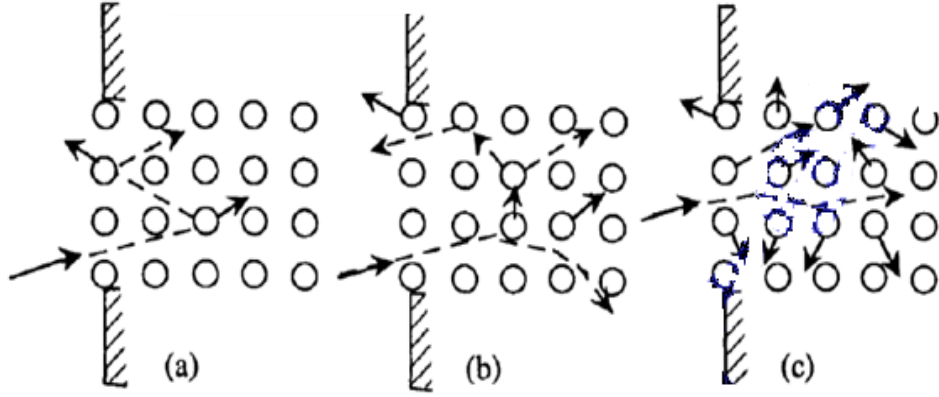
Şekil 2.8. İyon- madde etkileşimi ve sıçratma mekanizması (Keleşoğlu 2011)

Şekil 2.8 incelendiğinde, hedefin yüzeyine doğru gelen daha az enerjili iyonlar, hedef atomunu yerinden sökmeden geri gittiği görülmektedir. Bunlardan bazıları geri dönerken nötr durumuna geçerken, diğerleri ise yüzeyin üzerindeki ortamdan tekrardan ivmelenerek tekrar hedefin yüzeyine doğru hareketlenmektedir. Yüzeyden geri gelen iyonların oransal miktarı, iyon enerjisi, iyon kütlesi ve hedef malzeme atomunun kütlesi ile ilişkili olarak verilmektedir. Geri dönen iyonlardan daha fazla enerjiye sahip iyonlar iki tip olay gerçekleştirebilirler. Birincisinin de bunlar hedef malzemenin daha iç yerlerine doğru sokulabilirler ve enerjileri sona erdiğinde, orada sıkışık vaziyette yerleşebilirler. İkincisinde ise enerjilerinin bir kısmını harcadıktan sonra, ortama tekrardan nötr olarak geri gelebilirler. Burada fiziksel olarak bakıldığında, iyon hedef atomu ile etkileşime

girdiğinde, hedef atomunu sökmeye yeterli enerjisi yoksa bu durumda atomların titreşim genliklerini arttırabilmektedirler. Eğer enerjileri oldukça büyükse momentum aktarımı ile hedef atomunu yerinden sökebilmektedirler. Bir başka durum ise, bu yüksek enerjili iyonlar malzemenin yüzeyinden daha derinlere girerek ara kafesleri deforme edebilmekte ve enerjilerinin tükendiği yerde buralarda sıkışık vaziyette yerleşebilmektedirler. Bir başka olan olay ise çarpışmadan ötürü yüzeyde bulunan hedef atomlarının hareketliliği artmaktadır ve bu atomlar birbirlerine çarptığında da bu atomlardan bir kısmı sıçrayabilmektedir. Sıçratma hadisesinin gerçekleşmesi için, iyonların sahip olması gereken eşik enerjisi 20 ila 30 eV olarak verilmektedir. Her ne kadar saçırma tekniğinin maliyeti birçok tekniğe göre az olsa da verilmesi gereken bu eşik enerjisi tekniğin maliyetine sebep olan önemli bir parçadır. İyonlar hedef yüzeyini dövdüğünde, ortama ikincil elektronlar da salınmaktadır. Katot da negatif gerilim vardır ve bundan ötürü ikincil elektronlar buradan itilmektedirler. Söz konusu elektronların yeterli enerjiye sahip olmaları durumunda, gaz moleküllerini iyonlaştırabilmektedirler. Plazmanın kararlılığını korumasının sebeplerinden biri de bu durumdur. Bir sonraki bölümde sıçratma verimine detaylı olarak değinilecektir.

2.5.1. Sıçratma verimi

Sigmund, yaptığı bilimsel çalışmalar sonucunda sıçratma verimini hesaplamak için bir kuram ortaya koymuştur. Bu kurama göre, hedef atom kütlesi M_t , iyon kütlesi ise M_i olarak gösterilsin. Eğer M_i değeri M_t değerine yakınsa bu durumda iyon hedef etkileşiminde yeterli momentum transferi oluşabilmektedir. Şekil 2.9 a) da gösterildiği üzere, iyon tekli çarpışma durumunda enerjisini M_t atomuna aktarmaktadır ve sonrasında birkaç çarpışma daha yapabilmektedir. Atomlar arası bağ enerjisini, iyon enerjisi bozmaya yetecek enerjiye sahip olması durumunda, yüzeyden atom sıçratılabilmektedir. Yani iyon enerjisi ilk çarptığı atomu sıçratabilmeye imkân verir ancak zincirleme çarpışmalara imkân vermez. Bu sistem, tekli çarpışma veya hafif iyon düşük enerjili dövme (bombardıman) durumu olarak değerlendirmektedir.



Şekil 2.9. İyon–atom çarpışması

a) Tekli çarpışma (hafif iyon düşük enerjili dövme) b) Doğrusal zincirleme çarpışma c) Dalıcı çarpışma (Keleşoğlu 2011)

Bir diğer mekanizma ise doğrusal zincirleme olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemde ise ilk çarpılan atom enerjisini zincirleme olarak diğer atomlara da aktarabilmektedir. Söz konusu atomlar yüzeye doğru sürülürler ve bunlardan bazıları eğer yüzey enerjisini aşarsa yüzeyden ayrılarak ortama dâhil olurlar. Zincirleme çarpışma olabilmesi için hedefe yönlendirilen iyon enerjilerinin keV ile MeV mertebesinde olması gerekmektedir. Diğer bir mekanizma ise dalıcı çarpışma mekanizmasıdır. Bu sistemin zincirleme mekanizmasından temel farkı derinliklere giden atomların sayısının daha çok olmasıdır. Bu mekanizmayı sağlamanın yolu ağır iyonlar veya çok atomlu iyonlar kullanılmasıdır. Sigmund modeli özellikle zincirleme çarpışmayı varsaymaktadır ve diğer mekanizmalar kısmi olarak uymaktadır. Modele göre, hedef yüzeyine dik iyon bombardımanı ile elde edilen sıçratma verimi ifadesi Y (iyon başına sıçratılan atom sayısı ile verilir) aşağıda ifade edilmektedir.

$$Y = 3,56\alpha \frac{Z_i Z_t}{(Z_i^{2/3} - Z_t^{2/3})^{1/2}} \left(\frac{M_t}{(M_i + M_t)} \frac{s_n(\varepsilon)}{U} \right) \quad (2.12)$$

Z_i, Z_t sırasıyla iyon ve hedef atom numaraları, U , eV cinsinden hedef atomları arasındaki bağ enerjisi (bağ enerjisi metal bir malzeme için süblimasyon enerjisine, moleküler malzemeler için kovalent bağ enerjisine eşittir), α değeri M_t/M_i oranıyla ilgili birimsiz

bir sabiti göstermektedir. (M_t/M_i oranı 1 den düşükse α yaklaşık olarak 0,2, eğer M_t/M_i oranı 1-10 arasında ise α 0,2 ile 1,4 arasındadır) $s_n(\varepsilon)$ değeri ε değerine bağlı universal bir fonksiyondur ve aşağıda ε ve ilgili ifade verilmektedir.

$$\varepsilon = \left(\frac{M_t}{M_i + M_t} \right) \left(\frac{a}{Z_i Z_t e^2} E \right) \quad (2.13)$$

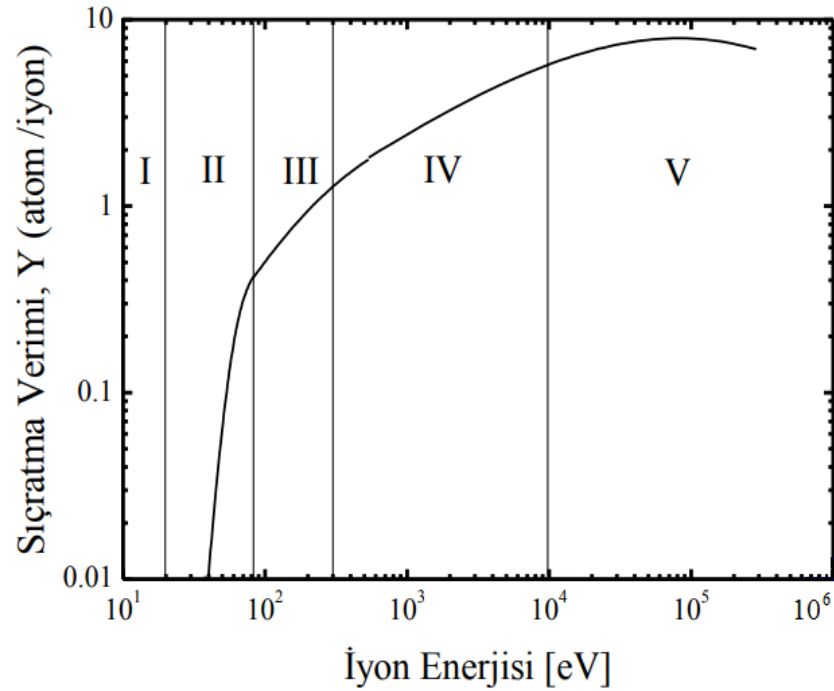
$$a = \frac{0,855 a_0}{(Z_i^{2/3} + Z_t^{2/3})^{1/2}} \quad a_0 = 0,529 \text{ Å} \quad (2.14)$$

E , eV cinsinden çarpan iyon enerjisini, a , cm olarak hedef atomun çekim alanı yarıçapını e , elektronun yükünü temsil etmektedir. Sıçratma verimini aşağıdaki ifade ile deneysel olarak da hesaplanabileceği belirtilmiştir (Keleşoğlu 2011).

$$Y = \frac{N_t}{N_i} = F \frac{\Delta W}{ItM_t} \quad (2.15)$$

N_t, N_i Sıçratılan atom sayısı ve yüzeye gönderilen iyon sayısını,
 I , Hedefte akan iyon akım şiddetini,
 t , Sıçratma süresini,
 ΔW , hedefteki kütle azalmasını,
 F , faraday sabitini göstermektedir.

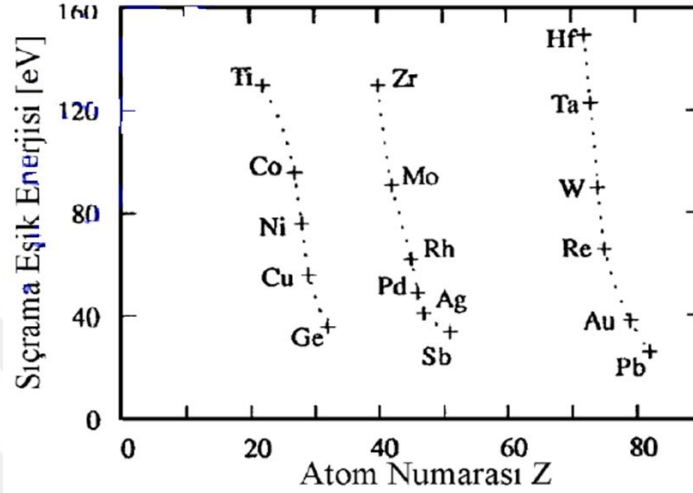
Bu deneysel modele göre yüzeye bombardıman edilen iyon enerjisi arttıkça sıçratma verimi de artmaktadır. Bu deneysel ifadede, iyon huzmesinin yüzeye dik olarak geldiği varsayımı yapılmaktadır aksi durumda çarpma açısını da dâhil edecek yeni bir ifade türetilmelidir. Deneysel model kullanılarak, bakırın Ar^+ iyonlarıyla bombardımanında iyon enerjisine bağlı sıçratma verimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Bakırın Ar^+ iyonlarıyla bombardımanında iyon enerjisine bağlı sıçratma verimi (Keleşoğlu 2011)

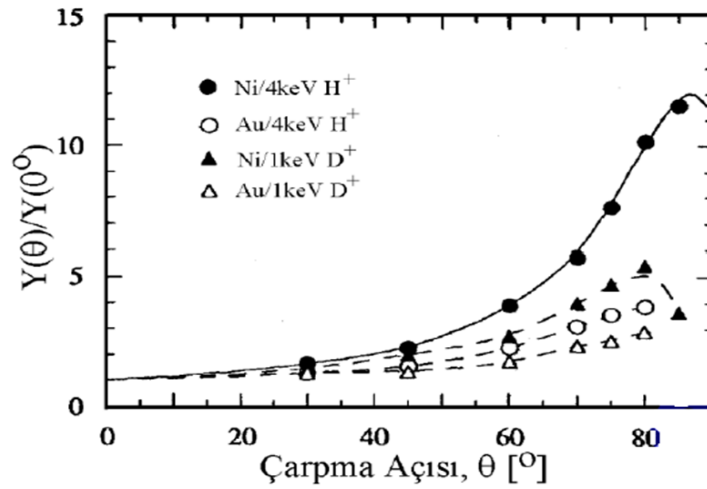
Elde edilen bu grafik 5 farklı bölgeye ayrılarak değerlendirilmiştir. 1.Bölge yorumlandığı zaman, enerjileri 20 eV den düşük olan iyonların hedef atomlarını sıçratamayacağı değerlendirilmiştir. Sıçratma olayı, iyonların enerjilerinin 20 eV değerinde olmasıyla başlayabilmektedir. Burada bu değer bu deney için eşik enerjisi olarak verilmektedir. 2.bölgede ki iyon enerjisi 20-80 eV de dir, sıçratma verimi iyon enerjisiyle lineer şekilde hızla artmaktadır. Her ne kadar 3. Bölgede (80-300 eV enerji aralığında) sıçratma verimi iyon enerjisiyle lineer artış devam etse de artış hızı göreceli olarak daha az olarak verilmektedir. Bu bölgede sıçratma mevcuttur ve kaplama metaller için mümkün olabilmektedir. Yer yer dalıcı çarpışma olayının olduğu 4. Bölgede, iyonlar derinliklerde saplandığından dolayı, sıçratma verimi düşmeye başlar. Dalıcı çarpışmanın baskın olduğu 5. Bölgede ise iyonlar yüzeyden çok derinliklerde saplı kaldığından sıçratma verimi düşme eğilimine girmektedir. H^+ Veya He^+ gibi daha hafif iyonlar argon yerine kullanıldığında, iyonlar rahatça derinlere girer ve verimi daha da düşürmektedir (Keleşoğlu 2011). Bunu yanı sıra, farklı hedef malzemesi farklı eşik

enerjisi ortaya çıkarmaktadır. Şekil 2.11’de bununla alakalı yapılmış olan bir çalışma mevcuttur.



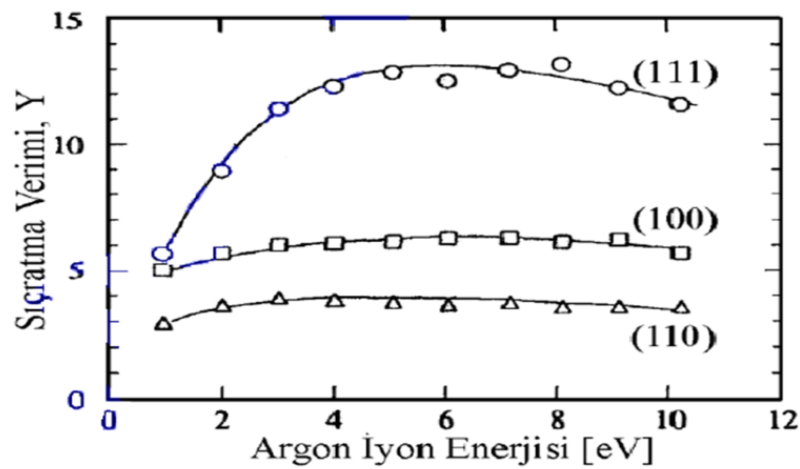
Şekil 2.11. Hg⁺ iyonlarıyla bombardıman edilen çeşitli hedef malzemeleri için eşik iyon enerjileri (Keleşoğlu 2011)

Eşik sıçratma enerjisi 40-130 eV olan bir sürü geçiş metali bulmak mümkündür. Şekilde de verildiği üzere, geçiş metallerinde artan atom numarası ile birlikte eşik enerji değerlerinin azaldığı değerlendirilmiştir. Sıçratma verimi için bir diğer önemli parametre ise çarpışma açısıdır. Şekil 2.11’de sonucu verilen bilimsel çalışmada bunun önemli olduğu gösterilmiştir. Hedef yüzeyine gelen iyonların belli açıda gelmesi ile sıçratma veriminde önemli değişimler gözlenmiştir. Şekil 2.12’de sıçratma veriminin çarpışma açısına bağlılığı gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Sıçratma veriminin çarpışma açısına bağlılığı (*Ni* ve *Au* hedef malzeme kullanılmıştır) (Keleşoğlu 2011)

Şekilden sıçratma veriminin açı arttıkça arttığı gözlemlenirken, açı azaldıkça sıçratma veriminin azaldığı gözlemlenmektedir. 80° ve üstü açılarda ise verim çok daha üst seviyelere çıkmaktadır. Ayrıca hafif iyonlarda yaklaşık 90° de verimin maksimuma gittiği gözlenmiştir. (Keleşoğlu 2011) Yukarıda sayılan parametrelerin yanı sıra hedef malzemenin kristal düzlemleri de sıçratma veriminde bir etmen olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2.13'de kristal düzlemlerinin sıçratma verimine etkisi gösterilmektedir.



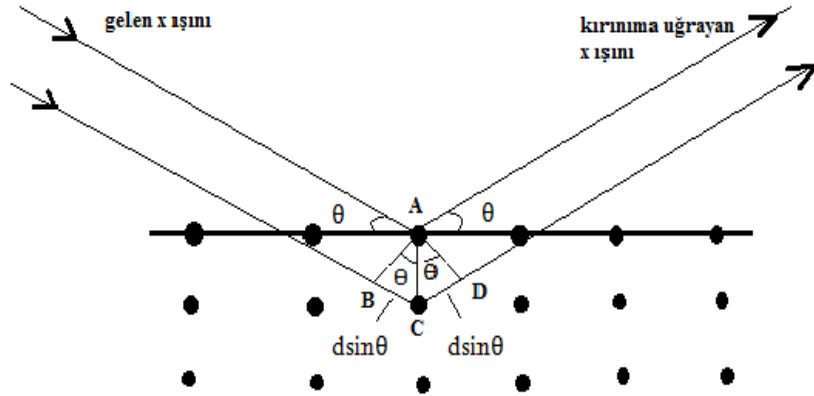
Şekil 2.13. Kristal düzlemlerinin sıçratma verimine etkisi (*Ag* hedef için) (Keleşoğlu 2011)

Buradan, (111) düzlemi için sıçratma verimi görelî olarak daha iyi olduğu sonucu çıkarılmıştır. Bunun nedeni ise bu düzlem için atom yoğunluğunun diğerklerine göre yüksek olması, ayrıca iyonların dalıcı çarpma oranlarının düşük olması ile açıklanmıştır(GD Magnuson, 1963). Sonuç olarak, ne kadar iyonlar yapıda içeri derinlere kolay nüfuz ederse o kadar sıçratma verimi de kötüleşip düşme eğilimine geçmektedir.

2.6. X Işını Kırınımı (XRD)

Işık yani elektromanyetik ışıma, madde ile etkileşiminde hem dalga hem de parçacık özelliğı göstermektedir. Işığın parçacık özelliğı gösterdiğine kanıt olarak iyi bilinen Compton saçılması örnek verilebilmektedir. Diğerk yandan, ışığın dalga davranışı sergilemesine ispat olarak girişim ve kırınım ile ilgili yapılan deneyler sunulabilmektedir. X Işını kırınımı ölçümlerinin dayandığı bilimsel temeli anlamada kırınım, girişim olgusunu ve X ışını anlamamız önemlidir. Işığın dalga davranışından hareketle, ışık hareket ederken eğer dar bir aralık ya da engel ile karşılaştığında aralığın ya da engelin kenarına yakın bir yerden bükülmektedir. Işık bu aralık ya da engeli geçtiğinde, her yönde yayılmaktadır. Bu olay kırınım olarak isimlendirilmektedir. Girişim ise bir veya daha fazla eş frekanslı dalgalar birbirleriyle etkileşimlerine verilen tanımlama olarak bakılabilmektedir. Eğer bu dalgalar birbirini destekleyecek şekilde girişim oluşturlarsa, burada genlik artar ve yapıcı girişim olur. Fakat bu dalgalar birbirlerini yok edecek şekilde girişim yaptıklarında ise yıkıcı girişim oluşmaktadır. Burada kırınım ve girişim ilişkisinden bahsedilmesi gerekirse, eş frekanslı dalgaların girişimlerinin bir sonucu, kırınım olarak nitelendirmek doğru olur. Başta ta ifade edildiğı üzere kırınım ve girişim, elektromanyetik bir ışıma olan ışığın dalga özelliğinin bir göstergesidir. Kırınım olayının oluşum şartı ise, ışığın karşılaştığı yarığın boyutu ile ışığın dalga boyunun bir birine yakın değerler olmasıdır. Yarığın boyutu ne kadar küçükse kırınım etkileri daha da baskın hale gelmektedir. Tam burada niçin X ışını kullanıldığının cevabı yatmaktadır. X ışının dalga boyu $1 \text{ \AA}$ civarındadır ve bu ışını malzemeye gönderdiğinizde, atomlar arası mesafede Angstrom civarında olduğundan, kırınım şartı yerine gelmiş olur ve malzemenin kristal yapısıyla alakalı bilgi alma yolu

açılmış olmaktadır. Nobel ödülü sahibi ünlü bilim insanı Laue, bu olayı detaylı anlamak üzere sürekli X ışını demetini bir kristal üzerine gönderdi ve kırınımına uğramasını sağladı. Bu kırınımına uğramış ışınların belirli doğrultularda yoğunlaştığını gözlemlemiştir. Bu olayı şu şekilde doğru bir şekilde yorumlamıştır: kristalin tabakalarından kırınımına uğrayan X ışığı dalgaları yapıcı girişim yaparak bu yoğun doğrultuları oluşturmuştur. Diğer tanınmış bilim insanı W.H Bragg, bulduğu bağıntı sayesinde, kristal düzlemlerinin arasındaki uzaklık değeri ile kristale gönderilen X ışınının kırınım açısıyla arasındaki ilişkiyi keşfetti. Bu keşif sayesinde X ışını kırınımı ölçümleri sonucunda, kristalin yapısal parametreleri hakkında bilgi edinmek yolu açılmıştır. Bragg yasasını bağıntısını türetmek için kullanılan kavramlar, Young'un çift yarık deneyi için türetilen kavramın benzeri olmaktadır. Uyumlu kaynaktan paralel gelen X ışınları, kristal düzlemine geldiğinde kırınımına uğrayarak yapıcı girişim oluşturmaktadır. Gelen X ışını dalga boyu λ olsun. Kristal düzlemi ile gelen X ışını arasındaki açı θ olsun. Düzlemler aradı mesafe d olarak tanımlansın. Kırınım mertebesi ise n ile gösterilsin. Bu durumdaki Bragg kırınımı gösteren Şekil 2.14. aşağıdadır.



Şekil 2.14. Bragg kırınımının temsili gösterimi

BC ve CD uzaklıkları toplamına yol farkı denmektedir. Bu yol farkı, gelen ışının dalga boyunun tam katları olduğunda yapıcı girişim ortaya çıkmaktadır. Bu durumda Bragg formülü;

$$2d\sin\theta = n\lambda \text{ olarak yazılır.} \quad (2.16)$$

Kırınım mertebesi $n = 1$ alındığında Bragg formülü şu şekilde olmaktadır.

$$2d_{hkl}\sin\theta = \lambda \quad (2.17)$$

Bu denklemde hkl miller indisleridir. Böylelikle eğer X ışını bir kristalin üzerine gönderildiğinde, eğer kırınımına uğrama açısı ve gelen ışının dalga boyu biliniyorsa kristalin düzlemleri arasındaki d değeri bulunabilmektedir.

2.7. Soğurma ve Yansıma Spektroskopisi

Bir elektromanyetik dalganın kuantası foton, madde ile etkileştiğinde soğurma, yayınım, yansıma olayları gerçekleştirebilmektedir. Kuantum teorisi, atomların yörüngelerinin belirli (kesikli) enerjilerde bulunabileceğini ve bu yörüngeler arası geçişleri açıklamada, atomik spektrumlar kavramının kullanılabileceği ortaya çıkartmıştır. Elektromanyetik ışıma, madde ile etkileşerek malzeme atomları tarafından soğurulduğunda enerji düzeyleri uyarılmış olur. Bu olay soğurma olayı olarak tanımlanırken, eğer uyarılmış enerji düzeyinden bir alt enerji düzeyine geçişte bir foton yayınlanır bu ise yayınım olarak tanımlanmaktadır. Ünlü Lambert yasası, fotonun soğurucu bir ortama girdiğinde fotonun şiddetinin malzeme kalınlığının artışı ile azalacağını söylemektedir. UV/Vis soğurma spektroskopisi geçen ışık şiddetini ölçer ve gönderdiği ışık şiddeti de belli olduğundan dolayı aradaki farkı ölçerek, soğurma şiddetini ölçmektedir. Burada spektrometre, soğrulan ışımaların şiddetini farklı dalga boyları için analiz ederek, dalga boyuna karşılık soğurma grafiği çizdirmektedir. Burada mor ötesi-görünür bölge (UV/Vis) soğurma spektroskopisi temel çalışma mekanizması şu şekilde verilebilmektedir. Işık kaynağı ölçümü istenen malzemeye gönderildiğinde, öncelikle dalga boyu seçiciden geçmekte ve dalga boyu bu sayede bilinmektedir. Sonra numuneye gelen ışık soğurucu malzemede etkileşime girerek bir kısmı soğrulur ve diğer kısmı ise malzemeden geçmektedir. Detektör numuneden geçen ışık şiddetini saymaktadır. Ayrıca referans numunede ölçülecek numunenin yanına konmaktadır ve

ikisi birlikte ölçülmektedir. Bu sayede kalibrasyonda yapılmış olmaktadır. Bu veriler bilgisayara gitmektedir. Burada bilgisayar kendi içindeki programlar vasıtasıyla istenirse geçirgenliğe karşılık dalga boyu istenirse soğurmaya karşılık dalga boyu grafiği çizdirmektedir. Yansıma ölçümleri de yine mor ötesi-görünür bölge soğurma spektrometresi yardımıyla ölçülebilmektedir. Burada ışık bir malzeme ile etkileşiminde kısmen de yansıma olayına maruz kalmaktadır. Fresnel denklemleri gelen ve yansıyan ışık oranlarını vermektedir. Burada yansıyan ışık detektör yardımıyla toplanabilmektedir ve referans numunede ölçülerek veriler bilgisayara gönderilmektedir. Bilgisayar yüzdelik yansıma oranına karşılık dalga boyu grafiği çizmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEMLER

3.1. Materyal Özellikleri

Araştırmada, üzerine ince film büyütmek için çeşitli alttaşlar kullanıldı. Bunlar, n-tipi silisyum, p-tipi silisyum, İndiyum Kalay Oksit (ITO), cam ve safir (Al_2O_3 (0001)) olarak verilmektedir. Bu malzemelerin hepsi Sigma Aldrich şirketinden alınmıştır. Kullanılan bu alttaşların özelliklerinden şu şekilde bahsedilmektedir. n-tipi silisyum, (100) yönelimine sahip, kübik kristal yapıda ($a = 5,4037 \text{ \AA}$), ince yuvarlak bir plaka şeklindedir. Bu plakanın boyutları ise $50,8 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ (çap $\times$ kalınlık) şeklindedir. Malzemenin yoğunluğu 25°C de $2,33 \text{ g/mL}$, erime noktası 1410°C , direnci $100 - 3000 \text{ ohm} - \text{cm}$ arasındadır. Barındırdığı oksijen oranı $1 \sim 1,8 \times 10^{18} (1/\text{cm}^3)$ değerinden küçük ve içerisindeki karbon oranı $5 \times 10^{16} (1/\text{cm}^3)$ değerinden küçüktür. p-tipi silisyum ise boron katkılı ve (100) yönelimine sahip kübik kristal yapıda ($a = 5,4037 \text{ \AA}$), plaka boyutları $50,8 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ (çap $\times$ kalınlık) değerindedir. Yoğunluğu 25°C de $2,33 \text{ g/mL}$, erime noktası 1410°C , direnci $10^{-3} - 40 \text{ ohm} - \text{cm}$ arasındadır. Oksijen oranı $1 \sim 1,8 \times 10^{18} (1/\text{cm}^3)$ değerinden küçüktür, karbon oranı ise $5 \times 10^{16} (1/\text{cm}^3)$ değerinden küçüktür. Malzemenin tek tarafı parlatılmıştır. İndiyum Kalay Oksit (ITO) olarak iki farklı direnç değerine sahip malzeme kullanılmıştır. Öncelikle direnci $8 - 12 \Omega / (\text{mm})^2$ olan İndiyum Kalay Oksit malzemesinin özelliklerinden bahsedilecektir. Bu malzeme boy $\times$ genişlik $\times$ kalınlık boyutları $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1,1 \text{ mm}$ olan dikdörtgen şeklindedir ve şeffaf bir renktedir. Malzemenin 550 nm dalga boyundaki yüzdesel geçirgenlik değeri %84 ve kırıcılık indeksi 1,517 şeklindedir. İndiyum Kalay Oksit cam yüzey üzerine kaplanmıştır ve bu kaplamanın kalınlığı $1,200 - 1,600 \text{ \AA}$ değerindedir. Direnci $70 - 100 \Omega / (\text{mm})^2$ olan İndiyum Kalay Oksit malzemesinin özellikleri ise şu şekildedir. $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1,1 \text{ mm}$ olan dikdörtgen şeklinde boyutlara sahip ve şeffaftır. 550 nm dalga boyundaki yüzdesel geçirgenlik değeri %86 ve kırıcılık indeksi 1,517 şeklindedir. İndiyum Kalay Oksit cam yüzey üzerine kaplanmıştır ve bu kaplamanın kalınlığı $150 - 300 \text{ \AA}$ değeri olarak verilmektedir. Cam olarak, dikdörtgen şeklinde

olan soda kireç camı (soda lime glass) tabir edilen malzeme kullanılmıştır. Amerikan ulusal standart bürosunun (National Bureau of Standards) verdiği 620 numaralı sertifikaya göre, cam malzemesinin içerisinde ağırlıkça %72,08 silisyum dioksit (SiO_2), %14,39 sodyum oksit (Na_2O), ve çok ufak yüzdelikte diğer maddelerden bulunmaktadır. Kullanılan safir, c düzleminde (0001) yönelimine ve hegzagonal ($a = 4,758 \text{ \AA}$, $c = 12,992 \text{ \AA}$) tek kristal yapıya sahiptir. Malzeme özellikle III – V grubu yarıiletkenlerin epitaksiyel büyütmelerinde yaygın kullanılan bir alttaştır. Safirin boyutları, boy $\times$ genişlik $\times$ kalınlık olarak $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0,5\text{mm}$ olan dikdörtgen şeklindedir. Erime sıcaklığı 2040°C , termal genişleme $7,5 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$, öz ısı $0,10 \text{ Cal/}^\circ\text{C}$, sırasıyla 100°C , 200°C ve 300°C deki ısı iletkenliği $46,06, 25,12, 12,56 \text{ W/(m.K)}$, A eksenindeki ve 300K° sıcaklığındaki dielektrik sabiti $\sim 9,4$ olarak verilmektedir. Ayrıca bu malzemenin safsızlığı %99,99 değerindedir ve görüntüsü şeffaf renktedir. Araştırmada kullanılan hedef Galyum Nitrür hedeftir ve ACI Alloys şirketinden satın alınmıştır. Hedef malzemenin safsızlık değeri %99.99 (4N) ve plaka boyutları $50,8 \text{ mm} \times 3175 \text{ mm}$ (çap $\times$ kalınlık) değerindedir. Büyütmelere başlamadan önce ilk olarak, tüm kullanılacak alttaşlar, istenilen boyutlarda elmas kesici kalem ile elle kesildi. Daha sonra, ince filmlere Radyo Frekans Magnetron Saçtırma yöntemiyle büyütmeye yapmadan önce, temizleme adı verilen şu aşamalar uygulandı. Öncelikle, alttaşlar temiz odada (ISO 7 sınıfı) alttaşın özelliğine göre, çeşitli temizlik aşamalarından geçirildi. n-tipi ve p-tipi silisyum alttaşlar dünyaca bilinen RCA adıyla verilen temizlemeden geçirildi. RCA, RCA-1(Amerika Radyo Kurumu-1) ve RCA-2(Amerika Radyo Kurumu-2) olarak 2 aşamadan oluşmaktadır. Organik kalıntıları silisyum yüzeyinden sökmek için RCA 1 kullanılmaktadır. Burada öncelikle silisyum üzerine ince bir oksitlenmiş yüzey oluşturulur ve sonra da yüzeyden kirlilikler söktürülmektedir. RCA -2 aşaması ise daha ileri kirliliklerin temizliği için kullanılmaktadır.

RCA 1 (Amerika Radyo Kurumu-1) de sırasıyla izlenen yollar:

- Deiyonize su (DI) , amonyum hidroksit (NH_4OH), hidrojen peroksit (H_2O_2), sırasıyla 325 ml, 65 ml ve 65 ml miktarında (5:1:1 oranında) kullanıldı.

- DI su konur.
- NH_4OH konur 70°C de bekletilir.
- Sonra H_2O_2 konur ve kabarcık çıkar.
- 1-2 dakika bekledikten sonra silisyumlar bu solüsyonun içine atılır.
- 15 dakika bekletilir.
- DI suyla yıkanır.
- Azot gazıyla kurutulur ve RCA-2 den sonra deneye hazır hale gelecektir.

RCA 2 (Amerika Radyo Kurumu-2) de sırasıyla izlenen yollar:

- Deiyonize su (DI), hidrojen klorür (HCl), hidrojen peroksit (H_2O_2), sırasıyla 300 ml, 50 ml, 50 ml miktarlarında (6:1:1 oranında) kullanıldı.
- DI su konur.
- Sonra HCl konur ve 70°C de 15 dakika bekletilir.
- Sonra H_2O_2 konur ve 1-2 dakika beklenir.
- Silisyumlar karışımın içerisinde 10 dakika bekletilir.
- DI suyla yıkanır.
- Azot gazıyla kurutulur ve numuneler büyütme için hazır hale gelmiştir.

Bu temizlik boyunca çeşitli güvenlik önlemlerine uyulması gerekmektedir. Bunlar, göz koruması ve nitrür malzemeler için özel eldivenler kullanılmalıdır. Bu aşamalar, çeker ocakta eldiven ve göz koruması giyilerek temiz odada yapıldı. Buradan bilinmesi gereken hidrojen peroksit malzemesi, patlayıcı bir kimyasaldır bu yüzden bu malzeme devamlı ısıya maruz kalacak şekilde bir yerde unutulmamalıdır. Göz ve deri hidrojen peroksit ile etkileşime girerse, suyla 15 dakika boyunca yıkanmalı ve acilen bir uzman doktora gidilmelidir. Cam alttaşlar için aşağıda verilen temizleme uygulandı.

Cam temizleme aşamasında izlenen yollar:

- Camlar sıvı sabun ile ovalayarak yıkandı.

- Normal suda yıkandı.
- Aseton içerisinde konarak, ultrasonik titreşim altında 5 dakika bekletildi.
- Sonra DI suya konarak, 5 dakika ultrasonik titreşimde bekletildi.
- Metanol içerisinde konarak 5 dakika ultrasonik titreşim uygulandı.
- Sonra DI suya konarak, 5 dakika ultrasonik titreşim altında bırakıldı.
- Azot gazı ile kurutuldu ve numuneler deney için hazır hale gelmektedir.

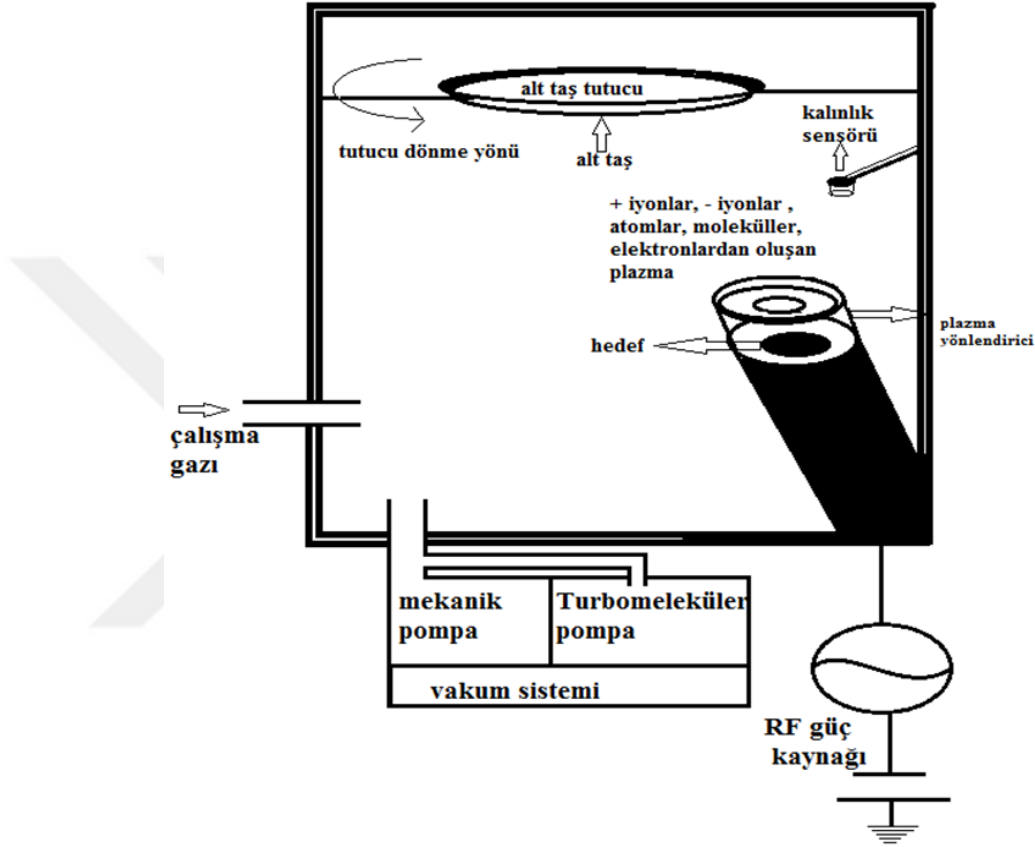
İndiyum Kalay Oksit (ITO) ve safir numuneleri temiz olduklarından dolayı, sadece deiyonize suda yıkayıp, azot ile kurutuldu ve bu sayede büyütme deneyleri için hazır hale gelmiştir.

3.2. Büyütmede Kullanılan RF Magnetron Saçtırma Sistemi

Araştırmada kullanılan sistem VAKSİS mühendislik şirketinden satın alınan PVD-MiDAS 3M (Sistem numarası: VK-1601-2) markalı saçtırma sistemidir. Deneysel çalışmalar, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesindeki temiz odada (ISO 7 sınıf) aşağıda verilen sistem ile yapılmıştır. Kullanılan sistemin teknik özellikleri şu şekildedir verilmektedir:

- En Düşük Basınç $\leq 5 \times 10^{-8}$ Torr,
- Altaş Boyutu 10,16 – 20,32 cm çap,
- Altaş Isıtma maksimum 800°C,
- Altaş Döndürme 3 – 30 rpm (dakikadaki tur sayısı),
- Kontrol tam otomatik,
- Gerekğinde soğutma sistemi,
- 2 adet RF güç kaynağı ve 1 adet DC güç kaynağı toplamda 3 adet hedef malzeme koyma imkânı

mevcuttur. Ayrıca kaplama yukarı yönlüdür ve istenilen açıda büyütme yapılabilir. Şekil 3.1’de kullanılan Radyo Frekans Magnetron Saçırma (RF sputter) sistemin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 3.1. Kullanılan Radyo Frekans Magnetron Saçırma sisteminin şematik gösterimi

RF Magnetron Saçırma yönteminde büyüme plazma ortamında gerçekleştirilmektedir. Öncelikle plazmanın oluşturulması gerekmektedir. Magnetler materyali iyonize ederek malzemenin plazma formuna geçmesini sağlarlar. Sonrasında istenilen malzeme alttaş üzerine yönlendirilerek ve orada yoğunlaşması sağlanarak ince film oluşturulur. Araştırmada kullandığımız sistem, çeşitli mekanik parçalardan ve sistemlerden oluşmaktadır. Bunlardan bahsedilmesi gerekirse, öncelikle sistemin içerisine direkt bağlı vakum sistemi mevcuttur. Bu sistemde temel olarak iki pompa vardır, bir tanesi mekanik pompa diğeri ise turbo moleküler pompadır. Ayrıca sıvı azotun takıldığı bir aparatta mevcuttur fakat sıvı azot bulunmadığından dolayı burası kullanılmaz. Sıvı azot

çok düşük basınçlara hızlı düşmesi için kullanılmaktadır. Bizim araştırmamızda sıvı azot bulamadığımızdan bu bölüm kullanılmadı. Sistemin kontrolü tümüyle otomatiktir şöyle ki; sistemin yanında bir bilgisayar monitörünün içerisinde grafik ara yüzü yüklüdür. Bu grafiksel kontrolde büyüme anında tüm sistemin şekli görülebilir ve tüm değerlere anlık müdahale edilebilmektedir. Bu otomasyonda öncelikle vakuma al komutuna basıldığında ilk olarak mekanik pompa otomatik devreye girmektedir. Mekanik pompa basınç değeri yaklaşık 10^{-3} Torr olduğunda devreden çıkmaktadır. Daha alt seviye basınçlara düşmek için turbo moleküler pompa devreye girmektedir. Burada turbo moleküler pompa yavaş yavaş hızı artarak, tam kapasite çalışma hızı olan %100'e yaklaşık 5-10 dakika arasında ancak ulaşabilmektedir. Vakuma almaya başlanıldığında itibaren 2,5 saat sonra basınç yaklaşık 10^{-6} Torr değerine gelmektedir. Normal şartlarda büyümeye başlamak için bu basınç yeterlidir fakat sistemin içerisinde daha da temiz olması isteniyorsa biraz daha beklenir bu sayede basınç 10^{-7} Torr değerine ulaşılabilir. Sistem vakumlaması bitince, içeriye çalışma gazı verilmesi gerekmektedir. Çalışma gazı boruları, biri oksijen diğeri argon ve bir başkası da azot olmak üzere üç tanedir ve sisteme bağlıdır. Bu borularda akan gaz miktarını ölçen sistemler takılıdır ve anlık olarak otomasyonda sccm (dakikadaki kübik santimetreden akan akış) değeri olarak gösterilmektedir. Bu değerini görmek otomasyonda anlık olarak mümkün olmaktadır. Büyüme için gaz verildikten sonra güç gerekmektedir. Güç kaynağı Radyo Frekans güç kaynağı olup şekilde de görüldüğü üzere silindirik bir mekanizmaya bağlıdır. Bu mekanizmanın üst tarafı yuvarlaktır ve altta boyutuna göre 10,16 – 20,32 cm çapında bir yer vardır. Buraya hedef malzeme konulmaktadır ve üzerine yanlarda vidaları olan ortası yuvarlak boşluk olan plazma yönlendirici aparatı mekanik olarak yerleştirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus bu aparatın alttaki aparata kontak yapmamasıdır. Bu durumu sistemin dışından kontrol etmek mümkündür. Sistemin altında güç kaynağının takılı olduğu bir kablo mevcuttur ve bu kablunun iç içe kısımları multimetre ile ölçüldüğünde eğer akım yoksa problem olmaz. Eğer varsa derhal plazma yönlendirici ile alt aparatı, aseton ile iyice temizlenmelidir. Ayrıca zımpara da yapılmalıdır. Sistemin arka kısmında güç kaynaklarının sigortası da vardır. Nadiren de olsa güç kaynağı çalışmadığında, sigorta indirilip biraz beklenildikten sonra kaldırıldığında sistemde güç kaynağı çalışır vaziyete gelmektedir. Plazma yönlendiricinin işlevi ise plazmanın bir alana yoğunlaştırıp, plazmanın doğru

şeklinde alt taşın üzerine homojen olarak gitmesini sağlamaktır. Altaşların konulduğu tablonun üzerinde altaş tutucu vardır ve bu aparat şekilde gösterildiği yönde 3 – 30 rpm (dakikadaki tur sayısı) arasında değerde dönmektedir. Büyüme koşulları sağlandığında altaş tutucu döndürme açılır ve istenilen döndürme hızı ile döndürülebilmektedir. Plazma yönlendiricinin sağ üst köşesinde kalınlık sensörü mevcuttur ve bu sensör altın ile kaplanmıştır. Bu sensörün kalınlığını doğru ölçtüğünden emin olabilmek ve çift kontrol yapmak için şu şekilde bir kalibrasyon yapıldı. Bir tane numuneyi ince film kaplanıldı ve kalınlık sensörü rakamı kaydedildi. Sonra bu numuneyi KLA tensör profilometre (P-7) ile ölçümü yapıldı ve değerleri karşılaştırıp sensör otomasyon ayarını yaparak kalibrasyonu tamamlandı. Bu sayede, kaç nanometre büyütmek istiyorsak sensör anlık ölçüm yapması vasıtasıyla istenilen kalınlığa ulaşıldığında perde sayesinde büyüme durdurulmaktaydı. Kalınlık sensörünün bir ömrü vardır ve ömrü bittiğinde içindeki malzeme çıkarılıp yeni malzeme konulmaktadır. Bunun dışında, sistemin içinde ve altaşın altında ve plazma yönlendiricinin üzerinde konumlanabilen perde (shutter) adında metal levhalar bulunur. Bu levhalar sistemde istenilen her an için kapalı pozisyona gelebilir ve altaşı plazmadan korur ve büyümeyi önlemektedir. Ayrıca hedef malzemesini de kapalı pozisyonda iken üstünü perdeleyerek korumaktadır. Ne zaman büyümede istenilmeyen bir sorun olsa, geçici olarak perde kapatılır ve plazma gitmeksizin problem çözülebilmektedir. Sistemin içindeki bir diğer aparat ise kaban adı verilen ve sistemin içindeki tüm yüzeyleri kaplayan ince tabakalardır. Bunlar sistemin içindeki yüzeylere vidalanmıştır. Sistemin içerisinde genel temizliği yapılmak istenildiğinde bunlar sökülür ve ilgili kimyasallar ile temizlenir, azotla kurutulur ve tekrar yerine yerleştirilmektedir. Sistem iç temizliği için bunların dışında ve en ilk olarak süpürge makinası ile iç taraf her yer çekilmektedir. Bu sayede toz ve benzeri kaba kirler bununla temizlenmektedir. Ayrıca sistemin dış yüzeyi ısıtıcı aparatına bağlanmıştır. İçerideki yüzeye yapışmış oksijeni kısmen buharlaştırmak için yüzey ısıtıcı mevcuttur. Bu sayede yüzey ısıtılır ve yüzeydeki oksijenler buharlaştırılır ve vakumlanarak sistem dışına atılmaktadır. Sistemin içinde ayrıca cam bir pencere vardır ve içeriğin izlenmesine yararmaktadır. Pencerenin kontrolü dışarıdaki bir mekanik kol tarafından sağlanmaktadır. Bu kol çevrilirken hızlı çevrilirse içeriye oksijen sızabileceği sistemin satın alındığı şirketin mühendislerinin test ölçümünden görülmüştür. Bundan dolayıdır ki bu kol ihtiyaç

halinde yavaşça döndürülmelidir. Sistemin dışındaki aparatlardan bahsedilecek olursa şu şekilde söylenebilmektedir. Öncelikle sistemin altında çeşitli bilgisayar kasaları vardır ve bunlar sistemin otomatik çalışma programının ve grafik ara yüzünün yüklenilip çalıştırıldığı kasalardır. Yine altında Radyo frekans ve doğru akım güç kaynakları ana kabloları ve bunların çalışıp çalışmadığını anlaşılabilecek çeşitli ikaz ışıkları vardır. Arka tarafta temelde gaz akış boruları bunlar oksijen azot ve argon ve bunların kaynağa bağlı olduğu vanaları bulunur. Ayrıca bunların makineye bağlı olan kısımlarında gaz miktarı ölçüm sensörleri vardır. Sistemin arka kısmında güç kaynaklarının, yüzey ısıtıcısının ve çeşitli aparatların ana sigortaları mevcuttur. Sistemin ön panel kısmında ise üstte bilgisayar ekranı, altta ise üstten aşağıya sırasıyla, bilgisayar aç-kapa, DC saçtırma aç-kapa ve DC göstergeleri ve bunun altında ise sistem aç-durdur ve en altta sol tarafta ise ana şalter 0 ve aç düğmeleri mevcuttur. Sistemi kapatma aşamaları ise şöyledir. Önce bilgisayar kapa butonu sonra açıksa DC dur butonu ve daha sonra sistemi durdur butonuna basılır ve en son şalter sıfır konumuna getirilir ve işlem bitirilmiş olur. Açma aşamaları kapatma aşamalarının tam tersi olur ki önce şalter açılır sonra sistem açılır ve en son bilgisayar açılmaktadır. Büyütmenin gerçekleştiği laboratuvar bir temiz odadır ve kendine özel elbisesi mevcuttur, bu elbise ile girilmek zorundadır. Ayrıca tüm büyütme ve deney aşamasında kesinlikle eldiven giyilerek numunenin kirlenmemesine özen gösterilmektedir. Bu tekniğin kullanılmasının birçok avantajı mevcuttur:

- Tekniğin dünyaca bilinen ve tanınmış olmasıdır.
- Tekniğin maliyetinin diğer bazı tekniklere örneğin Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniğine göre ucuz olmasıdır.
- Çok çeşitli malzemeler kullanılabilmesidir. Metal malzemelerde genelde Doğru Akım Saçtırma (DC Sputter) kullanılırken iletken olmayan hedef malzemelerinde Radyo Frekans Magnetron Saçtırma (RF Sputter) kullanılmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

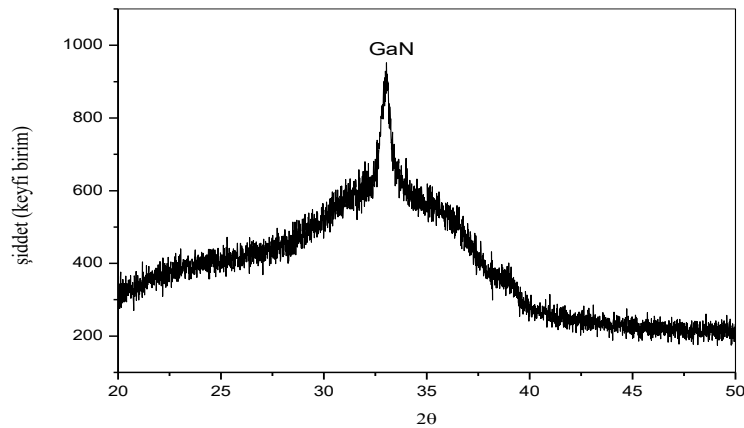
4.1. Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyon

4.1.1. X-Işını kırınımı (XRD) ölçümleri

X-ışını kırınımı ölçümleri alınarak kristalin yapısal özellikleri hakkında bilgi edinmek mümkün olduğundan, numunelerimizin yapısını karakterize edebilmek için X ışını kırınımı ölçümleri alınmıştır. GaN ince filmlerinin yapısal analizi için D-2 Phaser Bruker ($\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$) markalı X-ışını Kırınımı (XRD) ölçüm cihazı kullanılmıştır.

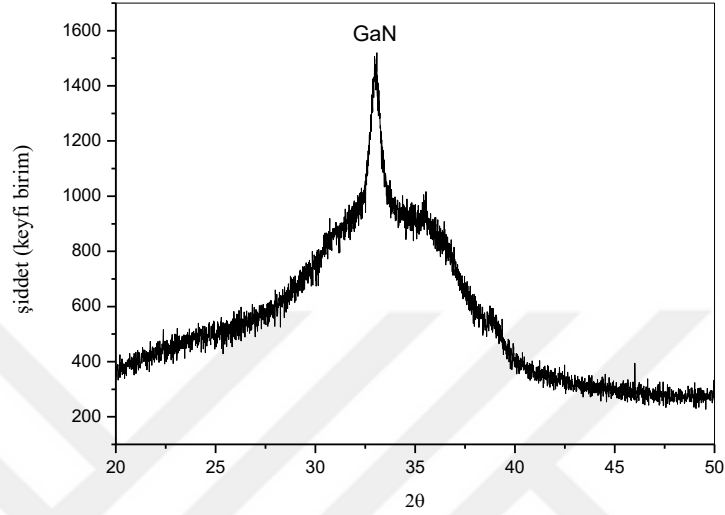
50 Watt, 75 Watt, 100 Watt ve 125 Watt değerindeki farklı Radyo Frekans (RF) güç değerlerinde büyütülen GaN ince filmleri cam, ITO, n-tipi silisyum, p-tipi silisyum, Al_2O_3 (0001) alttaşları üzerine büyütüldü. Buradaki temel amaç, Radyo Frekans gücünün malzemenin kristal yapısı kalitesine etkilerini araştırmaktır.

50 Watt RF gücünde cam üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



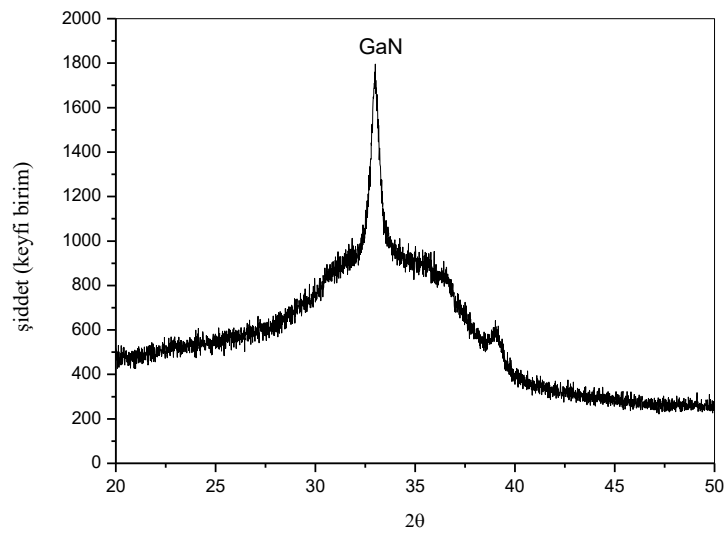
Şekil 4.1. 50 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

75 Watt RF gücünde cam üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir.



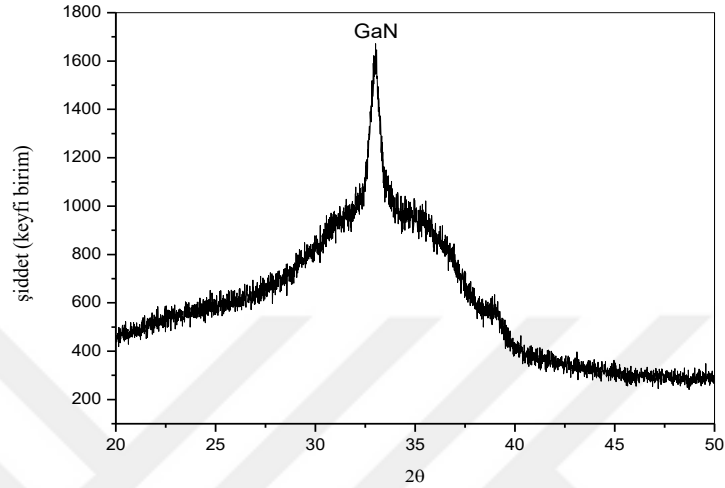
Şekil 4.2. 75 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

100 Watt RF gücünde cam üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.3’de görülmektedir.



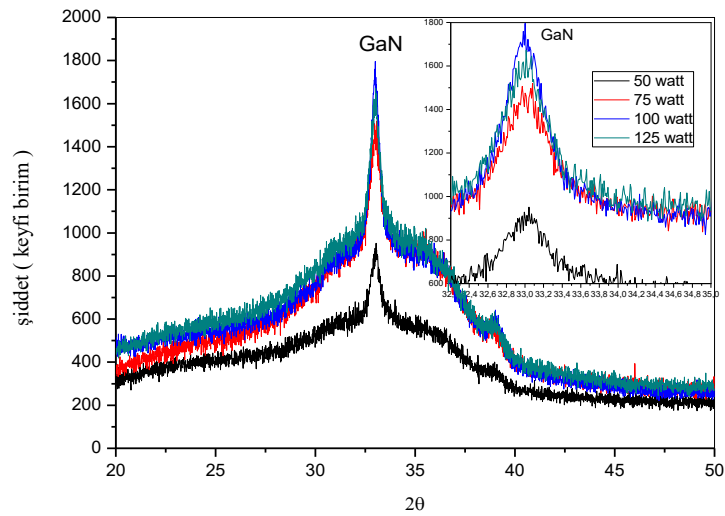
Şekil 4.3. 100 Watt RF gücü altında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

125 Watt RF gücünde cam üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.4’de görülmektedir.



Şekil 4.4. 125 Watt RF gücü altında cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

50, 75, 100 ve 125 Watt RF gücü varlığında, cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD ölçümü Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu sayede, buradaki kristal yapıdaki değişimler karşılaştırmalı olarak görülebilecektir.



Şekil 4.5. Farklı RF güçleri altında cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

Burada ölçümlerimiz yüzeysel (grazing) biçiminde alınmıştır yani 5 – 100 nm yüzeyden ölçüm alınmıştır. ~33°’de karakteristik pik gözlenmiştir ve bu pik GaN malzemesinin hegzagonal kristal yapısına ve (100) yönelime sahip karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-074-9380).

Numunelerimizin her birinin tanecik boyutunu hesaplamak için Scherrer formülü kullanılmıştır (Patterson 1939).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

Bu ifadede D kristalin tanecik boyutu, λ kullanılan X -ışını dalga boyu, β yarı yükseklik genişliği, θ Bragg'ın kırınım açısı ve GaN malzemesi için kullanılan sabit $K = 0,9$ olarak verilmektedir. Bu bağıntıdan yararlanarak, numunelerimizin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar çizelgede verilmiştir.

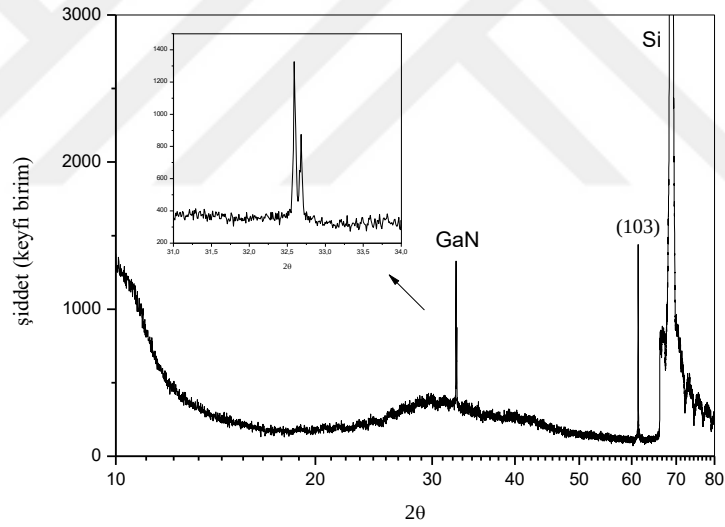
Çizelge 4.1. Farklı RF gücünde cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu - Alt taş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
50 Watt-Cam	(100)	11,93032	33,04	32,87	0,73	a=3,1430 c=5,7300
75 Watt-Cam	(100)	8,71342	33,06	32,87	0,99	a=3,1430 c=5,7300
100 Watt-Cam	(100)	8,89208	32,85	32,87	0,97	a=3,1430 c=5,7300
125 Watt-Cam	(100)	9,63267	33,01	32,87	0,90	a=3,1430 c=5,7300

Farklı alttaşlar üzerinde büyütülen GaN ince filmlerine, RF gücünün etkisini araştırmak için farklı bir alttaş olan İndiyum Kalay Oksit (ITO) malzemesi kullanıldı. 50, 75, 100

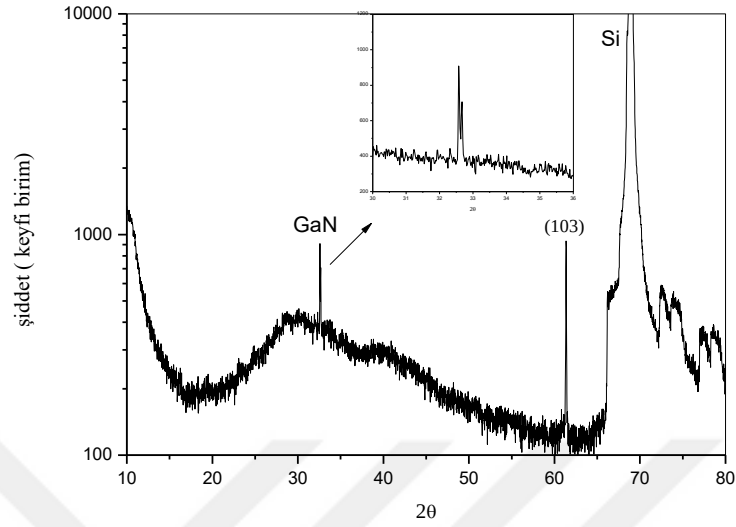
ve 125 Watt RF güçlerinde ITO alttaşın üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiklerinde herhangi bir pik gözlenmedi. Yayvan şekilde tümsek davranışı gösteren bu grafiklerden, ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerin amorf yapıda olduğu bulgusuna ulaşıldı. Farklı RF gücünün tüm değerlerinde İndiyum Kalay Oksit (ITO) alttaşı için amorf yapıya sahip GaN ince filmi elde edilmiştir.

n-tipi silisyum üzerine GaN ince filmleri 50, 75, 100, 125 Watt Radyo Frekans güçlerinde büyütüldü ve X –ışını kırınımı ölçüm grafikleri alınmıştır. 50 Watt RF gücü varlığında n-Si üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu Şekil 4.6’da görülmektedir.



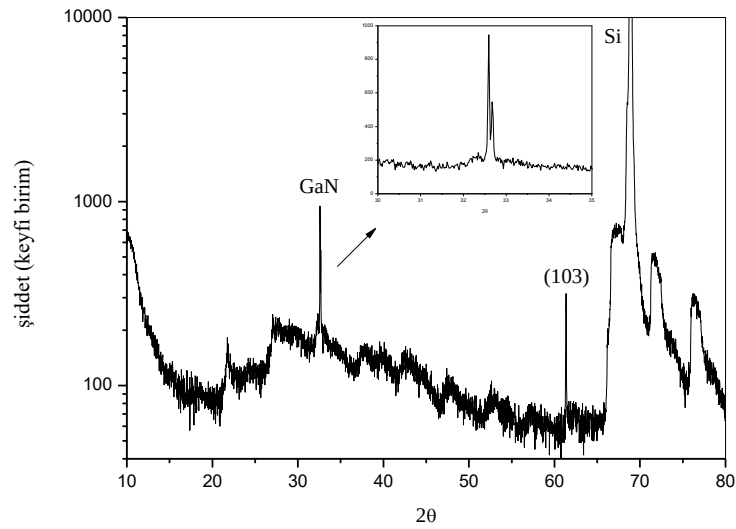
Şekil 4.6. 50 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu

75 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu Şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7. 75 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu

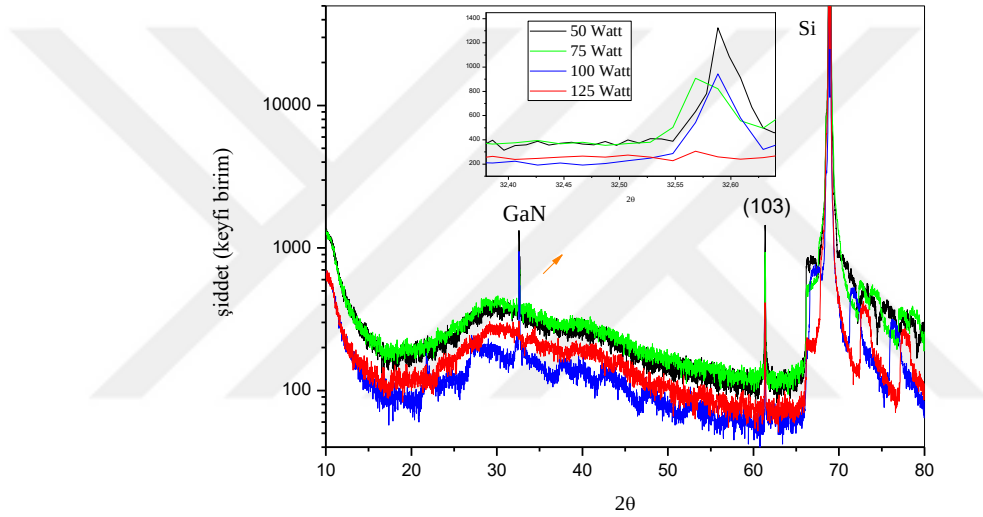
100 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8. 100 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumu

125 Watt RF gücü varlığında n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmi için XRD spektrumunda pik gözlenmedi. Tümseksi davranışı gösteren grafikten bu yapının amorf olduğu değerlendirildi.

Tüm uygulanan RF güçleri için, n-tipi silisyum üzerine GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9. Tüm uygulanan RF güçleri için, n-tipi silisyum üzerine GaN ince filminin XRD spektrumu

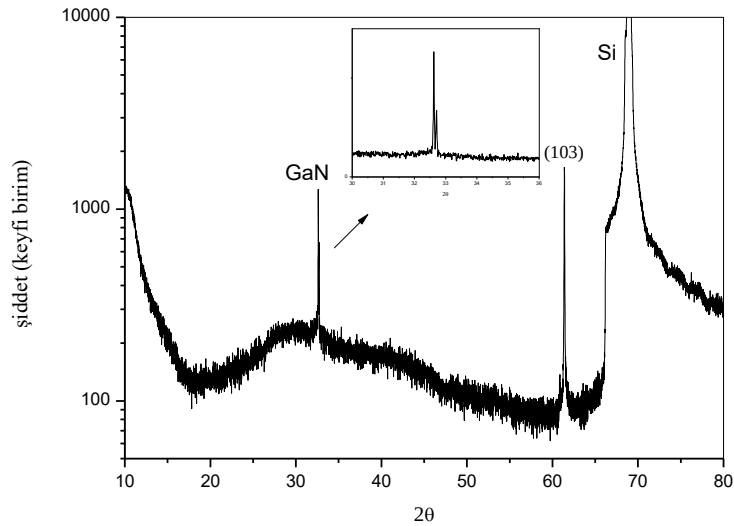
n-tipi silisyum üzerine GaN ince filmlerden $\sim 32,58^\circ$ pik tespit edildi ve bu pik yaygın olarak hegzagonal GaN (100) düzleminin karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ ’de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN’ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012).

(4.1) formülüyle verilen Scherrer bağıntısı yardımıyla numunenin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı RF gücünde n-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

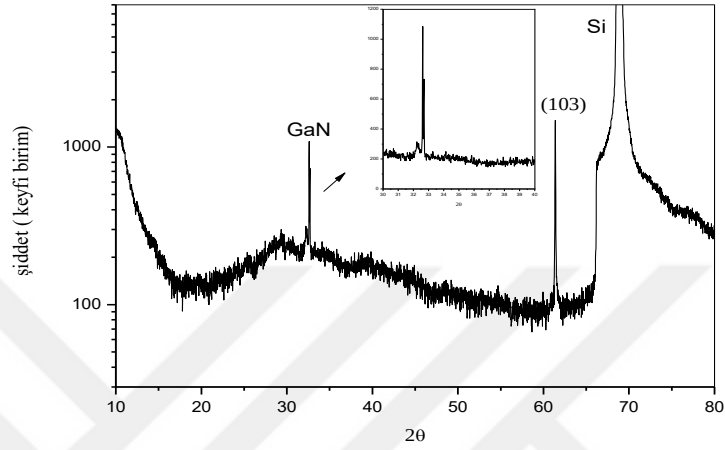
Uygulanan büyütme koşulu - Alt taş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
50 Watt-n-Si	(100)	0,04881	32,58	32,38	177,19	a=3,1900 c=5,1890
75 Watt-n-Si	(100)	0,05374	32,56	32,38	160,92	a=3,1900 c=5,1890
100 Watt-n-Si	(100)	0,05318	32,58	32,38	162,63	a=3,1900 c=5,1890

Bir diğer kullanılan farklı alttaş çeşidi p-tipi silisyumdur. p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 50 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği Şekil 4.10'da verilmektedir.



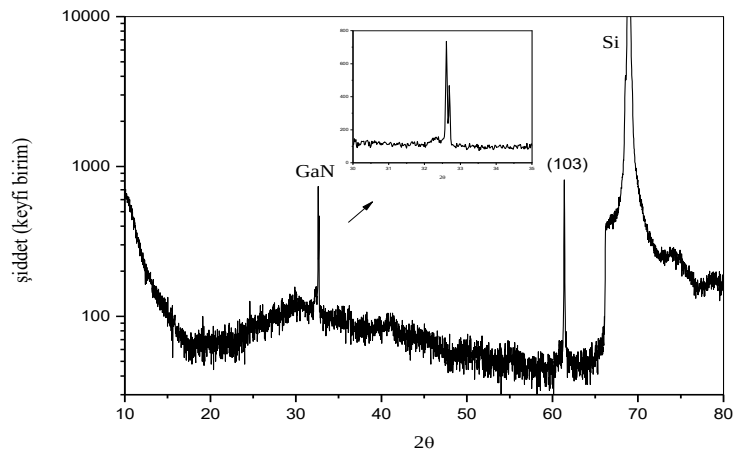
Şekil 4.10. p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 50 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği

p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 75 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği Şekil 4.11’de görülmektedir.



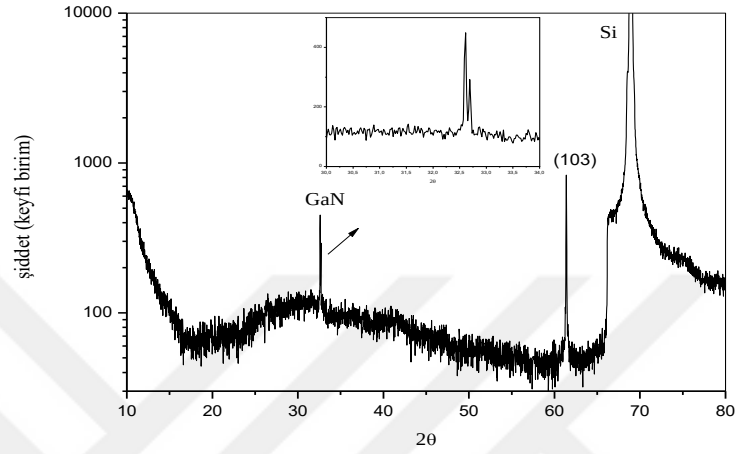
Şekil 4.11. p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 75 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği

p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 100 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği Şekil 4.12’de verilmektedir.



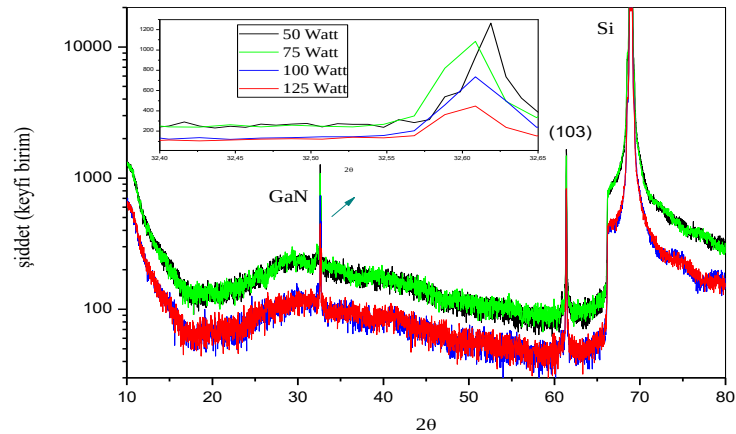
Şekil 4.12. p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 100 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği

p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 125 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği Şekil 4.13’de görülmektedir.



Şekil 4.13. p-tipi silisyum alttaşın üzerine GaN ince filminin 125 Watt RF gücü büyütme koşulundaki XRD grafiği

Bütün uygulanan RF güçleri için, p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.14’de verilmektedir.



Şekil 4.14. Bütün uygulanan RF güçleri için, p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

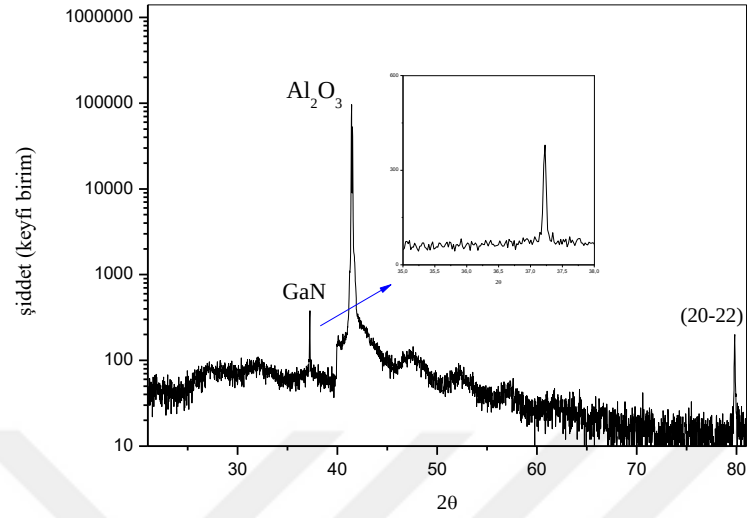
p-tipi silisyum üzerine GaN ince filmlerin XRD grafiklerinde $\sim 32,6^\circ$ pik gözlemlendi. Bu pik yaygın olarak hegzagonal GaN (100) düzleminin karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012).

(4.1) formülüyle verilen Scherrer ilişkisinden yararlanarak, numunenin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı RF gücünde p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

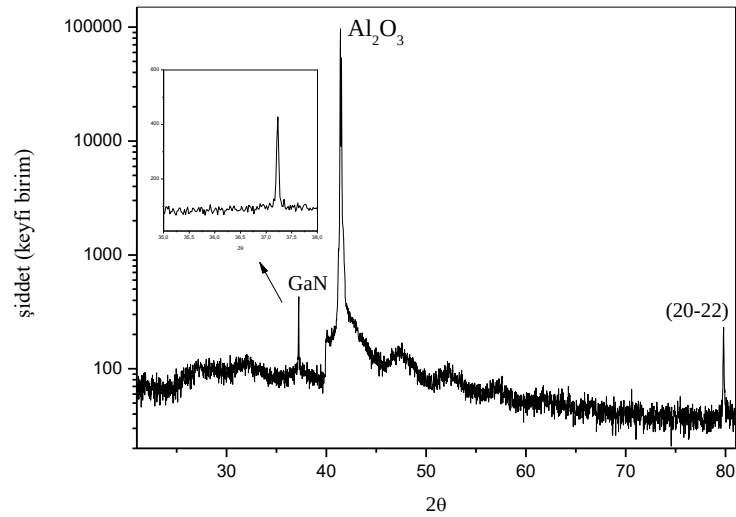
Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
50 Watt-p-Si	(100)	0,04974	32,61	32,38	173,89	a=3,1900 c=5,1890
75 Watt- p-Si	(100)	0,05458	32,60	32,38	158,45	a=3,1900 c=5,1890
100 Watt- p-Si	(100)	0,05300	32,60	32,38	163,19	a=3,1900 c=5,1890
125 Watt- p-Si	(100)	0,05480	32,60	32,38	157,82	a=3,1900 c=5,1890

Safir alttaş malzemesi özellikle III – V grubu yarıiletkenlerin epitaksiyel büyütmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. 50 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu Şekil 4.15'de görülmektedir.



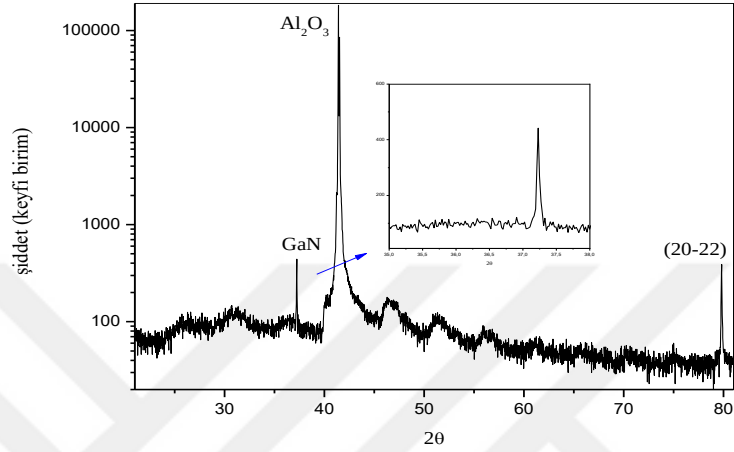
Şekil 4.15. 50 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu

75 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu Şekil 4.16’da verilmektedir.



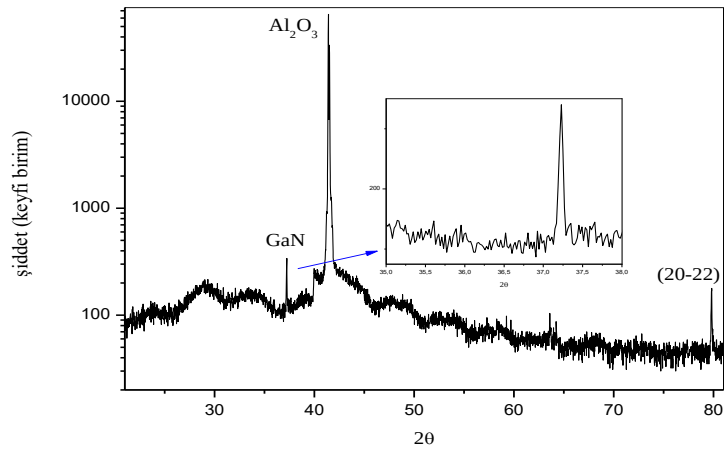
Şekil 4.16. 75 Watt RF gücü uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu

100 Watt RF gücü uygulanarak safır üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu Şekil 4.17’de görülmektedir.



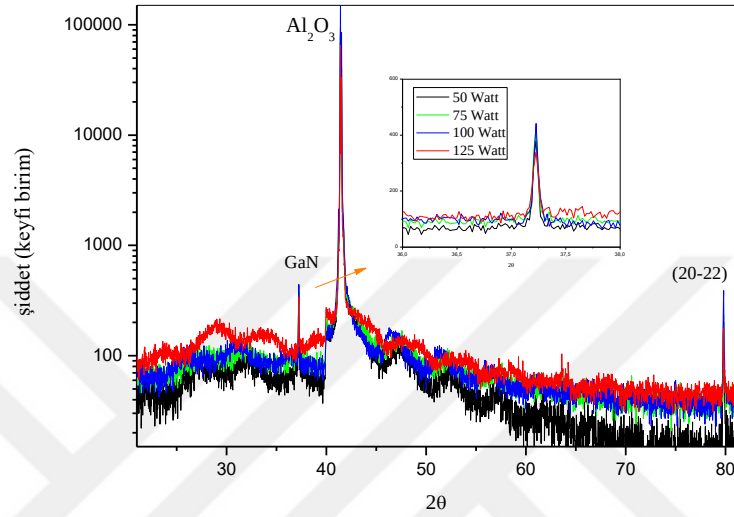
Şekil 4.17. 100 Watt RF gücü uygulanarak safır üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu

125 Watt RF gücü uygulanarak safır üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18. 125 Watt RF gücü uygulanarak safır üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu

50, 75, 100, 125 Watt RF güçleri için safir üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.19’da görülmektedir.



Şekil 4.19. 50, 75, 100, 125 Watt RF güçleri uygulanarak safir üzerine büyütülen GaN ince filmin XRD spektrumu

Al_2O_3 (0001) alttaş üzerine GaN ince filminin, farklı RF gücü için XRD spektrumu Şekil 4.19’da verilmiştir. $\sim 37^\circ$ ’de pik tespit edildi ve bu pik yaygın olarak hegzagonal GaN (101) düzleminin pikidir (PDF kodu: 01-079-2499). Bir başka pikte $\sim 79,8^\circ$ ’de gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN’nın $(20\bar{2}2)$ yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Schwaiger *et al.* 2010).

Scherrer bağıntısı yardımıyla numunelerin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.4 verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı RF gücünde safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}^{\circ}$)
50 Watt-Safir	(101)	0,27385	37,18	38,062	31,98	a=3,0950 c=5,0000
75 Watt- Safir	(101)	0,27402	37,18	38,062	31,96	a=3,0950 c=5,0000
100 Watt- Safir	(101)	0,17451	37,22	38,062	50,19	a=3,0950 c=5,0000
125 Watt- Safir	(101)	0,35003	37,22	38,062	25,02	a=3,0950 c=5,0000

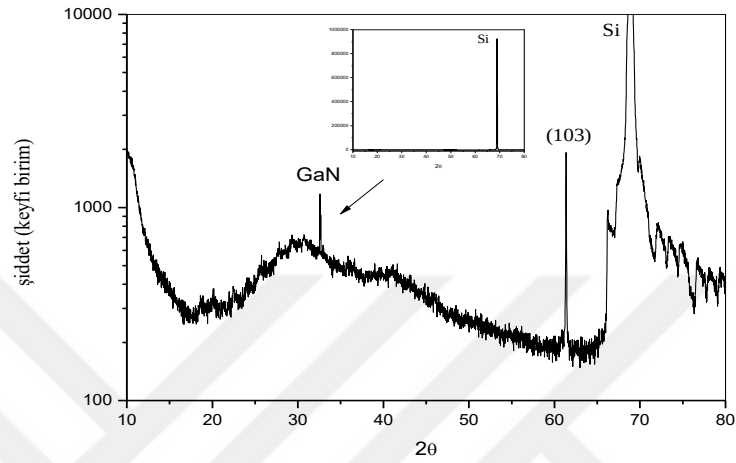
Farklı RF güçlerinde yapılan büyütmede, tüm alttaşlar için uygulanan büyüme koşulları (alttaş sıcaklığı, çalışma basıncı, kalınlık vesaire) aşağıdaki Çizelge 4.5’de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Farklı RF güçlerinde yapılan büyütmede, tüm alttaşlar (n-Si, p-Si, cam, ITO ve Safir) için uygulanan büyüme koşulları

RF gücü (Watt)	Alttaş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Başlangıç basıncı (Torr)	Çalışma basıncı (Torr)	Büyüme hızı ($\text{\AA}/\text{s}$)	Büyüme zamanı (dakika)	Film kalınlığı (nm)
50	300	$1,3 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10^{-3}$	0,1	114	100
75	300	$1,4 \times 10^{-6}$	$6,5 \times 10^{-3}$	0,2	105	110
100	300	$6,6 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-3}$	0,3	50	100
125	300	$1,7 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10^{-3}$	0,4	58	100

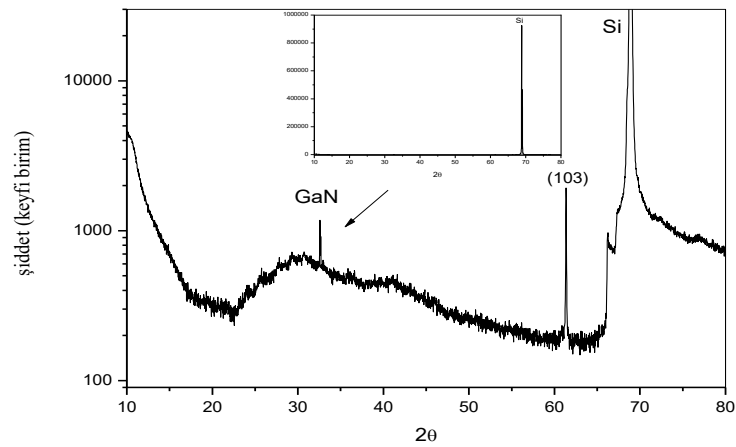
Büyütme yaparken bir diğer büyütme parametresi, büyütmede çalışma gazı olarak uygulanan azot gazı miktarıdır. Ayrıca büyütme yaparken hiç azot gazı vermemekte ince filmin fiziksel özelliklerini etkileyebileceğini düşünüldü ve bunun da araştırılmasına karar verildi. Araştırmanın bu aşamasında, n-tipi silisyum, p-tipi silisyum, İndiyum Kalay Oksit (ITO), cam alttaşları üzerine GaN ince filmleri sırasıyla azot gazı 0 sccm, 1 sccm, 2 sccm, 3 sccm ve son olarak ta 4 sccm akışlarında

uygulanarak XRD ölçümleri alındı. n-tipi silisyum alttaşı üzerine 0 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.20’de verilmektedir.



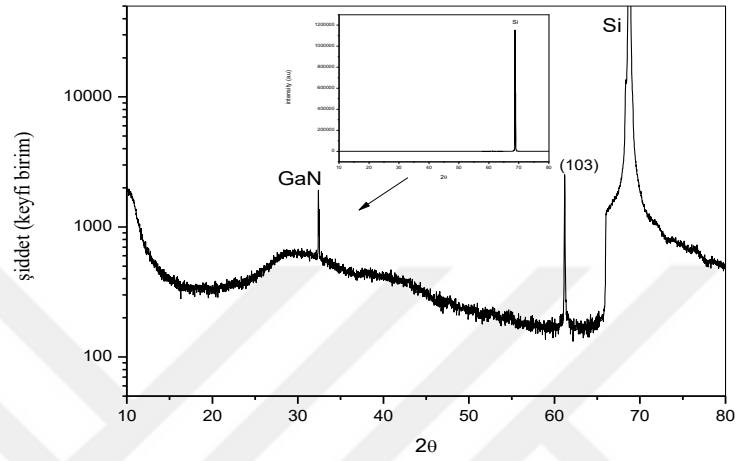
Şekil 4.20. n-tipi silisyum alttaşı üzerine 0 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

n-tipi silisyum alttaşı üzerine 1 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.21’de verilmektedir.



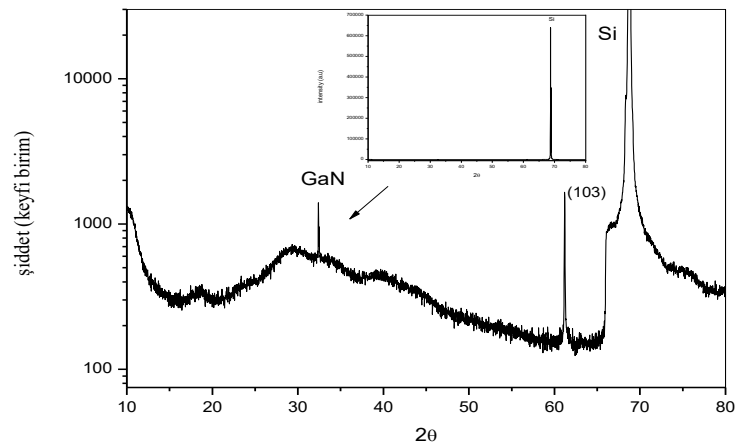
Şekil 4.21. n-tipi silisyum alttaşı üzerine 1 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

n-tipi silisyum alttaş üzerine 2 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.22’de görülmektedir.



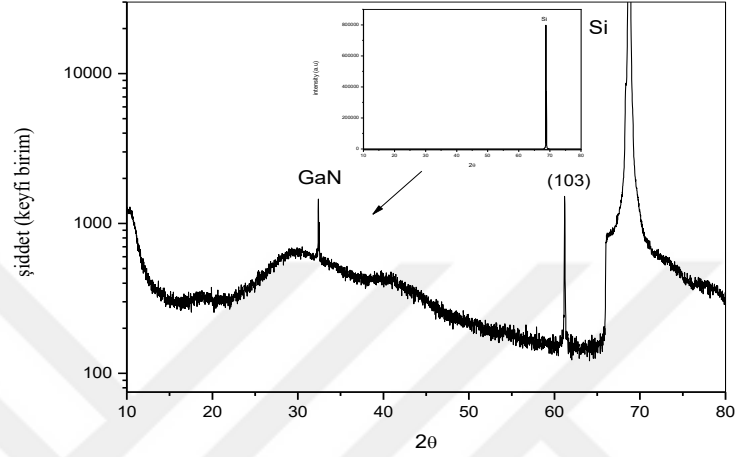
Şekil 4.22. n-tipi silisyum alttaş üzerine 2 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

n-tipi silisyum alttaş üzerine 3 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.23’de görülmektedir.



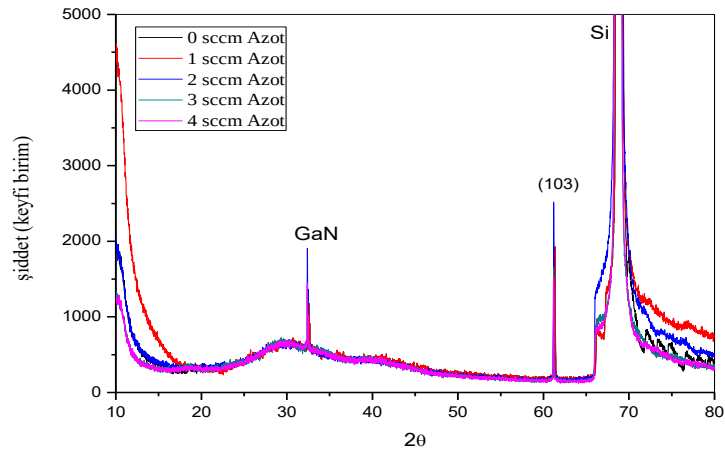
Şekil 4.23. n-tipi silisyum alttaş üzerine 3 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

n-tipi silisyum alttaş üzerine 4 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.24’de verilmektedir.



Şekil 4.24. n-tipi silisyum alttaş üzerine 4 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

n-tipi silisyum alttaş üzerine tüm azot gazı akışlarında büyütülen GaN ince filmlerinin XRD spektrumu Şekil 4.25’de görülmektedir.



Şekil 4.25. n-tipi silisyum alttaş üzerine tüm azot gazı akışlarında büyütülen GaN ince filmlerinin XRD spektrumu

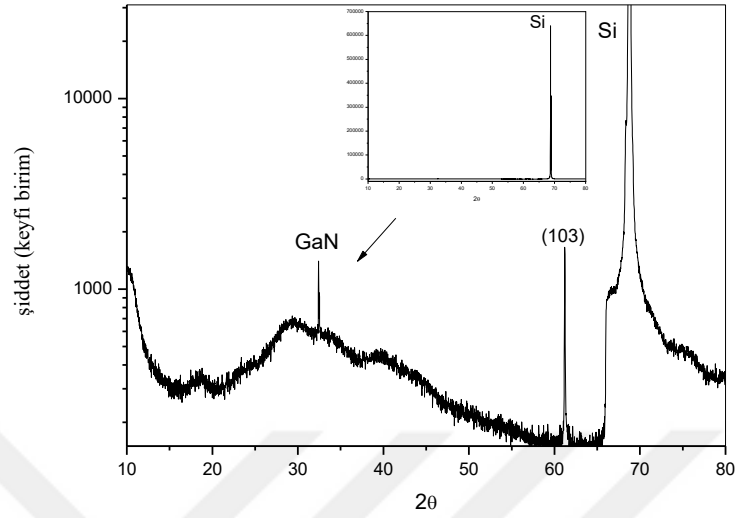
$\sim 32,4^\circ$ 'de gözlemlenen pik, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN (100) düzleminin karakteristik ve yaygın olarak bilinen pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012).

Scherrer bağıntısından yararlanarak n-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. Uygulanan farklı azot gazı akışlarında n-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

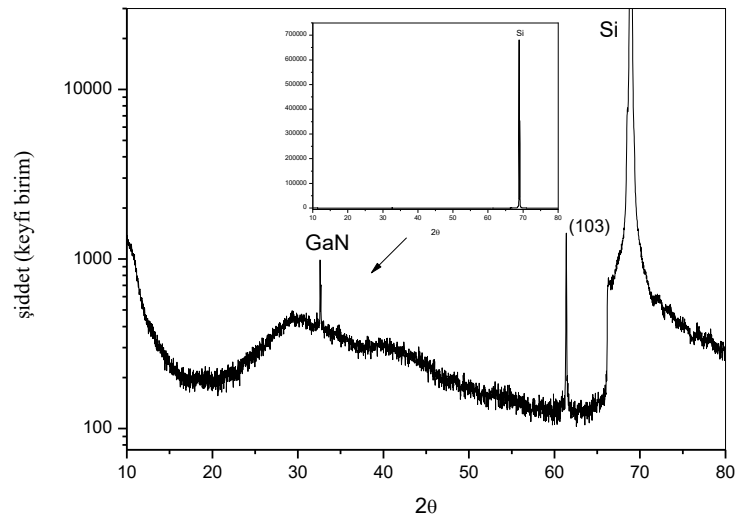
Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
0 sccm-n-Si	(100)	0,05329	32,56	32,38	162,28	a=3,1900 c=5,1890
1 sccm-n-Si	(100)	0,05323	32,56	32,38	162,45	a=3,1900 c=5,1890
2 sccm-n-Si	(100)	0,05344	32,38	32,38	161,75	a=3,1900 c=5,1890
3 sccm-n-Si	(100)	0,05493	32,40	32,38	157,37	a=3,1900 c=5,1890
4 sccm-n-Si	(100)	0,05279	32,40	32,38	163,75	a=3,1900 c=5,1890

Aynı azot gazı akış değerleriyle p-tipi silisyum üzerine GaN ince filmleri büyütülmüştür. p-tipi silisyum alttaş üzerine 0 sccm, 1 sccm ve 2 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumunda yayvan tümseksi eğri elde edilmiştir ve bu azot gazı akış değerlerinde p-tipi silisyum üzerine amorf yapıda GaN filminin oluştuğu sonucuna varılmıştır. p-tipi silisyum alttaş üzerine 3 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.26'da görülmektedir.



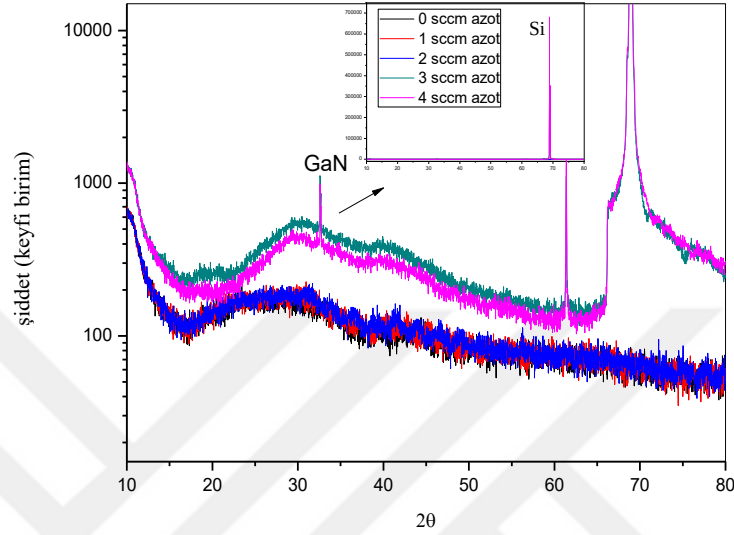
Şekil 4.26. p-tipi silisyum alttaş üzerine 3 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

p-tipi silisyum alttaş üzerine 4 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.27’de verilmektedir.



Şekil 4.27. p-tipi silisyum alttaş üzerine 4 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filminin XRD spektrum

p-tipi silisyum alttaş üzerine tüm azot gazı akış değerleri için büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.28’de görülmektedir.



Şekil 4.28. p-tipi silisyum alttaş üzerine tüm azot gazı akış değerleri için büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

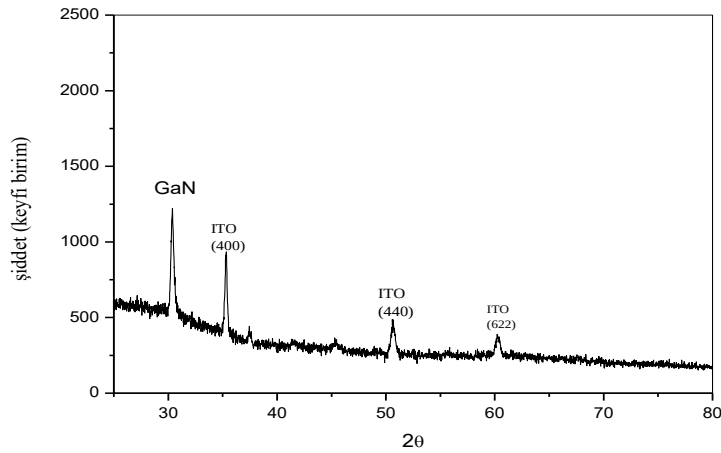
0, 1, 2 sccm azot gazı akışında büyütülen p-si alttaşı üzerine GaN ince filmleri için amorf yapı elde edildi. Fakat 3 ve 4 sccm azot gazında $\sim 32,4^\circ$ de pik gözlenmiştir. Bu pik hegzagonal kristal yapıya sahip GaN (100) düzleminin karakteristik ve yaygın olarak bilinen pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). Scherrer bağıntısından yararlanarak p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri Çizelge 4.7’de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Farklı azot gazı akış değerlerinde p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyüme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
3 sccm-p-Si	(100)	0,05481	32,40	32,38	157,70	a=3,1900 c=5,1890
4 sccm-p-Si	(100)	0,05375	32,58	32,38	160,90	a=3,1900 c=5,1890

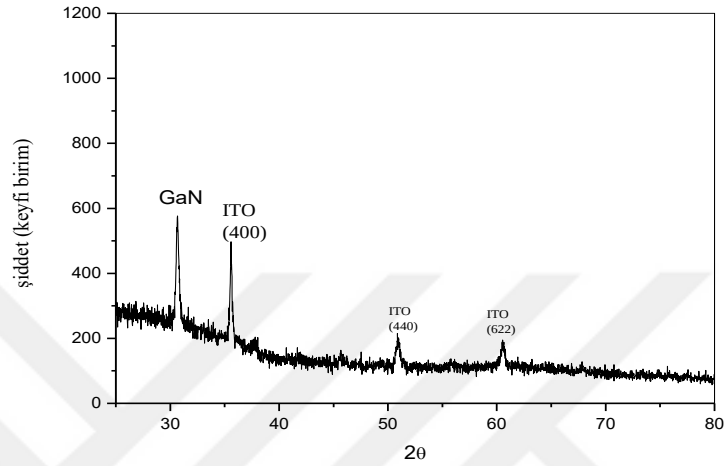
Cam alttaş üzerine GaN ince filmleri 0, 1, 2, 3 ve 4 sccm azot gazı akışında büyütüldü. Cam alttaş üzerine GaN ince filminin XRD grafiği eğrisi, tüm azot gazı akış değerlerinde amorf yapı sergilemiştir.

Farklı azot gazı akışlarında İndiyum Kalay Oksit (ITO) üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin X –ışını kırınımı ölçümleri alınmıştır. 0, 1, 4 sccm azot gaz akışı uygulanarak ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD spektrumundan büyütülen ince filmlerin amorf yapıda olduğu görülmüştür. 2 sccm azot gazı akışı uygulanarak ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.29’da görülmektedir.



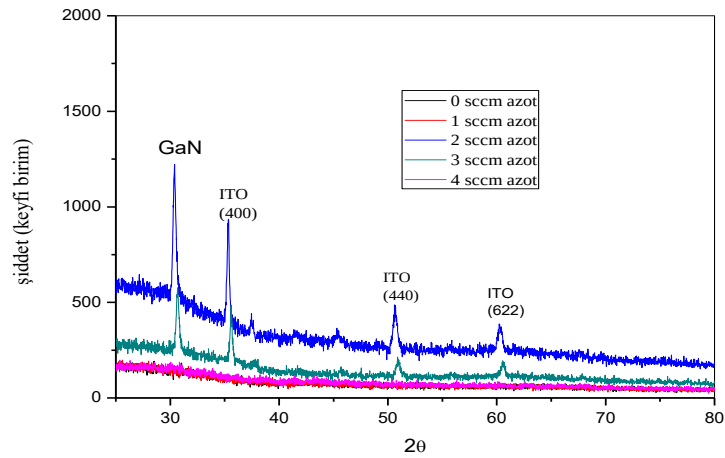
Şekil 4.29. 2 sccm azot gazı akışında ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

3 sccm azot gazı akışında ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu Şekil 4.30'da görülmektedir.



Şekil 4.30. 3 sccm azot gazı akışında ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD spektrumu

Çeşitli gaz akış değerleri için ITO üzerine GaN ince filmlerinin XRD spektrumu Şekil 4.31'de görülmektedir.



Şekil 4.31. Çeşitli gaz akış değerleri için ITO üzerine GaN ince filmlerinin XRD spektrumu

Farklı azot gaz akışlarında İndiyum Kalay Oksit (ITO) alttaşın üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD ölçümü incelendiğinde, 0, 1, 4 sccm azot gaz akış altında büyütülen ince filmler için pik gözlemlenmemiş fakat 2 ve 3 sccm azot gaz akış altında hegzagonal GaN'ın (002) yönelimine ait pik gözlemlenmiştir. (PDF kodu:01-074-9380) Bu pike ek olarak, $\sim 35^\circ$, 51° ve 61° 'de pikler gözlenmiş ve bunların sırasıyla ITO'nun (400), (440) ve (622) yönelimine ait pikler olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Kulkarni *et al.* 1999).

Scherrer bağıntısından yararlanarak ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri Çizelge 4.8'de verilmektedir.

Çizelge 4.8. Farklı azot gaz akışlarında ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

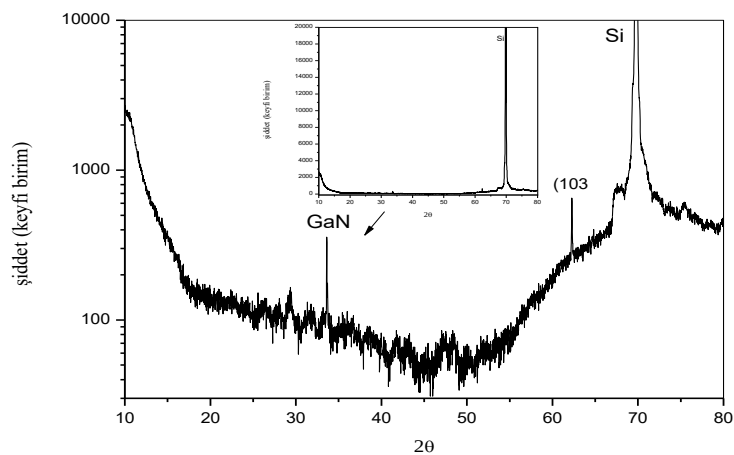
Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri (Å)
2 sccm-ITO	(002)	0,34123	30,38	31,19	25,21	a=3,1430 c=5,7300
3 sccm-ITO	(002)	0,34351	30,67	31,19	25,06	a=3,1430 c=5,7300

Farklı azot gaz akışlarında yapılan büyütmede, tüm alttaşlar için uygulanan büyüme koşulları aşağıdaki Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Farklı azot gaz akışlarında yapılan büyütmede, tüm alttaşlar(n-Si, p-Si, cam, ITO) için uygulanan büyüme koşulları

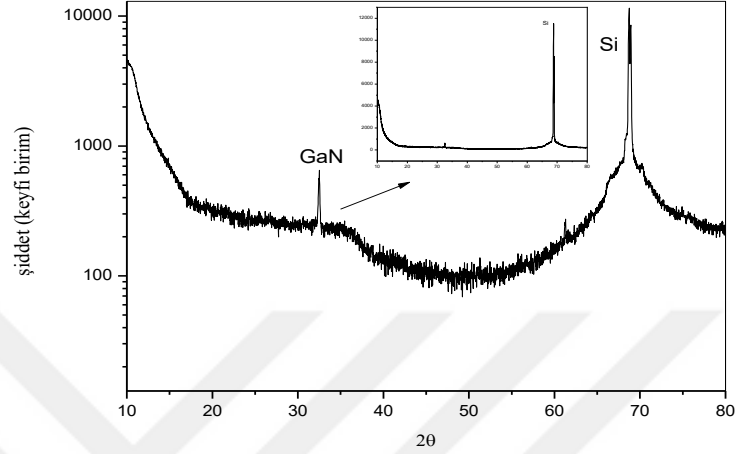
Azot (sccm)	Alttaş sıcaklığı (C°)	Başlangıç basıncı (Torr)	Çalışma basıncı (Torr)	Büyüme hızı (Å/s)	Büyüme zamanı (saat)	Film kalınlığı (nm)
0	300	$1,1 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-3}$	0,3	0,75	100
1	300	2×10^{-6}	$6,5 \times 10^{-3}$	0,3	0,66	75
2	300	$8,2 \times 10^{-7}$	$6,7 \times 10^{-3}$	0,2	1	90
3	300	$8,7 \times 10^{-7}$	$6,3 \times 10^{-3}$	0,3	1	100
4	300	$2,1 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-3}$	0,2	1,2	100

25, 50, 75 ve 100 sccm değerlerinde farklı argon gazı akışı uygulayarak, cam, İndiyum Kalay Oksit (ITO), p-tipi silisyum ve n-tipi silisyum alttaşları üzerine GaN ince filmleri büyütülerek, XRD ölçümleri alınmıştır ve yorumlanmıştır. 25 sccm argon gazı akışında n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiğinden amorf yapıda büyüdüğü görülmüştür. 50 sccm argon gazı akışında n-tipi silisyum altlığının üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.32’de görülmektedir.



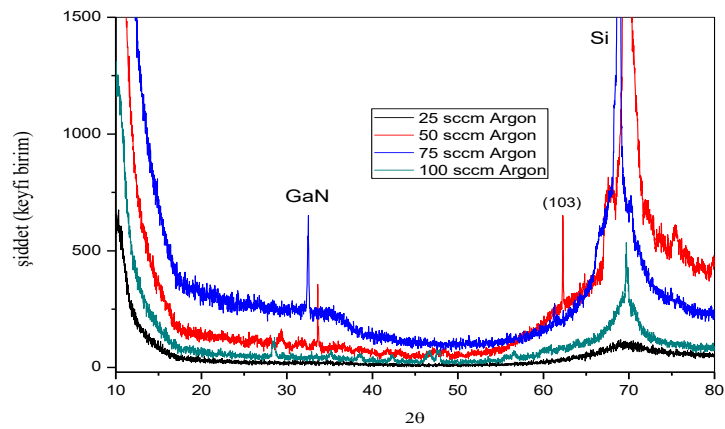
Şekil 4.32. 50 sccm argon gazı akışında n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

75 sccm argon gazı akışında n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.33’de görülmektedir.



Şekil 4.33. 75 sccm argon gazı akışında n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

100 sccm argon gazı akışında n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiğinde pik gözlenmemiştir. Amorf film elde edilmiştir. Uygulanan bütün argon gaz akışlarında n-tipi silisyum üzeri GaN ince filmlerinin XRD’si Şekil 4.34’de görülmektedir.



Şekil 4.34. Uygulanan bütün argon gaz akış değerleri için n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiği

Uygulanan 25, 100 sccm argon gaz akış değerinde, n-Si üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden elde edilen XRD ölçümlerinde pik gözlenmemiştir. Bu bulgu, filmlerin amorf büyüdüğünü söylemektedir. Öte yandan, 50 ve 75 sccm argon gaz akış değerlerinde büyütülen filmlerde $\sim 33^\circ$ 'de pik gözlenmiştir ve bu pik hegzagonal GaN'ın (100) yönelimine ait pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012).

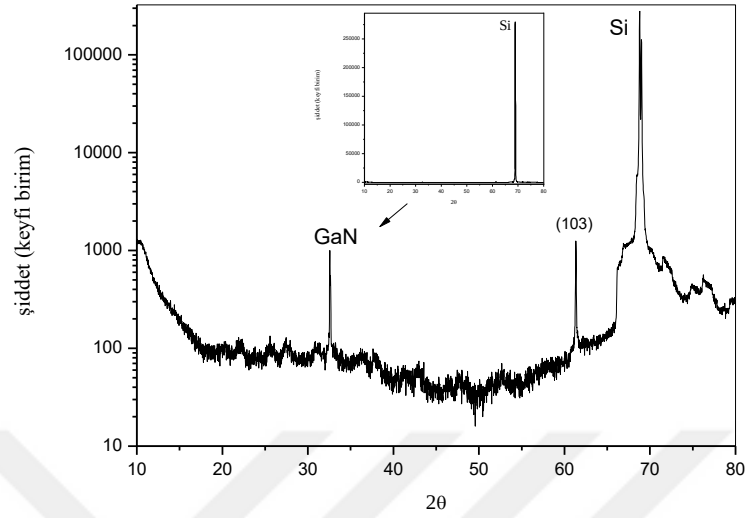
İyi bilinen Scherrer bağıntısından yararlanarak, GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Farklı argon gaz akışında n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
50 sccm-n-Si	(100)	0,04525	33,61	32,38	191,63	a=3,1900 c=5,1890
75 sccm-n-Si	(100)	0,18299	32,48	32,38	47,25	a=3,1900 c=5,1890

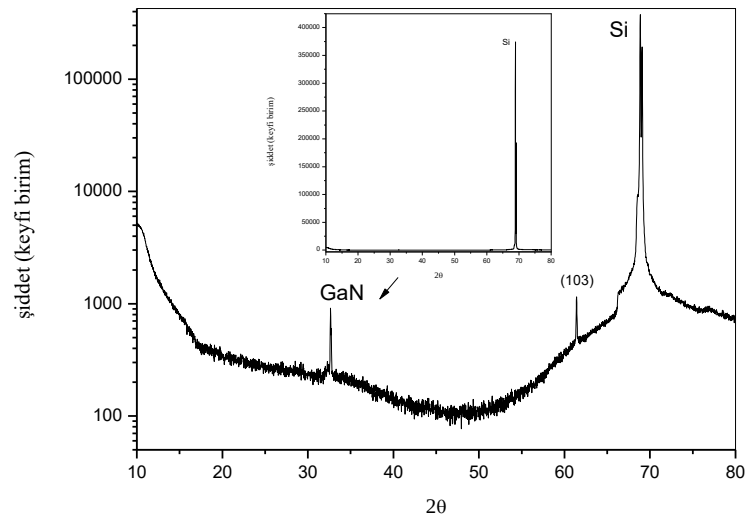
Farklı argon gaz akış değerlerinde p-tipi silisyum alttaş üzerine GaN ince filmleri büyütülmüştür. 25 sccm argon gaz akışında p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiğinde pik gözlenmediğinden filmin amorf olduğu sonucuna varılmıştır.

50 sccm argon gazı akışında p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.35'de görülmektedir.



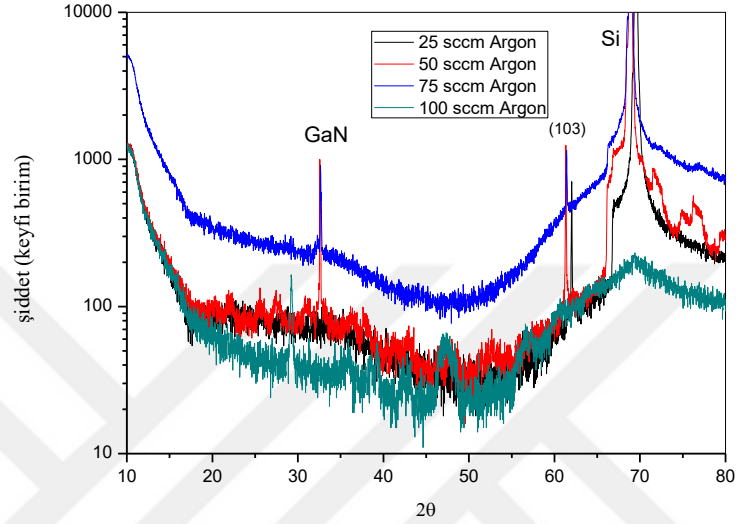
Şekil 4.35. 50 sccm argon gazı akışında p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

75 sccm argon gazı akışında p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.36’da görülmektedir.



Şekil 4.36. 75 sccm argon gazı akışında p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filminin XRD grafiği

Uygulanan tüm argon gaz akış değerleri için p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiği Şekil 4.37’de görülmektedir.



Şekil 4.37. Uygulanan tüm argon gazı akış değerleri için p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiği

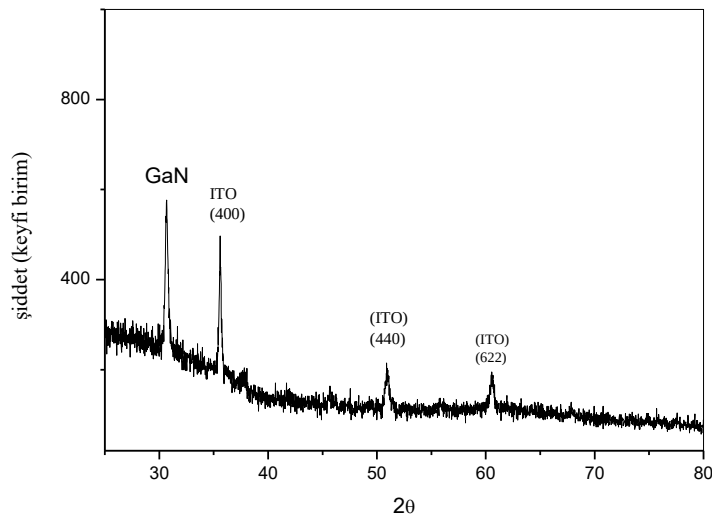
Büyütme yaparken uygulanan 25 ve 100 sccm argon gaz akış değerlerinde pik gözlenmemiştir ve bu filmlerin amorf büyüdüğü sonucu çıkartılmıştır. Fakat 50 ve 75 sccm argon değerlerinde büyütülen filmlerde $\sim 33^\circ$ de pik gözlenmiştir. Bu pik hegzagonal GaN’ın (100) yönelimine ait pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ ’de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN’ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012).

Scherrer formülünü kullanarak, GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Farklı argon gazı akışında p-Si alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

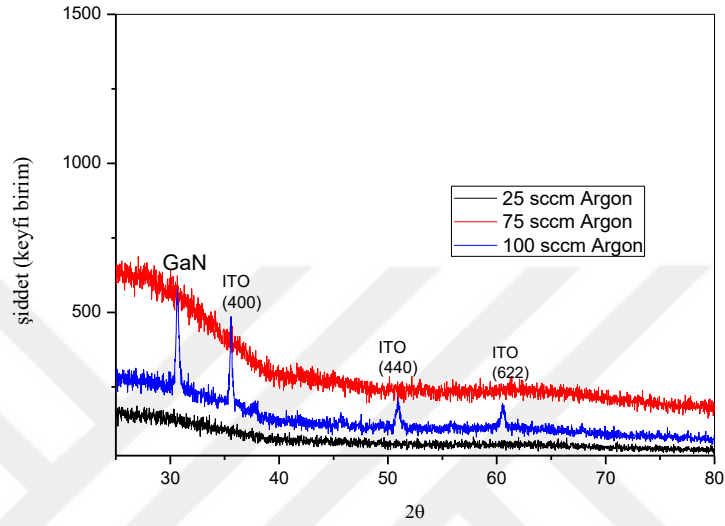
Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
50 sccm-p-Si	(100)	0,10579	32,57	32,38	81,75	a=3,1900 c=5,1890
75 sccm-p-Si	(100)	0,12241	32,65	32,38	70,66	a=3,1900 c=5,1890

Cam alttaşlar üzerine farklı argon gazı akışı uygulanarak GaN ince filmler büyütülmüştür. 25, 50, 75 ve 100 sccm argon gazı verilerek yapılan cam üzerine GaN ince filmlerinin büyütmesinde herhangi bir pik tespit edilememesi üretilen bu filmlerin amorf yapıda olduğunu göstermektedir. 25, 75 ve 100 sccm argon gazı akışında ITO üzerine GaN ince filmleri büyütülmüştür. 100 sccm argon gazı akışında ITO üzerine GaN ince filminin XRD grafiği Şekil 4.38’de görülmektedir.



Şekil 4.38. 100 sccm argon gazı akışında ITO üzerine GaN ince filminin XRD grafiği

Uygulanan argon gazı akış değerleri için ITO üzerine GaN ince filmlerinin XRD grafiği Şekil 4.39’da görülmektedir.



Şekil 4.39. 25, 75 ve 100 sccm argon gazı akışında ITO üzerine GaN ince filminin XRD grafiği

25 ve 75 sccm argon gazı akışında ITO üzerine büyütülen GaN filmlerinin XRD ölçümünden, pik gözlenmemiştir. Amorf yapı elde edilmiştir. Öte taraftan, 100 sccm argon gazı akışında $\sim 30,7^\circ$ de pik tespit edilmiştir. Bu pik hegzagonal GaN’ın (002) yönelimine ait pikidir (PDF kodu: 01-074-9380). $\sim 35^\circ$, 51° ve 61° ’de pikler gözlenmiş ve bunların sırasıyla ITO’nun (400), (440) ve (622) yönelimine ait pikler olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Kulkarni *et al.* 1999).

Scherrer bağıntısı yardımıyla, GaN ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. 100 sccm argon gazı akışında ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri ($\text{\AA}$)
100 sccm-ITO	(002)	0,32954	30,67	31,19	26,11	a=3,1430 c=5,7300

Farklı argon gazı akışında yapılan büyütmede, tüm alttaşlar için uygulanan büyüme koşulları (alttaş sıcaklığı, çalışma basıncı, kalınlık vesaire) aşağıdaki Çizelge 4.13’de sunulmuştur.

Çizelge 4.13. Farklı argon gazı akışında yapılan büyütmede, tüm alttaşlar (n-Si, p-Si, cam, ITO) için uygulanan büyüme koşulları

Argon (sccm)	Alttaş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Başlangıç basıncı (Torr)	Çalışma basıncı (Torr)	Büyüme hızı ($\text{\AA}/\text{s}$)	Büyüme zamanı (dakika)	Film kalınlığı (nm)
25	300	$1,76 \times 10^{-6}$	$1,81 \times 10^{-2}$	0,5	60	100
50	300	$1,92 \times 10^{-6}$	$1,74 \times 10^{-2}$	0,5	60	100
75	300	$3,10 \times 10^{-6}$	$1,65 \times 10^{-2}$	0,5	60	100
100	300	$3,45 \times 10^{-6}$	$1,90 \times 10^{-2}$	0,4	65	100

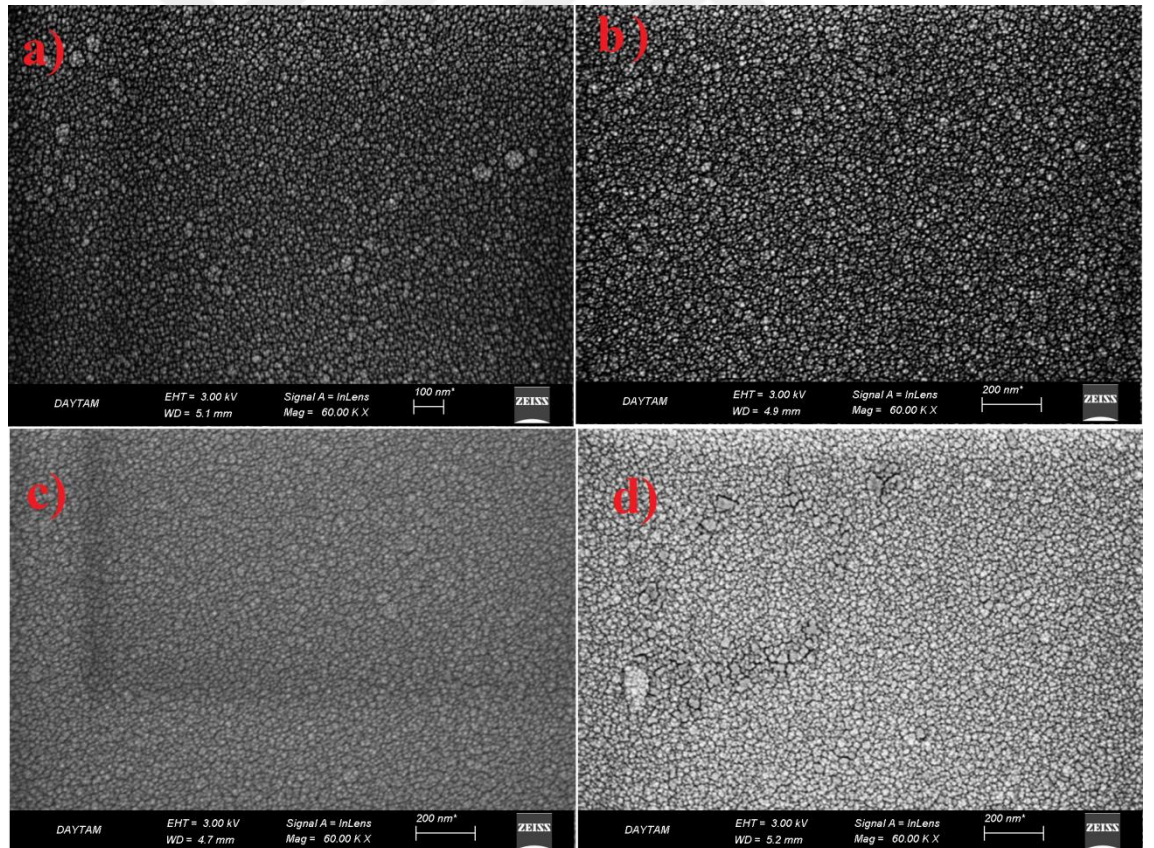
4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri

Bilimsel araştırmalarda, malzemenin yapısal analizlerinde XRD yönteminin yanı sıra taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi de faydalı/kullanışlı bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Bir malzemenin yüzeysel morfolojisinin tayini, teknolojinin günümüz kadar gelişmediği eski zamanlarda göz ile yapılmaktaydı. Fakat burada sorun şu idi: gözümüz ayırma gücü sadece 0,1 milimetre olduğundan ancak bu kadar

çözünürlük sağlayabilmekteydi. Yani elde edilen bilgi ancak bu boyutlarda güvenli idi ve daha alt boyutlar için yetersiz kalmaktaydı. Sonraları bu sorun, ışık mikroskobu kullanılarak biraz daha aşılması sağlandı. Işık mikroskoplarında ışığın dalga boyundan yararlanarak 0,2 mikrona kadar ayırma gücüne ulaşılmıştır. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte elektron mikroskopları keşfedildi ve hızlanan elektronların dalga boyu daha küçük olduğundan dolayı 0,1 nm ye kadar ayırma gücüne ulaşıldı. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) elektron mikroskoplarının bir çeşidi olarak verilmektedir. Bir taramalı elektron mikroskobunun temel olarak çalışma prensibi şu şekilde verilebilmektedir. Tungsten katottan elektronlar, termiyonik/alan vasıtasıyla salınmaktadır ve bu elektronlar dar bir demet şeklinde merceklerle odaklanmaktadır. Bobinler yardımıyla bu elektron demeti numunenin yüzeyinin bir bölgesine çarpmaktadırlar. Bu elektronlara birincil elektronlar denmektedir ve burada numune elektron etkileşiminde çeşitli fiziksel olaylar olabilmektedir. Bunlardan biri şudur: birincil elektronlar, malzemenin atomlarıyla onların elektro statik alanlarıyla etkileşime girmektedir ve yörüngelerindeki elektronlarla çarpışma gerçekleştirebilmektedir. Bu etkileşimde sadece yön değiştirme söz konusu olduğundan, elektronların enerjisi aynı kalır çünkü elektronun hızı aynı kalmıştır. Bu elektronların bazıları, malzeme yüzeyinden tekrar çıkabilmektedirler. Bu elektronların enerjileri, demetteki elektronların enerjilerine yakın olmaktadır, bunlara geri saçılan elektronlar denmektedir. Burada ölçülecek malzemeye bakan detektör ile bu saçılan elektronlar yani geri saçılan elektronlar kaydedilmektedir. Sonra kaydedilen veriler foto çoğaltıcı yükseltece gitmektedir. Geri saçılan elektronlardan elde edilen sinyaller, malzemenin atom numarasına bağlı olduğundan, bu sayede malzemedeki farklı elementler hakkında bilgi edinilebilmektedir. Elektron numune etkileşiminde bir diğer olası fiziksel olay ikincil elektronlar olayı olmaktadır. Gönderilen elektronlar, numune atomu yörünge elektronları ile çarpışmaktadırlar. Dış yörüngedeki elektronlar sökmeye yeterli enerjideki demet elektronları ile çarpıştığında, kendi atomlarından ayrılmaktadırlar. Bunlar ikincil elektronlar olarak adlandırılmaktadır. İkincil elektronlar, detektörde algılanarak, sinyalleri foto çoğaltıcı yükseltece gitmektedir. Elde edilen sinyaller bilgisayardaki ekranda resimlere dönüşür. Bu resimler malzemenin yüzeysel morfolojisi hakkında bilgi sağlamaktadır. Bunun yanı sıra katmanlı malzemelerin kalınlıkları hakkında da kesit görüntüsü alınarak bilgi edinilebilmektedir. Yapılan çalışmada,

büyüttüğümüz ince filmler vakum ortamında 5 nm kalınlığında altın ile kaplanmıştır. Bunun sebebi ise malzememizde aşırı elektron birikimini engelleyerek fazlalık olan elektronların atılmasıdır. Ayrıca Au'nın iletkenlikten dolayı daha iyi SEM görüntüsü olanağı da sağlamaktadır. Araştırmada yüzeyin morfolojik ve yapısal özelliklerinin daha iyi çözünürlük ve ayırma açısından analiz için ikincil elektron metodu kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu resimleri Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezindeki (DAYTAM) ileri spektroskopi laboratuvarındaki Zeiss marka Sigma 300 modeli SEM cihazı tarafından alınmıştır.

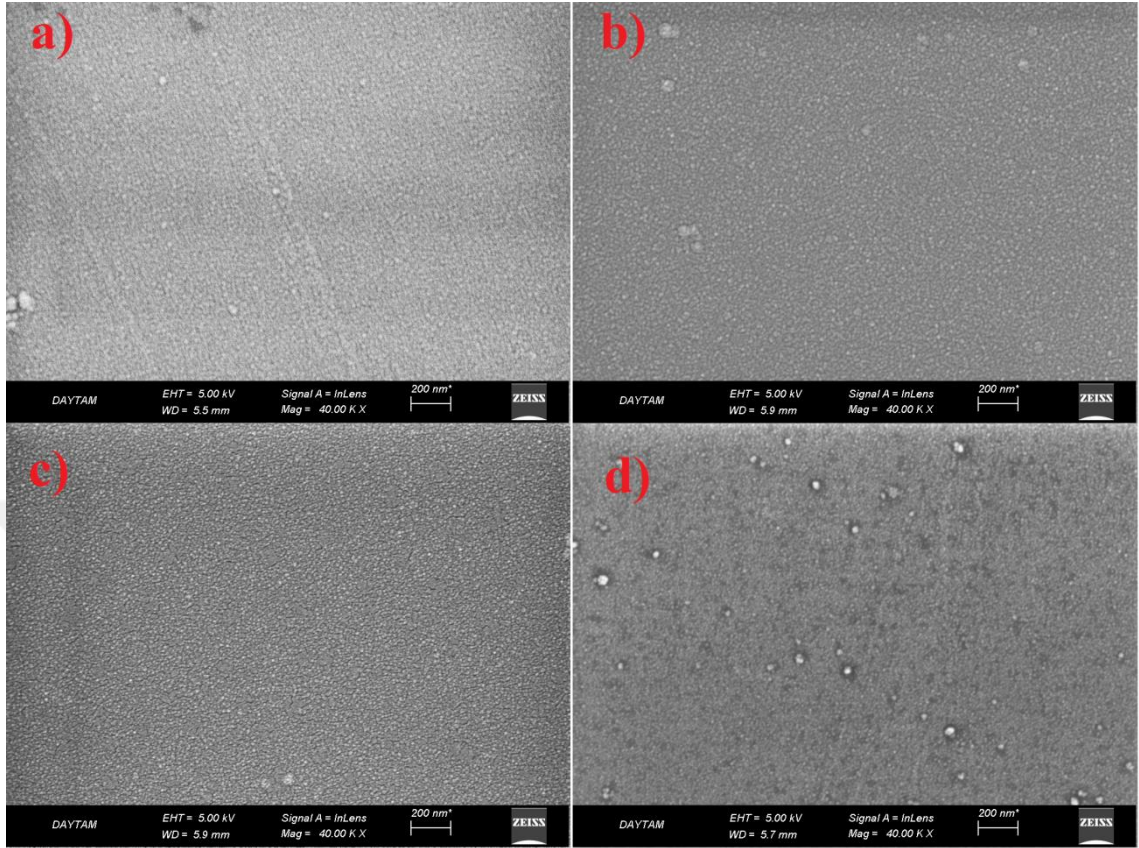
Farklı RF gücü uygulanarak cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerin 60000X büyütmedeki SEM resimleri Şekil 4.40'da gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 60000X büyütmedeki **a)** 50 Watt RF gücündeki **b)** 75 Watt RF gücündeki **c)** 100 Watt RF gücündeki **d)** 125 Watt RF gücündeki SEM resimleri

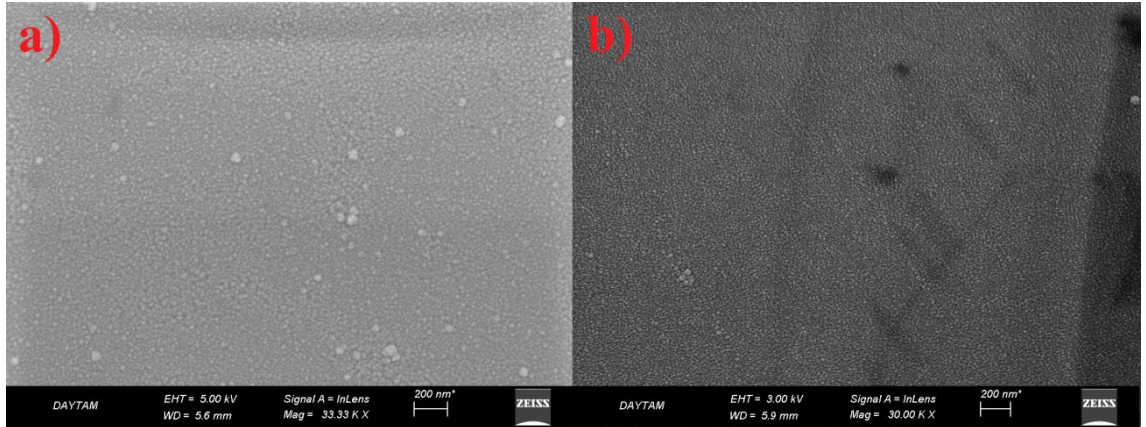
Şekil 4.40 SEM resimleri incelendiğinde şu bulgulara ulaşılabilmektedir. GaN ince filmlerinin kristal tanecik boyutları farklı RF gücü için yani 50, 75, 100, 125 Watt değerleri için farklı boyutta olduğu bulgusu XRD ölçümünden elde edilen sonuçlardan elde edilmiştir. Uygulanan 50 ve 75 ve 100 Watt RF gücü değerlerinde çizgisel kusurlar gözlenmezken fakat 125 Watt RF gücünde yer yer belirgin şekilde çizgisel kusurlar gözlenmektedir. Bu ise malzemenin o bölgelerdeki kırılma katsayısını arttırmaktadır. 50 Watt RF gücündeki büyütmedeki GaN ince filminde, bazı bölgelerde topaklanma şeklinde büyümeler ortaya çıkmaktadır. SEM resimleri, bütün uygulanan Radyo Frekans güç değerlerinde periyodik ve tanecikli yapıyı işaret etmektedir. 75 Watt RF gücündeki büyümelerde GaN ince filminin tanecikli yapısı diğerlerine kıyasla daha net olarak gözükmemektedir. SEM görüntüleri çekilen alanlar için GaN ince filmlerinin büyümesinin hemen hemen homojen oldukları söylenebilmektedir. Burada özet olarak; RF gücünün değiştirilmesi ile GaN ince filmlerinin morfolojik özelliklerinin değişebileceği SEM analizinden ortaya çıkmaktadır.

Farklı RF güçlerinde n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 40000X büyütme SEM resimleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.41. n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 40000X büyütmedeki **a)** 50 Watt RF gücündeki **b)** 75 Watt RF gücündeki **c)** 100 Watt RF gücündeki **d)** 125 Watt RF gücündeki SEM resimleri

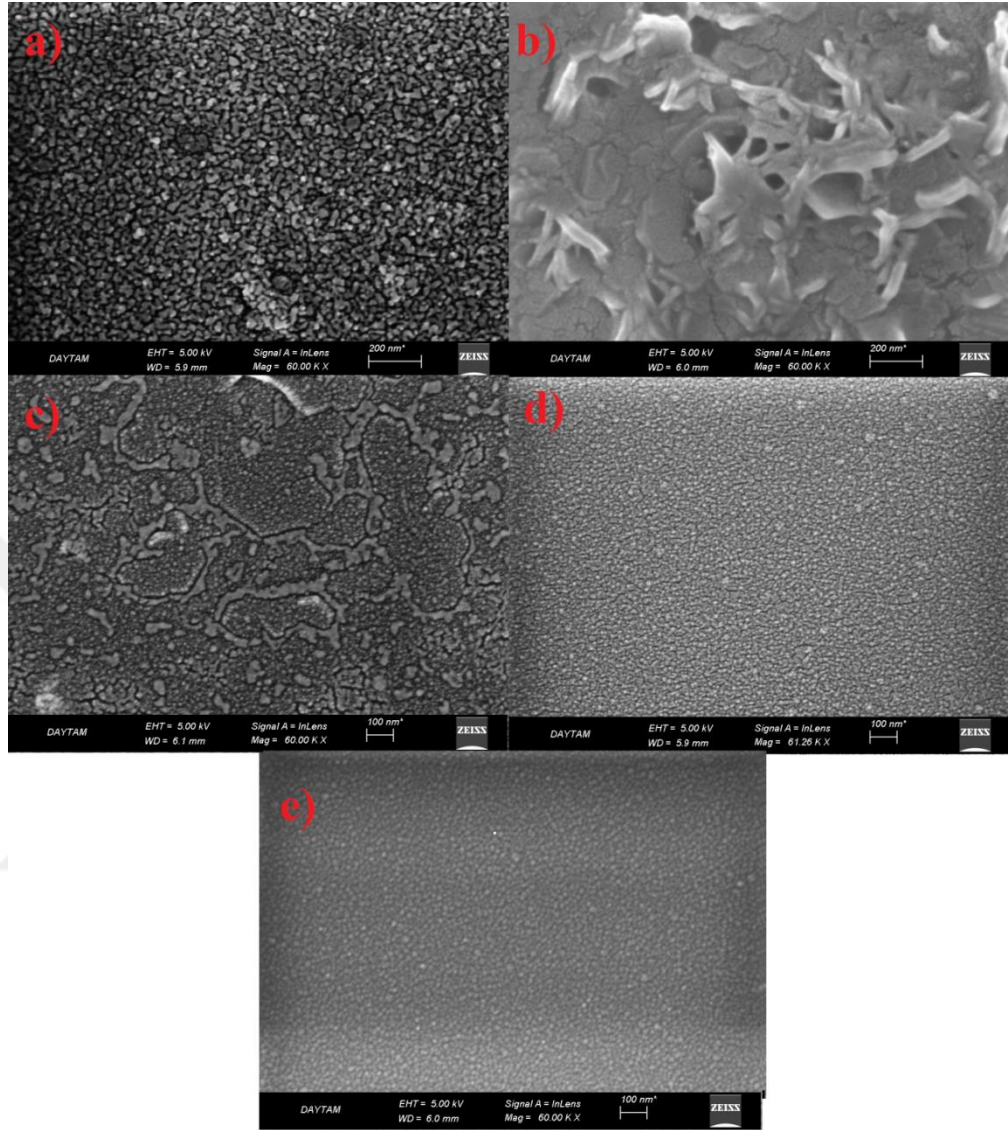
Şekil 4.41’de SEM resimleri, 100 Watt RF gücü değerinde büyütülen GaN ince filmlerin görüntüsü diğerlerine kıyasla daha nettir ve tanecikli periyodik yapı gözükmemektedir. 50 Watt RF değerinden daha yüksek 75 Watt ve 100 Watt değerine çıkıldığında ince filmin yüzey morfolojisi daha iyiye gittiği gözlemlenirken; 125 Watt değerine ulaşıldığında yapının bozulmaya başladığı değerlendirilmektedir. 50, 75 Watt RF güç değerlerinde topaklanma türü büyümelerin diğerlerine kıyasla daha çok olduğu tespit edilmiştir. Malzemenin yüzeyinin morfolojik yapısının değişimleri, RF gücünün büyütmede önemli bir rol aldığı bulgusunu göstermektedir. 50 ve 125 Watt RF güçleri varlığında safir alt taşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ~30000X büyütme SEM resimleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.42. Safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $\sim 30000\times$ büyütmedeki a) 50 Watt RF gücündeki b) 125 Watt RF gücündeki SEM resimleri

Şekil 4.42’de gösterilen SEM resimlerinde, tanecikli periyodik yapı görülmektedir. Ayrıca büyütmelerde 50 Watt RF gücünden 125 Watt değerine çıkıldığında büyütülen GaN ince filmlerinin kristal tanecik boyutlarının azaldığı bulgusu XRD sonucuyla ispatlanmaktadır. 50 Watt RF gücü değerinde topaklanma tipi büyümeler 125 Watt değerine kıyasla daha çok ve belirgin olmaktadır. İnce filmin SEM resmi alınan bölgelerde, hemen hemen homojen bir büyüme tespit edildi.

Farklı azot gazı akış değerinde (0, 1, 2, 3, 4 sccm) n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince $\sim 60000\times$ büyütme filmlerinin SEM resimleri Şekil 4.43’de verilmiştir.

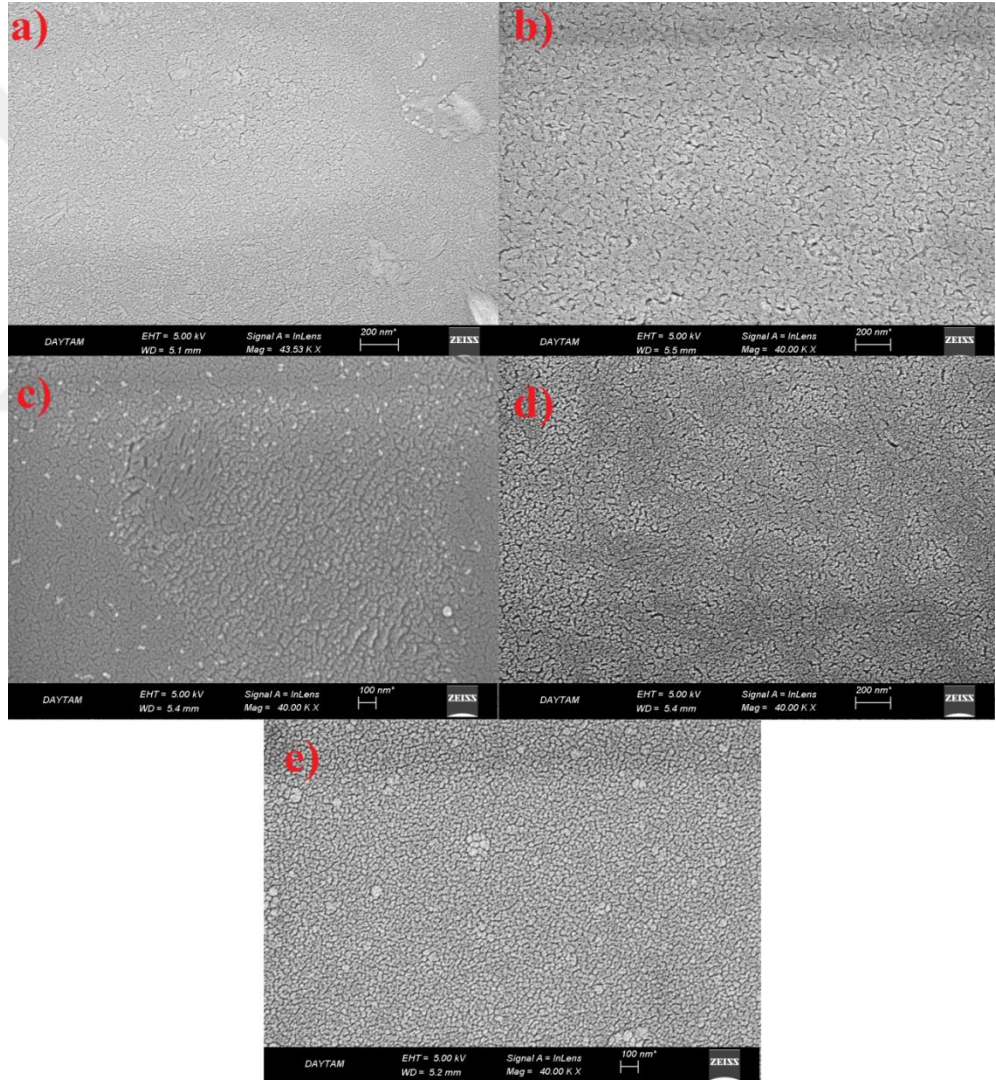


Şekil 4.43. n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $\sim 60000\times$ büyütmedeki **a)** 0 sccm azot gazı **b)** 1 sccm azot gazı **c)** 2 sccm azot gazı **d)** 3 sccm azot gazı **e)** 4 sccm azot gazı varlığındaki SEM resimleri

Şekil 4.43 görüldüğü üzere farklı azot gazı varlığında n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM görüntüleri birbirlerinden birçok açıdan farklı çıkmaktadır. Kristal tanecik boyutu 1 ve 2 sccm değerlerinde 0 sccm değerine göre çok farklıdır. 0 sccm azot değerinde periyodik tanecikli bir yapı gözükürken; 1 sccm ve 2 sccm azot değerinde yüzey bozulmuştur. Bölge bölge kırılmalar olmuş ve adacıklar şeklinde birbirlerinden ayrılmıştır. Bu yapıdaki malzemenin çizgisel kusurların olduğu yerlerde, kırılganlığa olan direncin azaldığı söylenebilmektedir. Tanecikli yapı açısından en net SEM

görüntüsü 0 sccm ve 3 sccm azot gazı varlığında elde edilmiştir. Ayrıca SEM ile çekilen bölgelerin hemen hemen homojen olduğu gözlenmektedir. Bu bulgulardan, farklı azot gazı değerlerinin, ince filmin yüzeyinin morfolojik özelliklerine etkisinin oldukça belirgin olduğu sonucu çıkmaktadır.

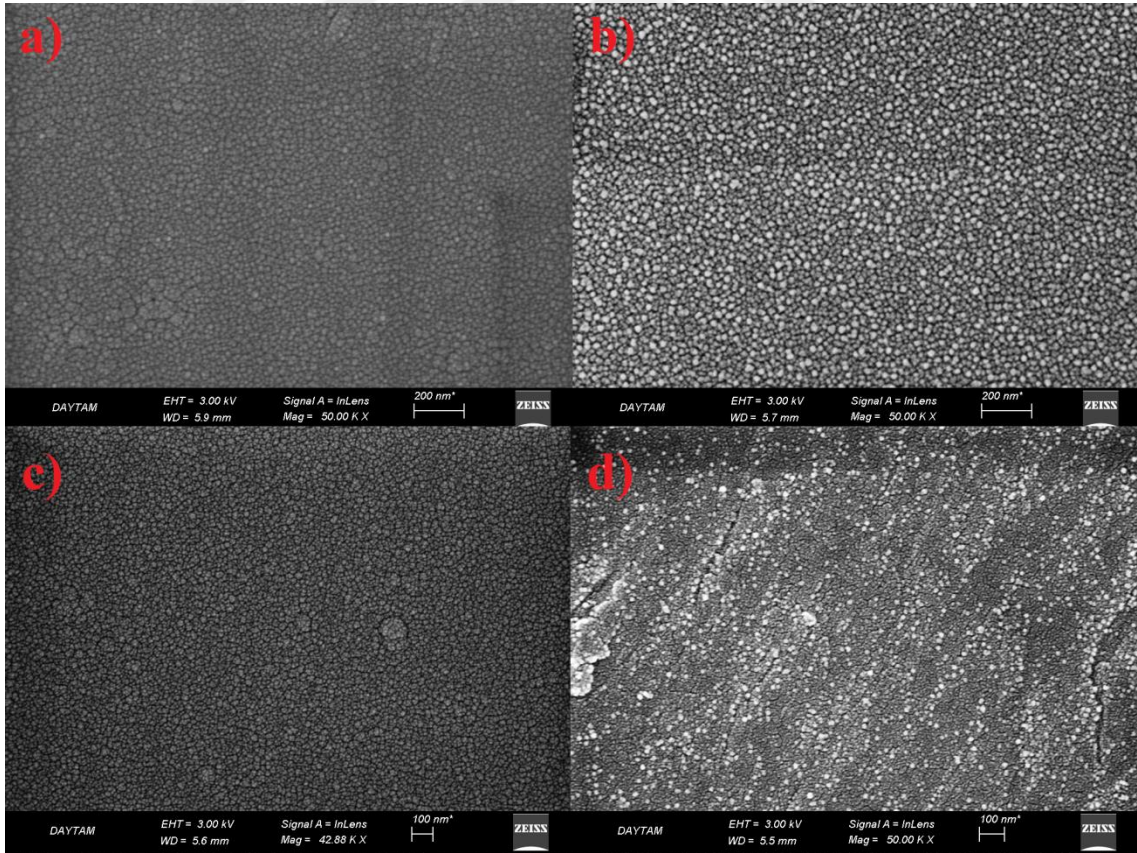
Farklı azot gazı değerlerinde cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden elde edilen SEM resimleri Şekil 4.44’de gösterilmiştir.



Şekil 4.44. Cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $\sim 40000\times$ büyütmedeki a) 0 sccm azot gazı b) 1 sccm azot gazı c) 2 sccm azot gazı d) 3 sccm azot gazı e) 4 sccm azot gazı varlığındaki SEM resimleri

Şekil 4.44'deki SEM sonuçları, cam üzerine GaN ince filmlerinin farklı morfolojik yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir. Yüzeysel morfolojik yapının, 0 sccm den 4 sccm azot değerine yükseltildikçe az miktarda iyileştiği gözlemlenmektedir. En son 4 sccm azot gazı değerinde bazı bölgelerde topaklanma türünden büyümelerin olduğu gözlenmekle beraber; fazla çizgisel kusurlar göze çarpmaktadır. Aynı şekilde 1, 2, 3 sccm azot değerlerindeki filmlerde de çizgisel kusurlar mevcuttur. Bu kusurlar yapının kırılabilirliğini arttıran etmenlerdir. Özellikle 2 sccm azot gazı değerinde homojen yapı çok çok az olduğu gözükmemektedir. Elde edilen morfolojik yapı, XRD ölçüm analizleriyle tam uyum içindedir.

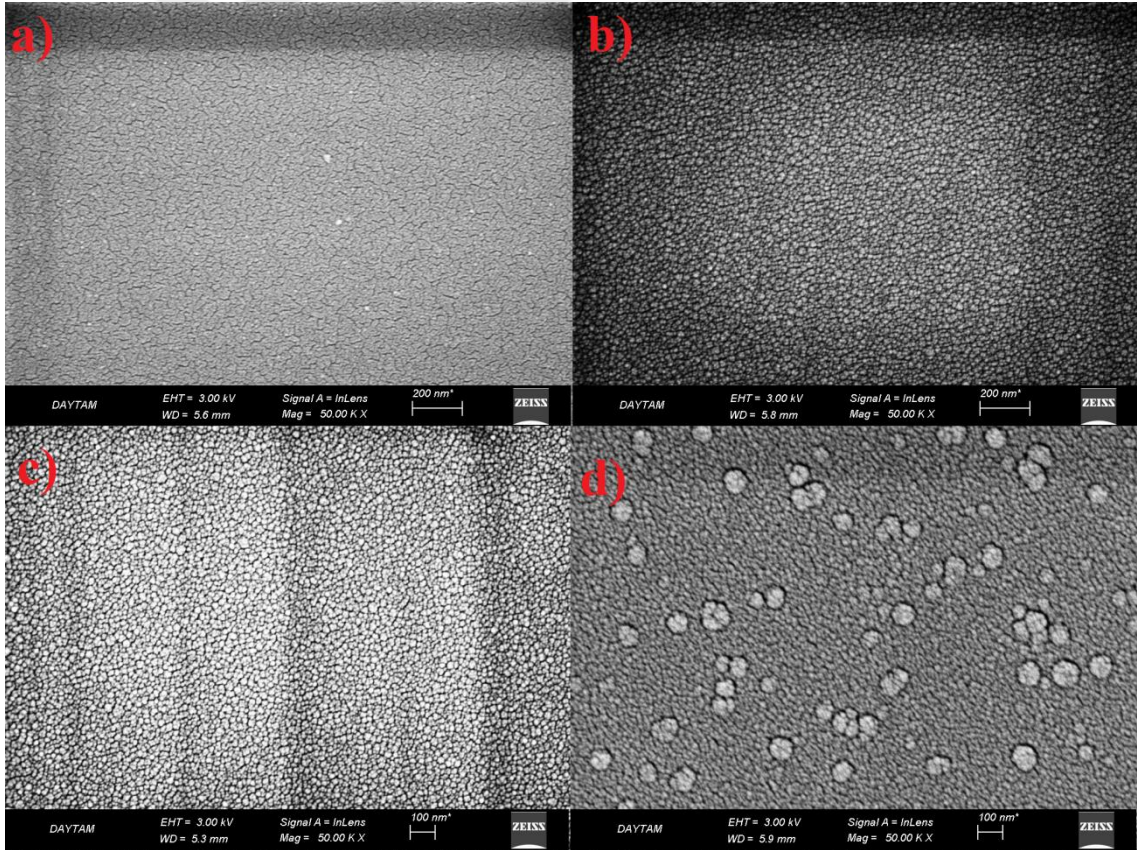
Uygulanan farklı argon gazı değerlerinde (25, 50, 75, 100 sccm) p-Si üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM resimleri Şekil 4.45'de gösterilmiştir.



Şekil 4.45. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ~50000X büyütmedeki **a)** 25sccm argon gazı **b)** 50sccm argon gazı **c)** 75sccm argon gazı **d)** 100sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri

Şekil 4.45’de verilen SEM ölçümlerinden, 50 sccm argon gazı uygulandığında GaN ince film yapısı en iyi tanecikli ve periyodik yapının olduğu, diğer argon değerlerinin resimleri ile kıyaslandığında görülebilmektedir. Öte taraftan, uygulanan argon değerleri arasından 100 sccm argon gazı değerinde nispeten ince filmin yüzeyinin en kötü morfolojik yapıya sahip olduğu çizgisel ve diğer kusurların hayli yüksek olduğu gözükmemektedir. Farklı argon gazı değerlerinde GaN ince filmin kristal tanecik boyutlarının değiştiği SEM ölçümünden görülmektedir. Filmin hemen hemen homojen yapıda ve filmin yapısında yer yer topaklanma şeklinde büyümelere de rastlanmaktadır.

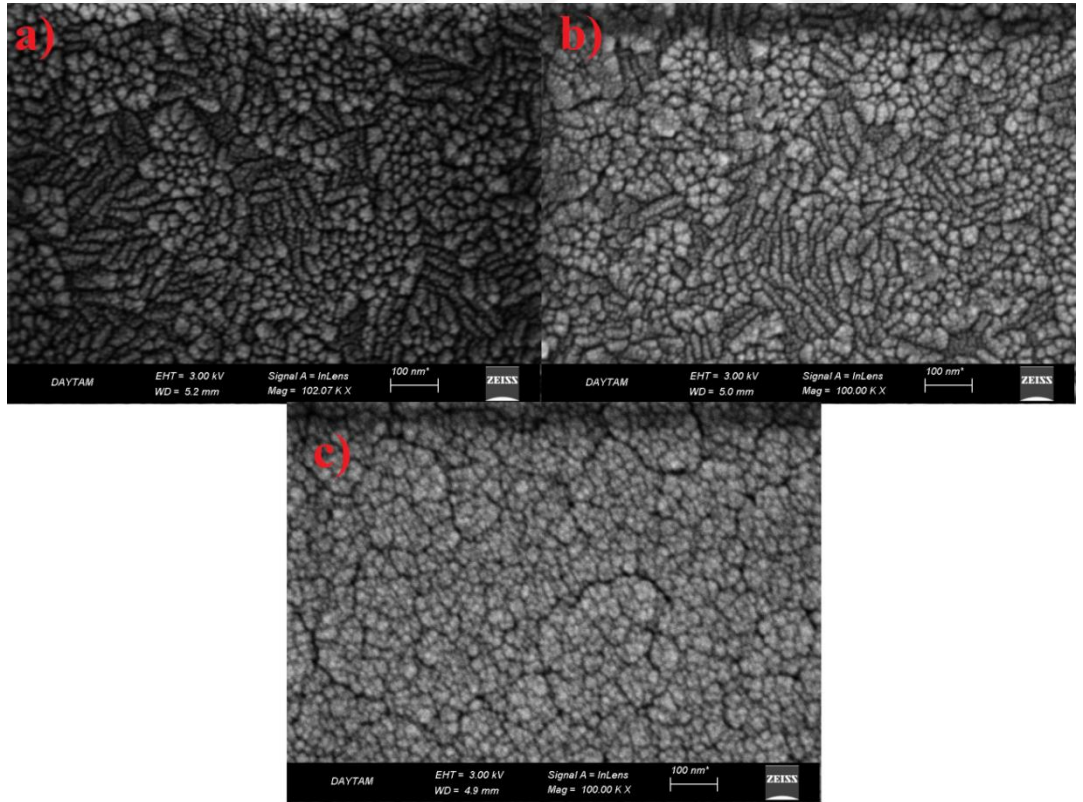
Farklı argon gazı akış değerlerinde n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM resimleri Şekil 4.46’da verilmektedir.



Şekil 4.46. n-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 50000X büyütmedeki **a)** 25 sccm argon gazı **b)** 50 sccm argon gazı **c)** 75 sccm argon gazı **d)** 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri

Şekil 4.46'daki SEM sonuçları analizinden şu bulgulara rastlanmaktadır. Elde edilen filmlerin yüzey morfolojileri birbirinden farklıdır. 50 sccm ve 75 sccm argon gazı varlığında GaN ince filmleri tanecikli ve periyodik bir yapı göstermektedir. Bu sonuçlar XRD ölçüm sonuçları tarafından da desteklenmektedir. Ayrıca 25 sccm argon değerindeki SEM resminde çizgisel kusurların var olduğu görülmektedir. Bu kusurlar filmin kırılgenliğe direncini azaltmaktadır. 100 sccm argon varlığında büyütülen GaN ince filminde de dikkat çeken olgu çokça topaklanma davranışı gösteren büyümelerin olduğudur. Bu bulgulardan, uygulanan argon gazı değerinin filmin morfolojik yapısını değiştirdiği ve bu değerin kontrolüyle malzemenin yapısal özelliklerinin değiştirilebileceği sonuçları çıkarılabilmektedir.

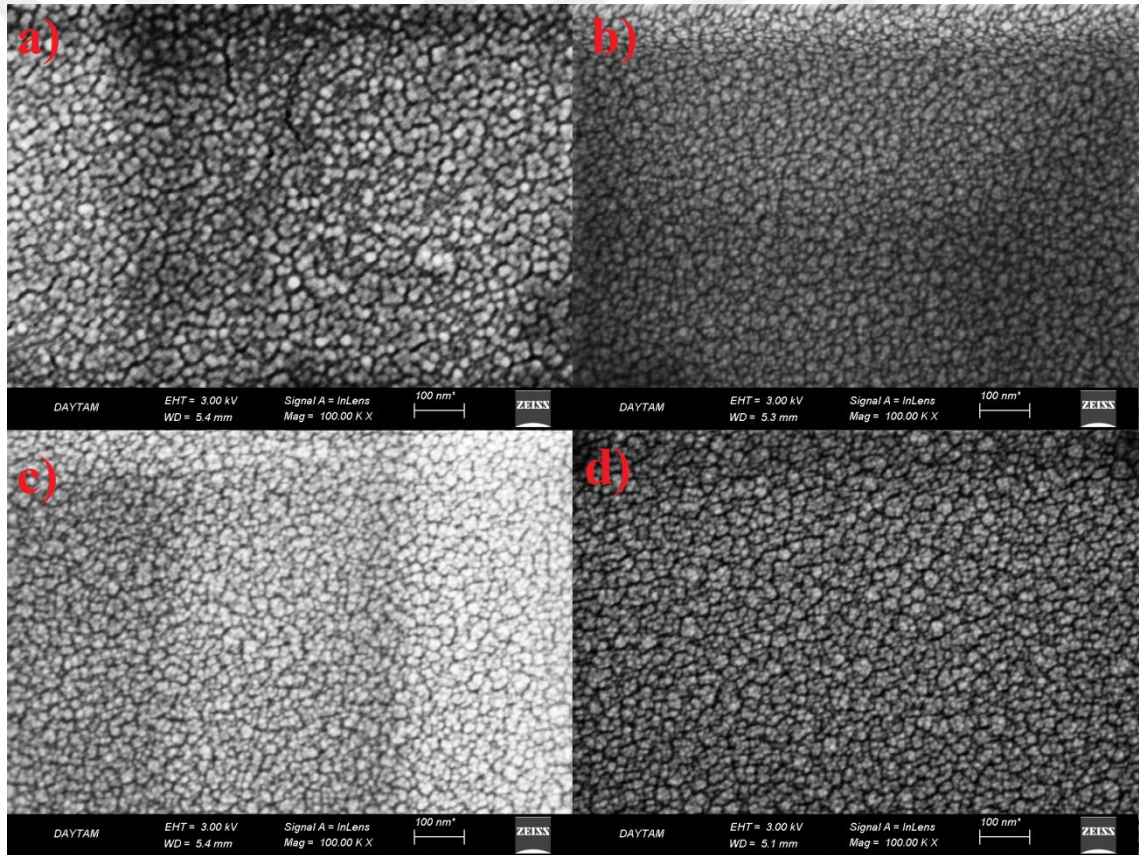
Uygulanan farklı argon gazı akış değerlerinde ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM resimleri Şekil 4.47'de gösterilmektedir.



Şekil 4.47. ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 100000X büyütmedeki **a)** 25 sccm argon gazı **b)** 75 sccm argon gazı **c)** 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri

Şekil 4.47’den görüleceği üzere 25 sccm ve 75 sccm argon gazı verilerek yapılan ITO üzerine GaN ince filmlerinin yüzey davranışı çubuksu şekilde büyümelerden oluşmaktadır. Ayrıca hemen hemen homojen yapıda oldukları görünmektedir. Fakat 100 sccm argon gazı verilerek büyütülen ince film, bu yapılardan farklı olarak topaklı bölgeler tarzında büyüme davranışı göstermektedir.

Farklı argon gazı akış değerlerinde cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM resimleri Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.48. Cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin 100000X büyütmedeki a) 25 sccm argon gazı b) 50 sccm argon gazı c) 75 sccm argon gazı d) 100 sccm argon gazı varlığındaki SEM resimleri

Şekil 4.48’de SEM ölçümlerinden, 25 sccm argon gazı uygulanarak büyütülen GaN ince filminin yüzeyinde belirgin çizgisel kusurlar gözükmektedir. Bu kusurlar malzemeyi kırılğan hale getirmektedir. 50, 75 ve 100 sccm argon gazı değerlerinde ise 25 sccm

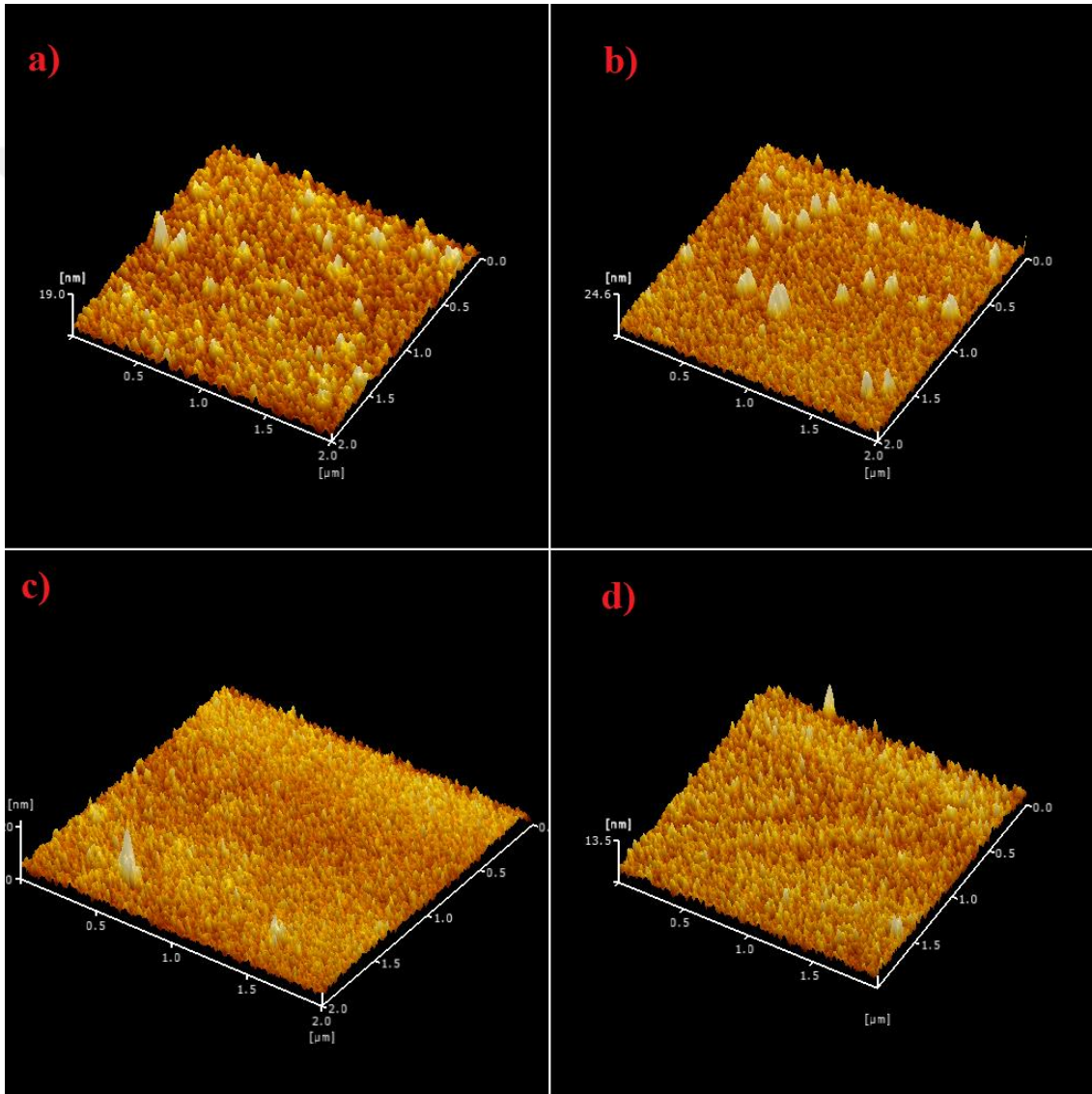
değerine kıyasla daha iyi yüzey yapısı tespit edilmiştir. Film yüzey yapısının en net yüzey görünümü 100 sccm argon gazı varlığında görülmektedir. Filmin yüzey morfolojisi, 25 sccm argon gazı değerinden 100 sccm değerine yükseltildiğinde film yüzeyinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.

4.1.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri

Malzemelerin yüzeyinin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde, taramalı sonda mikroskopları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu mikroskopların bilgiyi toplama şekillerine göre yani ölçüm yaparken sonda şekline göre çeşitli türleri vardır. Örnek vermek gerekirse, taramalı tünelleme mikroskobu (STM), manyetik kuvvet mikroskobu (MFM), taramalı yakın alan optik mikroskobu (SNOM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM). Atomik kuvvet mikroskobunda sonda, esnek manivela ve onun ucuna bağlı tip adı verilen iğne benzeri bir uçtan oluşmaktadır. Tip yüzeye yaklaştırıldığında tip ile yüzey arasında Hooke kanunu uyarınca manivela esnemektedir. Tip olarak, Si_3N_4 veya silikon kullanılmaktadır. Hooke kanuna dayanarak kuvvetin ölçüm prensibine dayanan atomik kuvvet mikroskobunda olası kuvvetler şunlar olabilmektedir: elektrostatik kuvvet, Van der Waals kuvvet, kimyasal bağ, Casimir kuvvet vs. Sistem şu şekilde çalışmaktadır. Manivela piezoelektrik malzemeden oluşmaktadır ve bu malzemenin özelliği farklı voltajlarda boyunun, uygulanan voltaja bağlı olarak çok küçük miktarlarda değişmesidir. Manivela uygulanan voltaj sayesinde x, y ve z yönlerinde hassas olarak hareket ettirilebilmektedir. Buradaki boyuttaki değişim yani maniveladaki bükülme miktarı, buraya lazer ışını gönderilip ve bu lazer ışının foto diyot tarafından alınıp kaydedilmesi ile belirlenmektedir. Bu şekilde tipin aşağı yukarı hareketleri konum olarak kaydedilmektedir. Atomik kuvvet mikroskobunda çeşitli operasyon modları mevcuttur ve bunlar temas modu, yatay kuvvet modu, temas olmayan mod, arada bir temas modu (tap modu), kuvvet modülasyon modu gibi verilebilmektedir. Bu araştırmada kullanılan mod arada bir temas modudur ve tap modu olarak da adlandırılabilir. Tip temas olmayan moda göre yüzeye daha yakın olmaktadır ve tip zaman zaman yüzeye hafifçe değmektedir. Bu araştırmadaki AFM ölçümlerinde, farklı frekanslara sahip tipler kullanılmıştır ve genellikle 500 (nm)^2 ve

$2 (\mu m)^2$ alanlarında ölçümler alınmıştır. Ayrıca, elde edilen ölçümler DAYTAM ileri spektroskopisi laboratuvarındaki Hitachi 5100N model AFM cihazı ile alınmıştır.

Farklı RF gücü değerlerinde (50, 75, 100, 125 Watt) cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.49'da gösterilmiştir.

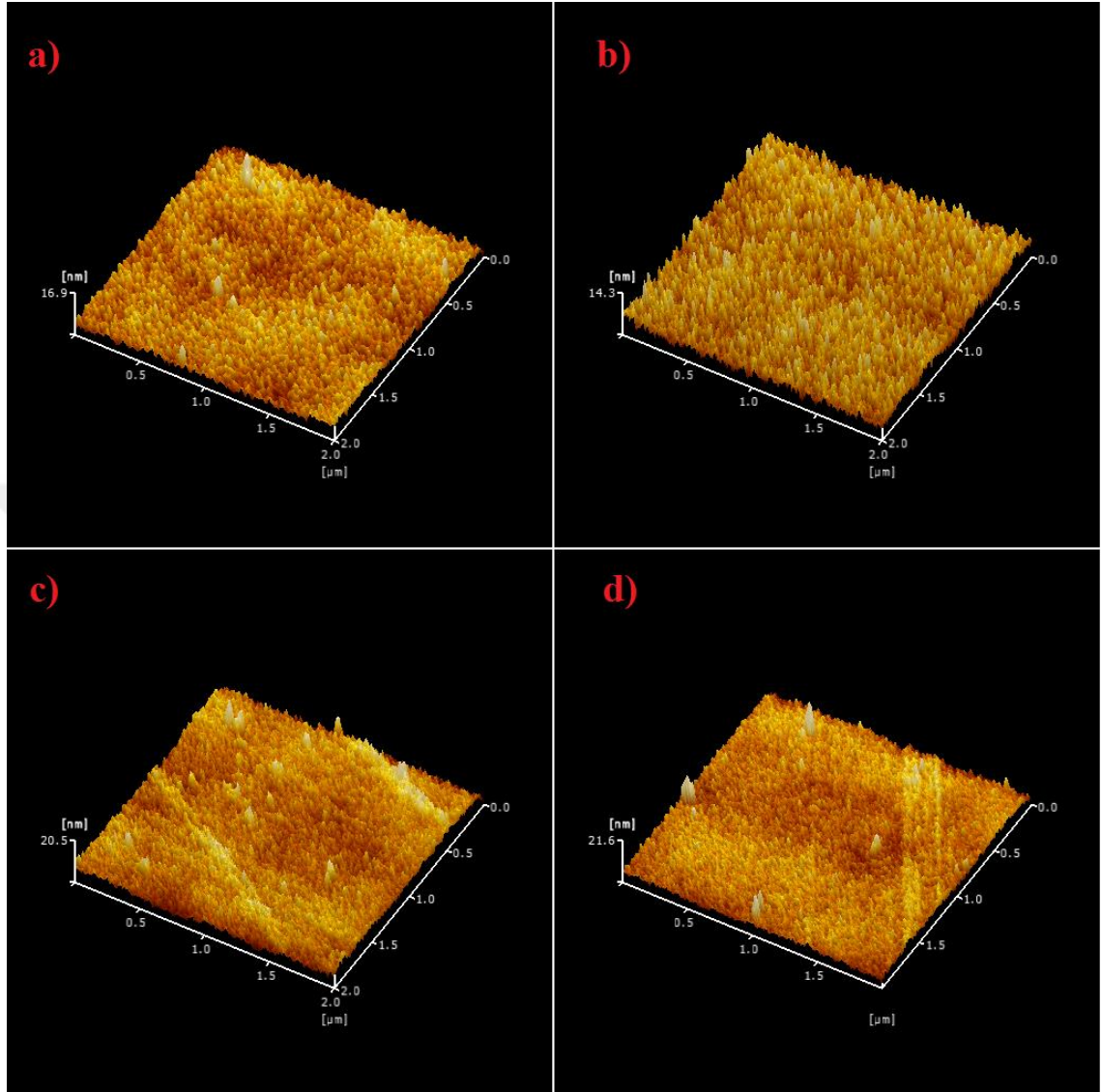


Şekil 4.49. Cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $2 (\mu m)^2$ alandaki **a)** 50 Watt **b)** 75 Watt **c)** 100 Watt **d)** 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri

Farklı RF gücü için, cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,7'$ nm den $\sim 1,3'$ nm ye değişmiştir. Cam alttaş için en düşük pürüzlülük değeri 100 Watt RF gücüne karşılık gelen 0,75 nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri 75 Watt RF güce tekabül eden 1,36 nm olarak elde edilmiştir.

Uygulanan 75 Watt RF gücü ile cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin maksimum yüksekliği 9,99 nm ve bu en yüksek değerdir. Ancak; uygulanan 125 Watt RF gücü ile cam alttaş üzerindeki GaN ince filminin maksimum yüksekliği en düşük değer olan 2,49 nm olarak elde edilmiştir. Cam alttaş için en yüksek ortalama mutlak eğimini (Δa) 75 Watt RF gücüne karşılık gelen $6,69^\circ$ değeri iken, en düşük ortalama mutlak eğim 50 Watt RF gücüne karşılık gelir ve değeri $4,24^\circ$ olmaktadır. Uygulanan 100 Watt RF gücü ile cam alttaş için maksimum derinlik (R_v) değerleri 2,2 nm ile en düşük değerdir. En yüksek maksimum derinlik değeri 75 Watt RF gücü değerine karşılık gelen 4,05 nm olarak elde edilmiştir. RF güç değerlerini kontrol etmenin, daha iyi morfolojik özelliklere sahip filmler üretebilmemizi sağladığı sonucuna varılmıştır.

Uygulanan RF gücü değerlerinde n-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.50'de verilmektedir.



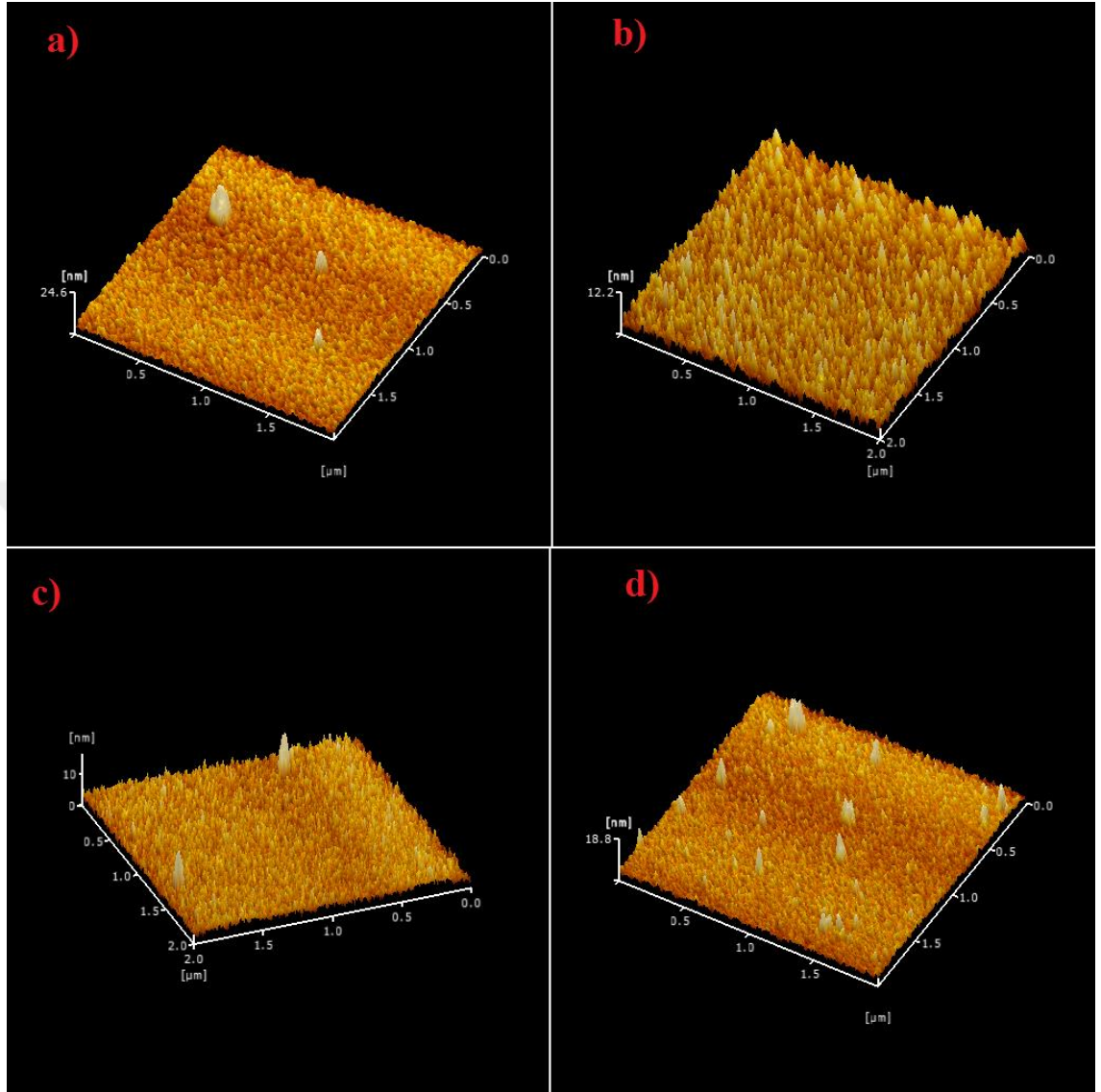
Şekil 4.50. n-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $2 (\mu m)^2$ alandaki **a)** 50 Watt **b)** 75 Watt **c)** 100 Watt **d)** 125 Watt RF gücünde üç boyutlu AFM resimleri

n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için ortalama pürüzlülük $\sim 0,8$ nm ila $\sim 1,1$ nm arasında değişmektedir. n-Si alttaş üzerine büyütülen ince filmin en düşük pürüzlülük değeri, 50 Watt RF gücüne karşılık gelen $0,8$ nm olarak belirlenmiştir.

Ancak; en yüksek pürüzlülük değeri 75 Watt RF gücüne karşılık gelen $1,16$ nm olarak elde edilmiştir. Uygulanan 100 Watt RF gücü ile n-Si alt-tabaka üzerindeki GaN ince filminin maksimum yüksekliği $6,14$ nm olarak en yüksek değer olmuştur. Fakat

uygulanan 50 Watt RF gücü ile n-Si alttaş üzerindeki GaN ince filminin maksimum yüksekliği 2,72 nm ve bu aralarındaki en düşük değer olmaktadır. n-Si alttaş üzerine büyütülen ince filmin en yüksek ortalama mutlak eğimini ($\Delta\alpha$) 100 Watt RF gücüne karşılık gelmektedir ve değeri $5,54^\circ$ olarak elde edilmiştir. Öte yandan, en düşük ortalama mutlak eğimini ($\Delta\alpha$) 50 Watt RF gücüne karşılık gelmektedir ve değeri $3,9^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Uygulanan 75 Watt RF gücü ile n-Si alttaş için maksimum derinlik (R_V) değeri 2,98 nm olmak üzere aralarındaki en yüksek değerdir. En düşük maksimum derinlik değeri 50 Watt RF gücü değerine karşılık gelmektedir ve değeri 2,48 nm dir. GaN ince filmlerinin AFM görüntülerindeki film yüzeyinde taneciklerin periyodik olarak düzenlenmesi, XRD sonuçları tarafından da desteklenmektedir.

Farklı RF gücü değerlerinde p-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.51’de gösterilmiştir.

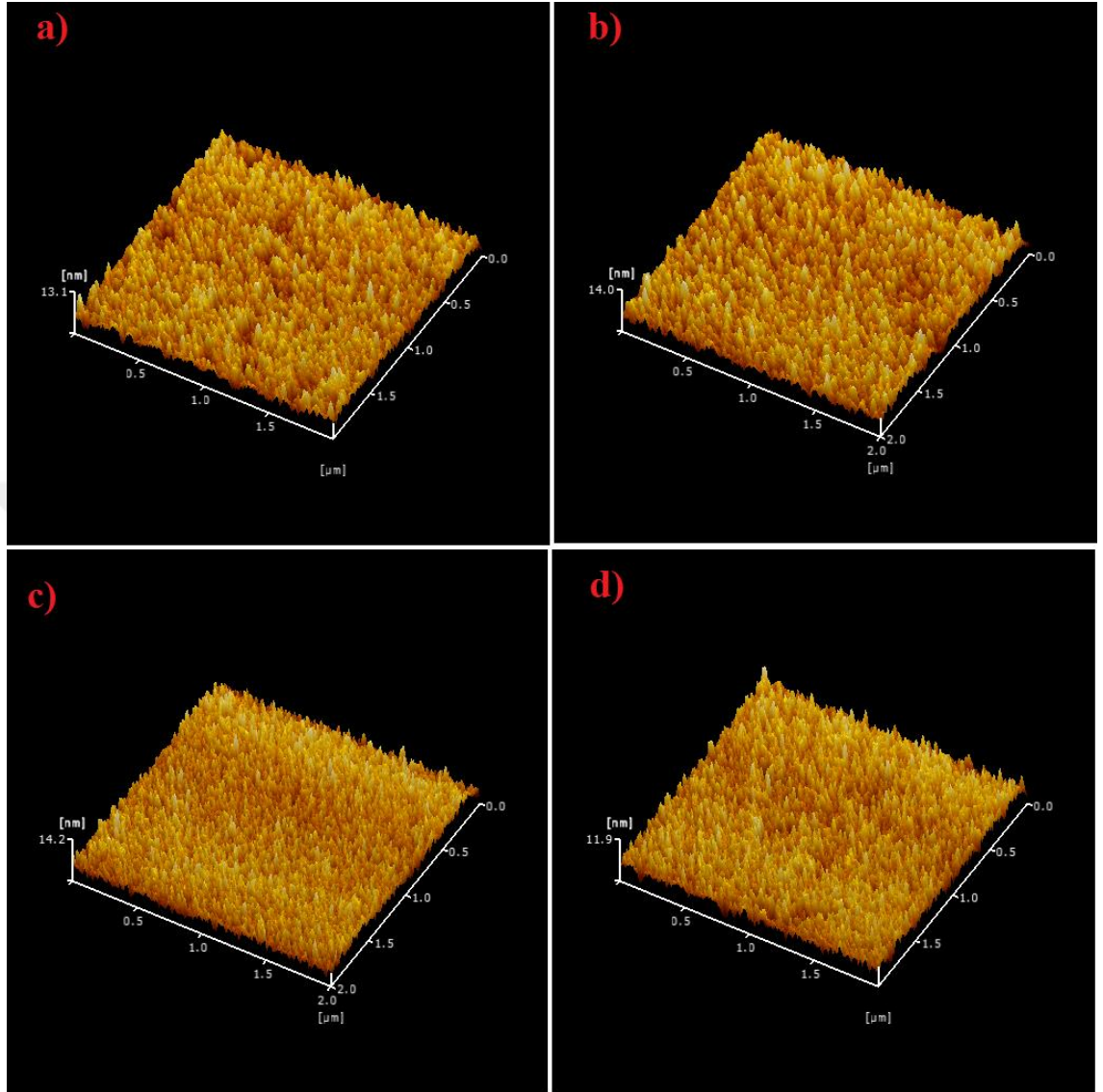


Şekil 4.51. p-tipi silisyum altaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $2 (\mu m)^2$ alandaki **a)** 50 Watt **b)** 75 Watt **c)** 100 Watt **d)** 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri

p-Si altaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülüğü değerleri $\sim 0,5$ nm ila $\sim 1,0$ nm arasında belirlenmiştir. p-Si altaşı için en düşük pürüzlülük değeri 125 Watt RF gücüne karşılık gelen $0,59$ nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri 75 Watt RF gücüne karşılık gelen $1,05$ nm olarak elde edilmiştir. Yüzey yapısındaki bazı büyük tepeler XRD ölçümündeki elde edilen bazı piklerle ilişkili olabilmektedir. GaN ince filminin yüzeyi neredeyse homojendir ve düşük pürüzlülüğe sahip bir nano yapı olarak değerlendirilmektedir. Uygulanan 75 Watt RF

gücü ile p-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin maksimum yüksekliği en yüksek değer olan 4,6 nm olarak bulunmuştur. Maksimum yükseklik için en düşük değer ise 2,63 nm ile 100 Watt RF gücü değerine karşılık gelmektedir. p-Si alttaş üstüne büyütülen ince filmin en yüksek ortalama mutlak eğimi ($\Delta\alpha$) $6,37^\circ$ olmaktadır ve 75 Watt RF gücü değerine karşılık gelmektedir. Fakat en düşük ortalama mutlak eğimi ($\Delta\alpha$) $4,46^\circ$ olmaktadır ve 50 Watt RF gücü değeri varlığında elde edilmiştir. Uygulanan 125 Watt RF gücü ile p-Si alttaş için maksimum derinlik değeri 1,87 nm olarak aralarındaki en düşük değerdir. Fakat uygulanan 75 Watt RF gücü ile p-Si altlık için aralarındaki en yüksek maksimum derinlik değeri 3,1 nm dir.

Uygulanan RF gücü değerlerinde ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.52’de verilmiştir.

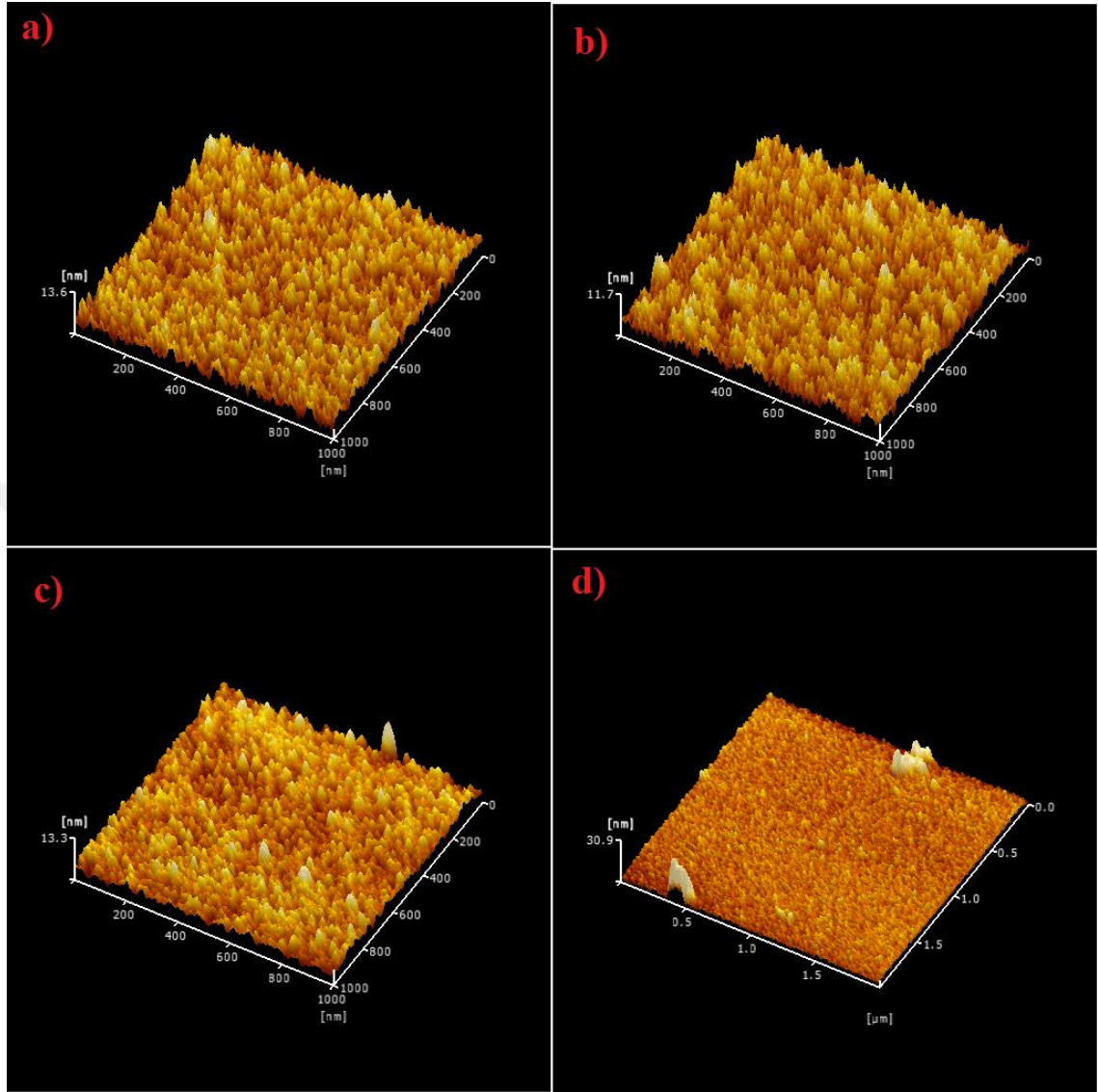


Şekil 4.52. ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin $2 (\mu m)^2$ alandaki **a)** 50 Watt **b)** 75 Watt **c)** 100 Watt **d)** 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri

Uygulanan 100 Watt RF gücü ile ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin maksimum yüksekliği 5,77 nm aralarındaki en yüksek değer olmuştur. Fakat uygulanan 125 Watt RF gücü ile ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin maksimum yüksekliği 3,85 nm'dir ki bu değer aralarındaki en düşük değerdir. ITO üzerine GaN ince filmi için ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,9$ nm ila $\sim 1,0$ nm arasında değiştiği ölçülmüştür. Bununla birlikte, ITO alttaşı için en düşük pürüzlülük değeri 50 Watt RF gücüne karşılık gelen 0,94 nm olarak bulunmuştur; en yüksek pürüzlülük değeri, 75

Watt RF gücüne karşılık gelen 1,05 nm olarak bulundu. En yüksek ortalama mutlak eğim $6,51^\circ$ ve bu değer 100 Watt RF gücüne karşılık gelmektedir. En düşük ortalama mutlak eğim ise 75 Watt RF gücüne karşılık gelen $4,13^\circ$ olarak elde edilmiştir. Uygulanan 125 Watt RF gücü ile ITO alttaşı için en yüksek maksimum derinlik değeri 3,32 nm; uygulanan 50 Watt RF gücü ile ITO alttaşı için en küçük maksimum derinlik değeri 2,98 nm olarak ölçülmüştür. AFM ölçümünden, ITO üzerindeki GaN ince filminin morfolojisinin, yüzeyinde çok az boşluk olan neredeyse pürüzsüz bir yüzey özelliği gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, AFM görüntüsünden, ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerin yüzeysel yapısının neredeyse homojen, nano yapılı, düşük pürüzlü film yüzeyi sergilediği sonucuna varılmaktadır.

Farklı RF gücü değerlerinde safir üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.53’de verilmiştir.



Şekil 4.53. Safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin **a)** 50 Watt **b)** 75 Watt **c)** 100 Watt **d)** 125 Watt RF gücünde üç boyuttaki AFM resimleri

Safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için en yüksek ortalama mutlak eğimi $6,01^\circ$ olmaktadır ve 100 Watt RF gücü koşullarında elde edilmektedir. Diğer yandan, en düşük ortalama mutlak eğim $0,62^\circ$ olmaktadır ve 75 Watt RF gücü koşullarında elde edilmektedir. Uygulanan 125 Watt RF gücü ile safir alttaş için maksimum derinlik değerleri $0,27\text{ nm}$ ile aralarındaki en düşük değer olmaktadır. Ancak uygulanan 100 Watt RF gücü ile safir alttaş için maksimum derinlik değerlerinin en yüksek değeri $2,31\text{ nm}$ elde edilmektedir. Safir alttaş üzerindeki GaN ince filmlerinin ortalama

pürüzlülük değerleri, farklı RF gücü için $\sim 0,09$ nm ila $\sim 0,7$ nm arasında değişmektedir. Safir alttaş için en düşük pürüzlülük değeri 125 Watt RF gücüne karşılık gelen 0,09 nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri, 100 Watt RF gücüne karşılık gelen 0,78 nm olarak elde edilmiştir. Uygulanan 100 Watt RF gücü ile safir alttaş üzerindeki GaN ince filminin maksimum yüksekliği, en yüksek değer olan 2,53 nm olacağı AFM sonuçlarından gösterilmektedir. Ancak uygulanan 125 Watt RF gücü ile safir alttaş üzerindeki GaN ince filminin maksimum yüksekliği en düşük değer olan 0,44 nm olmuştur. AFM görüntüsü üretilen filmlerin tanecikli ve periyodik yüzey davranışına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca XRD ölçüm sonuçları da bu sonucu desteklemektedir. Yüzeyde bazı büyük tepeler ve bazı küçük boşluklar göze çarpmaktadır. Bunların büyümedeki kirliliklerden ve safsızlıklardan kaynaklandığı söylenebilmektedir. Sonuç olarak, üretilen GaN ince filmlerinin morfolojik parametrelerinin değişen RF gücüne göre değiştiğine işaret etmektedir.

Farklı RF güçlerinde, çeşitli alttaşlar üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin morfolojik parametreleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

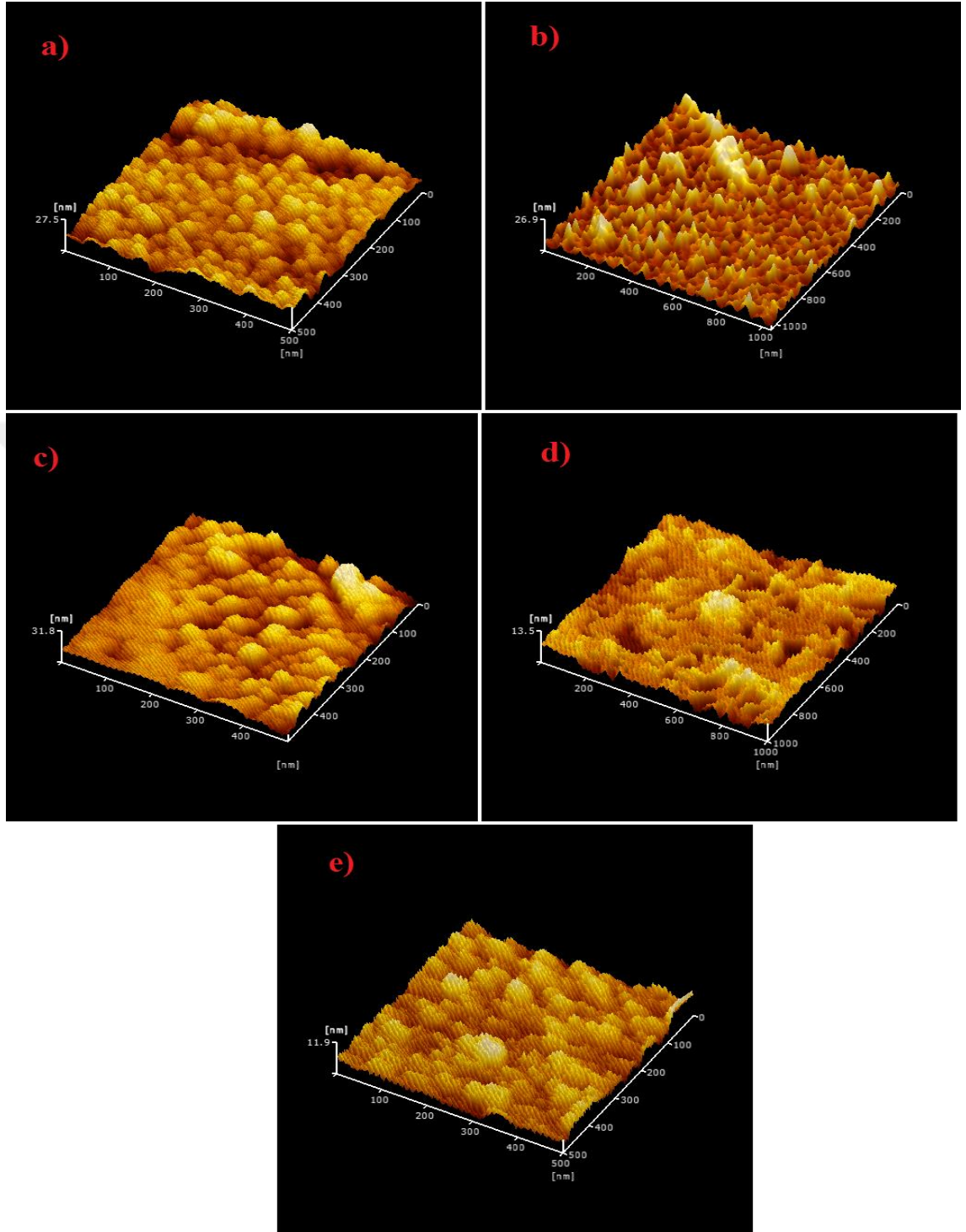
Çizelge 4.14. Farklı RF gücü değerlerinde cam, n-Si, p-Si, safir ve ITO alttaşlarının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri

RF gücü (Watt)	Alttaş	Ortalama pürüzlülük (R_a)(nm)	Maksimum derinlik (R_v)(nm)	Maksimum yükseklik (R_p)(nm)	Ortalama mutlak eğim($\Delta\alpha$)(°)
50	Cam	0,94	2,37	3,69	4,24
	p-Si	0,79	2,25	2,69	4,57
	n-Si	0,80	2,48	2,72	3,90
	Safir	0,46	1,55	1,38	1,76
	ITO	0,94	2,98	4,05	4,50

Çizelge 4.14. (devamı)

75	Cam	1,36	4,05	9,99	6,69
	p-Si	1,05	3,10	4,60	6,37
	n-Si	1,16	2,98	4,18	5,35
	Safir	0,20	0,50	0,77	0,62
	ITO	1,05	3,22	4,93	4,13
100	Cam	0,75	2,20	3,21	5,58
	p-Si	0,74	2,28	2,63	5,91
	n-Si	1,09	2,86	6,14	5,54
	Safir	0,78	2,31	2,53	6,01
	ITO	0,96	3,30	5,77	6,51
125	Cam	0,77	2,44	2,49	4,50
	p-Si	0,59	1,87	2,77	4,46
	n-Si	0,89	2,73	4,68	5,32
	Safir	0,09	0,27	0,44	0,99
	ITO	1,00	3,32	3,85	5,10

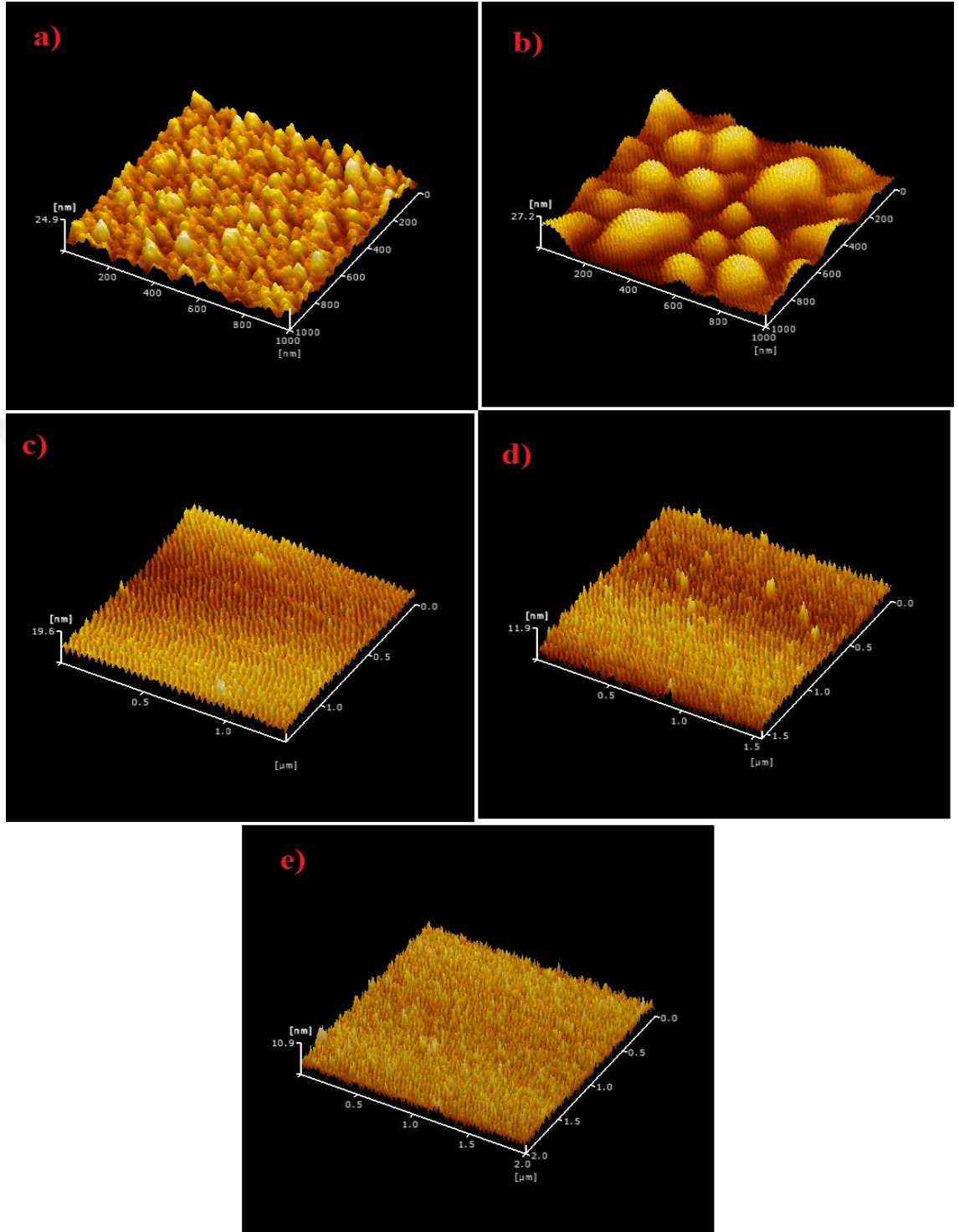
Farklı azot gazı akış değerleri için cam alttaşı üzerine GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.54’de verilmiştir.



Şekil 4.54. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazı akışında cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

Cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,8 \text{ nm}$ ile $\sim 2,2 \text{ nm}$ arasında değişmektedir. En düşük pürüzlülük değeri 3 sccm azot gazı varlığında elde edilmiş ve değeri ise $0,867 \text{ nm}$ olmaktadır. Filmin maksimum yükseklik değeri $9,041 \text{ nm}$ olmakta ve bu 1 sccm azot gazı büyütmesine karşılık gelmektedir. AFM resimlerinde bazı tepeler, bazı boşluklu yapılar gözükmektedir. Bunlar büyütme yaparken bulaşan safsızlıklar ve kirliliklerden ötürü oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, farklı azot gazı uygulanmasıyla filmin yüzeyinin morfolojisinin değişebileceği bulgusuna ulaşılmaktadır.

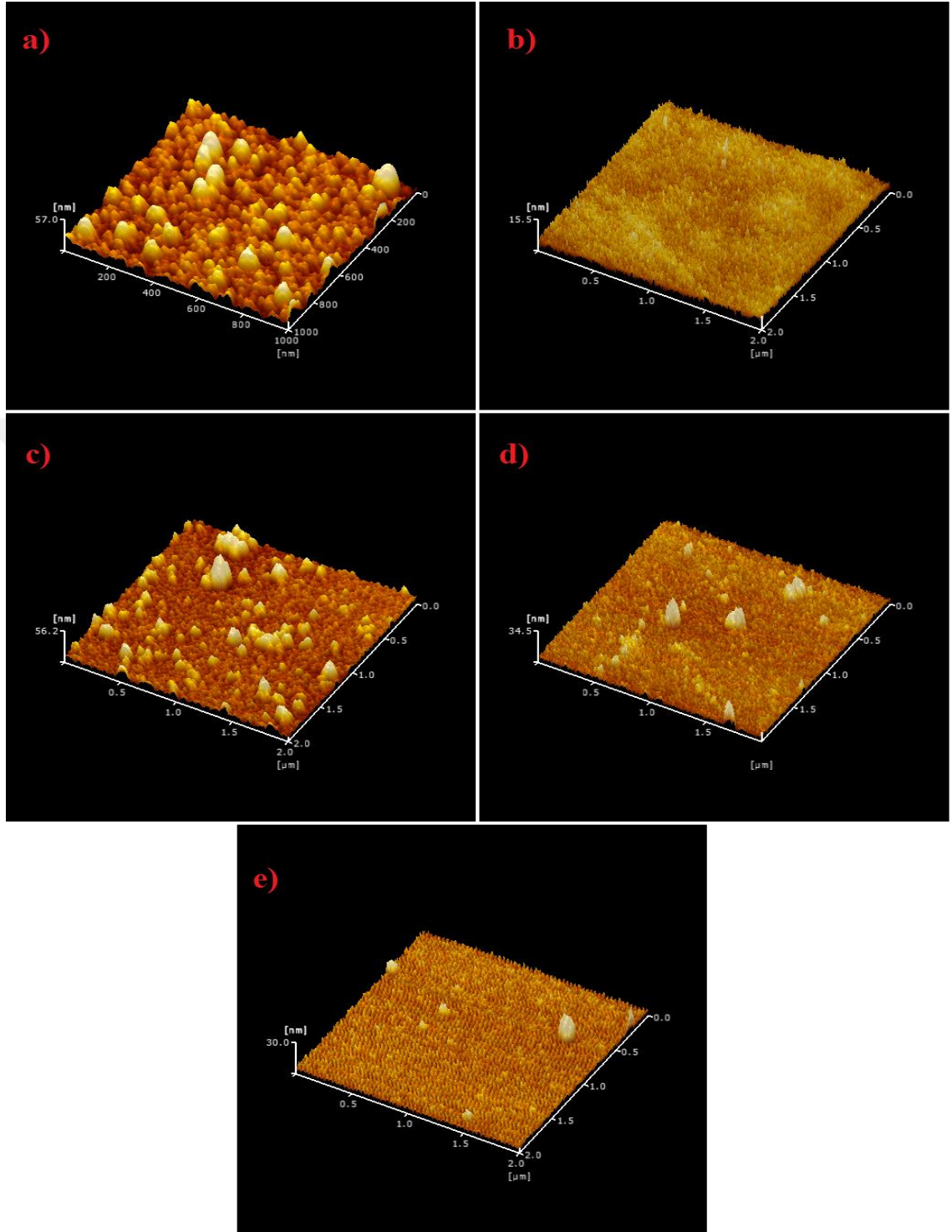
Farklı azot gazı değerleri için n-tipi silisyum alttaş üzerine GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri Şekil 4.55’de gösterilmiştir.



Şekil 4.55. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazı akışında n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,8 \text{ nm}$ ile $\sim 3 \text{ nm}$ arasındadır. 3 sccm azot gazı uygulandığında en düşük pürüzlülük $0,818 \text{ nm}$ değeri ile elde edilmektedir. n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin maksimum yüksekliğinin aralarındaki en büyük değeri 0 sccm azot gazı varlığında elde edilmekte ve değeri $14,880 \text{ nm}$ olarak  l  lm şt r. Büyütülen ince filmin maksimum derinliği $\sim 2 \text{ nm}$ ile $\sim 8 \text{ nm}$ arasında değişmektedir. n-Si  zerine GaN ince filminin yüzeyi hemen hemen homojen, nano yapıda, pürüzlülüğe sahiptir. Ayrıca filmin yüzeyinde tanecikli periyodik yapı belirgindir ve bu bulgu GaN malzemesinin hegzagonal kristal yapıda olduğunu XRD sonuçlarıyla doğrulamaktadır. Yüzeyde gözüken bazı tepeliklerin, büyütme esnasında oluşan kirlilikler sebebiyle olduğu söylenebilmektedir.

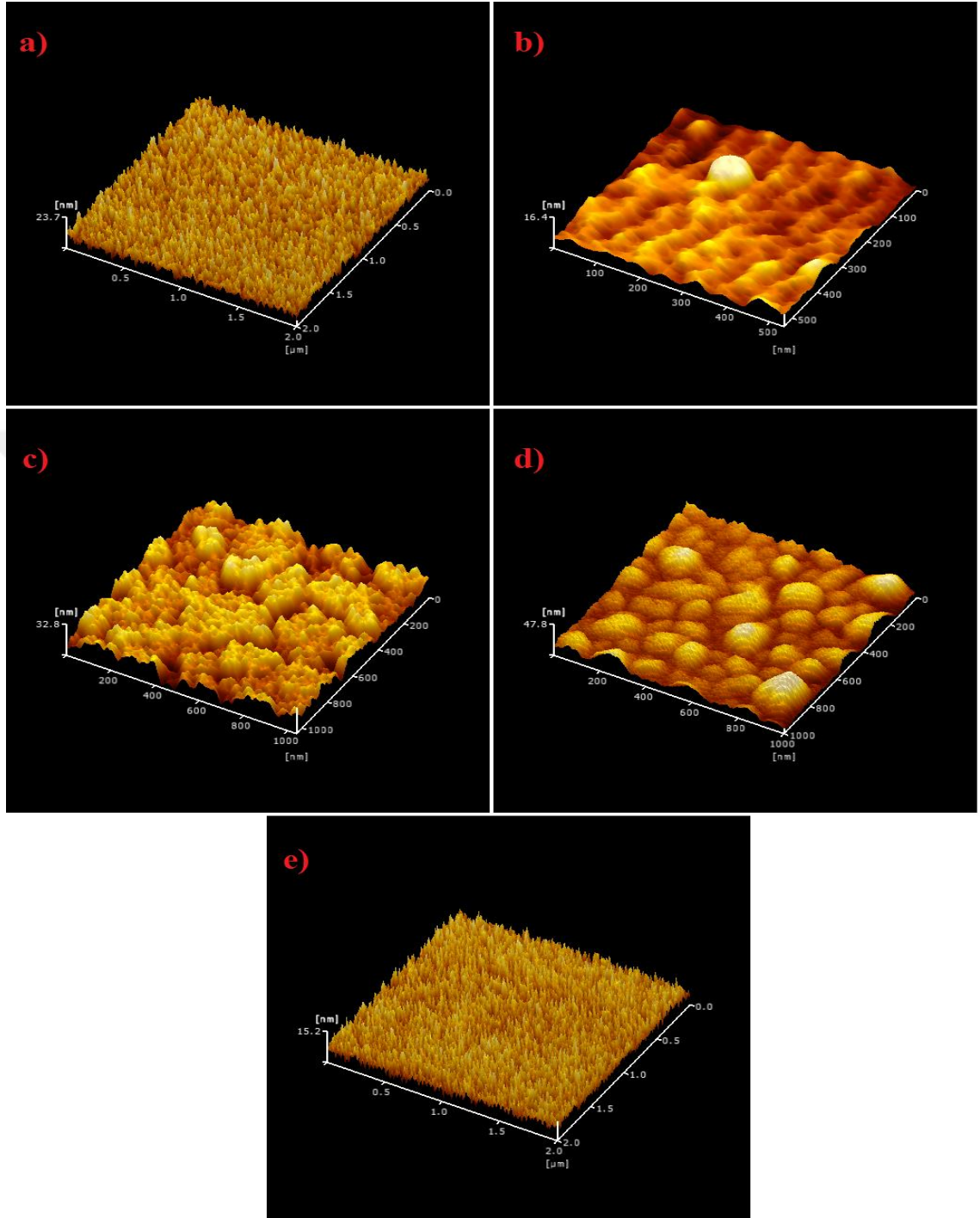
Uygulanan farklı azot gazı akış değerleri için p-tipi silisyum alttaş  zerine GaN ince filmlerinin    boyuttaki AFM resimleri şekil 4.56'da verilmiştir.



Şekil 4.56. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazı akışında p-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

p-Si alttaşın üzerine GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülüğü $\sim 0,9 \text{ nm}$ ile $\sim 4 \text{ nm}$ değerleri arasında olarak ölçölmüştür. En düşük pürüzlölük değeri $0,954 \text{ nm}$ olmaktadır ve 4 sccm azot gazı büyütmeye şartında ortaya çıkmaktadır. Malzemenin maksimum derinliği $\sim 2,7 \text{ nm}$ ile $\sim 13 \text{ nm}$ arasında değişmektedir. $17,400 \text{ nm}$ değeri p-tipi silisyum alttaş üstüne büyütilen GaN ince filminin maksimum yüksekliği olarak ölçölmüştür ve 0 sccm azot gazı varlığında elde edilmiştir. p-Si alttaş üzerine büyütilen filmin yüzeyinin pürüzlölüğü, genel olarak n-Si üzerine büyütilen filmin pürüzlölüğünden daha büyüktür. Malzemede yer yer yüksek tepe tarzı yüzeysel morfoloji gözökmektedir ve bunun nedeninin büyütmeye koşullarından kaynaklanan kirlilikler ve safsızlıklar olduğu düşünölmektedir.

Uygulanan farklı azot gazı akış değerleri için ITO alttaş üzerine GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri şekil 4.57’de gösterilmiştir.



Şekil 4.57. a) 0 sccm b) 1 sccm c) 2 sccm d) 3 sccm e) 4 sccm azot gazı akışında ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmleri için ortalama pürüzlülük değerleri yaklaşık $\sim 1 \text{ nm}$ ile $\sim 3 \text{ nm}$ arasında ölçülmüştür. En düşük pürüzlülük değeri,

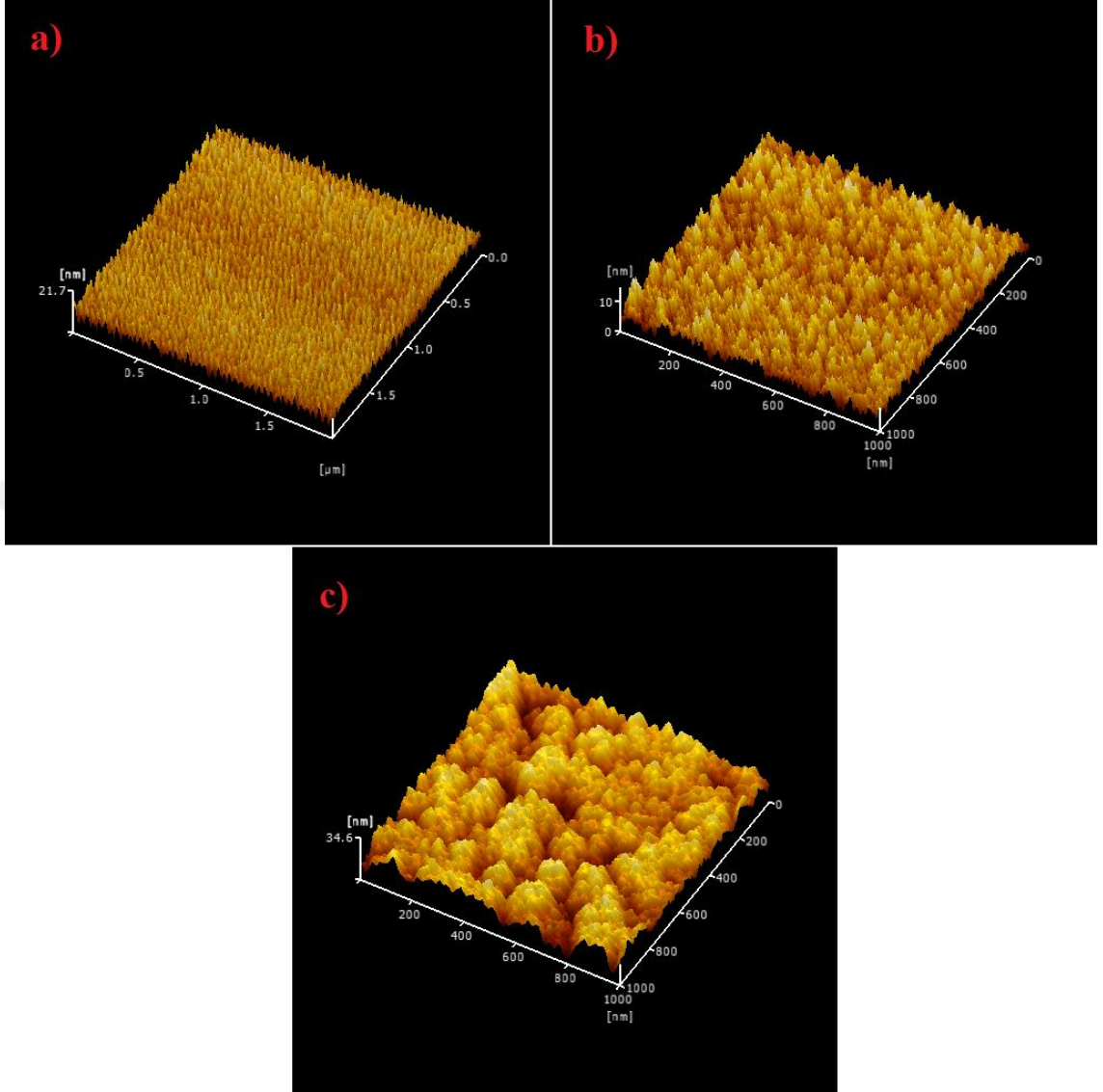
1,157 nm'ye karşılık gelen 1 sccm azot gazı değerinde elde edilmiştir. AFM görüntüleri, yüzey üzerinde tanecikli ve periyodik bir düzenlenişi işaret etmektedir. Filmin yüzeyinin maksimum yükseklik değeri 2 sccm azot değerine karşılık gelmektedir ve değeri 7,266 nm olmaktadır. Filmlerin maksimum derinliği ~ 2 nm ila ~ 14 nm arasında değişmektedir. Sonuçlar, film yüzeyi morfolojisinin azot değerlerini değiştirerek değiştiğini doğrulamaktadır.

Farklı azot gazı akış değerlerinde, çeşitli alttaşlar üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin morfolojik parametreleri Çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Farklı azot gazı akış değerlerinde cam, n-Si, p-Si ve ITO alttaşları üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri

Azot gazı (sccm)	Alttaş	Ortalama pürüzlülük (R_a)(nm)	Maksimum derinlik (R_v)(nm)	Maksimum yükseklik (R_p)(nm)	Ortalama mutlak eğim($\Delta\alpha$)(°)
0	n-Si	3,066	8,191	14,880	12,740
	p-Si	4,687	13,200	17,400	16,510
	ITO	2,091	5,554	6,975	11,550
	Cam	2,113	6,726	7,316	12,640
1	n-Si	0,954	2,864	2,653	8,444
	p-Si	1,129	3,698	4,849	4,874
	ITO	1,157	2,565	2,951	3,854
	Cam	2,249	5,727	9,041	1,114
2	n-Si	1,058	3,619	3,731	6,081
	p-Si	4,184	9,573	16,910	11,270
	ITO	3,440	14,640	7,266	11,730
	Cam	1,333	3,864	4,128	11,930
3	n-Si	0,818	2,270	3,085	7,732
	p-Si	1,183	2,735	8,809	5,221
	ITO	2,987	10,840	8,119	9,273
	Cam	0,867	2,824	2,605	6,464
4	n-Si	0,941	2,884	2,955	8,467
	p-Si	0,954	3,295	4,194	8,530
	ITO	1,423	5,099	6,680	10,700
	Cam	1,801	4,722	5,745	11,170

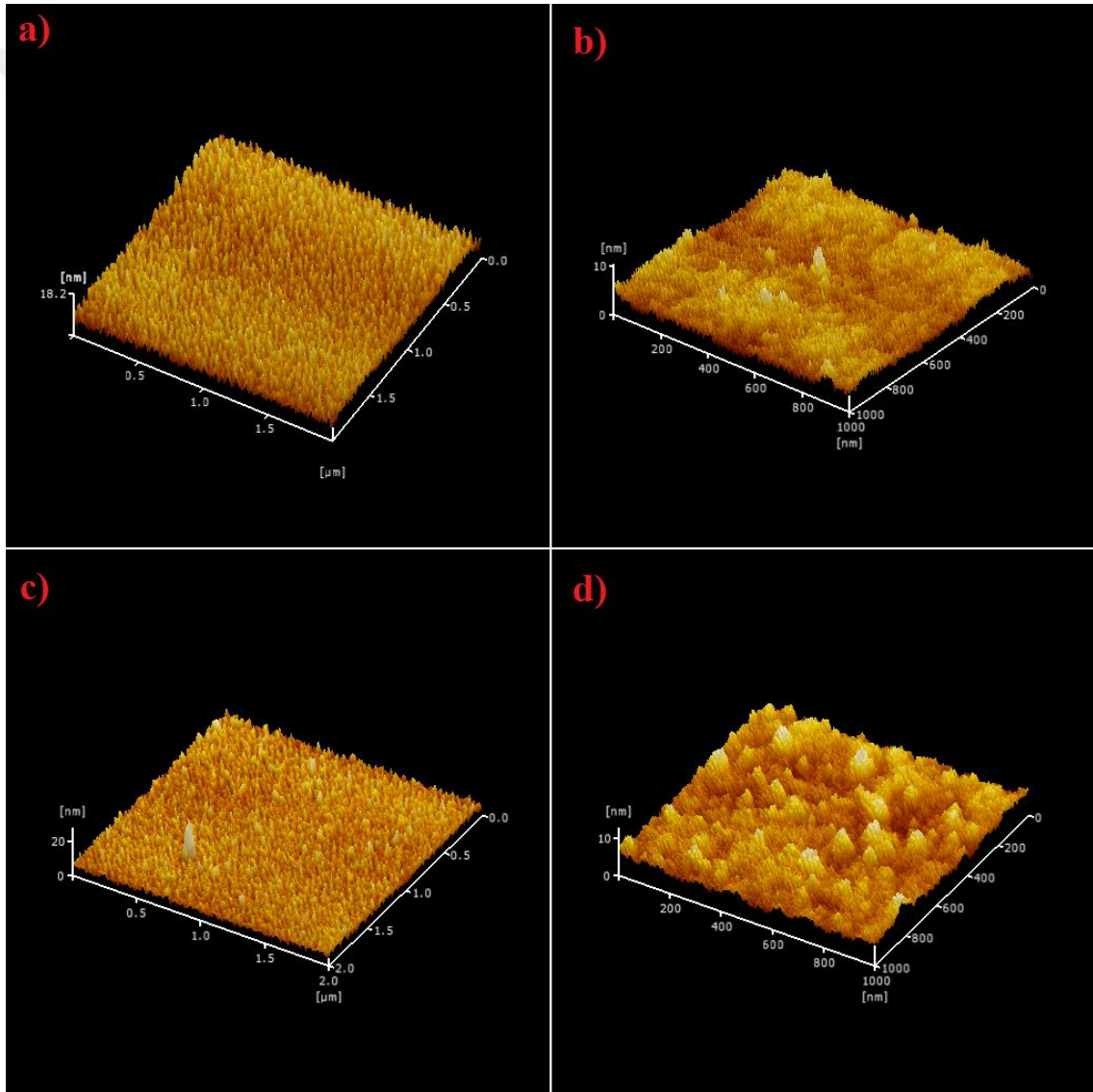
25, 75 ve 100 sccm argon gazı akışında ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerin AFM ölçümünden elde edilen üç boyutlu resimleri Şekil 4.58’de verilmiştir.



Şekil 4.58. a) 25 sccm b) 75 sccm c) 100 sccm argon gazı akışında ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,9 \text{ nm}$ ile $\sim 1,9 \text{ nm}$ arasında tespit edilmiştir. En düşük pürüzlülük, 75 sccm argon gazı şartlarında $0,978 \text{ nm}$ olarak gerçekleşmiştir. En yüksek pürüzlülük ise 100 sccm argon gazı varlığında $1,948 \text{ nm}$ olarak ölçülmüştür. Ölçülen en büyük maksimum yükseklik değeri 25 sccm argon gazı şartlarında ve değeri $5,674 \text{ nm}$ olarak verilmektedir. Diğer taraftan, en düşük maksimum yükseklik değeri 75 sccm değerinde ve $2,328 \text{ nm}$ olarak bulunmuştur. Ortalama mutlak eğimin en büyük değeri 100 sccm

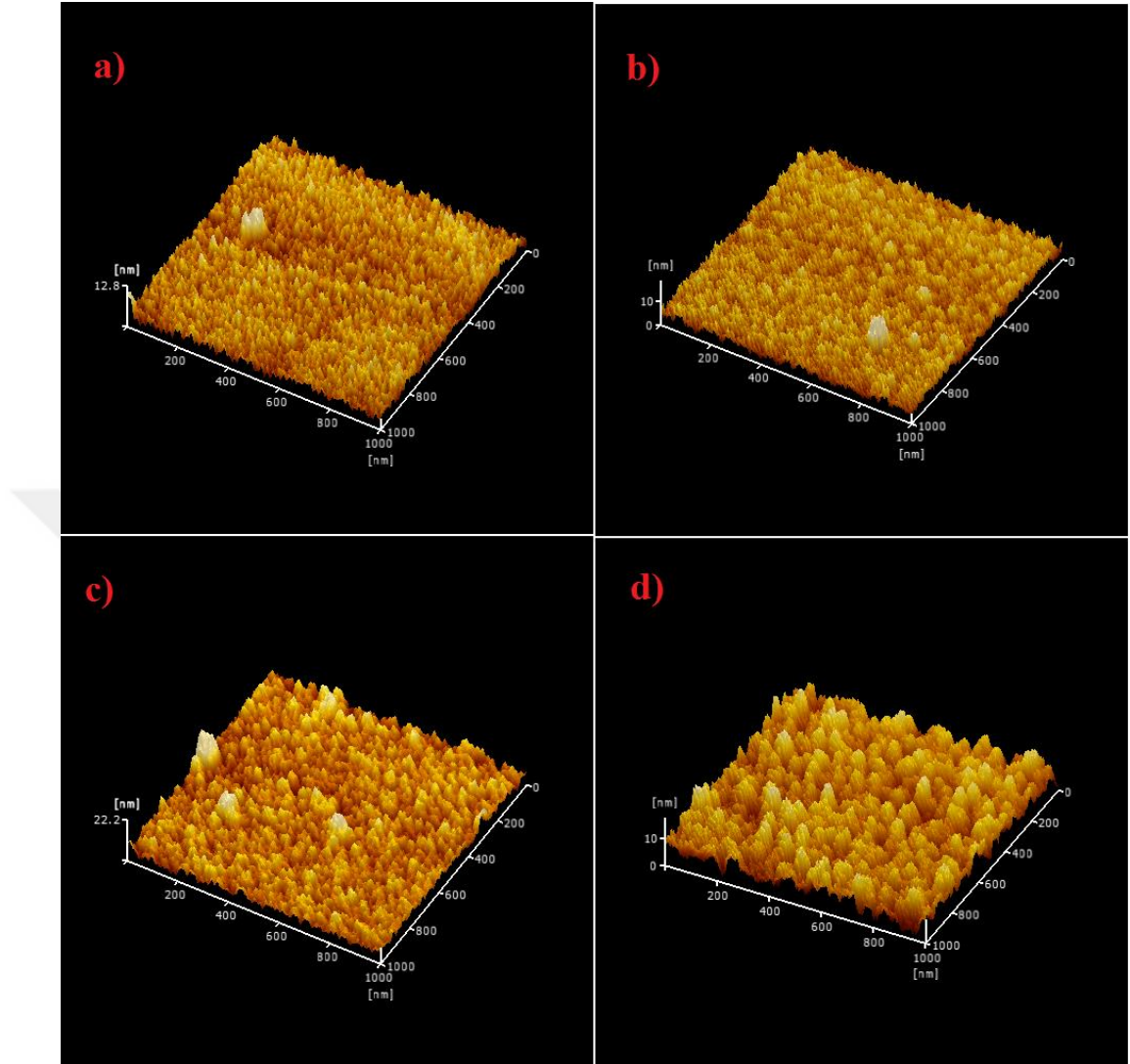
argon gazı varlığında ve $16,19^\circ$ olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama eğim $11,99^\circ$ olmaktadır ve 75 sccm argon gazına karşılık gelmektedir. AFM görüntülerinden filmin yüzeysel yapısı hemen hemen homojen olarak gözükmemektedir. Ayrıca filmin yüzeysel morfolojisi nano yapı, tanecikli ve periyodik yapıyla beraber nadir boşluklar içeren bir davranış sergilemektedir. Özellikle 100 sccm argon gazı değerinde filmin yüzeyinde büyümeler topaklanma şeklindedir. 25, 50, 75 ve 100 sccm argon gazı akışında n-Si alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerin AFM resimleri Şekil 4.59’da verilmiştir.



Şekil 4.59. a) 25 sccm b) 50 sccm c) 75 sccm d) 100 sccm argon gazı akışında n-Si alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,8$ ile $\sim 1,5$ nm arasında değişmektedir. Filmin en büyük maksimum yükseklik değeri 100 sccm argon gazı koşullarında elde edilmekte ve değeri 2,855 nm olarak tespit edilirken; en küçük maksimum yükseklik değeri 25 sccm argon gazı varlığında ve değeri 1,886 nm olarak elde edilmektedir. Ortalama mutlak eğimin en yüksek değeri 25 sccm argon gazı değerine karşılık gelmektedir ve $12,40^\circ$ olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama eğim 100 sccm argon gazı varlığında büyütülen filmde oluşmuştur ve değeri $7,86^\circ$ olmaktadır. Filmin yüzeyinde tepelikler ve bazı boşluklar göze çarpmaktadır. Bunlar büyüme esnasında bulaşan kirlilik ve safsızlıklar nedeniyle oluştuğu söylenebilmektedir. Ayrıca filmin yüzey morfolojisi tanecikli ve periyodik yapı barındırmaktadır. XRD sonuçları bunu desteklemektedir.

Tüm uygulanan argon gazı değerlerinde p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerin AFM ölçümünden elde edilen üç boyutlu resimleri Şekil 4.60'da gösterilmiştir.

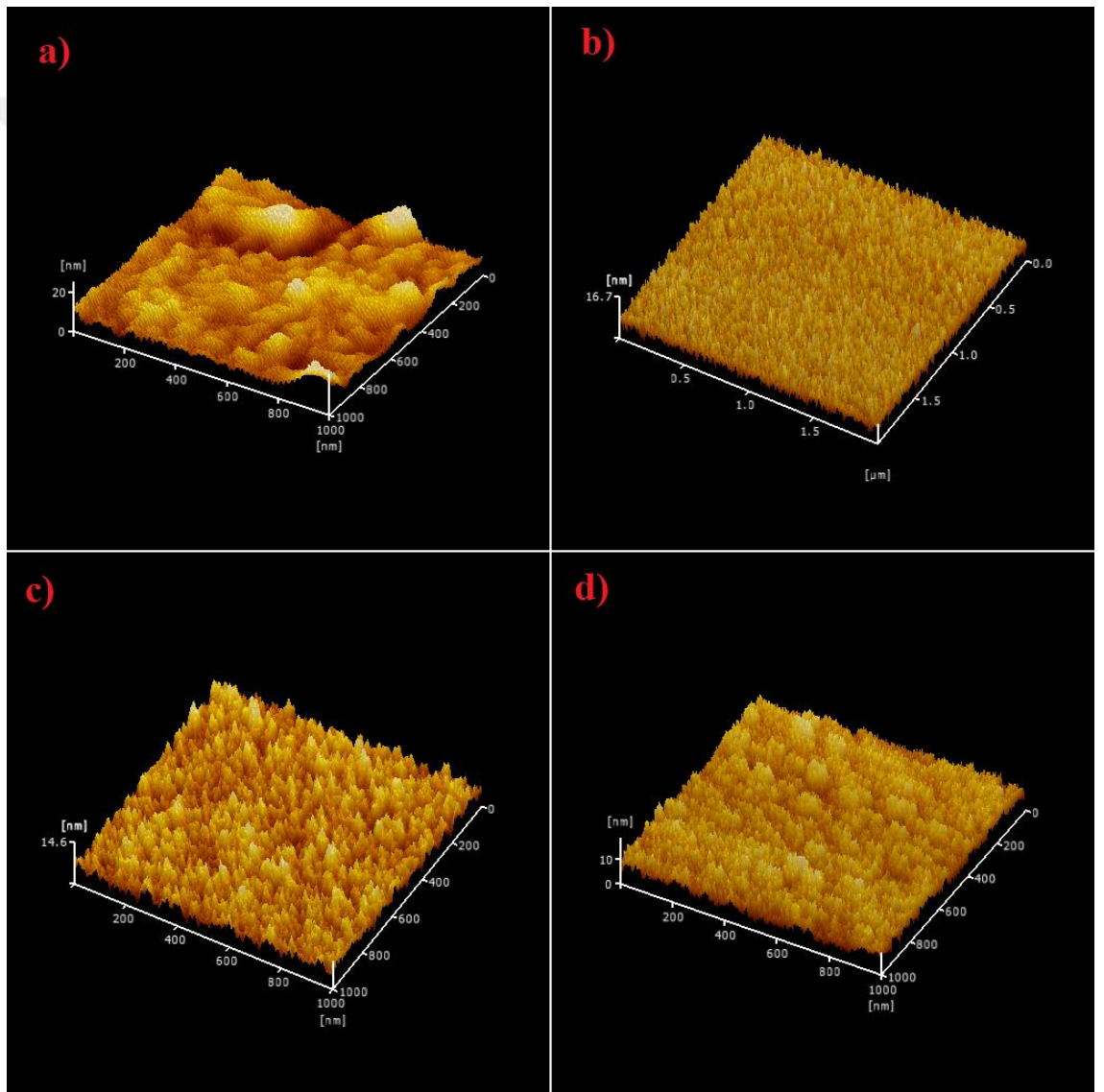


Şekil 4.60. a) 25 sccm **b)** 50 sccm **c)** 75 sccm **d)** 100 sccm argon gazı varlığında p-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

p-Si üzerine büyütülen film için ortalama pürüzlülük değeri $\sim 1,1$ ile $\sim 2,8$ nm arasında olmaktadır. Filmin en büyük maksimum derinlik değeri $7,274$ nm ile 50 sccm argon gazı şartlarında tespit edilirken, en düşük maksimum değeri $2,932$ nm ile 75 sccm argon gazında tespit edilmiştir. Öte yandan filmin en büyük maksimum yükseklik değeri $3,557$ nm ile 50 sccm argon gazı varlığında ölçülmüştür. En düşük maksimum yükseklik değeri 75 sccm argon gazına karşılık gelmektedir ve $2,032$ nm olarak verilmektedir. p-Si üzerine büyütülen GaN ince filmi genel olarak homojen bir yüzey morfolojisi davranışı sergilerken yer yer tepeli ve çukurlu alanlara da sahiptir. Bunun

yanı sıra periyodik tanecikli yapı gözükmemekte ve bu filmin hegzagonal kristal yapıda büyüdüğü savını XRD sonucu kanıtlamaktadır. Farklı argon değerlerinin film morfolojisi üzerine etkisinin olduğu AFM resimlerinden anlaşılmaktadır.

Tüm uygulanan argon gazı akış değerlerinde cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerin AFM ölçümünden elde edilen üç boyutlu resimleri Şekil 4.61’de verilmiştir.



Şekil 4.61. a) 25 sccm b) 50 sccm c) 75 sccm d) 100 sccm argon gazı akışında cam alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin üç boyuttaki AFM resimleri

Cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin ortalama mutlak eğim değerleri $\sim 7^\circ$ ile 30° arasında değişmektedir. En büyük ortalama mutlak eğim değeri $30,65^\circ$ olmaktadır ve bu 100 sccm argon gazı değerine karşılık gelmektedir. Filmin en büyük pürüzlülük değeri $4,239\text{ nm}$ olmaktadır ve 75 sccm argon gazı büyütme koşullarında ortaya çıkmaktadır. Ayrıca en büyük maksimum derinlik değeri $20,810\text{ nm}$ ile yine 75 sccm argon gazı koşullarında meydana gelmektedir. En düşük maksimum yükseklik değeri 50 sccm argon gazı varlığında elde edilmekte ve $0,944\text{ nm}$ olarak ölçülmektedir. Filmin yüzeyinin morfolojik yapısı uygulanan argon gazı miktarına göre değişmekte ve bu AFM resimlerinden görülmektedir. Farklı argon gazı akış değerlerinde, çeşitli alttaşlar üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin morfolojik parametreleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Farklı argon gazı akış değerlerinde cam, n-Si, p-Si ve ITO alttaşları üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri

Argon gazı (sccm)	Alttaş	Ortalama pürüzlülük (R_a)(nm)	Maksimum derinlik (R_v)(nm)	Maksimum yükseklik (R_p)(nm)	Ortalama mutlak eğim($\Delta\alpha$)($^\circ$)
25	n-Si	0,852	3,273	1,886	12,40
	p-Si	1,851	5,579	3,021	0,13
	ITO	1,861	7,164	5,674	13,99
	Cam	1,494	4,026	3,605	16,22
50	n-Si	1,050	3,834	2,005	9,72
	p-Si	2,777	7,274	3,557	23,46
	Cam	0,592	2,438	0,944	7,15
75	n-Si	1,469	4,214	2,215	10,77
	p-Si	1,105	2,932	2,032	12,39
	ITO	0,978	3,983	2,328	11,99
	Cam	4,239	20,810	6,839	20,73
100	n-Si	1,405	3,509	2,855	7,86
	p-Si	1,530	4,445	2,941	13,93
	ITO	1,948	2,992	4,286	16,19
	Cam	1,694	4,635	3,294	30,65

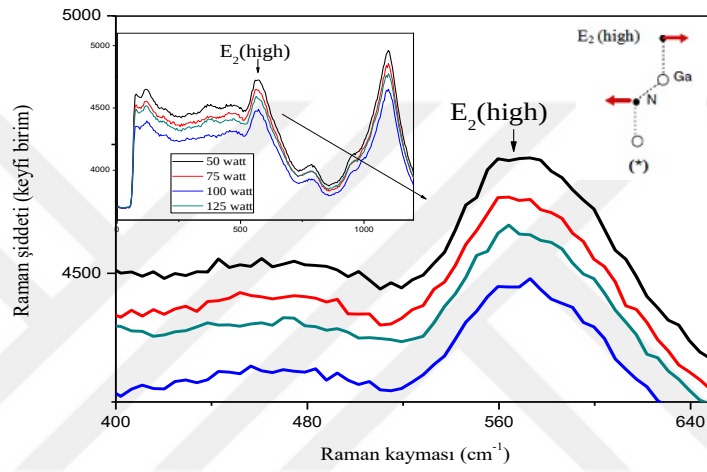
4.2. Optik Karakterizasyon

4.2.1. Raman spektroskopisi ölçümleri

Işık yani foton madde üzerine geldiğinde soğurma olayı olmadığı durumda ya elastik veya elastik olmayan şekilde saçılmaya uğrayabilmektedir. Burada saçılma fotonun yön değiştirmesi olarak tanımlanabilmektedir. Elastik saçılma olması durumunda Rayleigh saçılması olarak isimlendirilen gelen foton ile saçılan fotonun dalga boylarının/enerjilerinin aynı olduğu durum gerçekleşmektedir. Diğer yandan eğer gelen ve saçılan foton dalga boylarının farklı olduğu tarzda bir saçılma olursa (elastik olmayan) buna Raman saçılması denmektedir. Burada ışık ile etkileştiği molekülün titreşim enerji düzeyleri arasındaki fark, saçılan ışığın enerjisindeki saçılmadan sonra oluşan fazla veya az enerji miktarına eşittir. Bu ilkeden yararlanarak, eğer gelen ışıkla saçılan ışık arasındaki dalga boyunun farkının spektroskopi yardımıyla ölçülmesi ve bu sayede etkileşen moleküllerin titreşim enerji düzeyleri ilgili bilgi üretileceği fikri Nobelli ünlü bilim insanı C.V.Raman tarafından keşfedilmiştir. Buradaki ölçülen fark miktarına Raman kayması adı verilir. Çalışma prensibi temel olarak şöyledir: bir lazer ışık kaynağından fotonlar numuneye doğru gönderilir. Burada numuneye varmadan ışınlar geçirgen filtreden geçerler. Sonra numune ile etkileşime girerek elastik olmayan saçılma yaparlar. Saçılan bu ışınlar, dalga boyu seçici cihazı yardımıyla dalga boylarına göre seçilerek detektöre varmaktadır. Detektörde bunlar toplanır ve kaydedici cihaza gönderilir. Buradan veriler bilgisayara gitmektedir. Bilgisayar da otomatik olarak içerisindeki programları kullanarak gelen Raman kayma miktarını hesaplamaktadır. Gönderilen ışık şiddetine karşılık Raman kayması grafiği, bilgisayar ölçüm yaparken aynı anda çizmektedir. Burada ölçen uzman, numunenin isteğe bağlı farklı alanlarından da ölçüm alabilmektedir veya Raman Spektroskopisinden farklı parametreleri değiştirerek te ölçüm alınabilmektedir. Yapılan bu araştırmada büyütülen filmlerin Raman Spektroskopisi ölçümleri, DAYTAM-İleri spektroskopi laboratuvarındaki WITec alpha300 R modeline sahip Raman Spektroskopisi cihazı ile alınmıştır. Alınan tüm ölçümler oda sıcaklığı koşulları altında alınmıştır. Hegzagonal kristal yapıya sahip GaN malzemesi kararlı durumdadır ve C_{6v}^4 uzay grubuna aittir. Grup teorisine göre,

hegzagonal kristal yapıya sahip GaN altı Raman aktif moduna sahiptir, bunlar; $1A_1(TO) + 1A_1(LO) + 1E_1(TO) + 1E_1(LO) + 2E_2$ olmaktadır.

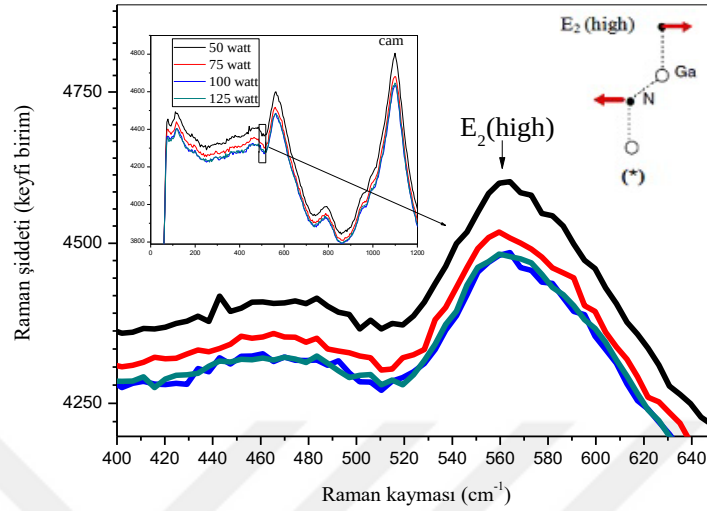
ITO alttaşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman ölçümü Şekil 4.62’de verilmektedir.



Şekil 4.62. ITO alttaşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman Spektrumu (*Kim and Kim 2004)

50, 75, 100 ve 125 Watt RF gücünde sırasıyla ölçülen Raman kayması pikleri $568,81 \text{ cm}^{-1}$, $563,91 \text{ cm}^{-1}$, $572,93 \text{ cm}^{-1}$, $564,17 \text{ cm}^{-1}$ olarak şekilde verilmektedir. Bu pikler, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN ince filmin $E_2(\text{high})$ optik fonon modunun titreşimine karşılık gelen karakteristik piklerdir. Bildirilen çalışmalarda gözlenilen pik değerlerine yakın değerlerde piklere sahiptir (Chen *et al.* 2001). En yüksek Raman şiddeti 50 Watt RF gücü için elde edilirken, en düşük Raman şiddeti 100 Watt RF gücü için elde edildi. Bu bulgu, RF güç değerinin ITO alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filminin optik fonon moduna etkisi olduğunu işaret etmektedir.

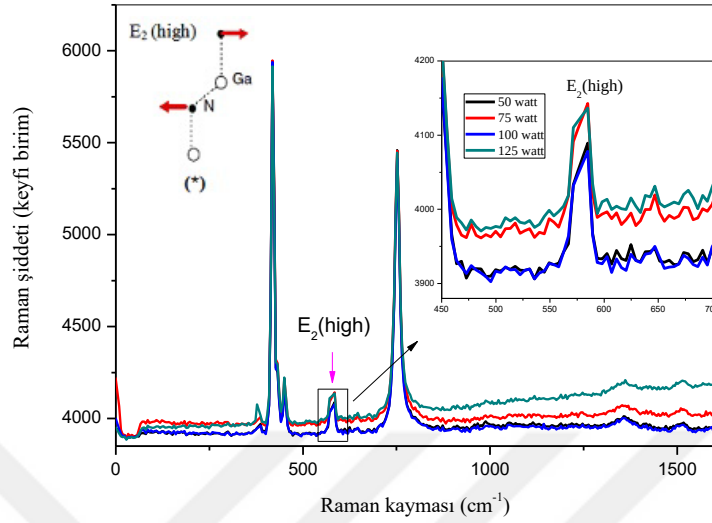
Cam alttaşı üzerine farklı RF gücü uygulanarak büyütülen GaN ince filminin Raman ölçümü Şekil 4.63’de verilmektedir.



Şekil 4.63. Cam alttaşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman spektrumu (*Kim and Kim 2004)

50, 75, 100, 125 Watt RF gücü için sırasıyla $564,03\text{cm}^{-1}$, $559,57\text{cm}^{-1}$, $564,03\text{cm}^{-1}$, $559,63\text{cm}^{-1}$ pikler gözlemlendi. Bu pikler, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN ince filmin E_2 (high) (Harima 2002) optik fonon modunun titreşimine karşılık gelen karakteristik piklerdir. Bildirilen çalışmalar ile gözlemlenen pikler yakın değerde olmaktadır (Chen *et al.* 2001). En yüksek Raman şiddeti 50 Watt RF gücü için elde edilirken; en düşük Raman şiddeti 125 Watt RF gücü elde edildi. RF güç değerinin, cam alt taş üzerine büyütülen GaN ince filminin optik fonon modları üzerinde etkisi olduğu sonucuna varıldı. Ayrıca sırasıyla 50, 75, 100, 125 Watt RF gücü için $1099,32\text{cm}^{-1}$, $1099,32\text{cm}^{-1}$, $1102,79\text{cm}^{-1}$, $1099,32\text{cm}^{-1}$ de çok güçlü pikler tespit edildi. Bu pikler cama karşılık gelen piklerdir. Literatürdeki çalışmalarda hemen hemen aynı değerde pikleri rapor etmiştir (Woelffel *et al.* 2015).

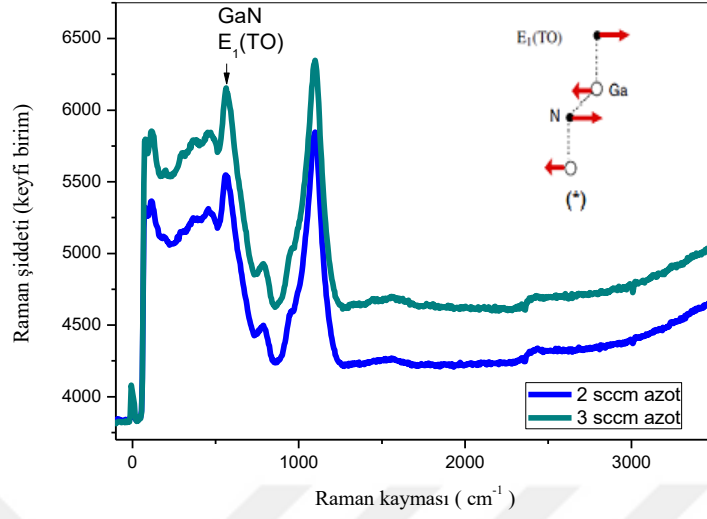
Safir alttaşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman ölçümü Şekil 4.64’de verilmektedir.



Şekil 4.64. Safir alttaşı üzerine farklı RF gücü koşullarında büyütülen GaN ince filminin Raman spektrumu (*Kim and Kim 2004)

50, 75, 100, 125 Watt RF gücü için sırasıyla $584,87 \text{ cm}^{-1}$, $584,53 \text{ cm}^{-1}$, $584,87 \text{ cm}^{-1}$, $584,53 \text{ cm}^{-1}$ pikleri gözlemlenmiştir. Bu pikler, hegzagonal yapıya sahip GaN ince filmin E_2 (high) (Harima 2002) optik fonon modunun titreşimi ile ilişkilidir ve bu değerler, literatür çalışmalarındaki değerinden daha yüksektir (Chen *et al.* 2001). 75 Watt ve 125 Watt RF gücü için Raman şiddetleri, 50 Watt ve 100 Watt RF gücü için Raman şiddetlerinden daha yüksektir; bu da, RF gücünün GaN ince filminin optik fonon modları üzerindeki etkisini göstermektedir. Özetle, farklı RF gücü değerlerinde farklı değerlerde Raman şiddeti ve Raman kayması değeri elde edildi ve buda RF gücü değiştirilerek optik fonon modlarının kontrol edilebileceğini ortaya koymaktadır.

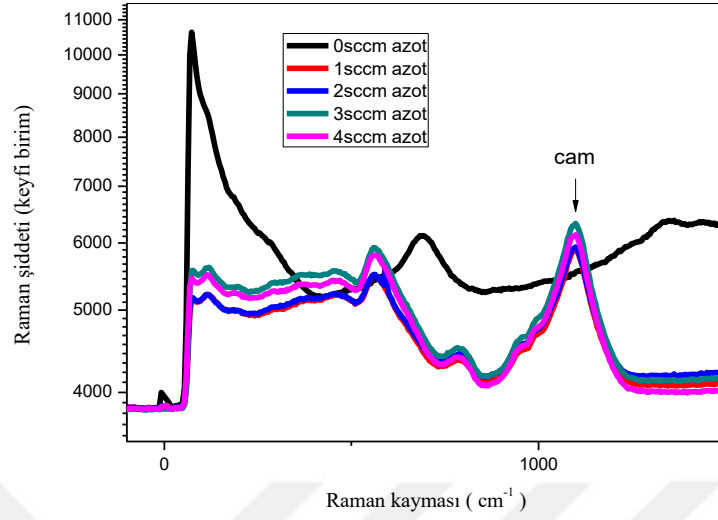
2 ve 3 sccm azot gazı akışında ITO üzerine büyütülen GaN ince filminin Raman ölçümü Şekil 4.65’de verilmektedir.



Şekil 4.65. ITO alttaş üzerine farklı 2 ve 3 sccm azot gazı akışında büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu (*Kim and Kim 2004)

2 ve 3 sccm azot gazı varlığında büyütülen GaN ince filminin Raman spektrumunda sırasıyla $563,144 \text{ cm}^{-1}$ $560,966 \text{ cm}^{-1}$ pikler tespit edilmiştir. Bu pikler hegzagonal kristal yapıya sahip GaN malzemesinin $E_1(\text{TO})$ optik fonon modlarına aittir. Literatürdeki çalışmalarda yakın değerlerde pikler rapor edilmiştir (Davydov *et al.* 1998). 2 ve 3 sccm azot gazında büyütülen filmlerdeki elde edilen pikteki Raman kayma miktarındaki fark, azot gazı etkisinden olabileceği değerlendirilmektedir.

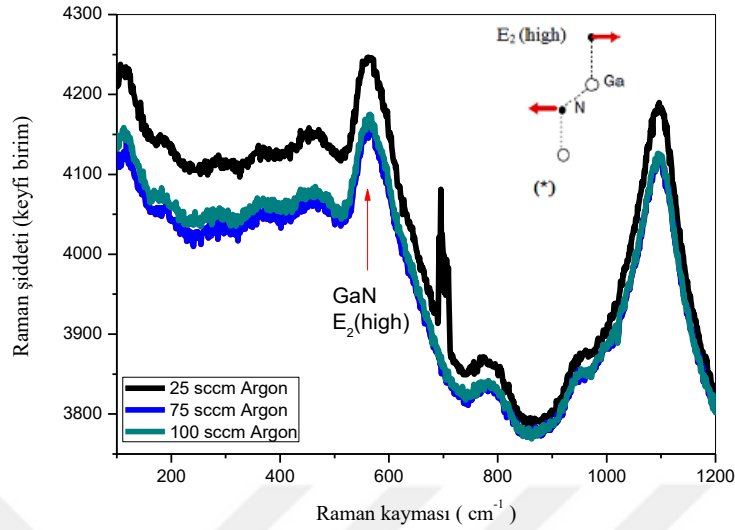
Farklı azot gazı akış değerlerinde cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu Şekil 4.66'da verilmektedir.



Şekil 4.66. Cam alttaş üzerine farklı azot gazı akış değerleri uygulanarak büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu

Sırasıyla 0, 1, 2, 3 ve 4 sccm azot gazı akışında cam alttaş için gözlemlenen pikler $1099,312 \text{ cm}^{-1}$, $1099,312 \text{ cm}^{-1}$, $1098,969 \text{ cm}^{-1}$, $1098,969 \text{ cm}^{-1}$ olmaktadır. Tespit edilen bu pikler cama ait olan piklerdir. Literatürdeki çalışmalarda yakın değerlerde pikler rapor edilmiştir. (Woelffel *et al.* 2015) Bu spektrumda dikkat çeken bulgu ise 0 sccm azot gazı değerindeki spektrumun davranışı diğer azot değerlerindekiyle (1, 2, 3, 4 sccm) çok farklı olmaktadır. Bu bulgu, filmlerin büyütülürken azot gazı verilip verilmemesinin filmin optik özellikleri üzerine etkisini ortaya koymaktadır.

Farklı argon gazı akışında ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu Şekil 4.67’de verilmiştir.



Şekil 4.67. ITO alttaş üzerine farklı argon gazı akışında büyütülen GaN ince filmlerinin Raman spektrumu (*Kim and Kim 2004)

Sırasıyla 25, 75 ve 100 sccm argon gazında büyütülen GaN ince filmleri için gözlemlenen pikler $566,88\text{ cm}^{-1}$, $562,04\text{ cm}^{-1}$ $566,04\text{ cm}^{-1}$ olmaktadır. Bunlar hegzagonal kristal yapıya sahip GaN malzemesinin $E_2(\text{high})$ optik fonon titreşim moduna karşılık gelmektedir. Bildirilen araştırmalarda yakın değerler rapor edilmiştir (Chen *et al.* 2001). Raman spektrumunda değişen argon değerlerine karşılık değişen Raman şiddetleri göze çarpmaktadır. Bu argon gazının optik fonon modları üzerine etkisinin olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, GaN ince filmlerinin büyütmesinde uygulanan argon gazı miktarı optik fonon modları üzerinde önemli bir role sahiptir ve argon gazı miktarının değiştirilmesiyle filmin optik özelliklerinin değişebileceği Raman ölçümleriyle doğrulanmıştır.

Büyütülen ince filmlerin mekanik özelliklerinin malzemenin kırılgenlik gibi bazı özellikleri üzerine etkisi vardır ve bu özelliklerin incelenmesi özellikle aygıt uygulamalarında daha önemli hale gelmektedir. Raman spektrumu ölçüm sonuçları, üretilen GaN ince filmlerin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir parametre olan kalıcı gerilme (residual stress) hakkında önemli bilgiler vermektedir. GaN ince filmi için $E_2(\text{high})$ optik fonon titreşimine ait gerilimsiz (stress free) Raman kayması piki literatürde ve araştırmacılar tarafından $567,2\text{ cm}^{-1}$ olarak bulunmuştur (Nootz *et al.*

2002; Park *et al.* 2015a). GaN ince filminin $E_2(high)$ optik fonon titreşimine ait Raman kayması bu değerden yüksek değerlere gidiyorsa yani daha yüksek dalga numarasında bulunuyorsa, mavi bölgeye kayma (blue shift) olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda GaN ince filminde Basma/Basınç gerilmesi (compressive stress) mevcuttur denmektedir. Eğer malzemenin $E_2(high)$ optik fonon titreşimine ait Raman kayması piki gerilimsiz pik değerinden daha düşük kaymaya yani daha düşük dalga numarasında bulunmakta ise bu durumda kırmızı bölgeye kayma (red shift) olarak değerlendirilir. Bu durum malzemenin yapısında çekme gerilmesi (tensile stress) varlığına işaret etmektedir. GaN ince filmlerinin kalıcı gerilme değerleri HaiyanWang ve arkadaşlarının tarafından ifade edilen formül (4.2) vasıtasıyla hesaplanabilmektedir (Wang *et al.* 2016a).

$$\sigma = \frac{\Delta w}{k} \quad (4.2)$$

Burada σ kalıcı gerilimini (residual stress), Δw Raman kayması pik değerinin gerilimsiz (stress free) pik değerine göre sapma/değişim miktarını, $k = 4,3 \text{ cm}^{-1}(\text{GPa})^{-1}$ Raman gerilim katsayısını ifade etmektedir. Safir alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri Çizelge 4.17’de verilmektedir.

Çizelge 4.17. Uygulanan farklı RF güç değerlerinde safir alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri

Uygulanan RF Gücü (<i>Watt</i>)	Kalıcı Gerilim Değerleri (<i>GPa</i>)	Gerilim Şekli
50	4,109	Basma/Basınç Gerilimi
75	4,030	Basma/Basınç Gerilimi
100	4,109	Basma/Basınç Gerilimi
125	4,030	Basma/Basınç Gerilimi

Uygulanan farklı RF güçlerinde safir alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin Raman kayma pikleri mavi bölgeye kaydığı Raman ölçümlerinden gözlenmiştir. Bu

durum değerlendirildiğinde; safir üzerine büyüyen GaN ince filmlerin basınç gerilimi gösterdiği sonucu çıkmıştır. Çizelge 4.18’de farklı RF güç koşullarında cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.18. Uygulanan farklı RF güç değerlerinde cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri

Uygulanan RF Gücü (<i>Watt</i>)	Kalıcı Gerilim Değerleri (<i>GPa</i>)	Gerilim Şekli
50	0,737	Çekme Gerilimi
75	1,774	Çekme Gerilimi
100	0,737	Çekme Gerilimi
125	1,760	Çekme Gerilimi

50 ve 100 Watt güç koşulunda cam alttaş üzerine büyüyen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri 0,737 *GPa* olarak elde edilmiştir. Malzemenin en yüksek kalıcı gerilim değeri 75 Watt güç değeri koşullarında 1,774 *GPa* olarak hesaplanmıştır. 125 Watt güç değerindeki kalıcı gerilim değeri 75 Watt güç değerine çok yakın olmakla beraber, 50 ve 100 Watt değerliyle kıyaslandığında oldukça farklı olduğu gözlenmektedir. Uygulanan farklı RF güç koşullarında ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Uygulanan farklı RF güç değerlerinde ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri

Uygulanan RF Gücü (<i>Watt</i>)	Kalıcı Gerilim Değerleri (<i>GPa</i>)	Gerilim Şekli
50	0,377	Basınç Gerilimi
75	0,765	Çekme Gerilimi
100	1,332	Basınç Gerilimi
125	0,704	Çekme Gerilimi

ITO üzerine GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerlerine bakıldığında; 100 Watt güç uygulandığında en büyük kalıcı gerilim elde edilirken; 50 Watt RF güç değerlerinde büyütülen film en küçük kalıcı gerilime sahip olduğu bulunmuştur. Burada 50 Watt değerinden başlayarak 75 Watt ve 100 Watt değerlerine güç yükseltildiğinde GaN ince filmin kalıcı gerilim değerleri artma eğilimi gösterirken; daha yüksek 125Watt RF güç değerinde yeniden kalıcı gerilim azalmaktadır.

Çizelge 4.20’de farklı argon gazı akış değerlerinde ITO üzerine büyüyen GaN ince filmlerin kalıcı gerilim değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.20. Uygulanan farklı argon gazı değerlerinde ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim değerleri

Uygulanan Argon Gazı (<i>sccm</i>)	Kalıcı Gerilim Değerleri (<i>GPa</i>)	Gerilim Şekli
25	0,074	Çekme Gerilimi
75	1,200	Çekme Gerilimi
100	0,269	Çekme Gerilimi

Farklı argon gazı akışında ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden en yüksek kalıcı gerilime 75 sccm argon gazı koşullarında ulaşılmıştır. Sisteme GaN ince filmleri büyütülürken farklı argon gazı verildiğinden GaN ince filminin kalıcı gerilim değerlerinin çeşitlendiği görülmektedir.

4.2.2. Soğurma (UV/Vis) ve yansımaya (Reflectance) ölçümleri

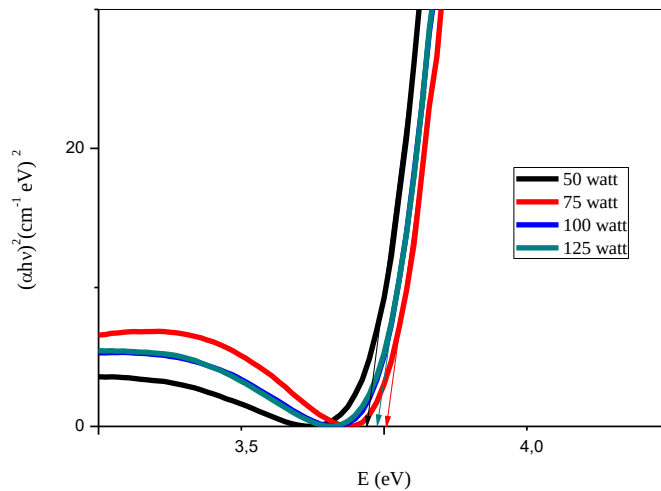
Yapılan bu çalışmada soğurma ve yansımaya ölçümleri, DAYTAM-İleri spektroskopi laboratuvarındaki LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR modeline sahip Spektrofotometre cihazı ile oda sıcaklığı koşullarında alınmıştır. Ayrıca, bu çalışmada 200 nm ile 900 nm arasındaki dalga boyu değeri için soğurma ölçümleri alınmıştır.

Optik bant aralığı enerjisi (E_g), iletim bandının en düşük noktasının enerjisiyle valans bandının en yüksek noktası arasındaki fark olarak tanımlanabilmektedir. Birçok önemli fotonik ve opto elektronik cihazın tasarımı, optik bant aralığının değerini kontrol etmeye dayanmaktadır. Optik bant değerleri ünlü Tauc ilişkisi (Tauc and Menth 1972; Stenzel 2005) kullanılarak hesaplandı.

$$(\alpha h\nu)^n = C(h\nu - E_g) \quad (4.3)$$

Burada n, bant aralığı türüne göre ölçülen parametre, C sabit, $h\nu$ foton enerjisini, E_g ise kullanılan materyalin optik bant aralığı enerjisini ifade eder. $n = 1/2$ kabul edildi ve bu sayede (4.3) formülü kullanılarak izinli direk optik enerji aralığı değerleri hesaplandı. UV / Vis / NIR Spektrofotometre ile soğurmaya karşı dalga boyu grafiği elde edilmiştir. Soğurma grafiği kullanılarak, $(\alpha h\nu)^2$ ifadesine karşılık enerji grafiği elde edildi. Bu grafiğin lineer bölgedeki $(\alpha h\nu)^2 = 0$ değeri kullanılarak, optik bant aralığı enerjilerini hesaplamak için doğrusal çizgiler dikkatli şekilde çizilmiştir. Bu yapılan teknik işleme fit alma olayı denmektedir ve Origin bilgisayar programı sayesinde yapılmıştır.

50, 75, 100 ve 125 Watt RF gücü değerlerinde safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$ değerine karşı enerji (E) grafiği Şekil 4.68’de verilmiştir.



Şekil 4.68. Farklı RF güçlerinde safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ değeri grafiği

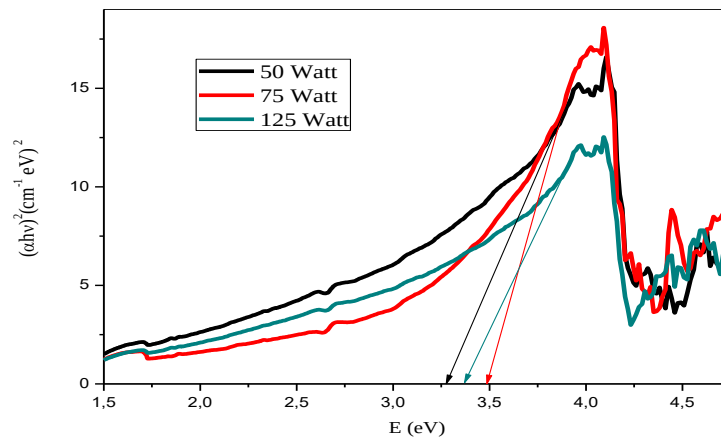
Buradan Safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin farklı RF güçleri için optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.21. Farklı RF güçleri için safir üstüne GaN ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri

Uygulanan RF Gücü (Watt)	Optik Bant Aralığı Enerjisi (E_g) (eV)
50	3,71
75	3,76
100	3,73
125	3,73

Farklı RF güçleri için optik bant aralığı enerjileri birbirine çok yakın değerler çıkmıştır. 75 Watt RF gücü için en yüksek optik bant aralığı enerjisi elde edilirken, 50 Watt RF gücü koşullarında büyütülen filmin optik bant aralığı enerjisi en düşük değer olarak bulunmuştur. Bu değerler, bildirilen çalışmalardaki değerlerden daha büyük olmaktadır (Guaddim *et al.* 2015; Said *et al.* 2016).

Cam alttaş üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen GaN ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ değerine karşı enerji (E) grafiği Şekil 4.69’da verilmiştir.



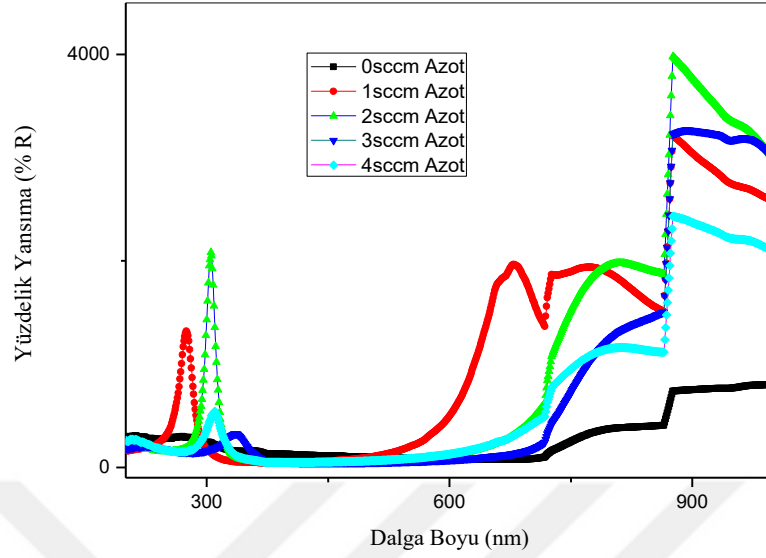
Şekil 4.69. Farklı RF güçlerinde cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ değeri grafiği

Tauc formülünden yararlanılarak, cam alttaşı üzerine GaN ince filmlerin farklı RF güçleri için optik bant aralığı enerjileri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.22. Farklı RF güçleri için cam alttaşı üzerine GaN ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri

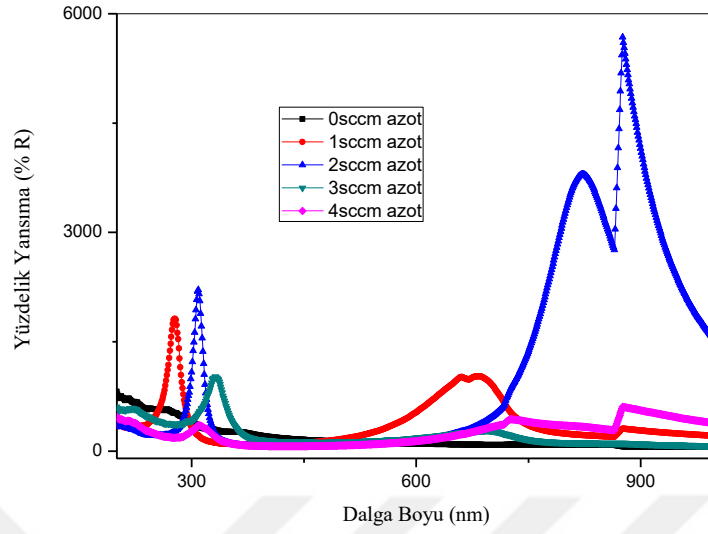
Uygulanan RF Gücü (Watt)	Optik Bant Aralığı Enerjisi (E_g) (eV)
50	3,27
75	3,48
125	3,37

75 Watt RF gücü değerinde en yüksek optik bant aralığı enerjisi elde edilmiştir. GaN ince filminin cam alttaşı üzerindeki optik bant aralığı enerjisi için en iyi değeri, 125 Watt RF gücüne karşılık gelen 3,37 eV olarak hesaplandı; bu değer, daha önceki literatür çalışmalarıyla desteklenmektedir (Yang *et al.* 2015). Uygulanan farklı RF gücü değerleri optik bant aralığını değiştirmiştir. Sonuç olarak, RF güç değeri, opto-elektronik cihazların tasarımı için çok önemli olan GaN ince filminin optik bant aralığı değerlerine açıkça etkide bulunmuştur. Ayrıca GaN ince filminin optik bant aralığı değerinde, kullanılan alttaşı seçiminin rol oynamakta olduğu, safir ve cam alttaşı E_g değerleri karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır. Üretilen filmlerin optik özelliklerini araştırmada, soğurma ölçümlerinin yanı sıra (%R) yansımaya ölçümleri de alınmış ve analiz edilmiştir. n-tipi silisyum üzerine farklı azot gazı akışında büyütülen GaN ince filmlerinin dalga boyuna karşılık yüzdelik yansımaya (%R) grafiği Şekil 4.70’de verilmektedir.



Şekil 4.70. Farklı azot gazı akışında büyütülen n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin dalga boyuna karşılık yüzdelik yansımaya (%R) grafiği

Görünür bölgede üretilen filmlerde en fazla optik yansımaya 1 sccm azot gazı ortamında büyütülen filmde ortaya çıkmaktadır. Fakat filmin en az optik yansımaya değeri ise 0 sccm azot ortamında büyütülen filmde oluşmaktadır. Farklı azot gazlarında ince filmin optik yansımaya miktarları görünür bölgede büyükten küçüğe doğru şu şekilde sıralanabilmektedir: 1, 2, 4, 3, 0 sccm azot gazı şartları şeklindedir. Ultraviyole bölgede ise ince filmin optik yansımaya değerleri büyükten küçüğe doğru 2, 1, 4, 3, 0 sccm azot gazı şeklinde verilmektedir. Optik yansımaya grafiği farklı azot değerleri için oldukça farklı davranışlar sergilemektedir. Bu bulgu, uygulanan farklı azot gazı değerleri üretilen filmin optik yansımalarını etkilendiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. p-tipi silisyum alttaş üzerine farklı azot gazı ortamında büyütülen GaN ince filmlerinin dalga boyuna karşılık yüzdelik yansımaya (%R) grafiği Şekil 4.71’de verilmektedir.



Şekil 4.71. Farklı azot gazı akışında büyütülen p-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin dalga boyuna karşılık yüzdelik yansımaya (%R) grafiği

Uygulanan 1 sccm azot gazında p-tipi silisyum üzerine GaN ince filmin görünür bölgedeki optik yansımaları en büyük değerdedir. 0 sccm azot gazı ortamındaki p-tipi silisyum üzerine GaN ince filmin görünür bölgedeki optik yansımaları ise en küçük değerdedir. Görünür bölgedeki filmin yansımaları değerleri büyükten küçüğe sırasıyla: 1, 2, 4, 3 ve 0 sccm azot gazı varlığı şeklinde olmaktadır. Ultraviyole bölgede filmin en büyük optik yansımaları 2 sccm azot gazı ortamındadır. Filmin ultraviyole bölgedeki en küçük optik yansımaları değeri 4 sccm azot gazı şartlarında oluşmaktadır. Ultraviyole bölgedeki filmin yansımaları değerleri büyükten küçüğe sırasıyla: 2, 1, 3, 0 ve 4 sccm azot gazı varlığı şeklinde olmaktadır. Özetle; büyütülen filmlerin optik yansımaları değerleri filmin büyütmesinde uygulanan azot gazı değerine ve kullanılan alttaşa bağlıdır ve yansımaları ölçümleriyle bu bulgu doğrulanmaktadır.

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada, RF Magnetron Saçtırma (RF-Sputter) tekniği kullanılarak n-Si, p-Si, cam, safir, ITO alttaşlar üzerine GaN ince filmleri farklı büyütme koşulları uygulanarak büyütüldü. Araştırmada, bu çeşitli büyütme koşullarının kullanılmasının ana nedeni büyütme koşullarının ince filmin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerine etkisini incelemektir. Bunun yanı sıra farklı alttaşların kullanılması sebebi de kullanılan alttaşın filmin kristal yapısı ve bazı fiziksel özellikleri üzerine etkisini irdelemektir. Aşağıdaki Çizelge 5.1’de XRD ölçümünden elde edilen filmin çeşitli yapısal özellikleri verilmektedir.

Çizelge 5.1. Üretilen ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu - Alttaş	(hkl)	Gözlenen 2 θ (°)	Literatür 2 θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D)(nm)	Örgü sabitleri (Å)	
50 Watt-Cam	(100)	33,04	32,87	0,73	a=3,1430	c=5,7300
75 Watt-Cam	(100)	33,06	32,87	0,99	a=3,1430	c=5,7300
100 Watt-Cam	(100)	32,85	32,87	0,97	a=3,1430	c=5,7300
125 Watt-Cam	(100)	33,01	32,87	0,90	a=3,1430	c=5,7300
50 Watt-n-Si	(100)	32,58	32,38	177,19	a=3,1900	c=5,1890
75 Watt-n-Si	(100)	32,56	32,38	160,92	a=3,1900	c=5,1890
100 Watt-n-Si	(100)	32,58	32,38	162,63	a=3,1900	c=5,1890
50 Watt-p-Si	(100)	32,61	32,38	173,89	a=3,1900	c=5,1890
75 Watt-p-Si	(100)	32,60	32,38	158,45	a=3,1900	c=5,1890
100 Watt-p-Si	(100)	32,60	32,38	163,19	a=3,1900	c=5,1890
125 Watt-p-Si	(100)	32,60	32,38	157,82	a=3,1900	c=5,1890
50 Watt-safir	(101)	37,18	38,062	31,98	a=3,0950	c=5,0000
75 Watt-safir	(101)	37,18	38,062	31,96	a=3,0950	c=5,0000
100 Watt-safir	(101)	37,22	38,062	50,19	a=3,0950	c=5,0000

Çizelge 5.1. (devamı)

125 Watt-safir	(101)	37,22	38,062	25,02	a=3,0950	c=5,0000
0 sccm-n-Si	(100)	32,56	32,38	162,28	a=3,1900	c=5,1890
1 sccm-n-Si	(100)	32,56	32,38	162,45	a=3,1900	c=5,1890
2 sccm-n-Si	(100)	32,38	32,38	161,75	a=3,1900	c=5,1890
3 sccm-n-Si	(100)	32,40	32,38	157,37	a=3,1900	c=5,1890
3 sccm-p-Si	(100)	32,40	32,38	157,70	a=3,1900	c=5,1890
4 sccm-p-Si	(100)	32,58	32,38	160,90	a=3,1900	c=5,1890
2 sccm-ITO	(002)	30,38	31,19	25,21	a=3,1430	c=5,7300
3 sccm-ITO	(002)	30,67	31,19	25,06	a=3,1430	c=5,7300
50 sccm-n-Si	(100)	33,61	32,38	191,63	a=3,1900	c=5,1890
75 sccm-n-Si	(100)	32,48	32,38	47,25	a=3,1900	c=5,1890
100 sccm-ITO	(002)	30,67	31,19	26,11	a=3,1430	c=5,7300
50 sccm-p-Si	(100)	32,57	33,0	81,75	a=3,1900	c=5,1890
75 sccm-p-Si	(100)	32,65	33,0	70,66	a=3,1900	c=5,1890

Farklı RF güçleri için cam üzerine kaplanan GaN ince filmlerinin X -ışını kırınımı ölçüm sonuçları analiz edilecek olunursa, birçok fikir elde edilmiş olur. Çizelge 5.1 verildiği üzere, $\sim 33^\circ$ de karakteristik pik gözlenmiştir ve bu pik GaN malzemesinin hegzagonal kristal yapısına ve (100) yönelime sahip karakteristik pikidir (PDF kodu:01-074-9380). İnce filmin örgü parametrelerini $a = 3,1430$ ve $c = 5,7300 \text{ \AA}$ olmaktadır. Ayrıca diğer yapısal parametrelerde PDF kodu sayesinde elde edilmiştir. Ölçülen bazı pik değerleri literatürdeki pikten yaklaşık $0,2^\circ$ kaymıştır ve bunun nedeni büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler olarak değerlendirilmektedir. Hegzagonal GaN malzemesinin ölçülen en şiddetli piki, 100 Watt RF gücü varlığında elde edilen büyütmede oluşmuştur. Bunun anlamı, 100 Watt RF gücü değerinde en iyi kristal yapısı elde edilmiştir. En düşük şiddete sahip pik, 50 Watt RF gücü altında elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak, elde edilen görelî olarak en kötü kristal yapısı 50 Watt RF değerinde büyütülen GaN ince filminde elde edilmiştir denilebilmektedir. Kristalin tanecik boyutları uygulanan RF gücüne göre çeşitlilik göstermektedir. 75 Watt RF gücü altında cam üzerine kaplanan GaN ince filminin tanecik boyutu $0,99 \text{ nm}$ olarak

aralarındaki en büyük değer olurken, diğer yandan 50 Watt gücünde bu değer 0,73 nm en küçük değere sahip olmaktadır. 50 Watt büyütme yapılırken 75 Watt değerine çıkılması halinde kristalin tanecik boyutu artarken, öte yandan RF gücü 100 Watt ta büyüme olurken bu değer 125 Watt değerine çıkartıldığında GaN ince filmi kristalinin tanecik boyutu küçülmektedir. Ayrıca, elde edilen grafiklerde hafif tümsek şeklinde spektrum davranış göstermektedir. Bunun anlamı büyütülen filmin bazı alanlarında amorf fazında bölgelerin mevcut olduğudur. Bu sonuçlar, RF gücünün kristalin yapısına etkisi olduğunu ve bu güç değerlerini kontrol ederek, istenilen tanecik boyutunda kristal elde edilebileceğini göstermektedir. XRD spektrumundan elde edilen bulgular, RF gücünün GaN ince filminin yapısal parametreleri üzerinde önemli bir rol oynadığını kanıtlamaktadır.

Farklı RF güçleri için n-tipi silisyum üzerine büyütülen ince filmlerin XRD sonuçları analiz edersek, $\sim 32,5^\circ$ de karakteristik pik tespit edilmiştir ve bu pik GaN malzemesinin hegzagonal kristal yapısına ve (100) yönelime sahip karakteristik piktir (PDF kodu: 01-076-0703). Büyütülen GaN ince filmlerinin örgü sabitleri $a = 3,1900$ ve $c = 5,1890 \text{ \AA}$ olarak belirlenmiştir. Yaklaşık $0,2^\circ$ pik kaymasının, büyütme yaparken oluşan kirlilik ve safsızlıklardan oluştuğu yorumlanmıştır. Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). $\sim 69^\circ$ de çok güçlü bir pik gözlemlenmiştir. Bu beklenen ve literatürde rapor edilen silisyuma karşılık gelen pik olarak değerlendirilmiştir (Orak *et al.* 2017). En yüksek şiddetteki pik 50 Watt RF gücü için elde edilmiştir. Öte taraftan, en düşük şiddete sahip pik 75 Watt RF gücü koşullarında büyütülen filmde elde edilmiştir. Bu bulgulara, n-Si altlık üzerine GaN ince filmin yapısında en iyi kristal yapının 50 Watt RF gücünde elde edildiği, n-Si üzerindeki GaN ince filmin yapısında en düşük kristalleşme 75 Watt RF gücünde elde edildiği sonucuna ulaşıldı. En küçük kristal tanecik boyutu değeri 160,92 nm ile 75 Watt RF gücünde üretilen GaN ince film yapısında ortaya çıkmaktadır. En büyük kristal tanecik boyutu değeri ise 177,19 nm değeri ile 50 Watt Radyo Frekans gücünde elde edilmiştir. Özetle, n-Si alttaş üzerine GaN ince filmin kristal yapısının, RF gücünü kontrol ederek değiştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

p-Si alttaşı üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen filmlerin XRD ölçümünde, $\sim 32,5^\circ$ deki pik, (100) yönelimine sahip hegzagonal GaN malzemesinin karakteristik piki olduğu sonucuna varılmıştır (PDF kodu: 01-076-0703). Yaklaşık $0,3^\circ$ pik kaymasının, büyütme yaparken oluşan kirlilik ve safsızlıklardan oluştuğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). $\sim 69^\circ$ 'de çok güçlü bir pik gözlemlenmiştir. Bu beklenen ve literatürde rapor edilen silisyuma karşılık gelen pik olarak yorumlanmıştır (Orak *et al.* 2017). En yüksek şiddetteki pik 50 Watt RF gücü için elde edilmiştir. Diğer yandan, en düşük şiddete sahip pik 125 Watt RF gücü koşullarında büyütülen filmde elde edilmiştir. Bu bulgulara, p-Si altlık üzerine GaN ince filmin yapısında en iyi kristal yapının 50 Watt RF gücünde elde edildiği, p-Si üzerindeki GaN ince filmin yapısında en düşük kristalleşme 125 Watt RF gücünde elde edildiği sonucuna varılmıştır. 125 Watt RF gücü uygulanarak büyütme yapıldığında, en küçük kristal tanecik boyutu 157,82 nm olarak elde edilirken; 50 Watt uygulandığında GaN ince filminin kristal tanecik boyutu 173,89 nm ile en büyük değerde olmaktadır. 50 Watt RF gücü değerinden 75 Watt değerine çıkıldığında veya 100 Watt RF gücünden 125 Watt değerine çıkıldığında malzemenin kristal tanecik boyutu azalmaktadır. Bu verilerden, RF gücünün değerinin GaN ince filmin yapısında etkili olduğunu ve bunu kontrol ederek GaN ince filminin yapısal özelliklerini başarıyla kontrol edebildiği sonuçları çıkarılmıştır.

Safir altlık üstüne büyütülen GaN ince filmlerinin XRD grafiğinde $\sim 37^\circ$ pik tespit edildi ve bu pik yaygın olarak hegzagonal GaN (101) düzleminin karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-079-2499). Yaklaşık $0,9^\circ$ pik kaymasının, büyütme yaparken oluşan kirlilik ve safsızlıklardan oluştuğu değerlendirilmiştir. GaN ince filmlerin örgü sabitleri $a = 3,0950$ ve $c = 5,0000 \text{ Å}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca $41,45^\circ$ 'de çok güçlü bir pik gözlemlenmiştir. Bu beklenen ve literatürde rapor edilen safire karşılık gelen pik olarak yorumlanmıştır (Fong *et al.* 2014). Bir başka pikte $\sim 79,8^\circ$ de gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'nin (2022) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Schwaiger *et al.* 2010). En yüksek şiddetteki pik 100 Watt RF gücü için elde edilmiştir. Öte yandan, en düşük şiddete sahip pik 125 Watt RF gücü

koşullarında büyütülen filmde elde edilmiştir. Bu bulgular, safir altlık üzerine GaN ince filmin yapısında en iyi kristal yapının 100 Watt RF gücünde elde edildiği, safir üzerindeki GaN ince filmin yapısında en düşük kristalleşme 125 Watt RF gücünde elde edildiği sonuçlarına işaret etmektedir. Büyütülen numunelerde 100 Watt RF gücü uygulandığında en büyük kristal tanecik boyutu elde edilmiştir. 125 Watt RF gücü koşullarında büyütülen numune ise en küçük kristal tanecik boyutuna sahiptir. 50 ve 75 Watt RF gücü varlığındaki numunelerinin kristal tanecik boyutları bir birinden çok az farklıdır. Fakat 100 Watt RF gücünden 125 Watt RF gücüne çıkıldığında, kristal tanecik boyutu büyük bir azalmaya gitmektedir. Bu bulgular, Radyo Frekans gücündeki değişimlerin kristalin yapısında değişimler yapabileceği ve bu faktörün yapısal parametreler için önemli olduğu sonuçlarına götürmektedir.

Farklı azot gazı uygulanarak n-Si üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD ölçüm sonucunda, $\sim 33^\circ$ de pik gözlenmiştir ve bu pik GaN malzemesinin hegzagonal kristal yapısına ve (100) yönelime sahip pikidir. (PDF kodu: 01-076-0703) Pik 33° kayma yaparak $\sim 32,5^\circ$ olmuştur. Bu kayma miktarı, büyüme esnasındaki kirliliklerden kaynaklanmıştır. Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). Si (100) alttaşının XRD piki de $\sim 69^\circ$ de tespit edildi ve literatürdeki bildirilen çalışmalar ile çok iyi uyumaktadır (Orak *et al.* 2017). Büyütülen bu GaN ince filmlerinin örgü sabitleri $a = 3,1900$ ve $c = 5,1890 \text{ Å}$ olarak belirlenmiştir. 4 sccm azot gazı uygulanarak büyütülen GaN ince filminin kristal tanecik boyutu 163,75 nm boyutu ile en büyük değeri alırken, diğer taraftan; 3 sccm azot gazı verildiğinde bu değer 157,37 nm değeri ile en küçük kristal tanecik boyutuna gelmektedir. 0 sccm ve 1 sccm azot gazı varlığında elde edilen kristal tanecik boyutları aralarında çok az bir farkla bir birine hemen hemen çok yakındır. Fakat 2, 3 ve 4 sccm azot gazında kristal tanecik boyutları birbirinden belirgin şekilde farklı olduğu gözükmektedir. n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin XRD sonuçlarından elde edilen bulgulara göre, farklı azot gazı akış değerlerinde büyütülen filmler farklı kristal yapıya sahip olmaktadır ve bu ise azot gazının GaN ince film yapısı üzerinde etkisi olduğunu kanıtlamaktadır.

Farklı azot gaz şartlarında büyütülen p-Si üzeri GaN ince filmlerin XRD'si $\sim 33^\circ$ de pik vermiştir. Bu bu pik yaygın olarak hegzagonal GaN (100) düzleminin karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Pik $32,58^\circ$ den kayma yaparak $\sim 32,4^\circ$ ve $\sim 32,6^\circ$ olmuştur. Bu kayma miktarı, büyüme esnasındaki kirliliklerden kaynaklandığı analiz edilmiştir. Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). Uygulanan 3 sccm azot ortamında p-Si üstüne büyütülen GaN ince filminin kristal tanecik boyutu 157,70 nm iken azot miktarı 4 sccm çıkarıldığında kristal tanecik boyutu 160,90 nm olarak yaklaşık 3 nm artmıştır. Azot miktarının değiştirilmesiyle ince filmin yapısında değişiklik yapılabileceği bulgusu elde edilmiştir. Ayrıca, p-Si üzerine GaN ince filmlerinin örgü sabitleri $a = 3,1900$ ve $c = 5,1890 \text{ \AA}$ olarak elde edilmiştir.

Cam alttaş üstüne büyütülen GaN ince filmlerinden alınan XRD ölçümünde pik gözlenmemiştir. Tümsek davranışı gösteren spektrum elde edilmiştir. Bu bulgu malzemenin kristal yapısında değil amorf yapıda büyüdüğünü göstermektedir. Bu tümseklerin şiddet ve genişlikleri az miktarda farklıdır. Bu ise farklı azot gazlarıyla, amorf yapıda büyüyen ince filmlerin yapısının çok az miktarda değiştiği anlamına gelmektedir.

ITO üzerine GaN ince filmler farklı azot gazında büyütülerek XRD ölçümleri analiz edilmiştir. 0, 1, 4 sccm azotta ITO üzerine büyütülen GaN filmlerinin yapısının amorf yapıda olduğu değerlendirilmiştir. Tümsekli davranışı gösteren spektrum bunu kanıtlamaktadır. Fakat 2 ve 3 sccm azotta, $\sim 33^\circ$ de pik tespit edildi ve bu pik hegzagonal kristal yapıya sahip GaN (002) düzleminin karakteristik ve yaygın olarak bilinen pikidir (PDF kodu: 01-074-9380). Bu pike ek olarak, $\sim 35^\circ$, 51° ve 61° de pikler gözlenmiş ve bunların sırasıyla ITO'nun (400), (440) ve (622) yönelimine ait pikler olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Kulkarni *et al.* 1999). Pikteki küçük kayma değerleri büyütmeden kaynaklanan kirliliklerdir denilebilmektedir. 2 sccm azot varlığında, ITO altlık üzerine büyütülen GaN ince filminin kristal tanecik boyutu 25,21 nm olarak hesaplanmıştır ve azot miktarı 3 sccm değerine çıkarıldığında kristal

tanecik boyutu 25,06 nm olarak azalmıştır. Bu ince filmlerin örgü parametreleri $a = 3,1430$ ve $c = 5,7300 \text{ Å}$ olarak bulunmuştur.

Farklı argon gazı değerlerinde n-Si üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden elde edilen XRD piki, hegzagonal GaN malzemesinin (100) kristal yönelimine sahip karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Literatürle kıyaslandığında gözlemlenen pikte $\sim 1^\circ$ kayma gözlenmiştir. Büyüme koşullarından kaynaklanan kirlilik ve safsızlıklar bu kaymanın sebebi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). 50 sccm argon gazı varlığında n-Si üstüne büyütülen GaN ince filminin kristal tanecik boyutu 191,63 nm iken, argon gazı 75 sccm değerine ulaştığında kristal tanecik boyutu 47,25 nm olarak oldukça azalmaktadır. Bu bilgiden yola çıkılırsa, argon gaz akış miktarının kontrolü yardımıyla kristalin yapısal parametrelerinin değiştirilmesinin mümkün olduğu ve argon gazı akış miktarının büyütmeye etkili bir etmen olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu filmlerin kristalinin örgü sabitleri $a = 3,1900$ ve $c = 5,1890 \text{ Å}$ olarak belirlenmiştir

Farklı argon gaz şartlarında büyütülen p-Si üzeri GaN ince filmlerin XRD'si $\sim 33^\circ$ de pik vermiştir. Bu pik hegzagonal GaN malzemesinin (100) kristal yönelimine sahip karakteristik pikidir (PDF kodu: 01-076-0703). Literatürle kıyaslandığında gözlemlenen pikte $\sim 0,4^\circ$ kayma gözlenmiştir. Büyüme koşullarından kaynaklanan kirlilik ve safsızlıklar bu kaymayı ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, $\sim 61,3^\circ$ 'de pik gözlenmiş ve bu pikin hegzagonal GaN'ın (103) yönelimine karşılık gelen pik olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Chung *et al.* 2012). p-Si üzerine büyütülen GaN ince filmlerin örgü sabitleri $a = 3,1900$ ve $c = 5,1890 \text{ Å}$ olarak belirlenmiştir. 50 sccm argon gazı uygulandığında, p-Si üzerine büyütülen GaN ince filminin kristal tanecik boyutu 81,75 nm olurken, argon gazı değeri 75 sccm değerinde kristal tanecik boyutu 70,66 nm değerine azalmaktadır. Azalma miktarı yaklaşık 11 nm olmaktadır. Argon gazı akış değerinin GaN ince filminin büyümesi üzerinde etki sahibi olduğu, yapısal parametrelerin değişiminden görülmektedir.

Farklı argon gaz varlığında cam alttaşı üzerine GaN ince filmlerin XRD ölçümünden pik gözlenmedi. Farklı genişlikte ve farklı şiddetlerde tümsekli davranış sergileyen XRD ölçümü gözlemlendi. Bu bulgudan hareketle, tüm filmlerin amorf büyümekle beraber farklı miktarda amorf fazlarına sahip oldukları sonucu çıkarılmaktadır. XDR ölçümü sonucundan, büyütmede uygulanan argon gazının amorf yapıyı etkilediği görülmüştür.

Farklı argon gazı değerlerinde ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden elde edilen XRD ölçümleri analiz edilmiştir. 25 ve 75 sccm argon gazı varlığında ITO üzerine büyütülen GaN filmlerinin XRD ölçümünden, pik gözlenmemiştir. Amorf yapı elde edilmiştir. Öte taraftan, 100 sccm argon gazı varlığında $\sim 30^\circ$ de pik tespit edilmiştir ve bu pik hegzagonal GaN malzemesinin (002) kristal yönelime sahip karakteristik pik olarak verilmektedir (PDF kodu: 01-074-9380). $\sim 0,6^\circ$ pik kaymasının büyütmeden kaynaklanan kirlilik ve safsızlıklar olduğu değerlendirilmektedir. Bu pike ek olarak, $\sim 35^\circ, 51^\circ$ ve 61° de pikler gözlenmiş ve bunların sırasıyla ITO'nun (400), (440) ve (622) yönelimine ait pikler olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Kulkarni *et al.* 1999). 100 sccm argon gazı uygulanmış ITO üzerine GaN ince filmin kristal tanecik boyutu 26,11 nm olarak ve örgü sabitleri $a = 3,1430$ ve $c = 5,7300 \text{ Å}$ olarak bulunmuştur. XRD ölçüm bulgularından temelde iki tane ana sonuç çıkmaktadır. Biri; uygulanan RF gücünün, azot, argon gaz akışının kontrol edilebilmesiyle kristalin temel yapısal parametresinden biri olan kristal tanecik boyutunun değiştirilebileceği ve malzemenin yapısal özelliklere etkilerinin sonuçları ortaya çıkmaktadır. Öteki ise; kullanılan alttaştan malzemenin yapısal özelliklerine önemli etkisinin olduğu sonucu çıkmaktadır.

Atomik kuvvet mikroskopu sonuçları malzemenin morfolojik ve yüzeysel özellikleri üzerine önemli bilgiler vermektedir. Aşağıda verilen Çizelge 5.2'de AFM ölçümünden elde edilen ortalama pürüzlülük değerleri uygulan büyüme koşuluna göre verilmektedir.

Çizelge 5.2. Uygulanan büyütme koşullarına göre GaN ince filmlerinin ortalama pürüzlülük değerleri

RF gücü (Watt)	Alt taş	Ortalama pürüzlülük (R _a)(nm)	Azot gazı (sccm)	Alt taş	Ortalama pürüzlülük (R _a)(nm)	Argon gazı (sccm)	Alt taş	Ortalama pürüzlülük (R _a)(nm)
50	Cam	0,94	0	n-Si	3,06	25	n-Si	0,85
	p-Si	0,79		p-Si	4,68		p-Si	1,85
	n-Si	0,80		ITO	2,09		ITO	1,86
	Safir	0,46		Cam	2,11		Cam	1,49
	ITO	0,94		n-Si	0,95		n-Si	1,05
75	Cam	1,36	1	p-Si	1,12	50	p-Si	2,77
	p-Si	1,05		ITO	1,15		Cam	0,59
	n-Si	1,16		Cam	2,24		n-Si	1,46
	Safir	0,20		n-Si	1,05		p-Si	1,10
	ITO	1,05		p-Si	4,18	75	ITO	0,97
100	Cam	0,75	2	ITO	3,44		Cam	4,23
	p-Si	0,74		Cam	1,33		n-Si	1,40
	n-Si	1,09		n-Si	0,81	100	p-Si	1,53
	Safir	0,78		p-Si	1,18		ITO	1,94
	ITO	0,96		ITO	2,98		Cam	1,69
125	Cam	0,77	3	Cam	0,86			
	p-Si	0,59		n-Si	0,94			
	n-Si	0,89		p-Si	0,95			
	Safir	0,09		ITO	1,42			
	ITO	1,00		Cam	1,80			
	Cam	0,77	4	n-Si	0,94			
	p-Si	0,59		p-Si	0,95			
	n-Si	0,89		ITO	1,42			
	Safir	0,09		Cam	1,80			
	ITO	1,00						

AFM sonuçları analiz edilerek, GaN ince filmleri için pürüzlülük değerleri açısından uygulanan büyütme şartları arasındaki en uygun değer ve en tercih edilmeyen sonuçlar bulunmuştur. Cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmleri için uyguladığımız büyütme koşulları altında mümkün olan en düşük ortalama pürüzlülüğe sahip ince film, 100 Watt RF gücü, 3 sccm azot gazı ve 50 sccm argon gazı şartlarında büyütülen filmde elde edilmiştir. Cam altlığının üzerine GaN ince filmlerinden en yüksek pürüzlülüğü sahip film ise 75 Watt RF gücü, 1 sccm azot gazı ve 75 sccm argon gazı büyütme koşullarında büyütülen ince filmde elde edilmiştir. p-tipi silisyum altlığı üzerine büyütülen GaN ince filmleri için en düşük pürüzlülüğe sahip ince film 125 Watt RF gücü, 4 sccm azot gazı ve 75 sccm argon gazı şartlarında büyümüştür. p-Si üzerine büyütülen en yüksek pürüzlülüğe sahip film ise 75 Watt RF gücü, 0 sccm azot gazı ve 50 sccm argon gazı şartlarında elde edilmiştir. n-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden en düşük pürüzlülük değerine sahip film, 50 Watt RF gücü, 3 sccm azot gazı ve 25 sccm argon gazı şartlarında üretilmiştir. Diğer yandan n-Si üzerine GaN ince filmlerinden en yüksek pürüzlülüğe sahip olan film, 75 Watt RF gücü, 0 sccm azot gazı ve 75 sccm argon gazı büyütme koşullarında büyütülmüştür. İndiyum Kalay Oksit (ITO) üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden en düşük pürüzlülüğe sahip film, 50 Watt RF gücü, 1 sccm azot gazı ve 75 sccm argon gazı büyütme şartlarında oluşturulmuştur. ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden en yüksek pürüzlülüğe sahip film, 75 Watt RF gücü, 2 sccm azot gazı ve 100 sccm argon gazı koşullarında büyütülmüştür. Literatürde çeşitli yöntemler kullanılarak büyütülen GaN'nın yüzey morfolojisi üzerine çalışmalar vardır. Zhang ve arkadaşları GaN piramit dizilerini, bir $K_2S_2O_8/KOH$ çözeltisi içinde seçimli foto-destekli kimyasal aşındırma yöntemiyle başarıyla sentezlediler. GaN piramitlerinin yüzey morfolojisinin zaman evriminin ayrıntılı analizi yapmışlardır. Oda sıcaklığında katodoluminesans ölçüm görüntülerinin, bu piramitlerin GaN kristalini çevreleyen çizgisel kusurlardan oluştuğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. (Zhang *et al.* 2016). Laifi ve arkadaşları MOCVD yöntemi ile (001) yönelimli GaAs alttaş üzerine GaN büyütmüşlerdir. Yüzeydeki kübik GaN kümelerinin çok verimli rekombinasyon bölgeleri olarak görev yaptığını belirtmişlerdir (Laifi *et al.* 2017). Kaufmann ve arkadaşları kinetiğin ve özellikle Ehrlich-Schwöbel bariyerinin (ESB) homoepitaksiyel GaN büyümesi ve yüzey morfolojisi üzerine etkilerini incelemişlerdir. ESB'nin varlığının, yüzey pürüzlülüğünü kuvvetle etkileyen çeşitli

kendi kendini bir araya getiren yüzey özelliklerine neden olabileceği sonucuna varmışlardır (Kaufmann *et al.* 2016a). Aggarwal ve arkadaşları homoepitaksiyel GaN filmlerinde aktif azotun yüzey özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Yüksek plazma gücünün (500 W) aktif azot radikallerinde bir artışa neden olduğunu ve düşük plazma gücüne (350,400 W) kıyasla azaltılmış çizgisel kusurlar ile yüksek kristal kaliteye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Bunun ise metalik galyumun yüzey üzerindeki varlığına ve düşük pürüzlülüğe işaret ettiğini belirtmişlerdir (Aggarwal *et al.* 2016). İnce filmler büyütülürken çok hassas özelliklere sahip olunması istenen aygıt üretiminde filmin pürüzlülüğü önem taşımaktadır. Çünkü filmin üzerine katmanlı büyütme yapılacaksa filmin pürüzlülük değeri büyütülecek katmanı da etkilemektedir veya omik kontak yapılacaksa kontağı etkilemektedir. Bu araştırmadan, belli sınırlı büyütme şartları arasından malzemenin pürüzlülük değerleri analizi yapılmıştır ve ileriki çalışmalara temel oluşturacaktır. Sonuçta özetle; hem filmin büyütme koşulları hem de kullanılan alttaş malzemesi, filmin yüzeysel parametrelerinden biri olan pürüzlülük değerinde önemli bir rol sahibidir.

SEM ölçümü de çalışılan malzeme ile alakalı önemli veriler vermektedir. Farklı RF gücünde cam üzerine büyütülen GaN ince filmler için şu sonuçlar çıkarılmaktadır. GaN ince filmlerinin kristal tanecik boyutları farklı RF gücü için yani 50, 75, 100, 125 Watt değerleri için farklı boyutta olduğu XRD ölçümünden elde edilen sonuçlarla kanıtlanmaktadır. 50 ve 75 ve 100 Watt RF gücü değerlerinde çizgisel kusurlar gözlenmezken fakat 125 Watt RF gücünde yer yer çizgisel kusurların var olduğu SEM resimlerinden gözükmektedir. Bu ise malzemenin o bölgelerdeki kırılma olasılığını arttırmakta olduğuna işaret etmektedir. 50 Watt RF gücündeki büyütmedeki GaN ince filminde, bazı bölgelerde topaklanma şeklinde büyümeler ortaya çıkmaktadır. Bütün uygulanan Radyo Frekans güç değerlerinde periyodik ve tanecikli yapı açıkça görülmektedir. Uygulanan 75 Watt RF gücündeki büyümelerde GaN ince filminin tanecikli yapısı diğerlerine kıyasla daha net olarak gözükmektedir. SEM görüntüleri çekilen alanlar için GaN ince filmlerinin büyümesinin hemen hemen homojen oldukları söylenebilmektedir. Sonuçta; RF gücünün değiştirilmesi ile GaN ince filmlerinin yapısal özelliklerinin değişebileceği SEM analizinden görülmektedir. n-tipi silisyum

altlığının üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM analizinden, 100 Watt RF gücü değerinde büyütülen GaN ince filmlerin görüntüsünün diğerlerine kıyasla daha net olduğu gözükmeaktadır. Ayrıca, bu RF değerindeki filmde tanecikli ve periyodik yapı açıkça gözükmeaktadır. 50 Watt RF değerinden daha yüksek 75 Watt ve 100 Watt değerine çıkıldığında ince filmin yüzey morfolojisi daha iyiye gittiği gözlemlenirken; 125 Watt değerine ulaşıldığında yapının bozulmaya başladığı SEM resimlerinden açıkça gözükmeaktadır. 50, 75 Watt RF güç değerlerinde topaklanma türü büyümelerin diğerlerine kıyasla daha çok olduğu gözlemlenmiştir. Safir alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden alınan SEM resimler analizinde, tanecikli ve periyodik yapı tespit edilmiştir. Ayrıca büyütmelede 50 Watt RF gücünden 125 Watt değerine yükseltildiğinde büyütülen GaN ince filmlerinin kristal tanecik boyutlarının azaldığı bulgusu XRD ölçümünden elde edilmiştir. Uygulanan 50 Watt RF gücü değerinde topaklanma tipi büyümeler 125 Watt değerine kıyasla daha çok ve belirgin olmaktadır. Uygulanan farklı azot gazı varlığında n-Si alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM resimleri birbirlerinden birçok açıdan farklı olarak ortaya çıkmaktadır. Kristal tanecik boyutu 1 ve 2 sccm değerlerinde 0 sccm değerine göre çok farklıdır. 0 sccm azot değerinde periyodik tanecikli bir yapı gözükürken; 1 sccm ve 2 sccm azot değerinde yüzey bozulmuştur. Bölge bölge kırılmalar olmuş ve adacıklar şeklinde birbirlerinden ayrılmıştır. Bu yapıdaki malzemenin çizgisel kusurların olduğu yerlerde, kırılmalığa olan direncin azaldığı söylenebilmektedir. Tanecikli yapı açısından en net SEM görüntüsü 0 sccm ve 3 sccm azot gazı varlığında elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, SEM çekilen bölgelerin hemen hemen homojen olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, farklı azot gazı değerlerinin, ince filmin yüzeyinin morfolojik özelliklerine etkisinin oldukça belirgin olduğu tespit edilmiştir. SEM sonuçları, cam üzerine GaN ince filmlerinin farklı morfolojik yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir. Yüzeysel morfolojik yapının, 0 sccm den 4 sccm azot gazı akış değerine yükseltildikçe az miktarda iyileştiği gözlemlenmektedir. En son 4 sccm azot gazı değerinde bazı bölgelerde topaklanma türünden büyümelerin olduğu gözlenmekle beraber; fazla çizgisel kusurlar göze çarpmaktadır. Aynı şekilde 1, 2, 3 sccm azot değerlerindeki filmlerde de çizgisel kusurlar mevcuttur. Bu kusurlar yapının kırılmalığını arttıran etmenlerdir. Özellikle 2 sccm azot gazı değerinde homojen yapı çok çok az olduğu gözükmeaktadır. Elde edilen morfolojik yapı, XRD ölçüm analizleriyle tam bir uyum içindedir. Farklı argon gazı

değerlerinde büyütülen p-tipi silisyum üzerine GaN ince filmlerinin SEM ölçümleri değerlendirildiğinde, uygulanan 50 sccm argon gazında GaN ince film yapısı en iyi tanecikli ve periyodik yapının olduğu, diğer argon gazı akış değerlerinin resimleri ile kıyaslandığında görülebilmektedir. Diğer yandan, uygulanan argon değerleri arasından 100 sccm argon gazı değerinde nispeten ince filmin yüzeyinin en kötü morfolojik yapıya sahip olduğu ve çizgisel ve diğer kusurların olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı argon gazı değerlerinde GaN ince filmin kristal tanecik boyutlarının değiştiği XRD ölçümünden anlaşılmaktadır. Elde edilen filmin hemen hemen homojen yapıda olduğu ve filmin yapısında yer yer topaklanma şeklinde büyümeler gözükmemektedir. n-tipi silisyum üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM sonuçları analizinden şu bulgulara rastlanmaktadır. Elde edilen filmlerin yüzey morfolojileri birbirinden farklıdır. 50 sccm ve 75 sccm argon gazı varlığında GaN ince filmleri tanecikli ve periyodik bir yapı göstermektedir. Bu sonuçlar XRD ölçüm sonuçları tarafından da desteklenmektedir. Ayrıca 25 sccm argon değerindeki SEM resminde çizgisel kusurların var olduğu görülmektedir. Bu kusurlar filmin kırılma direncini azaltmaktadır. 100 sccm argon varlığında büyütülen GaN ince filminde de dikkat çeken olgu çokça topaklanma davranışı gösteren büyümelerin olmasıdır. Bu bulgulardan, uygulanan argon gazı değerinin filmin morfolojik yapısını değiştirdiği ve bu değer kontrolüyle malzemenin yapısal özelliklerinin değiştirilebileceği sonuçları çıkarılabilmektedir. ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin SEM ölçümü değerlendirilmesinden, sisteme 25 sccm ve 75 sccm argon gazı verilerek büyütülen ince filmlerinin yüzey davranışı çubuksu şekilde büyümelerden oluşmaktadır sonucu çıkarılabilmektedir. Filmin yüzeyi için, hemen hemen homojen yapıda oldukları söylenebilmektedir. Ancak, 100 sccm argon gazı verilerek büyütülen ince film, bu yapılardan farklı olarak topaklı bölgelerin var olduğu büyüme davranışı göstermektedir. Cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerin SEM resimlerinden, uygulanan 25 sccm argon gazında büyütülen GaN ince filminin yüzeyinde belirgin çizgisel kusurlar gözükmemektedir. Bu kusurlar malzemeyi kırılma hale getirmektedir. 50, 75 ve 100 sccm argon gazı değerlerinde ise 25 sccm değerine kıyasla daha iyi yüzey yapısı gözlenmiştir. Elde edilen film yüzey yapısının en net yüzey görünümü 100 sccm argon gazı ortamında görülmektedir. Filmin yüzey morfolojisi, 25 sccm argon gazı değerinden 100 sccm değerine yükseltildiğinde daha iyileşmektedir. Literatürdeki çalışmalar

incelendiğinde, çeşitli tekniklerle büyütülen GaN'ın morfolojik özelliklerinin araştırıldığını görmekteyiz. Halidou ve arkadaşları safir (0001) üzerine ev yapımı dikey reaktör metal organik buhar faz epitaksi (MOVPE) yöntemi kullanarak GaN büyütmüşlerdir. Elde edilen numuneleri doğal yeri dışında (ex-situ) taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Numunelerin morfolojik özelliklerini tüm büyüme aşamalarında araştırmışlardır. SEM görüntülerinin, birleşim sürecini açıkça gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, tamamen birleşmiş bir tabakadan pürüzsüz bir yüzey elde edilebileceğini belirtmişlerdir (Halidou *et al.* 2006a). Matoussi ve arkadaşları metal organik buhar faz epitaksi (MOVPE) yöntemi ile 800 °C'de gözenekli silisyum üzerine büyütülmüş olan GaN'nın morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. SEM resimlerinden, farklı şekil ve ebatlara sahip olan yönsüz GaN tanecikleri tarafından kaba yüzey dokusunun ortaya çıkmakta olduğu sonucuna varmışlardır (Matoussi *et al.* 2008b). Shinoda ve Mutsukura RF magnetron saçtırma yöntemi ile GaN'ı safir üzerine başarılı şekilde büyütmüşlerdir. Malzemenin yüzey morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Galyumca zengin büyüyen numunenin yüzey morfolojisinin son derece pürüzsüz olduğu ve bu numunenin ortalama pürüzlülük değerinin 1,0 nm olduğunu ölçmüşlerdir (Shinoda and Mutsukura 2016).

Hegzagonal kristal yapıya sahip GaN kararlı durumdadır ve C_{6v}^4 uzay grubuna aittir. Grup teorisine göre, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN altı Raman aktif moduna sahiptir, bunlar; $1A_1 (TO) + 1A_1 (LO) + 1E_1 (TO) + 1E_1 (LO) + 2E_2$ olarak verilebilmektedir. E_2 optik fonon modu, $E_2(\text{high})$ ve $E_2(\text{low})$ olarak iki tane optik moddan oluşmaktadır. Ayrıca, $E_1 (TO)$, hegzagonal GaN malzemesinin enine optik modu olarak tanımlanabilmektedir. Araştırmada büyütülen ince filmlerin Raman spektrumu sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.3'de verilmektedir.

Çizelge 5.3. Uygulanan büyütme koşuluna göre elde edilen GaN ince filmlerinin bazı optik parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu	Kullanılan alttaş	Raman kayması piki (cm^{-1})	Optik fonon modu
50 Watt RF gücü	ITO	568,81	E_2 (high)
75 Watt RF gücü	ITO	563,91	E_2 (high)
100 Watt RF gücü	ITO	572,93	E_2 (high)
125 Watt RF gücü	ITO	564,17	E_2 (high)
50 Watt RF gücü	Cam	564,03	E_2 (high)
75 Watt RF gücü	Cam	559,57	E_2 (high)
100 Watt RF gücü	Cam	564,03	E_2 (high)
125 Watt RF gücü	Cam	559,63	E_2 (high)
50 Watt RF gücü	Safir	584,87	E_2 (high)
75 Watt RF gücü	Safir	584,53	E_2 (high)
100 Watt RF gücü	Safir	584,87	E_2 (high)
125 Watt RF gücü	Safir	584,53	E_2 (high)
2 sccm Azot gazı	ITO	563,14	E_1 (TO)
3 sccm Azot gazı	ITO	560,96	E_1 (TO)
25 sccm Argon gazı	ITO	566,88	E_2 (high)
75 sccm Argon gazı	ITO	562,04	E_2 (high)
100 sccm Argon gazı	ITO	566,04	E_2 (high)

ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinden 2 sccm ve 3 sccm azot gazı uygulanarak yapılan büyütmeye ait filmlerin Raman ölçümünden karakteristik E_1 (TO) enine optik modunun piki tespit edilmiştir. Bu pikler, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN malzemesinin E_1 (TO) optik fonon modlarına aittir ve literatürdeki çalışmalar da bunu desteklemektedir. (Davydov *et al.* 1998) Bunun dışında uygulanan diğer büyütme koşullarında, E_2 (high) moduna ait pikler gözlenmiştir. Bu pikler, hegzagonal kristal yapıya sahip GaN ince filmin E_2 (high) (Harima, 2002) optik fonon modunun titreşimine karşılık gelen karakteristik piklerdir ve bildirilen çalışmalar ile

hemen hemen aynı değerlere sahiptirler. (Chen *et al.* 2001) Farklı RF güçlerinde farklı şiddetlerde Raman kayması pikleri elde edilmiştir. ITO alttaş üzerine GaN ince filmleri için en yüksek Raman şiddeti 50 Watt RF gücü için elde edilirken, en düşük Raman şiddeti 100 Watt RF gücü için gözlemlendi. Buradan RF güç değerinin ITO alttaş üzerine büyütülen GaN ince filminin optik fonon moduna etkisi olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Cam altlık için büyütülen GaN ince filmler için bu değerler şu şekilde olmaktadır. En yüksek Raman şiddeti 50 Watt RF gücü için tespit edilirken; en düşük Raman şiddeti 125 Watt RF gücü tespit edilmiştir. Safir altlığının üzerine GaN ince filmler için 75 Watt ve 125 Watt RF gücü için Raman şiddetleri, 50 Watt ve 100 Watt RF gücü için Raman şiddetlerinden daha yüksektir; bu ise, RF gücünün GaN ince filminin optik fonon modları üzerindeki etkisini göstermektedir. Sırasıyla 25, 75 ve 100 sccm argon gazında büyütülen GaN ince filmleri için gözlemlenen Raman kayması pikleri $566,88 \text{ cm}^{-1}$, $562,04 \text{ cm}^{-1}$ $566,04 \text{ cm}^{-1}$ olmaktadır. Bu pikler hegzagonal kristal yapıya sahip GaN malzemesinin E_2 (high) optik fonon titreşim moduna karşılık gelmekte ve literatürdeki araştırmalarla desteklenmektedir (Chen *et al.* 2001). Raman spektrumunda değişen argon değerlerine karşılık değişen Raman şiddetleri göze çarpmaktadır. Bu argon gazının optik fonon modları üzerine etkisinin olduğunu göstermektedir. GaN ince filmlerinin büyütmesinde uygulanan argon gazı miktarı optik fonon modları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve argon gazı miktarının değiştirilmesiyle filmin optik özelliklerinin değişebileceği Raman ölçümleriyle doğrulanmıştır. Özetle; büyütme koşullarının yani farklı RF gücü, farklı azot gazı ve farklı argon gazı değerlerinin büyütülen GaN ince filmlerinin optik fonon modları üzerinde önemli bir rolü mevcuttur ve Raman ölçümü analizleri bunu desteklemektedir. Raman ölçümlerinden elde edilen Raman kayma piklerinin değişme miktarından formül (4.2) kullanılarak GaN ince filmlerindeki kalıcı gerilim (residual stress) değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.4’de çeşitli alttaş üzerine ve farklı büyütme koşullarında üretilen GaN ince filmlerin kalıcı gerilim değerleri ve gerilim şekli verilmektedir.

Çizelge 5.4. Uygulanan farklı büyütme koşullarında çeşitli alttaşlar üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin bazı mekanik parametreleri

Uygulanan büyütme koşulu	Kullanılan alttaş	Kalıcı gerilim (GPa)	Gerilim şekli
50 Watt RF gücü	Safir	4,109	Basınç Gerilimi
75 Watt RF gücü	Safir	4,030	Basınç Gerilimi
100 Watt RF gücü	Safir	4,109	Basınç Gerilimi
125 Watt RF gücü	Safir	4,030	Basınç Gerilimi
50 Watt RF gücü	Cam	0,737	Çekme Gerilimi
75 Watt RF gücü	Cam	1,774	Çekme Gerilimi
100 Watt RF gücü	Cam	0,737	Çekme Gerilimi
125 Watt RF gücü	Cam	1,760	Çekme Gerilimi
50 Watt RF gücü	ITO	0,377	Basınç Gerilimi
75 Watt RF gücü	ITO	0,765	Çekme Gerilimi
100 Watt RF gücü	ITO	1,332	Basınç Gerilimi
125 Watt RF gücü	ITO	0,704	Çekme Gerilimi
25 sccm Argon gazı	ITO	0,074	Çekme Gerilimi
75 sccm Argon gazı	ITO	1,200	Çekme Gerilimi
100 sccm Argon gazı	ITO	0,269	Çekme Gerilimi

Elde edilen bazı GaN ince filmlerde, Raman kayması pikinin mavi bölgeye kaydığı gözlenmiştir ve bu ince filmlerin mekanik yapısında basınç gerilimi bulgusuna rastlanmıştır. Öte yandan; diğer bazı filmlerde ise Raman kayma pikinin kırmızı bölgeye kaydığı gözlenmiştir ve bu ince filmlerin mekanik yapısında çekme geriliminin mevcut olduğu değerlendirilmiştir.

Kullanılan safir, c düzleminde (0001) yönelimine sahip hegzagonal yapıdadır ve örgü sabitleri $a = 4,758 \text{ Å}$, $c = 12,992 \text{ Å}$ olan tek kristal yapıya sahiptir. Bunun üzerine büyütülen GaN malzemesinin örgü sabitleri XRD ölçümünden $a = 3,0950 \text{ Å}$, $c = 5,0000 \text{ Å}$ olarak elde edilmiştir. Bu durumda GaN ince filmi büyürken alttaşına göre küçük örgü sabitine sahip olduğundan, altındaki alttaşın örgü parametresini kendi boyutuna doğru sıkıştıracaktır. Bu ise basınç gerilimi doğmasına neden olacaktır. Raman ölçüm sonuçlarından farklı RF gücü altında safir alttaş üzerine GaN ince filmlerindeki kalıcı gerilim şekli basınç gerilimi olarak (4.2) formülü ile hesaplanmış

ve Çizelge 5.4’de verilmiştir. Bu ince filmlerde basınç gerilimi oluşmasını sağlayan bir diğer faktör ise termal genleşme katsayıları arasındaki farktır. GaN ve safir için termal genleşme katsayıları $\alpha_{GaN} = 5,6 \times 10^{-6} K^{-1}$, $\alpha_{safir} = 9,0 \times 10^{-6} K^{-1}$ olmaktadır. İnce filmler 300 °C alttaş sıcaklığında büyütüldü. Bu aşamada termal genleşme katsayıları oranında genleşmeye uğramakta ve bu sabitin farklı olmasından, filmler soğumaya geçtiğinde ince filmlerde kalıcı gerilim ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, bu kalıcı gerilimler iki tür gerilimden ortaya çıkmakta olduğu değerlendirilmiştir. Bunların iç gerilme (örgü uyumsuzluğu sebebiyle) ve termal gerilimden (termal genleşme katsayı farkı) oluştuğu değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerimiz literatürdeki çalışmalara baktığımızda tam olarak desteklendiğini görmekteyiz (Spaepen 2000; Chen *et al.* 2003; Köstenbauer *et al.* 2008). Farklı RF güçlerinde cam üzerine büyütülen GaN ince filmlerde Raman ölçümünden elde edilen hesaplamada çekme gerilimi oluştuğu hesaplandı. Bunun nedenlerini irdelediğimizde şu analizler yapılabilir. Öncelikle cam amorf bir malzemedir ve dolayısıyla örgü parametresi yoktur. GaN ince filmi cam üzerine büyütürken, alttaş sıcaklığından dolayı camın yayvanlaşma eğilimi gösterdiğini düşünürsek, üsteki filmi dışa doğru çekme eğilimi oluşacaktır denilebilir. Bu durumda bu etkiden dolayı çekme gerilimi oluşmasını beklemekteyiz. Diğer nedenlere baktığımızda, büyüme aşamasından kaynaklanan gerilim, tane sınırlarının birleşmesinden dolayı gerilim ve safsızlıklar etkisinden özellikle oksijen (sistemde daima bir miktar olmaktadır) kaynaklı gerilim, sebepler olarak değerlendirilmektedir. Çeşitli RF güçlerinde ITO üzerine büyütülen GaN ince filmlerin Raman ölçümünden elde edilen verilerle kalıcı gerilim hesaplanmasında, 50 ve 100 Watt RF güç değerlerinde basınç gerilimi tespit edilirken, 75 ve 125 Watt RF güç değerlerinde ise çekme gerilimi tespit edilmiştir. Burada bu gerilimlere neden olan faktörler olarak birçok neden sıralanabilir: büyüme koşullarından kaynaklı gerilim, safsızlıklardan kaynaklı gerilimi (özellikle oksijen safsızlığı) olarak söylenebilir. 75 ve 125 Watt RF güçlerinde çekme gerilimine neden olan sebeplerin baskın olduğu ve 50 ve 100 Watt RF güçlerinde ise basınç gerilimine sebep olan faktörlerin baskın olduğu söylenebilir. Fakat kesin ve net analiz için bu tezin konusunu aşan başka çalışmalarda gerilim modelleri adres olarak gösterilebilmektedir (Thornton and Hoffman 1989; Barghout and Chaudhuri 2004; Öztürk *et al.* 2011). Gerilim şekline bakılmaksızın en büyük kalıcı

gerilime sahip olan GaN ince filmi, 50 Watt ve 100 Watt RF gücü koşullarında ve safir altlığının üzerine büyütülen filmde bulunmuştur. Diğer taraftan, en küçük kalıcı gerilime sahip olan GaN ince filmin 25 sccm Argon gazı koşullarında ve ITO alt taşı üzerine büyütülen filmde olduğu gözlenmiştir. Safir alttaşı üzerine çeşitli RF güçlerinde büyütülen GaN ince filmlerin kalıcı gerilim değerleri literatürdeki çalışmaların verdiği kalıcı gerilim değerlerinden yüksek bulunmuştur (Feiler *et al.* 1997; Liu *et al.* 2010; Guillén-Cervantes *et al.* 2011; Christian *et al.* 2013; Wang *et al.* 2014; Park *et al.* 2015b;) Cam altlığının üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen GaN ince filmlerin kalıcı gerilim değerleri literatürdeki araştırmada elde edilen verilere yakın değerler bulunmuştur (Zou *et al.* 2008; Zhang *et al.* 2010). ITO alttaş üzerine çeşitli argon gazı koşullarında büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim parametresi değerleri rapor edilen çalışmalara yakın değerler bulunmuştur (Adurodija *et al.* 2001; Barchuk *et al.* 2014). ITO alttaş üzerine çeşitli RF güç koşullarında büyütülen GaN ince filmlerinin kalıcı gerilim parametresi değerlerine literatürde yakın değerler rapor edilmiştir (Nootz *et al.* 2002). Özetle; büyütülen GaN ince filmlerin mekanik özelliklerinden biri olan kalıcı gerilim parametresinin karakterize edilmesi ve analizinin yapılması aygıt uygulamaları için şu açılardan önem arz etmektedir. Çekme gerilimi aygıtta çatlama, tabaka kullanılabilir kalınlığının sınırlanması (Mizushima *et al.* 2006) gibi sorunlara yol açarken; basınç gerilim ise burkulma, katmanlara ayrılma (Moon *et al.* 2002) gibi sorunlarına yol açmaktadır ve bu sorunlar aygıtta kısa devre oluşumuna (Chason *et al.* 2013) sebep olmaktadır. Uygulanan büyütme koşullarının malzemenin kalıcı gerilim değerleri üzerinde etkili bir parametre olduğu elde edilen analizler sonucu ortaya çıkmaktadır.

Büyütülen ince filmlerin optik özelliklerinin araştırmasında, soğurma ve yansıma ölçümleri de alınmış ve analiz edilmiştir. Çizelge 5.5’de farklı RF güçlerinde cam ve safir altlığının üzerine büyütülen filmlerinin optik bant aralığı enerjileri aşağıda verilmektedir.

Çizelge 5.5. Farklı RF güçlerinde cam ve safir altlığının üzerine büyütülen filmlerinin optik bant aralığı enerjileri

Uygulanan RF gücü (Watt)	Kullanılan alttaş	Optik bant aralığı enerjisi (eV)
50	Safir	3,71
75	Safir	3,76
100	Safir	3,73
125	Safir	3,73
50	Cam	3,27
75	Cam	3,48
125	Cam	3,37

Safir alttaş üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen GaN ince filmleri için optik bant aralığı enerjileri birbirine çok yakındır. 75 Watt RF gücü için en yüksek optik bant aralığı enerjisi elde edilirken, 50 Watt RF gücü koşullarında büyütülen filmin optik bant aralığı enerjisi en düşük değer olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, daha önce literatürdeki çalışmalardan daha büyüktür (Gueddim *et al.* 2015; Said *et al.* 2016). Fakat cam alttaş üzerine büyütülen GaN ince filmlerinin farklı RF güçlerindeki optik bant aralığı enerjileri birbirinden farklı çıkmaktadır. En düşük optik bant aralığı enerjisi 50 Watt RF gücü uygulanan filmde elde edilirken; öte yandan; 75 Watt RF gücü değerinde en yüksek optik bant aralığı enerjisi elde edilmiştir. GaN ince filminin cam alttaş üzerindeki optik bant aralığı enerjisi için en iyi değeri, 125 Watt RF gücüne karşılık gelen 3,37 eV olarak bulunmuştur; bu değer, daha önceki literatür çalışmalarıyla desteklenmektedir (Yang *et al.* 2015). Uygulanan farklı RF gücü değerleri optik bant aralığını değiştirmiştir. Sonuç olarak, RF güç değeri, opto elektronik cihazların tasarımı için çok önemli olan GaN ince filminin optik bant aralığı değerlerini değiştirmiştir. Bunun yanı sıra, GaN ince filminin optik bant aralığı değerinde, kullanılan altlık seçiminin rol oynamakta olduğu, safir ve cam altlık E_g değerleri karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır. Malzemenin optik özelliklerini araştırmak için yansıma ölçümleri de alınarak analiz edilmiştir. Farklı azot gazlar şartlarında n-tipi silisyum üstüne büyütülen GaN ince filmlerinin yansıma ölçümlerinin analizinden; görünür bölgede üretilen filmlerde en fazla optik yansımanın 1 sccm azot gazı akışında büyütülen filmde olduğu sonucu çıkarılmıştır. Diğer yandan; filmin en az optik yansıma

değeri ise 0 sccm azot gazı akışında büyütülen filmde oluşmaktadır. Farklı azot gazlarında ince filmin optik yansımaya miktarları büyükten küçüğe doğru şu şekilde sıralanabilmektedir: 1, 2, 4, 3, 0 sccm azot gazı akışı şeklindedir. Ultraviyole bölgede ise ince filmin optik yansımaya değerleri büyükten küçüğe doğru 2, 1, 4, 3, 0 sccm azot gaz akışı şeklinde verilmektedir. Optik yansımaya grafiği farklı azot gazı akış değerleri için oldukça farklı davranışlar sergilemektedir. Buradan uygulanan farklı azot gazı akış değerlerinin üretilen filmin optik yansımalarını etkilediği denilebilmektedir. Farklı azot gaz akışında p-tipi silisyum üstüne büyütülen GaN ince filmlerinin yansımaya ölçümlerinin analizinden ise; uygulanan 1 sccm azot gazı akışında GaN ince filmin görünür bölgedeki optik yansımaya en büyük değerde olduğu sonucu çıkmıştır. 0 sccm azot gazı akışında p-tipi silisyum üzerine GaN ince filmin görünür bölgedeki optik yansımaya ise en küçük değerdedir. Görünür bölgedeki filmin yansımaya değerleri büyükten küçüğe sırasıyla: 1, 2, 4, 3 ve 0 sccm azot akışı şeklinde olmaktadır. Ultraviyole bölgede filmin en büyük optik yansımaya 2 sccm azot gazı akışındadır. Filmin ultraviyole bölgedeki en küçük optik yansımaya değeri 4 sccm azot gaz akış değerinde oluşmaktadır. Ultraviyole bölgedeki filmin yansımaya değerleri büyükten küçüğe sırasıyla: 2, 1, 3, 0 ve 4 sccm azot gaz akışı şeklinde olmaktadır. Sonuç olarak; malzemenin optik yansımaya, filmin büyütmesinde uygulanan azot gazı değerine ve kullanılan altığa bağlıdır ve bu yansımaya ölçümleriyle ispatlanmaktadır. Literatürde GaN malzemesinin yansımaya ölçümü çalışmaları mevcuttur. Kornitzer ve arkadaşları MOCVD yöntemi ile büyütülmüş GaN'ın yüksek çözünürlüklü fotoluminesans ve yansımaya spektrumunu aldılar. Yansımaya ölçüm analizinden, epitaksiyal tabakanın kalitesinin, zayıf sönümlenmiş eksitonik durum geçişlerinin gözlemine olanak sağladığını buldular. (Kornitzer *et al.* 1999). Diğer bir çalışmada ise, Dingle ve arkadaşları epitaksiyel GaN'ın geniş bir aralıkta düşük sıcaklık yansımaya ölçümlerini aldılar. Aldıkları ölçümlerden GaN malzemesinin direk bant aralığına sahip bir yarıiletken olduğunu ispatlamışlardır. GaN'nın 2 °K'de en düşük eksiton durumlara karşılık gelen değeri $3.474 \pm 0.002 \text{ eV}$ olarak ölçtüler (Dingle *et al.* 1971). Kosicki ve arkadaşları safir üzerine büyütülmüş olan GaN'ı deneysel olarak incelemişlerdir. GaN malzemesinin yansımaya değerlerini rapor eden ilk araştırmacılarıdır. Ölçtükleri bu yansımaya değerleri 6,8 eV, 9,5 eV ve 10,7 eV dir (Kosicki *et al.* 1970).

KAYNAKLAR

- A. Alexewicz, M. A., D. Maier , H. Behmenburg , C. Giesen , M. Heuken , D. Pogany , E. Kohn, G. Strasser., 2013. Current collapse reduction in InAlGaN/GaN high electron mobility transistors by surface treatment of thermally stable ultrathin in situ SiN passivation. *Solid-State Electronics*, 207–211.
- A. Polian, M. G. a. I. G., 1996. Elastic constants of gallium nitride. *Journal of Applied Physics*, 3343.
- Adurodija, F. O., Izumi, H., Ishihara, T., Yoshioka, H. and Motoyama, M. 2001. Effects of stress on the structure of indium-tin-oxide thin films grown by pulsed laser deposition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 12, 57-61.
- Aggarwal, N., Krishna, S., Mishra, M., Maurya, K. and Gupta, G. 2016. Influence of active nitrogen species on surface and optical properties of epitaxial GaN films. *Journal of Alloys and Compounds*, 661, 461-465.
- Azadeh Ansari, C.-Y. L., Chien-Chung Lin , Hao-Chung Kuo , Pei-Cheng Ku and Mina Rais-Zadeh (2015) GaN Micromechanical Resonators with Meshed Metal Bottom Electrode. *Materials*, 1204-1212.
- Barchuk, M., Röder, C., Shashev, Y., Lukin, G., Motylenko, M., Kortus, J., Pätzold, O. and Rafaja, D. 2014. Correlation between the residual stress and the density of threading dislocations in GaN layers grown by hydride vapor phase epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 386, 1-8.
- Barghout, K. and Chaudhuri, J. 2004. Calculation of residual thermal stress in GaN epitaxial layers grown on technologically important substrates. *Journal of Materials Science*, 39, 5817-5823.
- C.H. Chiu, Y. W. L., M.T.Tsai , B.C.Lin , Z.Y.Li , P.M.Tu , S.C.Huang , EarlHsu , W.Y.Uen , W.I.Lee , H.C.Kuo 2015. Improved output power of GaN-based ultraviolet light-emitting diodes with sputtered AlN nucleation layer. *Journal of Crystal Growth*, 258–262.
- Chabert, E. D.-P. a. P. 2010. Low energy Ar⁺ bombardment of GaN surfaces: A statistical study of ion. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1263.
- Chan-Jeong Park, S.-G. L., Young-Jo Ko, and K. J. Chang 1999. Theoretical study of the structural phase transformation of BeO under pressure. *Physical Review B*, 59.
- Chason, E., Jadhav, N., Pei, F., Buchovecky, E. and Bower, A. 2013. Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms. *Progress in Surface Science*, 88, 103-131.
- Chen, K.-S., Zhang, X. and Lin, S.-Y. 2003. Intrinsic stress generation and relaxation of plasma-enhanced chemical vapor deposited oxide during deposition and subsequent thermal cycling. *Thin Solid Films*, 434, 190-202.
- Chen, P., Zhang, R., Zhao, Z., Xi, D., Shen, B., Chen, Z., Zhou, Y., Xie, S., Lu, W. and Zheng, Y. 2001. Growth of high quality GaN layers with AlN buffer on Si (111) substrates. *Journal of Crystal Growth*, 225, 150-154.
- Chenlong Chen, H., ChiamingLu, MitchM.C.Chou 2014. Epitaxy of triangular GaN nanoislands on (010) β -LiGaO₂ substrate. *Materials Letters*, 101-103.

- Ching, Y.-N. X. a. W. Y. 1993. Electronic, optical, and structural properties of some wurtzite crystals. *Physical Review B*, 4335.
- Cho, J. H. K. a. Y. K. 2014. Influence of N₂ Gas Pressure on the Structural Properties of Sputter-deposited GaN Thin Films. *Journal of the Korean Physical Society*, 994-998.
- Chung, K., In Park, S., Baek, H., Chung, J.-S. and Yi, G.-C. 2012. High-quality GaN films grown on chemical vapor-deposited graphene films. *Npg Asia Materials*, 4-24.
- Christian, R., Frank, L., Frank, H., Gunnar, L., Martin, A., Cameliu, H. and Jens, K. 2013. Raman spectroscopic characterization of epitaxially grown GaN on sapphire. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46, 285302.
- D Zhu, D. J. W. a. C. J. H. 2013. Prospects of III-nitride optoelectronics grown on Si. *Reports on Progress in Physics*, 76.
- D. C. Reynolds, D. C. L., B. Jogai, C. W. Litton, G. Cantwell, and W. C. Harsch 1999. Valence-band ordering in ZnO. *Physical Review B*, 2340.
- D.M. Roessler, W. C. W. 1969. Electronic spectrum of crystalline beryllium oxide. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 157-167.
- D.S. Rawala, H. A., V.R. Agarwala, Seema Vinayaka, Ashok Kapoora, B.K. Sehgal, R. Muralidharana, Dipankar Sahab, H.K. Malik 2012. GaN etch rate and surface roughness evolution in Cl₂/Ar based inductively coupled plasma etching. *Thin Solid Films*, 7212–7218.
- David Poppitz, A. L., Jürgen W. Gerlach, Jörg Lenzner, Marius Grundmann, Bernd Rauschenbach, 2015. An aberration-corrected STEM study of structural defects in epitaxial GaN thin films grown by ion beam assisted MBE. *Micron*, 1–8.
- Davydov, V. Y., Kitaev, Y. E., Goncharuk, I. N., Smirnov, A. N., Graul, J., Semchinova, O., Uffmann, D., Smirnov, M. B., Mirgorodsky, A. P. and Evarestov, R. A. 1998. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN. *Physical Review B*, 58, 12899-12907.
- Dingle, R., Sell, D. D., Stokowski, S. E. and Ilegems, M. 1971. Absorption, Reflectance, and Luminescence of GaN Epitaxial Layers. *Physical Review B*, 4, 1211-1218.
- Doerner, M. F. and Nix, W. D. 1988. Stresses and deformation processes in thin films on substrates. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 14, 225-268.
- Dong-Hau Kuo, C.-C. L., Thi Tran Anh Tuan. 2015a. Effects of Mg Doping on the Performance of InGa_N Films Made by Reactive Sputtering. *Journal of Electronic Materials*, 210-216.
- Dong-Hau Kuo, T. T. A. T., Cheng-Che Li, Wei-Chun Yen., 2015b. Electrical and structural properties of Mg-doped In_xGa_{1-x}N ($x \leq 0.1$) and p-InGa_N/n-GaN junction diode made all by RF reactive sputtering. *Materials Science and Engineering B*, 13-19.
- Duffy, G. D. O. C. J. a. M. T. 1973. Acoustic surface wave properties of epitaxially grown aluminum nitride and gallium nitride on sapphire. *Applied Physics Letters* 55.
- Editors: Yao, T., Hong, Soon-Ku 2009. *Oxide and Nitride Semiconductors Processing, Properties, and Applications*.

- Fabio Bernardini, V. F., and David Vanderbilt.,1997. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Physical Review B*, 56.
- Feiler, D., Williams, R. S., Talin, A. A., Yoon, H. and Goorsky, M. S. 1997. Pulsed laser deposition of epitaxial AlN, GaN, and InN thin films on sapphire(0001). *Journal of Crystal Growth*, 171, 12-20.
- Finger, R. M. H. a. L. W. 1986. High-Pressure and High-Temperature Crystal Chemistry of Beryllium Oxide. American Institute of Physics, 3728-3733.
- Fong, C., Ng, S., Yam, F., HASSAN, H. and Hassan, Z. 2014. Growth of gallium nitride thin film with the aid of polymethyl methacrylate. *Sains Malaysiana*, 43, 1943-1949.
- Fröhlich, J. W. a. D. 1997. Two-photon and three-photon spectroscopy of ZnO under uniaxial stress. *Physical Review B*, 13087.
- GD Magnuson, C. C. 1963. Sputtering Yields of Single Crystals Bombarded by 1 to 10keV Ar⁺ Ions. *Journal of Applied Physics*, 3267.
- Gueddim, A., Eloud, T., Messikine, N. and Bouarissa, N. 2015. Energy levels and optical properties of GaN spherical quantum dots. *Superlattices and Microstructures*, 77, 124-133.
- Guillén-Cervantes, A., Rivera-Álvarez, Z., López-López, M., Ponce-Pedraza, A., Guarneros, C. and Sánchez-Reséndiz, V. M. 2011. Structural and optical properties of GaN thin films grown on Al₂O₃ substrates by MOCVD at different reactor pressures. *Applied Surface Science*, 258, 1267-1271.
- H. Karzel, W. P., M. Köfferlein, W. Schiessl, M. Steiner, U. Hiller, G. M. Kalvius, D. W. Mitchell, T. P. Das, P. Blaha, K. Schwarz, and M. P. Pasternak 1996. Lattice dynamics and hyperfine interactions in ZnO and ZnSe at high external pressures. *Physical Review B*, 53.
- H. Morkoç, S. S., G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov and M. Burns., 1994. Large band gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe based semiconductor device technologies. *Journal of Applied Physics* 76.
- Halidou, I., Benzarti, Z., Bougrioua, Z., Boufaden, T. and El Jani, B. 2006a. Correlation between morphological, electrical and optical properties of GaN at all stages of MOVPE Si/N treatment growth. *Superlattices and Microstructures*, 40, 490-495.
- Halidou, I., Benzarti, Z., Bougrioua, Z., Boufaden, T. and El Jani, B. 2006b. Correlation between morphological, electrical and optical properties of GaN at all stages of MOVPE Si/N treatment growth. *Superlattices and Microstructures*, 40, 490-495.
- Harima, H. 2002. Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14, R967.
- Hyo Sung Kim, H. G. N., Ju Chan Yang, Chongmu Lee, Hyoun Woo Kim 2010. GaN-based core-shell nanowires sputtered with Pd target and their annealing characteristics. *Surface & Coatings Technology*, S90-S95.
- Hyoun Woo Kim, H. S. K., Han Gil Na, Ju Chan Yang, Chongmu Lee., 2010. Preparation and annealing of GaN/Cu core-shell nanowires. *Journal of Alloys and Compounds*, 175-180.
- I. Vurgaftman, J. R. M., L. R. Ram-Mohan., 2001. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 5816-5875.

- Jian-Kai Liou, C.-C. C., Po-Cheng Chou, Zong-Jie Tsai, Yu-Chih Chang, 2014. Implementation of a High-Performance GaN-Based Light-Emitting Diode Grown on a Nanocomb-Shaped Patterned Sapphire Substrate. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 973-980.
- Ju Chan Yang, H. G. N., Mesfin Abayneh Kebede, Hyo Sung Kim, HyounWooKim 2010. GaN-cored heteronanowires sheathed with hPt shells: Preparation and annealing studies. *Journal of Crystal Growth*, 1199–1204.
- Julita Smalc-Koziorowska, Szymon Grzanka, El_zbieta Litwin-Staszewska, Ryszard Piotrkowski, Grzegorz Nowak, Michał Leszczynski, Piotr Perlin, Ewa Talik, Jan Kozubowski, Stanisław Krukowski 2010. Ni–Au contacts to p-type GaN – Structure and properties. *Solid-State Electronics*, 701-709.
- Kaufmann, N. A. K., Lahourcade, L., Hourahine, B., Martin, D. and Grandjean, N. 2016b. Critical impact of Ehrlich–Schwöbel barrier on GaN surface morphology during homoepitaxial growth. *Journal of Crystal Growth*, 433, 36-42.
- Kaufmann, N. A., Lahourcade, L., Hourahine, B., Martin, D. and Grandjean, N. 2016a. Critical impact of Ehrlich–Schwöbel barrier on GaN surface morphology during homoepitaxial growth. *Journal of Crystal Growth*, 433, 36-42.
- Keleşoğlu, E. 2011. Sert kaplamalar, Üretim teknikleri ve özellikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kikuma, T., Tominaga, K., Furutani, K., Kusaka, K., Hanabusa, T. and Mukai, T. 2002. GaN films deposited by planar magnetron sputtering. *Vacuum*, 66, 233-237.
- Kim, H. W. and Kim, N. H. 2004. Preparation of GaN films on ZnO buffer layers by rf magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 236, 192-197.
- Kornitzer, K., Ebner, T., Thonke, K., Sauer, R., Kirchner, C., Schwegler, V., Kamp, M., Leszczynski, M., Grzegory, I. and Porowski, S. 1999. Photoluminescence and reflectance spectroscopy of excitonic transitions in high-quality homoepitaxial GaN films. *Physical Review B*, 60, 1471-1473.
- Kosicki, B. B., Powell, R. J. and Burgiel, J. C. 1970. Optical Absorption and Vacuum-Ultraviolet Reflectance of GaN Thin Films. *Physical Review Letters*, 24, 1421-1423.
- Köstenbauer, H., Fontalvo, G. A., Keckes, J. and Mitterer, C. 2008. Intrinsic stresses and stress relaxation in TiN/Ag multilayer coatings during thermal cycling. *Thin Solid Films*, 516, 1920-1924.
- Kulkarni, A. K., Schulz, K. H., Lim, T. S. and Khan, M. 1999. Dependence of the sheet resistance of indium-tin-oxide thin films on grain size and grain orientation determined from X-ray diffraction techniques. *Thin Solid Films*, 345, 273-277.
- Laifi, J., Chaaben, N., El Gmili, Y., Salvestrini, J. P., Bchetnia, A. and El Jani, B. 2017. Study of cubic GaN clusters in hexagonal GaN layers and their dependence with the growth temperature. *Vacuum*, 138, 8-14.
- Lee-Woon Jang, D.-W. J., A.Y. Polyakov, A.V. Govorkov, V.N. Sokolov, N.B. Smirnov, Han-Su Cho, Jin-Hyeon Yun, K.D. Shcherbatchev, Jong-Hyeob Baek, In-Hwan Lee, 2014. Electrical and structural properties of GaN films and GaN/InGaN light-emitting diodes grown on porous GaN templates fabricated by combined electrochemical and photoelectrochemical etching. *Journal of Alloys and Compounds*, 507–512.

- Li Sun, G.-E., Ming-MingLiang , Lei-YingYing , Xue-QinLv, Jiang-Yong Zhang,Bao-Ping Zhang 2014. Influence of p-GaN annealing on the optical and electrical properties of InGaN/GaN MQW LEDs. *Physica E*, 166–169.
- Li, L., Huang, J., Yang, W., Tang, K., Ren, B., Xu, H. and Wang, L. 2016. Fabrication and characterization of p-CuS/n-GaN thin film heterojunction diodes. *Surface and Coatings Technology*, 307, Part B, 1024-1028.
- Liu, Y.-J., Tsai, T.-Y., Yen, C.-H., Chen, L.-Y., Tsai, T.-H., Huang, C.-C., Chen, T.-Y., Hsu, C.-H. and Liu, W.-C. 2010. Performance investigation of GaN-based light-emitting diodes with tiny misorientation of sapphire substrates. *Opt. Express*, 18, 2729-2742.
- Liuan Li, Y. X., Qingpeng Wang, Ryosuke Nakamura,Ying Jiang and Jin-Ping Ao 2015. Metal-oxide-semiconductor AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistors using TiN/AlO stack gate layer deposited by reactive sputtering. *Semiconductor Science and Technology*, 015019 (015016pp).
- M Junaid, P. S. o., J Palisaitis, V Darakchieva, C-L Hsiao,P O Å Persson, L Hultman and J Birch., 2014. Stress evolution during growth of GaN (0001)/Al₂O₃(0001) by reactive dc magnetron sputter epitaxy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 145301 (145308pp).
- M. Junaid, D. L., J. Palisaitis, C.L. Hsiao, V. Darakchieva, J. Jensen, P. O. Å. Persson, P. Sandström W.J. Lai, L.C. Chen, K.H. Chen, U. Helmersson, L. Hultman and J. Birch., 2011. Two-domain formation during the epitaxial growth of GaN (0001) on c-plane Al₂O₃ (0001) by high power impulse magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 123519.
- M.E.A. Samsudin, N. Z., Z. Hassan 2014. Controlled porosity of GaN using different pore size of Si (100) substrates. *Superlattices and Microstructures*, 54–59.
- Martin Magnuson, M. M., Carina Höglund, Jens Birch and Lars Hultman 2010. The electronic structure of GaN and Ga investigated by soft x-ray spectroscopy and first-principles methods. *Physical Review B*, 085125.
- Masakatsu Suzuki, T. U., and Akira Yanase., 1995. First-principles calculations of effective-mass parameters of AlN and GaN. *Physical Review B*, 8132.
- Matoussi, A., Ben Nasr, F., Salh, R., Boufaden, T., Guermazi, S., Fitting, H. J., Eljani, B. and Fakhfakh, Z. 2008a. Morphological, structural and optical properties of GaN grown on porous silicon/Si(100) substrate. *Materials Letters*, 62, 515-519.
- Matoussi, A., Nasr, F. B., Salh, R., Boufaden, T., Guermazi, S., Fitting, H.-J., Eljani, B. and Fakhfakh, Z. 2008b. Morphological, structural and optical properties of GaN grown on porous silicon/Si (100) substrate. *Materials Letters*, 62, 515-519.
- Meyer, I. V. a. J. R. 2003. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics* 3675.
- Mizushima, I., Tang, P. T., Hansen, H. N. and Somers, M. A. J. 2006. Residual stress in Ni–W electrodeposits. *Electrochimica Acta*, 51, 6128-6134.
- Moon, M. W., Chung, J. W., Lee, K. R., Oh, K. H., Wang, R. and Evans, A. G. 2002. An experimental study of the influence of imperfections on the buckling of compressed thin films. *Acta Materialia*, 50, 1219-1227.
- Murat Soylyu, F. Y. 2014. Properties of sol–gel synthesized n-ZnO/n-GaN (0001) isotype heterojunction. *Materials Chemistry and Physics*, 495-502.

- Nootz, G., Schulte, A., Chernyak, L., Osinsky, A., Jasinski, J., Benamara, M. and Liliental-Weber, Z. 2002. Correlations between spatially resolved Raman shifts and dislocation density in GaN films. *Applied Physics Letters*, 80, 1355-1357.
- Orak, I., Kocyigit, A. and Turut, A. 2017. The surface morphology properties and respond illumination impact of ZnO/n-Si photodiode by prepared atomic layer deposition technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 691, 873-879.
- Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S.-J. and Morkoç, H. 2005. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 041301-041301-041103.
- Öztürk, M. K., Altuntaş, H., Çörekçi, S., Hongbo, Y., Özçelik, S. and Özbay, E. 2011. Strain–Stress Analysis of AlGaIn/GaN Heterostructures With and Without an AlN Buffer and Interlayer. *Strain*, 47, 19-27.
- Park, B.-G., Saravana Kumar, R., Kim, M.-D., Cho, H.-D., Kang, T.-W., Panin, G. N., Roschupkin, D. V., Irzhak, D. V. and Pavlov, V. N. 2015a. Domain matching epitaxy of GaN films on a novel langasite substrate: an in-plane epitaxial relationship analysis. *CrystEngComm*, 17, 4455-4461.
- Park, B.-G., Saravana Kumar, R., Moon, M.-L., Kim, M.-D., Kang, T.-W., Yang, W.-C. and Kim, S.-G. .2015b. Comparison of stress states in GaN films grown on different substrates: Langasite, sapphire and silicon. *Journal of Crystal Growth*, 425, 149-153.
- Patterson, A. L. 1939. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review*, 56, 978-982.
- Prasana Sahoo, S. D., S. Dash, S. Amirthapandian, Arun K. Prasad, A.K. Tyagi 2013. Room temperature H₂ sensing using functionalized GaN nanotubes with ultra low activation energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3513–3520.
- R. Gutt, M. H., M. Fenske, S. Müller, T. Lim, L. Kirste, P. Waltereit, K. Köhler, S. Krischok and T. Fladung 2011. Comprehensive surface analysis of GaN-capped AlGaIn/GaN high electron mobility transistors: Influence of growth method. *Journal of Applied Physics* 083527.
- R. Nandi, P. J. D. S., Pravanshu Mohanta , R.S. Srinivasa , S.S. Major 2014. Structural and optical properties of ZnO nanorods grown chemically on sputtered GaN buffer layers. *Thin Solid Films*, 122–125.
- Recent Progress in GaN-Based Light-Emitting Diodes By Haiqiang Jia, L. G., Wenxin Wang, and Hong Chen* 2009. Recent Progress in GaN-Based Light-Emitting Diodes. *Advanced Materials*, 4641-4646.
- Ritu Bajpai, A. M., Albert V. Davydov, Vladimir P. Oleshko, Geetha S. Aluri, Kris A. Bertness, Mulpuri V. Rao, Mona E. Zaghoul 2012. UV-assisted alcohol sensing using SnO₂ functionalized GaN nanowire devices. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 499–507.
- S. F. Chichibu, T. S., G. Cantwell, D. B. Eason and C. W. Litton 2003. Polarized photoreflectance spectra of excitonic polaritons in a ZnO single crystal. *Journal of Applied Physics*, 756.
- S. Takeuchi, H. I., A. Kunishige 2000. Anisotropic thermal expansion in wurtzite-type crystals. *Journal of Materials Science*, 2451-2454.
- S.Bloom, G. H., E.Meier, I. B.Ortenburger 1974. Band Structure and Reflectivity of GaN. 66.

- Said, A., Debbichi, M. and Said, M. 2016. Theoretical study of electronic and optical properties of BN, GaN and $B_xGa_{1-x}N$ in zinc blende and wurtzite structures. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127, 9212-9221.
- Sarı, E. 2007. InGaN/GaN Quantum electroabsorption modulators with record breaking electroabsorption in blue. Bilkent üniversitesi-Master tezi.
- Sawin, J. L. 2016. Renewables 2016-Global status report. Frankfurt School–UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy, Paris.
- Schwaiger, S., Argut, I., Wunderer, T., Rösch, R., Lipski, F., Biskupek, J., Kaiser, U. and Scholz, F. 2010. Planar semipolar (101 $\bar{1}$) GaN on (112 $\bar{3}$) sapphire. *Applied Physics Letters*, 96, 231905.
- Se-Yeon Jung, J.-H. O., Tae-Yeon Seong 2012. Improved light output power of GaN-based light-emitting diodes by using Ag grids. *Microelectronic Engineering*, 10-13.
- Shinoda, H. and Mutsukura, N., 2016. Structural properties of GaN layers grown on Al₂O₃ (0001) and GaN/Al₂O₃ template by reactive radio-frequency magnetron sputter epitaxy. *Vacuum*, 125, 133-140.
- Sneed, B. T., Young, A. P. and Tsung, C.-K. 2015. Building up strain in colloidal metal nanoparticle catalysts. *Nanoscale*, 7, 12248-12265.
- Soylu, M. 2012. Fabrication and characterization of transparent MEH-PPV/n-GaN (0001) heterojunction devices. *Optical Materials*, 878-883.
- Spaepen, F. 2000. Interfaces and stresses in thin films. *Acta Materialia*, 48, 31-42.
- Stenzel, O. 2005. The physics of thin film optical spectra, Springer.
- Sudhakar Shet, Y. Y., John Turner , Mowafak Al-Jassim 2013. Effect of gas ambient varying RF sputtering power for bandgap narrowing of mixed (ZnO:GaN) thin films for solar driven hydrogen production. *Journal of Power Sources*, 74-78.
- Sudhakar Sheta, Y. Y., Nuggehalli Ravindra, John Turner, Mowafak Al-Jassim 2013. Photoelectrochemical behavior of mixed ZnO and GaN (ZnO:GaN) thin films prepared by sputtering technique. *Applied Surface Science*, 718–721.
- Sukit Limpijumnong, W. R. L. 2001. Theoretical study of the relative stability of wurtzite and rocksalt phases in MgO and GaN. *Physical Review B*, 104103.
- Sunghoon Park, H. K., Soohyun Kim, Chongmu Leen 2014. Gas sensing properties of multiple networked GaN/WO₃ core-shell nanowire sensors. *Ceramics International*, 8305–8310.
- Takayuki Miyazaki, K. T., and Sadao Adachi 2005. Properties of radio-frequency-sputter-deposited GaN films in a nitrogen/hydrogen mixed gas. *Journal of Applied Physics* 093516.
- Takeuchi, R. J. G.-M. a. N. 2002. First principles calculations of the ground-state properties and structural phase transformation in CdO. *Physical Review B*, 205205
- Tauc, J. and Menth, A. 1972. States in the gap. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 8, 569-585.
- Thornton, J. A. and Hoffman, D. W. 1989. Stress-related effects in thin films. *Thin Solid Films*, 171, 5-31.
- Ting, C.-W., Thao, C. P. and Kuo, D. H. 2017. Electrical and structural characteristics of tin-doped GaN thin films and its hetero-junction diode made all by RF reactive sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 59, 50-55.

- Walter R. L. Lambrecht, A. V. R., Sukit Limpijumnong, B. Segall, and Bruno K. Meyer 2002. Valence-band ordering and magneto-optic exciton fine structure in ZnO. *Physical Review B*, 075207.
- Wang, H., Wang, W., Yang, W., Zhu, Y., Lin, Z. and Li, G. 2016a. Effect of residual stress on the microstructure of GaN epitaxial films grown by pulsed laser deposition. *Applied Surface Science*, 369, 414-421.
- Wang, W., Yang, W., Liu, Z., Lin, Y., Zhou, S., Qian, H., Wang, H., Lin, Z. and Li, G. 2014. Epitaxial growth and characterization of high-quality aluminum films on sapphire substrates by molecular beam epitaxy. *CrystEngComm*, 16, 7626-7632.
- Woelffel, W., Claireaux, C., Toplis, M. J., Burov, E., Barthel, É., Shukla, A., Biscaras, J., Chopinet, M.-H. and Gouillart, E. 2015. Analysis of soda-lime glasses using non-negative matrix factor deconvolution of Raman spectra. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 428, 121-131.
- Wojciech Lisowski, E. G., Janusz W. Sobczak, Mirosław Krawczyk, Aleksander Jablonski, Robert Czernecki, Michał Leszczyński, Tadeusz Suski 2014. XPS method as a useful tool for studies of quantum well epitaxial materials: Chemical composition and thermal stability of InGaN/GaN multilayers. *Journal of Alloys and Compounds*, 181–187.
- Wright, A. F. 1997. Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN. *Journal of Applied Physics*, 2833.
- Wu, Y., Xue, C., Zhuang, H., Tian, D., Liu, Y. a., He, J., Sun, L., Wang, F., Ai, Y. and Cao, Y. 2006. Synthesis of GaN nanorods through ammoniating Ga₂O₃/BN thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Journal of Crystal Growth*, 292, 294-297.
- XPS Varun Thakur, S. M. S. 2015. Electronic structure of GaN nanowall network analysed by XPS. *Applied Surface Science*, 389–393.
- Y. C. Yeo, T. C. C. a. M. F. L. 1998. Electronic band structures and effective-mass parameters of wurtzite GaN and InN. *Journal of Applied Physics* 1429.
- Yang, M., Chang, B., Hao, G., Wang, H. and Wang, M. 2015. Optoelectronic properties of GaN, AlN, and GaAlN alloys. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126, 3357-3361.
- Yu-Wen Cheng, H.-Y., Yu-Zhong Lin, Cheng-Che Lee, Ching-Fuh Lin 2015. Post-annealing effects on pulsed laser deposition-grown GaN thin films. *Thin Solid Films*, 17–25.
- Zhang, L., 张丽昉, Cheng, K., Degroote, S., Leys, M., Germain, M. and Borghs, G. 2010. Strain effects in GaN epilayers grown on different substrates by metal organic vapor phase epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 108, 073522.
- Zhang, S., Xiu, X., Xu, Q., Li, Y., Hua, X., Chen, P., Xie, Z., Liu, B., Zhou, Y., Han, P., Zhang, R. and Zheng, Y. 2016. Morphological evolution and characterization of GaN pyramid arrays fabricated by photo-assisted chemical etching. *Superlattices and Microstructures*, 100, 1249-1255.
- Zou, C. W., Yin, M. L., Li, M., Liu, C. S., Guo, L. P. and Fu, D. J. 2008. GaN films deposited on glass substrate by middle-frequency magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 517, 670-673.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Giresun ili Şebinkarahisar ilçesinde dünyaya gelmiştir. İlkokul ve ortaokul eğitimini İstanbul'da, lise eğitimini Çanakkale ilinde Gökçeada Atatürk Anadolu Öğretmen Lisesinde tamamlamıştır. 2003 yılında Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fizik bölümüne girmiş, 2007 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2008 yılında Milli Eğitim Bakanlığı Lisansüstü Eğitim Bursunu kazanmıştır. Bu burs ile Amerika Birleşik Devletlerinde 1 sene yabancı dil hazırlık okumuş ve TOEFL-ibt sınavında gerekli notu alarak, 2009 yılında Ohio Üniversitesi Fizik bölümü Katıhal Fiziği Anabilim dalında yüksek lisansa başlamıştır. 2011 yılında yüksek lisansı başarıyla bitirip Muş Alparslan Üniversitesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2013 yılında Atatürk Üniversitesinde Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim dalında doktora eğitimine başlamıştır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.