



**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ÜÇLÜ
BİLEŞİĞİNİN İNCE FİLM OLARAK
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Erman ERDOĞAN

Doktora Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı

Nanomalzeme Bilim Dalı

Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

2017

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ÜÇLÜ BİLEŞİĞİNİN
İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Erman ERDOĞAN

NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI
Nanomalzeme Bilim Dalı

ERZURUM
2017

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ÜÇLÜ BİLEŞİĞİNİN
İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ VE
KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında, Erman ERDOĞAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 17/11/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

İmza :

Üye : Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

İmza :

Üye : Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

İmza :

Üye : Doç. Dr. Murat TOMAKİN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Özlem BARIŞ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 30/11/2017 tarih ve 47../...12..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Doktora Tezi

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ÜÇLÜ BİLEŞİĞİNİN İNCE FİLM OLARAK BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Erman ERDOĞAN

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

Danışman: Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Bu tez çalışmasında radyo frekanslı magnetron saçtırma (sputtering) tekniği kullanılarak indiyum galyum nitrür üçlü bileşiği farklı büyütm parametreleri altında büyütülmüştür. InGaN bileşiğinin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Yapısal analiz için XRD, XPS, Raman; optik özellikleri için soğurma ölçüm tekniği; morfolojik özellikleri için SEM ve AFM ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Saçtırma tekniğiyle yapılan büyütmelemlerde optimum şartlar sağlamak için altlık, altlık sıcaklığı, RF güç değişimi, çalışma basıncı ve azot gazı akış oranı gibi birçok parametre dikkate alınmıştır. Büyütülen filmlerin XRD analizinde birçok film hekzagonal kristal yapı sergilemiştir. Farklı çalışma parametreleri altında büyütülen filmlerin XRD piklerinin yönelimi ve şiddeti değişmiştir. Bazı parametreler altında ise film yapısının dentritik yapıda olduğu gözlemlenmiştir. XPS sonuçlarında spektrumdan Ga, N, In ve O da dâhil olmak üzere dört çeşit element, hem yüzeyde hem de InGaN filmi içerisinde gözlemlenmektedir. Ayrıca büyütülen InGaN filmlerin kimyasal durumları da XPS ile incelenmiştir. Bu analiz için O (1s), In (3d_{5/2}), Ga (2p_{3/2}) ve N (1s) fotoelektron pikleri seçilmiştir. Göreceli olarak yüksek yoğunluklu O-ilişkili XPS O (1s) özelliği ile belirtildiği gibi, büyütülen InGaN filmlerin yüzeyi önemli derecede oksitlenmiştir. Raman analizinde InGaN bileşiğine ait optik fonon modları A₁(LO) ve E₂(high) olmaktadır. Raman analizi sonucunda InGaN filmine ait Raman değişimlerini gösteren piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm⁻¹ değerinde çok güçlü olduğundan E₂(high) moduna ait pik (430 cm⁻¹ – 490 cm⁻¹) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan A₁(LO) moduna ait pik ise çok yayvan bir şekilde görülmekte olup (616 cm⁻¹ - 720 cm⁻¹) aralığında oluşmuştur. Filmlere ait karakteristik Raman değişimi pikleri stretching modunda bulunmaktadır. SEM analizinde filme ait kristal yapısı ve tanecik sınırları belirgin bir şekilde görülmekte olup hem kristal oluşumu hem de dentritik yapı oluşumu desteklenmektedir. AFM sonuçlarında yapılar da yer yer tepeler ve çukurlar mevcut olup kısmen homojendirler ve topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmişlerdir. Ayrıca farklı parametreler altında büyütülen tüm filmler 0.48 nm-85.48 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptirler. Optik özelliklere bakıldığında soğurma ölçümlerinde elde edilen yasak enerji aralığı değerlerinin tüm büyütm parametreleri dikkate alındığında en düşük 2.34 eV ve en yüksek 3.26 eV olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen geniş yasak enerji aralığı, InGaN filmlerini çok sayıda bilinen PV aygıtı konfigürasyonunu ve tandem yapılarını mümkün kılan çok yönlü bir potansiyel PV malzemesi yapmaktadır. Morfolojik özellikleri nedeniyle optoelektronik ve mühendislikte sürtünme uygulamaları için uygun birer yapı olduklarını söyleyebiliriz. Ayrıca hekzagonal kristal yapıya sahip filmlerin de LED, lazer diyot ve güç elektroniği gibi aygıt uygulamalarında kullanılabileceğini söyleyebiliriz.

2017, 149 sayfa

Anahtar Kelimeler: İndiyum Galyum Nitrür, RF Saçtırma, Yapısal Analiz, Optik Analiz, Morfolojik Analiz

ABSTRACT

Phd Thesis

GROWTH OF $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ TERNARY COMPOUND AS THIN FILM BY RF MAGNETRON SPUTTERING TECHNIQUE AND INVESTIGATION OF CHARACTERISTIC PROPERTIES WITH EXPERIMENTAL ANALYSIS

Erman ERDOĞAN

**Atatürk University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Nanoscience and Nanoengineering
Department of Nanomaterials**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

In this thesis study, indium gallium nitride triple compound was grown under different deposition parameters by using radio frequency magnetron sputtering technique. The structural, optical and morphological characteristics of the InGaN compound have been studied in detail. XRD, XPS, Raman for structural analysis; absorption measurement technique for optical properties; SEM and AFM measurement techniques were used for their morphological characteristics. In order to obtain optimum conditions for the growth of the scattering technique, many parameters such as substrate, substrate temperature, RF power variation, working pressure and nitrogen gas flow rate are taken into consideration. In the XRD analysis of the deposited films, many films exhibited hexagonal crystal structure. The orientation and intensity of the XRD peaks of films grown under different operating parameters have changed. Under some parameters, it is observed that the film structure is dendritic. Four types of elements, including Ga, N, In and O, are observed both in the suRFace and in the InGaN film in the XPS results. The chemical states of the grown InGaN films were also investigated by XPS. O (1s), In (3d_{5/2}), Ga (2p_{3/2}) and N (1s) photoelectron peaks were selected for this analysis. As indicated by the relatively high density O-associated XPS O (1s) feature, the suRFace of grown InGaN films is significantly oxidized. In the Raman analysis, the optical phonon modes of the InGaN compound are A₁(LO) and E₂(high). As a result of the Raman analysis, the peak of the E₂(high) mode (430 cm⁻¹ – 490 cm⁻¹) is very weak because the peak of the Si substrate is very strong at 520 cm⁻¹ from the peak of the raman changes of the InGaN film. On the other hand, the peak of the A₁(LO) mode is very broad (616 cm⁻¹ - 720 cm⁻¹). The characteristic Raman change peaks belonging to the films are in the stretching mode. In the SEM analysis, the crystal structure and grain boundaries of the structure are clearly visible and both crystal formation and dendritic structure formation are supported. In the results of the AFM, there are locally peaks and valleys, and partially homogeneous and circular-like clusters are arranged. In addition, all deposited films under different parameters have linear roughness between 0.48 nm and 85.48 nm. When the optical properties are taken into consideration under various growth parameters, it is determined that the band gap values obtained in the absorption measurements are the lowest 2.34 eV and the highest 3.26 eV. The resulting wide band gap makes InGaN films a versatile potential PV material that makes possible the configuration of many known PV devices and tandem structures. Due to their morphological properties, we can say that they are suitable structures for optoelectronic applications and friction applications in engineering. We can also say that films with hexagonal crystal structure can be used in device applications such as LED, laser diode and power electronics.

2017, 149 pages

Key Words: Indium Gallium Nitride, RF Sputtering, Structural Analysis, Optical Analysis, Morphological Analysis

TEŞEKKÜR

Bu doktora tez çalışması Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden Sayın Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'nın yöneticiliğinde yapılmıştır. Çalışmalarım boyunca verdiği destek ve katkılarından dolayı çok kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde bulunan Sayın Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM'a, Sayın Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR'e, Sayın Doç. Dr. Murat TOMAKİN'e ve Sayın Doç. Dr. Özlem BARIŞ'a tez çalışmalarım süresince değerli öneri ve desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım boyunca engin görüş ve tecrübelerinden istifade ettiğim, laboratuvar olanaklarını sınırsız bana sunan Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü ve Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) müdür yardımcısı değerli hocam Sayın Doç. Dr. Emre GÜR'e teşekkür ederim.

Çalışmada DAYTAM bünyesinde görev yapan Uzman Ahmet Emre KASAPOĞLU'na Raman ve XPS ölçümlerinin alınmasında ve özellikle malzeme büyütme aşamasında verdiği desteklerden ötürü teşekkür ederim. Bu çalışmanın gerçekleşmesine imkân sağlayan tüm Nanobilim ve Nanomühendislik ABD öğretim üye ve elemanlarına teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmaları sırasında her türlü imkânından yararlandığım Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) yöneticilerine ve çalışanlarına ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana göstermiş olduğu sabır, anlayış, moral ve her türlü destekten dolayı çok değerli eşim Ayşegül ERDOĞAN'a sonsuz teşekkür ederim. Sevgin, desteğin ve varlığın olmadan hayatımda hiçbir şey mümkün olmazdı.

Erman ERDOĞAN

Kasım, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	ii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	13
2.1. Giriş	13
2.2. III-Nitrürlerin Kristal Yapısı	14
2.3. III-Nitrürlerin Fiziksel Özellikleri.....	17
2.4. InGaN Teknolojisindeki Zorluklar	18
2.4.1. Altlıklar ve Kristal Kalitesi	19
2.4.2. Faz Ayrışması.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	23
3.1. Büyütme Metodu.....	23
3.1.1. Saçtırma (Sputtering) Teknikleri.....	26
3.1.1.1. RF Saçtırma Tekniği	26
3.2. Deneysel Ölçüm Teknikleri.....	30
3.2.1. Soğurma Ölçüm Sistemi.....	30
3.2.2. XRD Ölçüm Sistemi.....	34
3.2.3. Raman Spektroskopisi Sistemi.....	36
3.2.4. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)	38
3.2.5. Alan Emisyon Tabancalı Taramalı Elektron Mikroskopisi (FEG-SEM).....	40
3.2.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	44
4.1. Giriş	44
4.2. Düşük azot gazı değişim oranlarında elde edilen InGaN ince filmler.....	45
4.2.1. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi	45

4.2.2. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi	48
4.2.3. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi	52
4.2.4. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi	54
4.2.5. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi.....	59
4.2.6. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XPS analizi.....	60
4.2.7. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi	62
4.2.8. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi	65
4.2.9. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi	68
4.2.10. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi	70
4.2.11. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi	74
4.2.12. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi	75
4.2.13. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi	78
4.2.14. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin SEM analizi	81
4.2.15. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi	84
4.2.16. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi	87
4.2.17. Altlık sıcaklığı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi	88
4.2.18. Altlık sıcaklığı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi	90

4.2.19. Altlık sıcaklığı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi	94
4.3. Yüksek azot gazı değişim oranlarında elde edilen InGaN ince filmler.....	96
4.3.1. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi	96
4.3.2. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi	98
4.3.3. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi	103
4.3.4. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN İnce Filmlerinin AFM Analizi ..	106
4.3.5. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi	111
4.3.6. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi	113
4.3.7. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi	117
4.3.8. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi	121
4.3.9. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi	125
4.3.10. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XPS analizi	127
5. SONUÇLAR.....	130
KAYNAKLAR	144
ÖZGEÇMİŞ	150

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

a, b, c	Örgü Parametreleri
$\text{\AA}$	Angström
<i>AFM</i>	Atomik Kuvvet Mikroskobu
<i>AlN</i>	Alüminyum Nitrür
CH_3OH	Metanol
d	Kristal Düzlemleri Arası Mesafe
<i>DAYTAM</i>	Doğu Anadolu İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi
<i>EDS</i>	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
E_g	Yarıiletkenin Yasak Enerji Aralığı
eV	Elektron Volt
<i>FBB</i>	Fiziksel Buhar Biriktirme
<i>FEG-SEM</i>	Alan Emisyon Tabancalı Taramalı Elektron Mikroskobu
<i>FIR</i>	Uzak Kızıl Ötesi Işın Bölgesi
$F(R)$	Kubelka-Munk fonksiyonu
<i>GaAs</i>	Galyum Arsenik
<i>GaN</i>	Galyum Nitrür
H_2	Hidrojen
<i>InN</i>	İndiyum Nitrür
<i>InGaN</i>	İndiyum Galyum Nitrür
K	Kelvin
<i>KBB</i>	Kimyasal Buhar Biriktirme
<i>LED</i>	Işık Yayan Diyot
<i>MBE</i>	Moleküler Demet Epitaksisi
<i>MOCVD</i>	Metal–Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
n	Tauc İlişkisinde Üstel Değer
$n\text{-Si}$	n-tipi silisyum
$p\text{-Si}$	p-tipi silisyum
<i>MEMS</i>	Mikro Elektro-Mekanik Sistemler
<i>NEMS</i>	Nano Elektro-Mekanik Sistemler

<i>NIR</i>	Yakın Kızıl Ötesi Işın Bölgesi
<i>PEC</i>	Hibrid Fotoelektrotokimyasal
<i>R</i>	Yansıma
<i>RF</i>	Radyo Frekans
<i>SEM</i>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<i>TEC</i>	Termal Genleşme Katsayısı
<i>TEM</i>	Geçirimli Elektron Mikroskobu
<i>TVA</i>	Termiyonik Vakum Ark
<i>UV</i>	Morötesi (Ultra-Viyole) Işınları
<i>PV</i>	Güneş Hücresi
<i>XANES</i>	X-ışını Soğurma Yakın Kenar Spektrumu
<i>XRD</i>	X-ışını Kırınımı
α	Soğurma Katsayısı
λ	Dalgaboyu
μ -PL	Mikro-Fotolüminesans Haritalama
θ	Gelen Işınlarla Düzlem Arasındaki Aç
2θ	Kırınım Açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İnce film büyütme tekniklerinin sınıflandırılması.....	2
Şekil 2.1. III-Nitrür için örgü parametresi üzerinden yasak enerji aralığı.....	13
Şekil 2.2. Hekzagonal hekzagonal yapının birim hücresi.....	14
Şekil 2.3. GaN, AlN, veya InN gibi hekzagonal kristallerin a-, c-, m-, ve r- düzlemlerinin gösterimi.....	15
Şekil 2.4. Hekzagonal metal nitrat yapısının şematik gösterimi (<i>a</i> , <i>c</i> ve <i>u</i> örgü parametreleri, <i>b</i> (=uc) en yakın komşu uzaklığı, <i>b</i> ₁ ', <i>b</i> ₂ ', <i>b</i> ₃ ' üç tip ikinci yakın komşu uzaklığı, α ve β atomlar arası açığı ifade etmektedir).....	16
Şekil 2.5. Elektromanyetik spektrumun görünür aralığında yarıiletkenler için kimyasal bağ uzunluğu ve yasak enerji aralığı.....	18
Şekil 2.6. In _x Ga _{1-x} N/GaN için kritik kalınlığa karşılık kompozisyon eğrisi.....	21
Şekil 3.1. Vaksis Saçtırma sistemi. 1. Altlık ısıtıcı PID kontrolcüsü 2. Bilgisayar açma/kapama butonu 3. DC güç kaynağı 4. Ana şalter 5. Başlatma durdurma butonları 6. Acil durdurma butonu 7. Kontrol ünitesinin monitörü 8. Plazma izleme penceresi 9. Kaplama odası	23
Şekil 3.2. Saçtırma cihazının çalışma şeması	25
Şekil 3.3. Saçtırma sisteminin detaylı çalışma şeması.....	26
Şekil 3.4. RF saçtırma sisteminin şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.5. RF saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi (Johnson, 2005)	28
Şekil 3.6. RF magnetron saçtırmanın şeması.....	29
Şekil 3.7. Reaktif magnetron saçtırma şeması	29
Şekil 3.8. UV-3600 Plus modeline sahip çift ışınlı UV-vis Spektrometre	31
Şekil 3.9. Soğurma ölçüm sisteminin çalışma prensibi	32
Şekil 3.10. PANalytical Empyrean X-Işını Kırınım cihazı	34
Şekil 3.11. X-ışınları kırınım tekniği (XRD) çalışma prensibi.....	35
Şekil 3.12. Bragg Yasası: $2d \sin\theta = n\lambda$	35

Şekil 3.13. WITec alpha 300 Series Raman Yüksek Çözünürlüklü Optik ve Tarama

Mikroskopi Sistemi 36

Şekil 3.14. Raman Spektroskopisi çalışma prensibi 37

Şekil 3.15. Raman saçılması ile moleküllerin titreşim enerji düzeyleri 38

Şekil 3.16. Specs-Flex XPS cihazı 39

Şekil 3.17. XPS cihazı temel çalışma prensibi 39

Şekil 3.18. Sigma 300 Model Zeiss Gemini marka FEG-SEM cihazı 40

Şekil 3.19. SEM cihazının şematik görüntüsü 41

Şekil 3.20. Hitachi marka AFM 5000 II Model cihaz 42

Şekil 3.21. AFM'nin çalışma prensibi 42

Şekil 4.1. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filminin XRD kırınım deseni 46

Şekil 4.2. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filminin XRD kırınım deseni 47

Şekil 4.3. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filminin XRD kırınım deseni 47

Şekil 4.4. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği 49

Şekil 4.5. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği 50

Şekil 4.6. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği 51

Şekil 4.7 RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen
InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği 51

Şekil 4.8. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN
ince filminin FEG-SEM görüntüsü 52

Şekil 4.9. RF saçırma yöntemi ile p-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN
ince filminin FEG-SEM görüntüsü 53

Şekil 4.10. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	53
Şekil 4.11. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 50 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	54
Şekil 4.12. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 75 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	55
Şekil 4.13. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	55
Şekil 4.14. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	56
Şekil 4.15. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 50 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	56
Şekil 4.16. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 75 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	57
Şekil 4.17. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	57
Şekil 4.18. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	58
Şekil 4.19. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği	60
Şekil 4.20. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XPS analizi	61
Şekil 4.21. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	63
Şekil 4.22. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	64
Şekil 4.23. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	64
Şekil 4.24. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	65

Şekil 4.25. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği	66
Şekil 4.26. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	67
Şekil 4.27. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği.....	68
Şekil 4.28. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 0.4 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	69
Şekil 4.29. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 0.8 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	69
Şekil 4.30. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 1.2 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	70
Şekil 4.31. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 0.4 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	71
Şekil 4.32. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 0.8 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	71
Şekil 4.33. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 1.2 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	71
Şekil 4.34. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 0.4 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	72
Şekil 4.35. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 0.8 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	72
Şekil 4.36. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 1.2 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	72
Şekil 4.37. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği	75

Şekil 4.38. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	76
Şekil 4.39. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	77
Şekil 4.40. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	77
Şekil 4.41. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	79
Şekil 4.42. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği	79
Şekil 4.43. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	80
Şekil 4.44. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği	81
Şekil 4.45. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	82
Şekil 4.46. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	82
Şekil 4.47. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	83
Şekil 4.48. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	83
Şekil 4.49. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	84
Şekil 4.50. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	85

Şekil 4.51. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü.....	85
Şekil 4.52. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	85
Şekil 4.53. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği	87
Şekil 4.54. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	89
Şekil 4.55. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni.....	89
Şekil 4.56. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	90
Şekil 4.57. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	91
Şekil 4.58. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	91
Şekil 4.59. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği.....	92
Şekil 4.60. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 400°C de büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2(\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği	93
Şekil 4.61. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 300°C de büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2(\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği.....	93
Şekil 4.62. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 300°C de büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	94
Şekil 4.63. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 400°C de büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	95
Şekil 4.64. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 500°C de büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	95
Şekil 4.65. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	97

Şekil 4.66. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	97
Şekil 4.67. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	98
Şekil 4.68. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	99
Şekil 4.69. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	100
Şekil 4.70. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği	101
Şekil 4.71. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği	102
Şekil 4.72. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2(\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği	103
Şekil 4.73. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 40 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	104
Şekil 4.74. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 60 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	104
Şekil 4.75. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	105
Şekil 4.76. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	105
Şekil 4.77. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 40 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	106
Şekil 4.78. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 60 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	107
Şekil 4.79. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	107
Şekil 4.80. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	108
Şekil 4.81. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 40 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	108

Şekil 4.82. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 60 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	109
Şekil 4.83. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	109
Şekil 4.84. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	110
Şekil 4.85. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	112
Şekil 4.86. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	112
Şekil 4.87. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni	113
Şekil 4.88. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	114
Şekil 4.89. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansıma grafiği	115
Şekil 4.90. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği	115
Şekil 4.91. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filmlerin $F(R)$ karşı enerji grafiği	116
Şekil 4.92. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2(\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği	117
Şekil 4.93. RF saçtırma yöntemi ile nSi üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	118
Şekil 4.94. RF saçtırma yöntemi ile nSi üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	118
Şekil 4.95. RF saçtırma yöntemi ile nSi üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	119
Şekil 4.96. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	119

Şekil 4.97. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	120
Şekil 4.98. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü	120
Şekil 4.99. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	121
Şekil 4.100. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	122
Şekil 4.101. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	122
Şekil 4.102. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	123
Şekil 4.103. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	123
Şekil 4.104. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü	124
Şekil 4.105. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine 5 sccm azot gazı akış miktarında büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği.....	126
Şekil 4.106. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine 5 sccm azot gazı akış miktarında büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği.....	126
Şekil 4.107. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XPS analizi.....	128
Şekil 4.108. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin tavlama sonrası XPS analizi	129

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Hekzagonal yapıya ait a, c ve u örgü parametreleri ile c/a oranı (Ponce, 2000 ve Liu, 2002)	15
Çizelge 2.2. Grup III-Nitrürlerin bazı fiziksel özellikleri (Olson, 1986).....	17
Çizelge 2.3. InGaN ile yaygın altlıklar arasındaki örgü uyumsuzluğu ve termal genleşme katsayısı uyumsuzluğu	20
Çizelge 4.1. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı RF gücü değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri.....	45
Çizelge 4.2. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım desenlerinden elde edilen yapısal özelliklerini belirten parametreler	48
Çizelge 4.3. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler.....	58
Çizelge 4.4. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler.....	59
Çizelge 4.5. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler.....	59
Çizelge 4.6. Bileşiklerdeki elementlerin bağ yaptığı orbital, bağlanma enerjileri, pik şiddetleri ve yapıdaki atomik yüzdeleri	62
Çizelge 4.7. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri.....	63
Çizelge 4.8. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	73

Çizelge 4.9. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	73
Çizelge 4.10. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	74
Çizelge 4.11. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri	76
Çizelge 4.12. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım desenlerinden elde edilen yapısal özelliklerini belirten parametreler	78
Çizelge 4.13. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	86
Çizelge 4.14. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	86
Çizelge 4.15. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler.....	86
Çizelge 4.16. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı altlık sıcaklığı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri	88
Çizelge 4.17. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı RF gücü değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri	96
Çizelge 4.18. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	110

Çizelge 4.19. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	110
Çizelge 4.20. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	111
Çizelge 4.21. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri	111
Çizelge 4.22. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	124
Çizelge 4.23. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	125
Çizelge 4.24. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler	125
Çizelge 4.25. Bileşiklerdeki elementlerin bağ yaptığı orbital, bağlanma enerjileri, pik şiddetleri ve yapıdaki atomik yüzdeleri	128
Çizelge 4.26. Bileşiklerdeki elementlerin tavlama durumuna bağlı bağ yaptığı orbital, bağlanma enerjileri ve yapıdaki atomik yüzdeleri	129

1. GİRİŞ

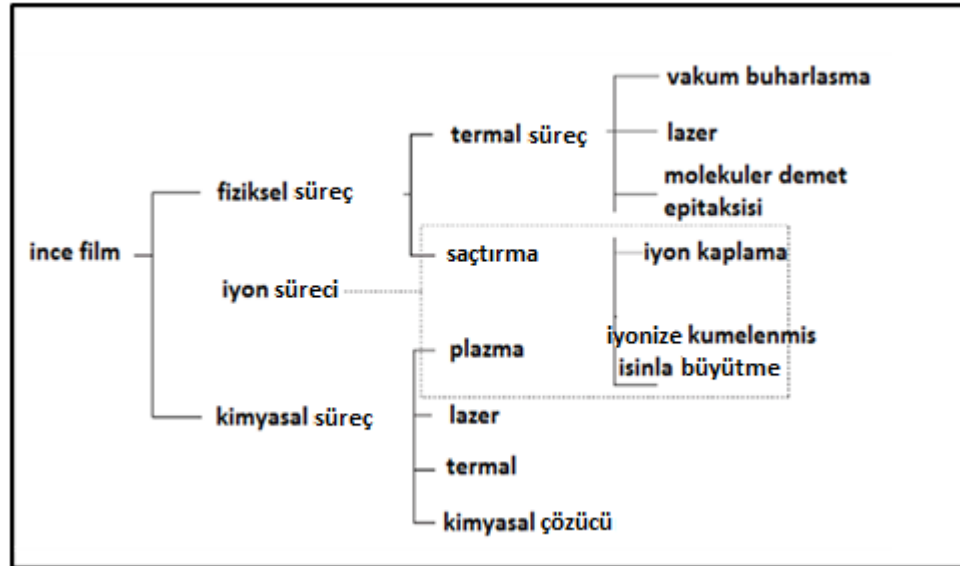
Günümüzde modern teknoloji olarak adlandırdığımız nanobilim ve nanoteknoloji alanının en çok ilgi gören araştırma dalları arasında ince film teknolojisi bulunmaktadır. Bu teknoloji için üretilen filmlerin özelliklerinin belirlenmesi farklı uygulamalar için önem taşımaktadır. İnce film teknolojisi katı hal elektroniğinde şaşırtıcı gelişimin temelidir. Metal filmlerin optik özelliklerinin kullanışlılığı ve iki boyutlu katıların davranışları hakkında bilimsel merak, ince filmlerin bilim ve teknolojisine olan ilgisinin kaynağı olmuştur. Bir maddenin çok ince bir filmini düşündüğümüzde, iki yüzey birbirine çok yakın olup, bunlar üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabilirler. Maddenin fiziksel özellikleri ve süreçleri, dolayısıyla bulk halinden farklılık gösterecektir. Yüzeyler arasındaki uzaklığın azalması ve karşılıklı etkileşimi, tamamen yeni olguların ortaya çıkmasına neden olabilir. Malzemenin bir boyutu birkaç atomik katmana indirgendiğinde makro sistemler ile moleküler sistemler arasında bir ara sistem oluşturulabilir ve bu sayede çeşitli işlemlerin mikroskopik doğasının incelenmesi için bir yöntem sağlanabilir (Han, 2012). İnce filmler özellikle mikroelektronik ve bütünleşmiş optik uygulamaları için uygundur. İnce bir film için kalınlık sınırı on nanometre ve birkaç mikrometre arasında düşünülür. İnce film malzemeleri, optoelektronik, fotonik ve manyetik cihazların alanlarında yapılan teknolojik ilerlemelerin temel unsurlarıdır. Malzemelerin ince filmlere işlenmesi çeşitli cihaz türlerine kolay bütünleşme sağlar. İnce film formunda analiz edildiğinde materyalin özellikleri önemli derecede farklılık gösterir (Seshan, 2012).

İnce film malzemeler geçmişten günümüze farklı uygulamalarda kullanılmaktadır: yarıiletken aygıtlar, kablosuz iletişim, bütünleşmiş devreler, doğrultucular, transistörler, güneş hücreleri, ışık saçan diyotlar, fotoiletkenler, ışıklı kristal ekranlar, ses ve görüntü sistemleri, çok tabakalı kapasitörler, bilgisayar çipleri, litografi, mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS), nano elektro-mekanik sistemler (NEMS) ve çok fonksiyonlu kaplamalar. İnce film materyallerinin geniş çeşitleri, bunların biriktirme işlemi ve fabrikasyon teknikleri, spektroskopik ve optik karakterizasyonları ve aygıt üretiminde

nasıl kullanılacakları ile ilgili teknikleri iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Fiziksel buhar biriktirme (FBB) ve kimyasal buhar biriktirme (KBB) (Guo, 2009).

Fiziksel yöntem, vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan altlık malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanırken, kimyasal yöntemler fiziksel özelliklere bağlıdır (Pat, 2005). Kimyasal buhar biriktirme reaksiyonları çok geniş bir basınç yelpazesinde gerçekleşebilir. Düşük basınç, sınır katmanlarında yayılımı (difüzyonu) ve eşbiçimliliği yükseltir ve çoğunlukla biriktirme verimliliğinde artış sağlar (Campbell, 1978). Metot seçiminde fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikler önemlidir. FBB yöntemi, KBB yöntemine göre daha düşük sıcaklıklarda uygulanabilmektedir. Böylece KBB işlemlerindeki altyapı özelliklerini olumsuz yönde etkileyen yüksek sıcaklık etkisi ortadan kaldırılmış olur. Biriktirme için optimum koşulların sağlanması için her adım ve her reaksiyon analiz edilmelidir. Yapı-özellik ilişkileri, bu tür aygıtların temel özelliklerindendir ve ince film teknolojilerinin temelidir (Chopra, 2004).

Aşağıda Şekil 1.1'de özetlenen yöntemler ince film üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. İnce film büyütme tekniklerinin sınıflandırılması

InGaN ince filmler teknolojik gelişmeler nedeniyle umut verici malzemeler haline gelmiş ve araştırmacıların dikkatini çekerek çok sayıda çalışmanın yapılmasında elverişli olmuştur (Morkoç, 2009). InN yasak enerji aralığının daha dar bir değere düzeltilmesi daha geniş bir spektral bölge üzerinde grup III nitrür alaşım sisteminin yeni uygulamalar için çeşitlilik olasılığını yükselterek genişletmiştir (InN için 0.7 eV tan GaN için 3.4 eV a veya AlN için 6.2 eV a kadar) (Wua, 2009). III-nitrürler zaten optoelektronik cihazlar için mükemmel bir malzeme sistemi olarak kanıtlanmıştır. Yüksek verimli ışık yayan diyot lazerler gösterilmiş ise de, bu malzeme sistemi özelliklerinin çoğu güneş hücreleri (PV) için de ilgi odağı olmuştur (Omkar, 2007; Yu, 2003). $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yarıiletkenler tam güneş spektrum PV uygulamaları için mükemmel adaylar olarak tahmin edilmiştir (Wu, 2002). Bu doğrudan yasak enerji aralığı özellikleri ile 0.7 eV ile 3.4 eV arasında ayarlanabilen yasak enerji aralığı değerlerinin uygunluğuna dayalıdır (Seong, 2013). Fotovoltaik (PV) hücreler ya da fotoelektrokatalitik güneş yakıt hücreleri vasıtasıyla yenilenebilir güneş enerjisi üretimi, önümüzdeki yüzyılda, devam eden fosil yakıt tüketimiyle ilişkili çevre sorunlarının hafifletilmesi için enerjinin üretilmesinde merkezi bir rol oynamaktadır (Jani, 2007; Northrup, 2001). Fotoelektrokatalitik dönüşümle üretilen yakıtlar, hidrojen (H_2), metanol (CH_3OH) veya kütle birimi başına muazzam miktarda enerji depolayan diğer alkanlar molekülleri olabilir. Bu güneş enerjisi, çevresel olarak zararlı yan ürün üretmeden oksijen (O_2) ile reaksiyona girerek enerjisini kullanılabilir bir şekilde serbest bırakabilir. Bu öngörülen güneş enerjisi yakıtlarının oluşumu, ürünleri ayrı lokasyonlarda üretme avantajına sahip olan bileşik yarıiletken elektrolitik hücrelerin geliştirilmesi yoluyla kolaylıkla ele alınabilir (Balakrishnam, 2010). Grup III-nitrür bileşik yarıiletkenleri, ışıkla bu tür endergonik reaksiyonları sürmek için idealdir ve hibrid fotoelektrokimyasal (PEC) hücrelerdeki ışık emici üniteler gibi davranırlar (Ambacher, 1998). Bu yarıiletkenlerin yüzeyleri istenen reaksiyon yollarını katalize etmek için moleküler veya inorganik katalizörler ile stabilize edilmeli ve modifiye edilmelidir. Bu alandaki araştırmalar, iyi tanımlanmış uyarlanmış özelliklere ve tekrarlanabilirliğe sahip, yüksek kalitede malzemeler gerektirir (Collazo, 2013; Wei, 2014).

Literatürde saçıtırma tekniği kullanılarak InGaN ince filmlerin büyütülmesi ve mikro yapılarının incelenmesi için çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmektedir.

Guo ve arkadaşları tarafından GaAs wafer ve saf indiyum hedef kullanarak, azot plazmada reaktif saçıtırma yoluyla (0001) safir yüzeylerde InGaN filmlerin büyütmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, reaktif saçıtırma yoluyla geniş bir kompozisyon aralığına sahip bir InGaN filmin büyütülmesi rapor edilmiştir. Ayrıca, elde edilen InGaN filmlerin yapısal ve optik özellikleri de incelenmiştir. In, Ga, As ve N atomları alt-tabaka üzerine tutunarak düşük bir alt-tabaka sıcaklığında InGaNAs bir film oluşturmak için birbirleriyle reaksiyona girdiklerini gözlemlemişlerdir. 550°C' ye kadar artan sıcaklık ile As atomları ayrışarak InGaN filmi elde edilmiştir. Elde edilen XRD sonuçları örgü sabitinin Vegard kanununa uyacak şekilde Ga kompozisyon oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. Optik özellikler incelendiğinde ise, InGaN filmlerin direkt yasak enerji aralığına sahip oldukları belirlenmiştir (Guo, 2010).

Itoh ve arkadaşları, çeşitli In kompozisyon oranları ile fotoiletken $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmleri eş-zamanlı reaktif RF magnetron saçıtırma tekniği ile Ga ve In hedefler kullanarak düşük altlık sıcaklığında biriktirilmişlerdir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri de incelenmiştir. Biriktirilen filmlerin mikrokristal wurtzide yapıda oldukları yapısal özellikler yardımıyla bulunmuştur. Fotoiletken özellikler Ga ve In hedef yerine GaN ve InN hedefler kullanılarak geliştirilmiştir. Filmlerin optiksel yasak enerji aralıklarının In kompozisyon oranı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir (Itoh, 2012).

Sang-Heon Han ve arkadaşları, Ga-polar ve N-Polar InGaN/GaN çok eklemli kuantum kuyulu ışık yayan diyotlar (LED) üzerinde bir simülasyon çalışması yaparak iç elektrik alanın etkisi ve verim düşüş etkisini araştırmışlar. Elde ettikleri sonuçlara göre; verim düşüşü, iç elektrik alanın dış elektrik alana ters yönde yönelmesi neticesinde geliştirilmiş, bu da N-polar büyütme neticesinde ortaya çıkmıştır. İç elektrik alanın azaltılması ileri öngerilim voltajı artırılarak yüksek akım yoğunluğunda elektron aşırı akışını azaltılmıştır. Çalışmada, N-polar LED' lerin verim düşüşündeki iyileştirme iç elektrik alanın azaltılmasına dayandırılmıştır (Han, 2012).

Cheng-Che Li ve arkadaşları, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmleri ($x=0, 0.25, 0.5$) farklı oranlar içeren In, Ga ve GaN tekli seramik-metal hedefler ile 200°C'de RF magnetron saçıtırma tekniği

kullanarak SiO₂/Si(100) altlık üzerine başarıyla büyötmüşlerdir. GaN içine indiyum katkısı, örgü parametrelerini genişletmiş ve InGaN filmi pürüzsüzlüğünü geliştirilmiştir. Ayrıca, mavi ve yeşil ışık yayma özelliğine sahip InGaN filmler de başarıyla gösterilmiştir (Li, 2013).

Fischer ve arkadaşları, In kompozisyonu $x=0.22$ 'den $x=0.67$ 'ye kadar değişen oranlar ile In_xGa_{1-x}N filmleri epitaksi tekniğı ile büyötmüşler ve büyötilen filmlerin yapısal ve optik özelliklerini incelemişler. X-ışını kırınımı sonuçları, parçacık boyutu genişletilmesi ile açıklanan kırınım tepe genişlikleri ile yüksek kaliteli yapısal özellikler elde edildiğı göstermiştir. Fotoluminesans sonuçları da yüksek In konsantrasyonuna sahip yüksek kalitede malzeme elde edildiğini göstermiştir (Fischer, 2013).

Wang ve arkadaşları, In_xGa_{1-x}N filmleri RF magnetron saçırma tekniğini kullanarak düşük altlık sıcaklıklarında farklı saçırma basınçlarında hazırlamışlar. Kuartz cam altlık kullanarak, 300°C'de In-Ga ikili bileşik hedef yardımıyla saçırma basıncı değiştirilerek O₂ kirliliğı araştırılmıştır. Elde ettikleri SEM görüntüleri In_xGa_{1-x}N filmlerin iyi yüzey morfolojisine sahip olduklarını göstermiş. Saçırma basınç değeri artırılması ile filmin ban aralığının arttığı gözlenmiştir. Yine aynı şekilde bowing parametresini içeren yasak enerji aralığı denkleminde elde edilen sonuçlarda ise artan saçırma basıncı ile In içeriğinin azaldığını göstermişlerdir (Wang, 2013).

Yadav ve arkadaşları tarafından In_xGa_{1-x}N filmler kısmen In ile kaplanmış GaAs hedef ve N₂ reaktif gaz ile saçırma tekniğini kullanarak kuartz altlık üzerine ince film biriktirme yapılmıştır. Farklı indiyum kompozisyonları ile In_xGa_{1-x}N filmlerin elektriksel taşıma parametrelerinin ölçümünde, $x \geq 0.5$ olan filmlerin 10²⁰-10²¹ cm⁻³ aralığında yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip oldukları bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, saçırma tekniğı ile büyötilmiş In_xGa_{1-x}N alaşımlarının yüksek elektron konsantrasyonu, düşük özdirenç, görünür bölümünde yüksek şeffaflık gibi özelliklere sahip olmaları neticesinde fotonik ve fotovoltaik cihazlarda şeffaf elektrotlar uygulamaları için cazip oldukları rapor edilmiştir (Yadav, 2014).

Guo ve arkadaşları başka bir çalışmada, reaktif saçırma tekniğı kullanılmak suretiyle (111) silikon yüzeyler üzerinde InGaN filmler büyötmeyi rapor etmişlerdir. InGaN filmlerde indiyum bileşiminin GaAs hedefin bu indiyum hedefin uygulanan RF

gücü oranının değiştirilmesiyle kontrol edilebileceğini göstermişlerdir. Reaktif saçırmanın silikon tabanlı cihazlar ile düşük maliyetli ve uyumlu silikon altlıklar üzerine InGaN tabakaları elde etmek için umut verici bir gelişme tekniği olduğunu belirtmişlerdir (Guo, 2014).

Cheng-Che Li ve arkadaşları başka bir çalışmalarında film üzerinde büyüme sıcaklığının etkisini araştırmak için farklı altlık sıcaklıklarında 100W RF gücü ile magnetron saçırma tekniği kullanarak $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ ince filmler $\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ altlık üzerine biriktirilmiştir. Hedef olarak metalik In, Ga ve seramik GaN kullanılmıştır. Fabrikasyon ve saçırma esnasında metallerin dışarıya sızması için In ve Ga hedeflerin miktarları %50 den az kullanılmış, hedefteki metallere katı destek sağlaması amacıyla da GaN hedef %50 den fazla kullanılmıştır. InGaN filmler oldukça düşük sıcaklıklarda büyütülmüş ve 0.6 nm'lik pürüzlülük değeri ile düz yüzeyler elde edilmiştir. 2 μm üzerinde film kalınlığına kolayca ulaşılmıştır (Li, 2015).

Wang ve arkadaşları başka bir çalışmalarında, InGaN ince filmleri kuartz altlık üzerine RF magnetron saçırma tekniği ile farklı nitrojen gaz akış oranlarında büyütmüşler. %30 nitrojen gaz akış oranında büyütülen InGaN filmler amorf yapıda, %40-%60 oranında nitrojen gazı ile büyütülen InGaN filmler hekzagonal yapıda ve %80-%100 oranında nitrojen gazı ile büyütülen InGaN filmlerin ise altlığa dik sütunlu yapılar şeklinde büyüdüğü gözlemlenmiştir. Çalışmada, nitrojen gaz akış oranının kristal yönelimi ve piklerin şiddetini değiştirmeye yönelik büyük etkisi olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca film yasak enerji aralığının nitrojen gaz akış oranının artması ile azaldığı gözlemlenmiştir (Wang, 2015).

Dong-Hau Kuo ve arkadaşları, tekli sermet hedef ile RF saçırma tekniğini kullanarak p-InGaN filmleri Si (100) altlık üzerine başarıyla büyütmüşler. Sermet hedefler metalik Mg, In ve Ga ve seramik GaN tozların karışımının sıcak preslemesi ile elde edilmiştir. GaN içeriği hedeflere katı destek sağlaması için %50'den fazla kullanılmıştır. Bu çalışmada, yüksek boşluk konsantrasyonuna sahip p-InGaN filmlerin tavlama işlemi olmadan bu yöntemle büyütülebileceği rapor edilmiştir. InGaN filmlerin tavlama işlemine gerek kalmadan %7.7 Mg katkılama içeriği ile p-tipine dönüştüğü gözlemlenmiş. Mg katkılama oranı %7.7'den %18.2'ye çıkarıldığında, InGaN filmin

yasak enerji aralığı 2.92 eV dan 2.84 eV a düşmüş ve buna bağlı olarak Mg-InGaN filmin elektriksel özellikleri çözünürlük sınırlaması nedeniyle bozulmuştur. Ayrıca, XRD, TEM, SEM, AFM ve UV-vis spektrometresi Mg-InGaN filmlerin mikro yapısını ve karakterizasyonunu araştırmak için kullanılmıştır (Kuo, 2015).

Dong-Hau Kuo ve arkadaşları başka bir çalışmada, p-tipi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.025, 0.05, 0.075, \text{ and } 0.1$) filmleri Mg içeren sermet hedefler kullanarak saçtırma tekniği ile büyütme çalışmışlar. p-tipi InGaN filmleri elde etmedeki başarıyı kanıtlamak için, n tabakası için GaN'ı ve p tabakası için de Mg katkılanmış $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 'ı seçerek p-n eklem diyot yapmışlar. In içeriği maksimum %10 olarak hedeflenmiş, çünkü In içeriğinin artmasının filmin n-tipine dönüşmesine neden olacağı rapor edilmiştir. Özellikle, p- $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ / n-GaN eklem diyot reaktif saçtırma yoluyla başarıyla yapılmıştır (Kuo, 2015).

Pat ve arkadaşları, termiyonik vakum ark (TVA) tekniğini kullanarak PET ve cam altlıklar üzerine GaN biriktirme için hızlı ve düşük maliyetli bir teknik tanımlamışlardır. Bu teknikle üretilen GaN filmlerin nano-yapılı, homojen, yoğun ve düşük pürüze sahip oldukları rapor edilmiştir. SEM, AFM, EDAX, UV-vis spektrometresi teknikleri ile filmin mikro yapısı ve karakterizasyonu araştırılmıştır. Sonuç olarak, TVA tekniğinin filmin kalitesinde kayıp olmaksızın hızlı depolamaya ve kolay bir sisteme sahip olduğu vurgulanmıştır (Pat, 2015).

Hoffbauer ve arkadaşları, moleküler demet epitaksi yöntemini kullanarak Si(111) ve safir altlıklar üzerine yüksek büyütme oranlarında In oranınca zengin InGaN filmleri büyütmeyi başarmışlar ve bu filmler üzerinde geniş bir çerçevede yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyon sonuçlarını yayınlamışlardır. Safir altlık üzerine büyütülen filmlerde faz ayrışımı gözlenmeksizin düzgün olarak yüksek kristal yapıları elde etmişler. Silikon üzerine büyütülen filmlerde ise bir şekilde ayrılmış ancak yüksek taşıyıcı konsantrasyona sahip kristal yapılar elde edilmiştir (Hoffbauer, 2013).

Amidani ve arkadaşları, yüksek çözünürlükte N-K kenarlı x-ışını soğurma yakın kenar spektrumu (XANES) vasıtasıyla $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımlarının bir seti için rapor bildirmişlerdir. X-ışını kutuplanması ile malzeme yönlendirmesi ve In konsantrasyonu

üzerinde yapısal değişkenler gözlemlemiştir. Bu çalışmada ilk ilkeler yöntemi ve atom izgesel simülasyonu beraber kullanılmıştır (Amidani, 2012).

Vilbois ve arkadaşları, InGaN temelli bir güneş hücresinin simülasyonunu gerçekleştirerek, bu yapıda elektrik yüklerinin taşınması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Böylelikle bir güneş hücresinin her bir parametresinin etkisini anlama amacıyla performans geliştirmeye yönelik bir amaç edinilmiştir. Çalışmadaki hesaplamalar (güneş hava kütle 1.5 aydınlatma altında) ve 300 K sıcaklığında bir ideal diyot model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda InGaN temelli güneş hücrelerinin yüksek dislokasyon yoğunluğu nedeniyle çok düşük difüzyon uzunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapıdaki çok ince tabakaların ışığı soğurmadaki iyi etkileri rapor edilmiştir (Vilbois, 2012).

Anh Tuan ve arkadaşları, $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/p\text{-Si}$ heteroeklemlı diyot yapısını $p\text{-Si}(100)$ yonga plakası üzerine magnetron saçırma yöntemi kullanarak elde etmişlerdir. Bu yapının morfolojik, yüzey ve elektriksel özellikleri SEM, AFM ve Hall ölçümü yardımıyla analiz edilmiştir. Sıcaklığa bağlı taşınma davranışları ise akım-gerilim (I-V) analizi yardımıyla belirlenmiştir (Tuan, 2015).

Laref ve arkadaşları, farklı potansiyeller kullanarak külçe halindeki $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yapısının elektronik ve optik özelliklerini ilk ilkesel yöntem vasıtasıyla elde ettiler. Yasak enerji aralığı, durum yoğunluğu, dielektrik sabitinin sanal kısmı, kırıcılık indisi ve soğurma katsayısı gibi bazı fiziksel nicelikler belirlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, teorik olarak tasarlanmış InGaN temelli güneş hücrelerine uygun olarak yasak enerji aralıklarını ayarlamak olarak belirlenmiştir (Laref, 2013).

Nergis Akter, simülatör yardımıyla çeşitli nümerik simülasyonlar kullanarak InGaN temelli güneş hücrelerinin yüksek verimliliğe sahip olma olasılıkları üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Tek eklemli, iki eklemli ve üç eklemli olmak üzere üç farklı türde InGaN güneş hücreleri tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Farklı yasak enerji aralıklarına sahip InGaN malzemesi için yapılan nümerik çalışmada, maksimum verimin 1.2 eV ile 1.5 eV yasak enerji aralığı değerleri arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tek eklemli, iki eklemli ve üç eklemli yapıların en iyi dönüşüm

verimleri sırasıyla %25.02, %35.45 ve %42.34 olarak elde edilmiş. Ayrıca, tasarlanan hücrelerin termal kararlılıkları yüksek değerde bulunmuştur (Akter, 2014).

Özen ve arkadaşları, amorf cam altlık üzerine termiyonik vakum ark tekniği ile elektrotlar arasına uyguladıkları 500 V ve 600 V'luk iki farklı voltaj değeri için InGaN ince filmini üretmişler ve bu ince filmlerin optik ve morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. Optik ve morfolojik özellikler FESEM, AFM, spektroskopik elipsometre, refloktometre, spektrofotometre ve optik gerilimölçer vasıtasıyla elde edilmiştir. Ek olarak optik değerler bazı deneysel ifadelerle karşılaştırılmıştır. Voltaj değerinin artması kırıcılık indisi, tanecik boyutu, pürüzlülük ve yüzek serbest enerjisi gibi bazı fiziksel değerlerde artışa neden olmuştur. Ayrıca InGaN numunelerin suyu sevmeyen özellikte olduğu gözlemlenmiştir (Özen, 2015).

Belyaev ve arkadaşları, mikro-fotoluminesans haritalama (μ -PL) tekniği kullanarak altlık sıcaklığının 645°C ile 680°C arasında ayarlandığı moleküler demet epitaksi yöntemi ile safir altlık üzerine büyütülen InGaN mikro yapılarının detaylı çalışmasını gerçekleştirmiştir (Belyaev, 2013).

Jakkala ve Kordesch, farklı büyütme sıcaklıklarında (35° – 450°C) RF magnetron sıçratma tekniğini kullanarak aluminosilikat cam ve Si(111) altlıklar üzerine farklı In ve Ga oranlarında InGaN ince filmler büyüttüler. Argon ve nitrojen gaz basınçlarını toplam ortam basıncı sabit kalacak şekilde ayarlayarak numune üzerinde oda sıcaklığı Hall ölçümleri vasıtasıyla elektriksel özelliklerin değişimlerini gözlemlediler (Jakkala ve Kordesch, 2016).

Wang ve arkadaşları, reaktif magnetron saçtırma tekniği yardımıyla Si(111) altlık üzerine farklı indiyum oranlarında $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmleri büyüttüler. Raman ölçümleri sonucu farklı sıcaklıklarda elde edilen filmlerin hekzagonal kristal yapısında olduğu gözlemlenmiştir. XRD, SEM ve EDX ölçümleri ile numunenin yapısal, morfolojik ve kimyasal analizi yapılmıştır (Wang, 2016).

Hamady ve arkadaşları, InGaN schottky güneş hücresi için matematiksel optimizasyon metodu kullanarak numerik bir çalışma gerçekleştirerek, en iyi verimi elde etmek için

optimum geometrik ve fiziksel parametreleri bulmaya çalıştılar. Yaptıkları InGaN dizaynı neticesinde %18.2'lik bir verim oranı tahmin edilmiştir (Hamady, 2016).

Ebdah ve arkadaşları, RF magnetron saçtırma tekniği ile nitrojen gazı altında In ve Ga metal alaşımlarla kuartz altlık üzerine InGaN ince film büyüttüler Yapısal ve kimyasal analizler XRD ve EDX ölçümleri ile belirlenmiştir. Filmin optiksel geçirgenliği ve soğurması spektrometre tekniği ile elde edilirken, elektriksel ölçümler oda sıcaklığında 0.55 T manyetik alan altında Hall etkisi ile irdelenmiş ve sonuç olarak elektriksel iletkenlik, serbest taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri karakterize edilmiştir (Ebdah, 2008).

Abud ve arkadaşları yaptıkları çalışmada $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$ ince filmlerde nanoporoz yapıları 1 μm 'lik kalınlıkta, çeşitli aşındırma sürelerinde fotoelektroteknik aşındırma tekniği ile sentezlediler. Ön ve son aşındırılmış ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri araştırılmıştır. Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve X-Işını kırınımı ölçümleri, ön aşındırılmış ince tabakalı filmlerin, hekzagonal yapıya sahip geniş bir bölge üzerinde yeterince pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Abud, 2015).

Jakkala ve Kordes, *in situ* RF saçtırma yöntemi ile InGaN ince filmlerinin elektriksel, optik ve yapısal özelliklerini irdemişlerdir. Alüminosilikat cam ve silikon (111) plakalar üzerine değişik sıcaklıklarda ve değişen N_2 gazı akış oranında çeşitli InGaN örnekleri büyütmüşlerdir. Öz direnç, mobilite, iletkenlik değerleri ve sıcaklığa bağlı değişimleri, hall ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş. $(\text{Ar} + \text{N}_2)$ karışımında yasak enerji aralığı değerleri ve N_2 gazı akış oranına göre değişimler UV spektrofotometre ve Tauc grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Atomik kompozisyon, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Numunelerin amorf / kristal yapıları XRD analizi kullanılarak doğrulanmıştır (Jakkala ve Kordes, 2015).

Joglekar ve arkadaşları, GaN tabanlı cihazlara omik kontak uygulanması amacıyla III-nitrür materyallerin büyütülmesi için bir araç olarak reaktif saçtırmayı araştırdılar. Büyüme koşulları, filmlerin kontak olarak kullanılması için optimize edilmiştir. Reaktif saçtırmanın GaN esaslı cihazlara omik kontak sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Çıkarılan kontak direnci, MBE / MOCVD gibi büyütme teknolojilerine kıyasla hala yüksek olsa da, reaktif saçırtmanın, GaN tabanlı cihazlarda omik kontaklar için uygun maliyetli bir yöntem sunabilen umut verici bir teknik olduğu sonucuna varılmıştır. (Joglekar, 2016).

Jakkala ve Kordesch başka bir çalışmalarında, InGaN filmlerde indiyum ve galyum bileşimini, RF saçırtma yönteminde argon ve azotun kısmi basınç oranlarını kontrol ederek başarıyla ayarlamışlardır. Gaz karışımındaki Ar kısmi basınç oranındaki artış, InGaN alaşımında indiyumun oranını arttırmış ve bu nedenle büyütülen filmlerin yasak yasak enerji aralığını azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca InGaN ince filmler, büyüme basıncı ve büyüme sıcaklığı kontrol edilerek de büyütülmüştür. Yüksek absorpsiyon katsayısı değerleri ışığın çoğunun filmin yüzeyine kuvvetle soğurduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, RF saçırtma yöntemi ile büyütülen InGaN filmlerin, ince film büyütme için iyi aday olduğu ve geniş yasak enerji aralığı ile fotovoltaiikte aktif katmanlar olarak kullanılabileceği öngörülmüştür (Jakkala ve Kordesch, 2017).

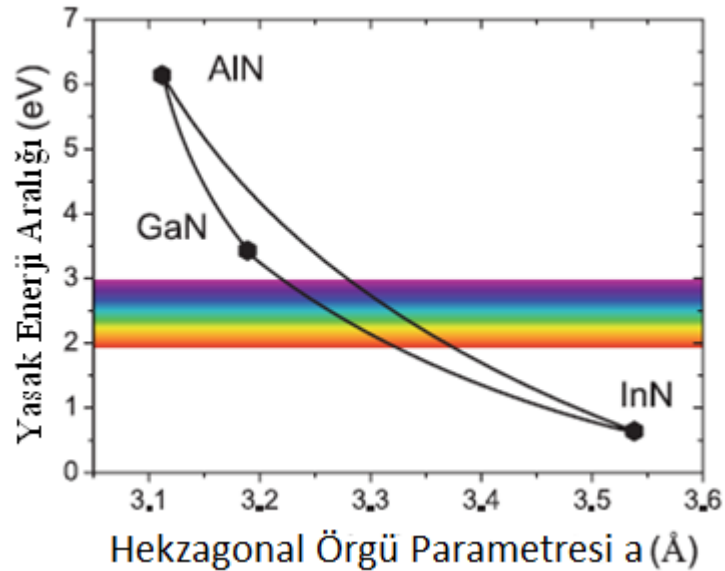
InN ve GaN arasındaki örgü parametresindeki büyük farklılık, InN'nin GaN'ninkine kıyasla entalpi oluşumlarındaki ve yüksek buhar basıncındaki farklılık InGaN filmlerin kalitesini etkileyen problemler. Bununla birlikte, bu problemler, büyüme sıcaklığı, gaz akış oranı, büyüme hızı ve büyüme basıncı gibi büyüme koşullarının parametrelerini değiştirerek en aza indirilebilir. Büyüme koşulları, InGaN filmlerin optik, elektriksel ve yapısal özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir (Mclaughlin and Pearce, 2013). Büyüme parametrelerinde ufak bir değişiklik, InGaN ince filmlerinin kalitesini ve özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. Sonuç olarak, yüksek kaliteli InGaN ince filmler için üretim tekniklerini geliştirebilen büyüme kinetiklerini anlamak önemlidir (Yam and Hassan, 2008). Bu çalışma, bu ince filmlerin optik (yasak enerji aralığı), morfolojik ve yapısal özelliklerinin değişimini anlamak için büyüme sıcaklığı, RF gücü değişimi, çalışma basıncı ve azot akış oranı gibi büyüme koşullarını değiştirerek RF magnetron saçırtma yöntemini kullanarak InGaN ince filmlerin büyütülmesi üzerine yoğunlaşmaktadır.

Yapılan bu çalışma aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: Birinci bölümde, yarıiletken teknolojisinin gelişiminde ince filmler ve karakterizasyon tekniklerinin kısa tanımları ve önemi vurgulanarak tez çalışmasında incelenen numuneler için kısa bilgiler sunuldu. İkinci bölümde, III-Nitürler ve InGaN malzemesi başlığı altında çalıştığımız alaşımın, fiziksel yapısı, fiziksel özellikleri, altlık uygunluğu ve bu alaşımda karşılaşılan zorluklar hakkında bilgiler verildi. Üçüncü bölümde, radyo frekanslı saçırma büyütme tekniğı, yapısal, optik ve yüzey özelliklerin karakterize edildiğı x-ışını kırınımı, UV-Vis spektrometre, AFM, SEM, Raman ve XPS analiz yöntemleri tanıtıldı. Dördüncü bölümde, farklı büyütme parametreleri altında elde edilen InGaN ince film yapılarının saçırma tekniğı ile büyütölmeleri, ölçümler sonucunda film yapılarının detaylı bir şekilde değeriendirilmeleri yapıldı. Tez değeriendirmesi düşük azot gazı akış oranında ve yüksek azot gazı akış oranında büyütölen filmler olmak üzere iki ana başlık altında toplandı. Beşinci bölümde, elde edilen analizlerinin sonuçları değeriendirildi.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

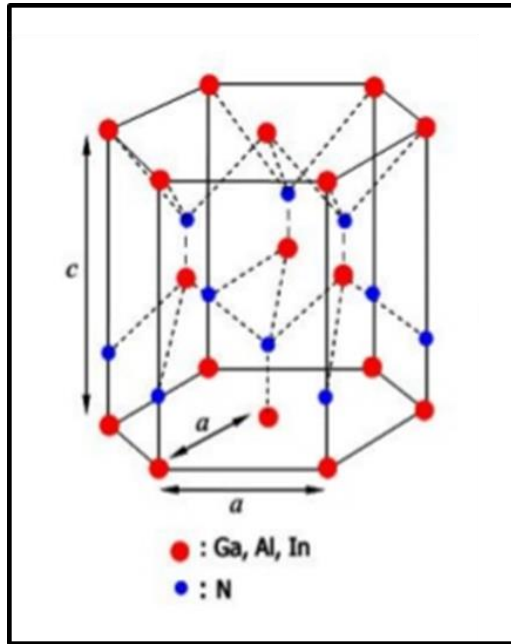
AlN, GaN ve InN ve üçlü (AlGaInN ve InGaInN), dörtdü (AlGaInN) dahil grup-III nitrür yarıiletkenler, kızılötesi, görünür ve morötesi spektral aralığını kapsayan, 0,7 eV (InN) den 6,2 eV (AlN) arasında değişen doğrudan yasak enerji aralıklarına sahiptir. Başka hiçbir yarıiletken malzeme sistemi böyle bir geniş ayarlanabilir doğrudan yasak enerji aralığına sahip değildir. Kırmızı, mavi, yeşil ışık yayan cihazlar (LED), mavi-mor, ultraviyole (UV) lazer diyotlar (LD), UV ışığı detektörleri ve yüksek güç elektronik cihazlar grup-III nitrür materyallere dayanarak elde edilmiş ve ticarileştirilmiştir (Neufeld, 2008). Çoğu uygulama için, ikili bileşiklerin kombinasyonları üçlü alaşım veya dörtdü alaşımlar sentezlenmesi için kullanılır. Grup-III nitrürler için örgü parametlerine karşılık yasak enerji aralığı enerjileri Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Yu, 2003).



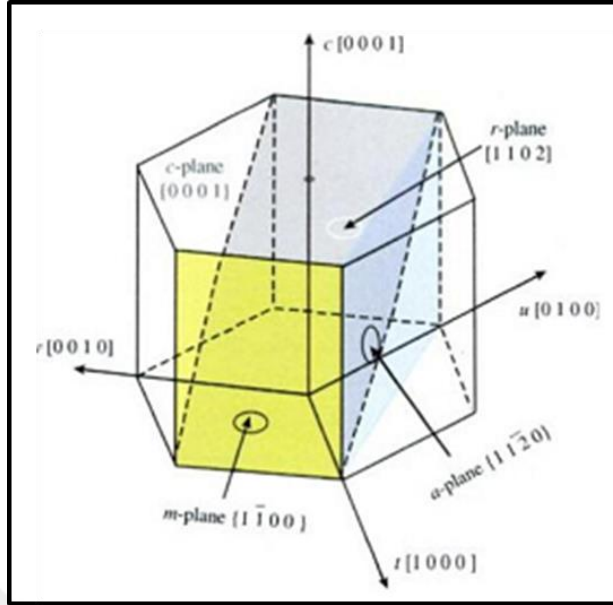
Şekil 2.1. III-nitrür için örgü parametresi üzerinden yasak enerji aralığı

2.2. III-Nitrürlerin Kristal Yapısı

Çoğu yarıiletken gibi, nitrür yarıiletkenlerinin atom düzenlemesi de dört yönlü (tetrahedral) olarak koordine edilir; bu nedenle her atomik yer, bir tetrahedronun köşelerini işgal eden en yakın dört komşu gruba sahiptir. Genellikle grup-III nitrürler için kristal yapıların iki türü vardır: kübik zinkoblend ve hekzagonal wurtzit. Her iki kristal büyümesi için kullanılan çeşitli parametreleri altında bir arada bulunabilir (Shur and Gaska, 2010). III-nitrürler hekzagonal yapıda kristalleşirler. Hekzagonal yapı iç içe girmiş iki tane sıkı paket hekzagonal yapıdır. Birinci alt örgü III. grup elementleri (Galyum, indiyum, alimünyum gibi) diğeri ise beşinci grup azot elementidir. Birinci örgü diğeri c-ekseni doğrultusunda $5/8$ oranında geçmiş durumdadır (Popovici and Morkoç, 2000). Şekil 2.2’de hekzagonal yapıya ait birim hücre görülmektedir. Kesikli çizgiler tetrahedral bağlanmayı göstermektedir. Hekzagonal, yaygın kristal düzlemlerine sahiptir (Şekil 2.3). Hekzagonal kristal yapının a-, c-, m-, ve r- düzlemleri polarizasyonda oldukça farklı davranış gösterirler (Yu, 2003). Diğer düzlemler çalışma için ilginç olmasına rağmen şimdiye kadar araştırmalar c-düzlem nitrürler üzerine yoğunlaşmıştır (Bulutay, 2000).



Şekil 2.2. Hekzagonal wurtzit yapının birim hücresi

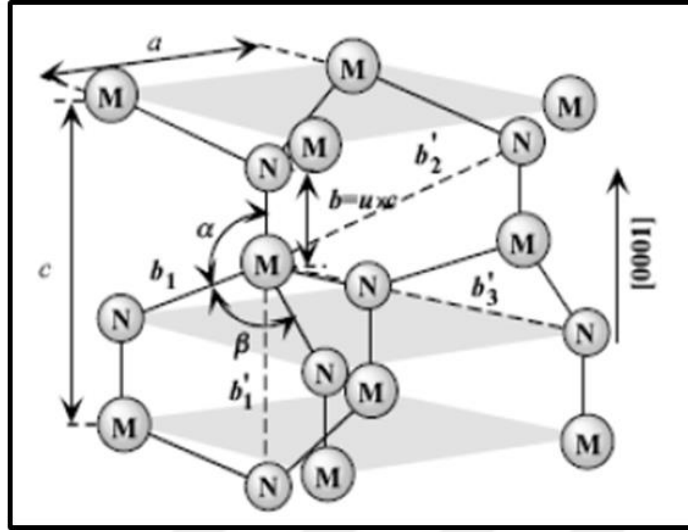


Şekil 2.3. GaN, AlN, veya InN gibi hekzagonal kristallerin a-, c-, m-, ve r-düzlemlerinin gösterimi

Hekzagonal yapı a ve c örgü parametresine sahip olup ideal bir hekzagonal yapı için $c/a = 1.633$ değerini alır. Bu yapı için bir diğer parametre ise anyon ve katyon arasındaki bağ uzunluğu b 'nin (veya en yakın komşular arası bağ uzunluğu) c 'ye oranı olan u parametresi olup ideal bir hekzagonal yapı için $u = 0.375$ değerini alır (Yam and Hassan, 2008). Şekil 2.4'te hekzagonal yapı için örgü parametreleri, birinci yakın komşuluk, ikinci yakın komşuluk ve atomlar arası açılar gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Hekzagonal yapıya ait a, c ve u örgü parametreleri ile c/a oranı (Ponce, 2000 ve Liu, 2002)

	a	c	u	c/a
AlN	3.112	4.982	0.380	1.601
GaN	3.189	5.185	0.376	1.627
InN	3.545	5.703	0.377	1.612



Şekil 2.4. Hekzagonal metal nitrür yapısının şematik gösterimi (a , c ve u örgü parametreleri, $b (=uc)$ en yakın komşu uzaklığı, b'_1, b'_2, b'_3 üç tip ikinci yakın komşu uzaklığı, α ve β atomlar arası açığı ifade etmektedir).

Tüm hekzagonal III-nitrürlerde deneysel olarak gözlenen c/a oranları ideal değerlerden daha küçüktür. İdeal değerlerden bu sapmanın sebebi olarak iki faktör dikkate alınabilir: c/a oranının veya u değerinin değişimi. Burada c/a oranı ile u parametresi arasında güçlü bir ilişki olduğu vurgulanmaktadır. c/a oranı azaldığında dört tetrahedral uzaklığı hemen hemen sabit tutmak için tetrahedral açıların bozulumu yoluyla u parametresi artar (Vurgaftman, 2003). c/a oranı elektronegatiflikteki farklılıklar ile de ilişkilendirilebilir. c/a oranındaki farklılık polarizasyona neden olan dipolün yaratılmasına atfedilebilir. Güçlü iyonik III-N bağlarından dolayı, III-nitrürlerin birim hücresi ideal hekzagonal birim hücreden bozulur ve böylece c -ekseni boyunca geniş bir kendiğilinden polarizasyon oluşur (Bernardini, 1997). III metal katyonlarının iyonik yarıçapı ve bağ enerjisindeki büyük farklılıklar, III-nitrürlerin epitaksiyal çökeltisine meydan okuyan farklı kat kristal sabitlerine, bant soğurma enerjilerine ve elektron benzerliklerine neden olur. Günümüzde, farklı III-nitrür materyalleri ve yaygın olarak kullanılan altlıklar arasındaki örgü uyumsuzluğu, epilayerlerin optoelektronik ve mekanik özelliklerini etkileyen yüksek yer değiştirme yoğunluklarına neden olmaktadır. Bu tür yer değiştirmeler, aynı zamanda, heteroepitaksiyal III-nitrür epilayerlerin yüzey morfolojisini de değiştirmektedir. Son zamanlarda, III-nitrür doğal altlıklarındaki gelişmelere bağlı olarak, yer değiştirme yoğunluğuna sahip homoepitaksiyel ve

psödomorfik heteroepitaksiyel filmler elde edilmiştir (Jain, 2000). Daha düşük yer değiştirme yoğunlukları, tek kristalin yüzey enerjisinin küçültülmesi ile belirlendiği gelişmiş bir yüzey morfolojisine yol açar (Collazo, 2013).

2.3. III-Nitrürlerin Fiziksel Özellikleri

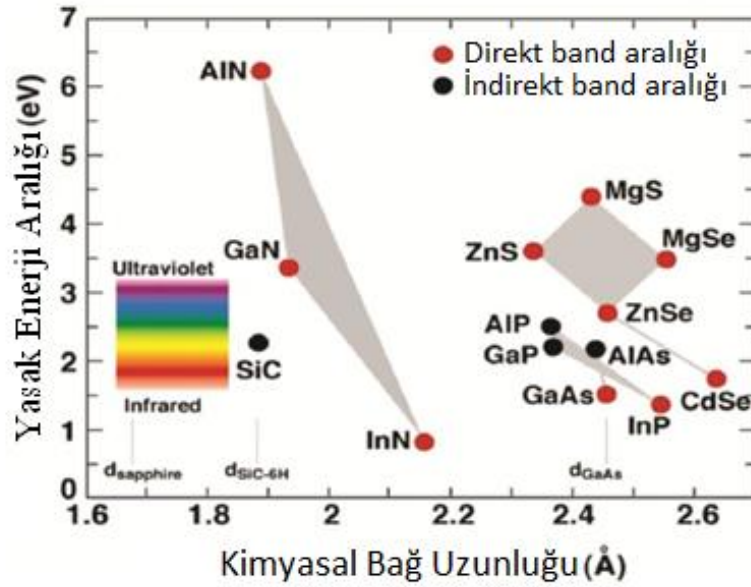
Literatürden elde edilen III-nitrürlerin bazı yapısal, elektriksel ve termal özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Grup III-Nitrürlerin bazı fiziksel özellikleri (Olson, 1986; Wang, 2001)

Özellikler	GaN	InN	AlN
Kristal yapı	Hekzagonal	Hekzagonal	Hekzagonal
Erime Noktası (°C)	2791	2146	3481
Isısal İletkenlik(WC/cm)	1.3	0.8	2.0
Yasak enerji aralığı (eV 300 K)	3.4	0.7	6.2
Elektron mobilitesi (cm²/Vs)	900	4400	300
Boşluk mobilitesi (cm²/Vs)	30	39	14
Dielektrik sabiti	9.5	8.4	8.5
Bağ uzunluğu (Å)	1.94	2.15	1.89

Azot atomu, V elementleri arasında en güçlü elektronegatifliğe sahip olanıdır (Wright, 1997). Azot ve III grubu elementler arasındaki elektronegatiflikteki büyük fark, Ga, Al veya In arasındaki kovalent bağlara kuvvetli bir iyonik bağlayıcı bileşen ekleyerek, sıkıca bağlanmış kristal bir yapıya neden olur. Buna ek olarak, III-Nitrürlerin valans bandındaki yük taşıyıcıları azot atomlarının kuvvetli elektron yakınlığı ilgisi gösterir (Trautman, 2005). Bu özellikler III-nitrür yarıiletkenleri yüksek güç / yüksek sıcaklık uygulamaları için önde gelen malzemeler haline getirmektedir. Azot atomları III-nitrür malzemelerinde büyük bir iyonik bağlayıcı bileşen oluşturur, bu nedenle bu atomlar sıkıca bağlanmış bir kristal yapının oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. AlN bileşiğinin bağlanma enerjisi 11.5 eV/atom iken, GaN bileşiğinin bağlanma enerjisi 8.9 eV/atom dur. Karşılaştırıldığında, InN bileşiği 7.7 eV/atom’luk bir bağlanma enerjisine sahip iken, GaAs 6.5 eV/atom luk bağlanma enerjisine sahiptir (Butcher, 2003). Daha

büyük bir bağlanma enerjisine sahip sıkı bağlanmış yapı, diğer yarıiletkenlere kıyasla daha kısa kimyasal bağ uzunluğuna katkıda bulunur. Geniş yasak enerji aralığı ile kombine edildiğinde, bu özellik III-nitrürleri birçok optoelektronik uygulamada aday malzeme haline getirir (Nakamura, 2000). Şekil 2.5 optoelektronik uygulamalar için tipik bileşik yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarını ve kimyasal bağ uzunluğunu göstermektedir (Cutler and J. Zimmerman, 2011).



Şekil 2.5. Elektromanyetik spektrumun görünür aralığında yarıiletkenler için kimyasal bağ uzunluğu ve yasak enerji aralığı

2.4. InGaN Teknolojisindeki Zorluklar

III-nitrür malzeme sisteminin geliştirilmesi aşamalarında hala üstesinden gelinmesi gereken bazı teknolojik zorluklar vardır (Bhuiyan, 2012). En önemli zorluk, tüm kompozisyon aralığında ($x=0$ 'dan 1 'e) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmlerin büyütülmesinde yatmaktadır. Bu zorluklar iki sınıf altında toplanabilir: yüksek kaliteli düşük kusurlu kristal filmleri büyütmede yetersizlik ve malzeme boyunca homojen bir indiyum bileşimine ulaşmada zorluk. Uygun altlık eksikliği, yüksek dislokasyon yoğunluğu, büyüme sırasında termodinamik olmayan denge ve faz ayrılması gibi konular malzeme kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Bloom, 1971).

Üçlü nitrür materyallerin üçlü bileşikleri arasında, InGaN çok fazla dikkat çekmektedir. GaN ve Ga-zengin InGaN, UV tayf bölgelerinin tamamının ve bir kısmının aktif olduğu ışık yayıcıların imalatı için kullanılan en önemli ve vazgeçilmez materyal olarak düşünülmüştür (Monemar, 2005). Bununla birlikte, InGaN teknolojisinde son yıllarda kaydedilen önemli ilerlemelere rağmen, InGaN malzemeleri ile ilgili temel fizik geliştirilmemiştir. Fiziksel ve kimyasal özelliklerin bazıları, örneğin yasak enerji aralığı, örgü parametreleri, elastik sabitler, etkili elektron kütlesi ve diğerleri GaN ve InN gibi iki ikili bileşiğe dayanılarak tahmin edilmektedir. (Walukiewicz, 2004).

InGaN alaşımlarının optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin büyüme koşullarından önemli ölçüde etkilenebileceği iyi bilinmektedir (Lee, 2016). Büyüme parametrelerinin hafif ayarlanması, InGaN ince filmlerinin kalitesinde büyük bir değişime neden olabilir; bu nedenle InGaN'nin büyüme kinetiğinin anlaşılması büyük önem taşır ve bu sonuçta büyüme parametrelerini optimize ederek daha kaliteli InGaN filmleri geliştirmeye ve imal etmeye yardımcı olabilir (Levinshtein, 2001). Yeni optoelektronik cihaz yapılarını tasarlayıp, optik emisyon özelliklerini ayarlayacak şekilde imal etmek, sadece alaşım bileşiminin bir fonksiyonu olarak yasak enerji aralığının doğru bir şekilde bilinmesini değil, aynı zamanda InGaN malzemelerinin temel özelliklerinin derinlemesine anlaşılmasını da gerektirir (Pearson, 2000). Bununla birlikte, örneğin InN mol oranının yüksek olduğu alaşımların yanı sıra yüksek indüktif InGaN alaşımlarının yetiştirilmesinde karşılaşılan güçlükler ve indiyum bileşiminin belirlenmesindeki belirsizlikler gibi bazı teknik zorlukların varlığı, istenen optik özelliklere sahip yüksek performanslı optoelektronik cihazların imalatını etkilemektedir (Razeghi, 2004).

2.4.1. Altlıklar ve Kristal Kalitesi

Yüksek kristal kalitesine sahip malzeme elde edilmesindeki temel zorluklar nedeniyle, III-nitrür epitaksiyel tabakaların büyütülme konusu yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Epitaksiyel yapıların kristal mükemmeliği malzemenin elektriksel ve fiziksel özelliklerini ve sonuç olarak uygulamaları kısıtlamayı etkileyen ana faktörlerden birisidir. Safir hekzagonal InGaN büyümesi için en yaygın olarak kullanılan altlıktır. Ancak, safir ve III-Nitrürler arasındaki büyük örgü uyumsuzluğu (safir üzerinde GaN için % 16 ve safir üzerinde InN için % 29) ve termal uyumsuzluk (safir üzerinde GaN

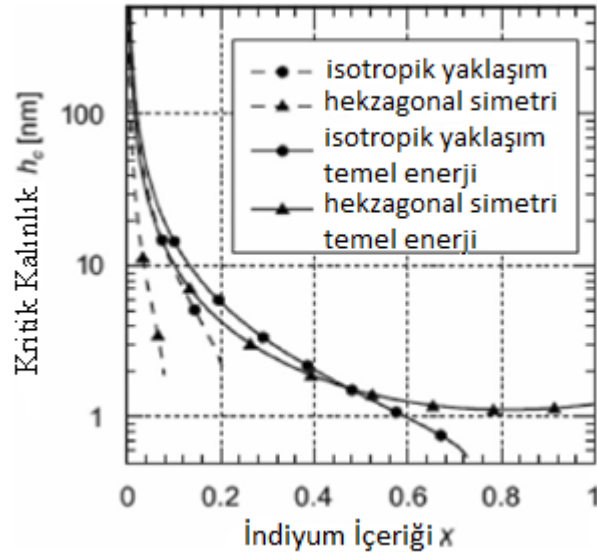
için %-34 ve safir üzerinde InN için -100%) nedeniyle, safir üzerinde epitaksiyel filmler yüksek dislokasyon yoğunlukları ile sonuçlanır (Leszczynski, 2011). Diğer altlıklar SiC ve ZnO daha iyi örgü uyumu sağlamaktadır, ama yinede Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi termal genleşme katsayısı (TEC) uyumsuzluğuna sahiptirler. Diğer III-nitrür alaşımları ile karşılaştırıldığında, epitaksiyel büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmler 10^{10} dislokasyon/ cm^2 değerine kadar oldukça yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahiptir (Faleev, 2009).

Çizelge 2.3. InGaN ile yaygın altlıklar arasındaki örgü uyumsuzluğu ve termal genleşme katsayısı uyumsuzluğu

Altlık	Örgü Uyumsuzluğu	Termal Genleşme Katsayısı Uyumsuzluğu
Safir	16%	-34%
SiC	3%	+25%
ZnO	2%	-14%
Si	17%	+100%

2.4.2. Faz Ayrışması

Dislokasyon yoğunluğu ve diğer kusurların artmasına ek olarak, InN ve GaN örgü uyumsuzluğu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmlerde katı bir faz karışabilirlik boşluğu oluşturur (Van de Walle, 1999). Bu durum indiyum ayrışmasına sebep olur, böylece kompozisyon homojenliği ve kristal kalitesi azalır. Ayrıca InN'ın yüksek buhar basıncına sahip olması ve oluşum entalpilerindeki farklılık In yüzey ayrışmasına neden olmaktadır (Chuah, 2008).



Şekil 2.6. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ için kritik kalınlığa karşılık kompozisyon eğrisi

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ için hesaplanmış kritik kalınlığa karşılık kompozisyon eğrisi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. GaN üzerine büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tabakaları için kritik kalınlık h_c $x > 0,1$ için genellikle 100 nm'den daha azdır ve x 'in artmasıyla hızlı bir şekilde azalır. Örneğin; $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$ hetero yapısı için, misfit dislokasyonlarının oluşması için kritik kalınlık sadece 1 nm dir ve bu değer güneş hücresi uygulamaları için oldukça incedir (Holec, 2008). Kalınlık 1 nm den daha büyük olmaya başladığında, aygıt performansını büyük ölçüde düşüren çukurlar GaN/InGaN ya da InGaN/GaN arayüzeylerinde oluşmaktadır (Brajesh, 2014; Nipko, 1998).

Büyüme oranı indiyum birleşme ve kristal kalitesinde önemli bir rol oynayan başka bir biriktirme parametresidir. Yüksek büyüme oranlarında büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmlerin (1.0 angstrom / saniye üzeri) genellikle daha yüksek indiyum içeriğe sahip oldukları bulunmuştur (Liou, 2005). Yüksek büyüme oranları ve düşük sıcaklıklar indiyum atomlarının yanal hareketliliğini azaltır ve büyüyen filmde eşit olmayan bir bileşime yol açar (Sohmer, 1997). Büyüyen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ filmler ile altlık örgü uyumsuzluğunun olumsuz etkisini azaltmak amacıyla, altlık ve film arasında bir tampon tabakası kullanmak, yaygın bir uygulamadır (Muller, 2012). Bu katman büyüme sırasında

kompresif zorlanmayı azaltabilir ve filminden altlığa geçişi kolaylaştırmak için bir ara örgü sabitine sahiptir (Leszczynski, 2011; Faleev, 2009).



3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Büyütme Metodu

Bu çalışmada DAYTAM bünyesinde yer alan Vaksis Saçtırma sistemi kullanılarak InGaN ince filmlerin büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Vaksis Saçtırma sistemi. 1. Altlık ısıtıcı PID kontrolcüsü 2. Bilgisayar açma/kapama butonu 3. DC güç kaynağı 4. Ana şalter 5. Başlatma durdurma butonları 6. Acil durdurma butonu 7. Kontrol ünitesinin monitörü 8. Plazma izleme penceresi 9. Kaplama odası

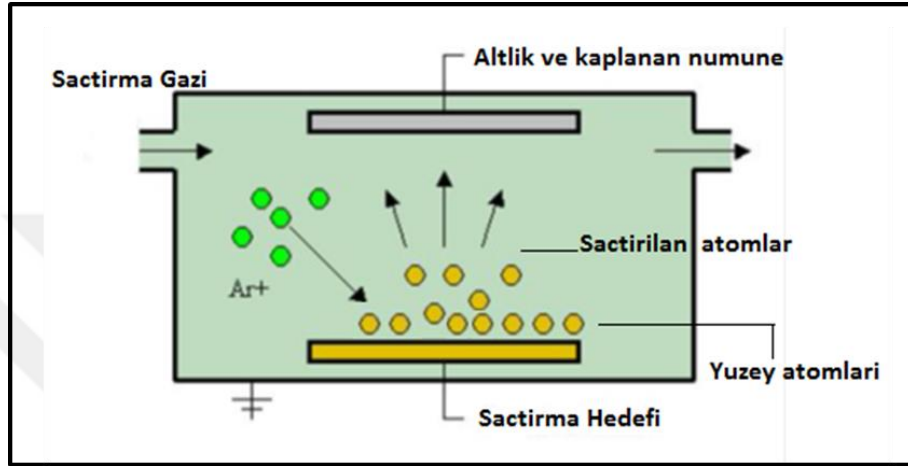
Saştırma yüzeylerin erozyonu ve filmlerin çökertilmesi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve yarıiletken levhaları desenlemek, yüzeyleri temizlemek, mikro işleme, derinlik profillemesi ve bir yüzeyin dikkatli mikroskopik erozyonu gerektiren bir dizi uygulama için kullanılır. Saştırma ile büyütme işlemi yarıiletken tabakalarda, manyetik ortamlarda, kaplama aletleri ve aşınma direnci için kesim yüzeylerinde (tırış bıçakları gibi aletler de dahil olmak üzere), pencere camındaki yansıtıcı kaplamalarda, plastik poşetlerin iç kısımlarında ve otomobil parçalarının yüzeylerini kaplamada ve diğer bir dizi geniş kapsamlı uygulamada kullanılmaktadır (Wasa, 2004). Saştırma, genellikle bir yüzeyde elektriksel olarak hızlandırılabilen yüklü parçacıklar üreten plazmalar vasıtasıyla uygulanır. Saştırma, basitçe o yüzeyin enerjik parçacıklar tarafından erozyona uğratılması işlemidir. Saştırma ile büyütme aslında yüzeyden yakındaki bir numuneye püskürtülen bu atomların birikiminden başka bir şey değildir (Thornton, 1983).

Herhangi bir parçacık yüzeyden bir atomu çıkarmak için yeterli enerjiyle bir yüzeye çarptığında saştırma oluşur. Saştırma tekniğinde saştırmanın verimi hedef malzemeden kopan parçacık sayısının hedefe çarpan iyon sayısına oranı olarak tanımlanır ve kısaca saştırma verimi olarak isimlendirilir (Seshan, 2002).

$$\mu = \frac{\text{hedeften kopan parçacık sayısı}}{\text{hedefe çarpan iyon sayısı}} \quad (3.1)$$

Saştırma verimi bombardıman iyonlarının kütle numarasına, bombardıman iyonlarının enerjisine, gönderilen iyonların hedefe çarpma açısına, hedef malzemenin cinsine ve ortamın sıcaklığına bağlıdır. Saştırma atomlar, iyonlar, elektronlar, fotonlar ve nötronların yanı sıra moleküller ve moleküler iyonlar da dahil olmak üzere hemen hemen her olay türünde ortaya çıkabilir. Hemen hemen tüm pratik durumlarda, saştırma, hemen hemen her zaman Ar^+ ve Kr^+ gibi inert gaz iyonlarıyla veya N_2^+ , O_2^+ gibi küçük moleküler iyonlarla iyon bombardımanı için kullanılır. Bu işlemde üzerinden atomların ya da moleküllerin koparıldığı malzemeye hedef (kaynak), atomların ya da moleküllerin biriktirildiği malzemeye de altlık adı verilir. Bir yüzeyin bombardımanı için verim bir iyon veya aynı enerjili bir atom ile neredeyse aynı olacaktır; fiziksel saştırma, fiziksel momentum ve kinetik enerjinin olaydaki parçacıktan yüzey atomlarına transferine dayanır ve bu, parçacığın yükünden bağımsızdır (Akan, 2003).

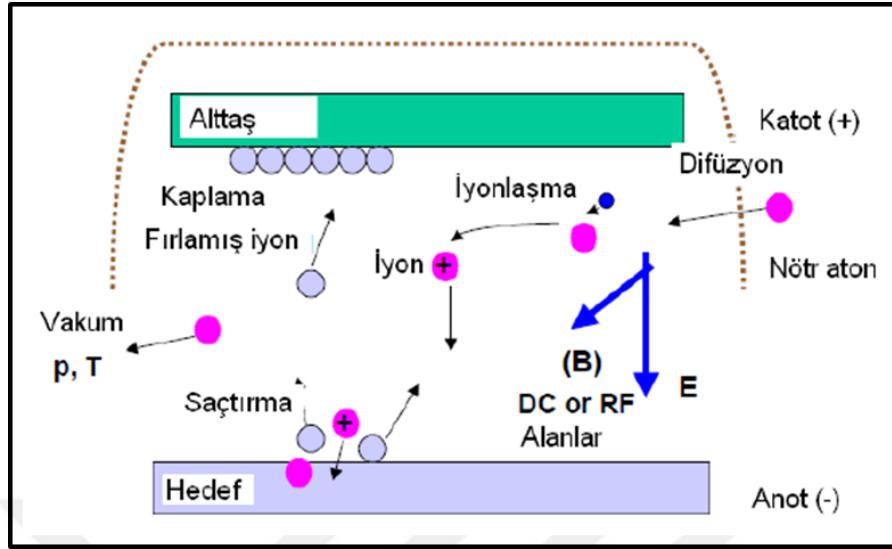
Saçtırma işlemi genel olarak  ekil 3.2’de gösterilmektedir. Yüklü parçacık, katı maddenin yüzeyini veya y zeyeye yakın atomlarını, ba ları koparmak ve atomları yerinden sökmek için yeterli enerjiyle etkiler. Bu işlem sırasında bir veya daha fazla atom katıdan çıkarsa, sa tırılmı  atomlar olarak kabul edilir.



Şekil 3.2. Saçtırma cihazının çalışma  eması

Saçtırma sisteminin basit çalışma şeması  ekil 3.3’de gösterilmektedir. Sa tırmada genellikle Ar gazı kullanılır (Krischbrown, 2007). Asal gaz olarak Ar kullanılmasının nedeni ise Ar moleküllerin büyük olması, sistemden kolayca atılabilmesi ve tehlikeli bir gaz olmamasından dolaydır (Tarımcı, 2006). Bu gaz iyonize edilmiş ve hedef malzemeye doğru hızlandırılmış olduğundan hedef atomlara çarparak enerji ve momentum transferi sonrasında hedef atomlar kopartılarak iyonizasyon gerçekleştirilir.

Basit ve birçok materyale uygulanabilmesi, alaşım ve bileşik kaplamaların stokiyometrik şekilde elde edilmesi, düşük altlık sıcaklıklarının olması, homojen olması, elde edilen filmlerin m kemmел bağlanma ve kristalografik yapılar göstermesi avantajları arasındadır. Yavaş olmaları ise dezavantajdır (Tüzemen, 2007).



Şekil 3.3. Saçırtma sisteminin detaylı çalışma şeması

3.1.1. Saçırtma (Sputtering) Teknikleri

Saçırtma tekniği ile film üretiminde kullanılan farklı teknikler bulunmaktadır. Genellikle bu tekniklerde kullanılan güç kaynaklarının özelliklerine göre değişik saçırtma teknikleri ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

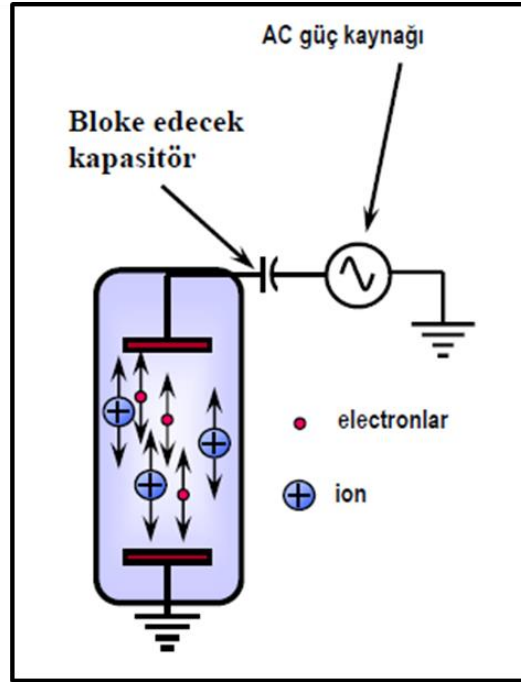
- DC diyot saçırtma
- AC saçırtma
- RF (Radyo frekans) saçırtma
- DC magnetron (DC manyetik alan) saçırtma,
- DC darbeleri magnetron saçırtma
- İyon ve plazma ışın saçırtma

olarak sıralanabilir. Burada RF saçırtma tekniği üzerinde duracağız.

3.1.1.1. RF Saçırtma Tekniği

Radyo frekansında güçlenen elektrotta, elektronlar ve iyonlar arasındaki mobilitelerdeki farklılık sebebiyle net olarak negatif yük oluşarak, pozitif iyonlar güçlü elektrodu bombardıman eder. Böylece altlığa saçırtma gerçekleşmiş olur. İyon akışı,

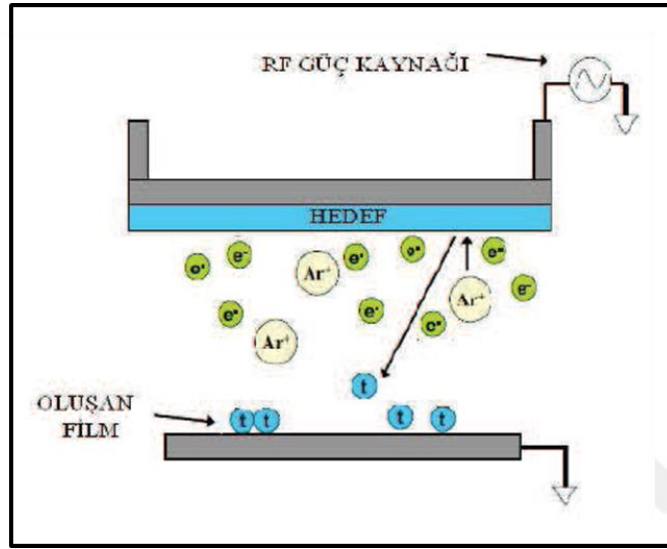
plazma boyunca geniş ölçüde tekdüze olur ve küçük bir alan olan hedef, daha küçük bir iyon akımı alır. Bununla birlikte, elektron akımı plazma potansiyeli ile yüzeye göre belirlenir ve yüzey alanından bağımsızdır. Böylece hedef elektron akımından daha az iyon akımı alır ve negatif bir potansiyele sürülür. Plazma işlemi için ayrılan standart RF frekansı 13.56 MHz'dir (Bunshah, 1994).



Şekil 3.4. RF saçtırma sisteminin şematik gösterimi

RF saçtırma sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. RF saçtırma sistemi; vakum odası, vakum pompası, radyo frekansı güç kaynağı kısımlarından oluşur. Bu sistemde, vakum odası içinde bulunan elektrotlardan birinin üzerine hedef yerleştirilirken, diğer elektrota ise altlık yerleştirilir. Vakum pompası, vakum odasının basıncını düşük basınç değerlerine çekmek amacıyla kullanılmaktadır. Basıncın düşürülmesinin nedeni, vakum odasını havadaki diğer gazlardan temizlemek ve iyonize olmuş parçacıkların ortalama serbest yolunu artırarak yüksek enerjili çarpışmalar elde etmektir. Böylece plazması oluşturulmak istenen materyalin saflığı ve kalitesi artırılabilir (Grill, 1993).

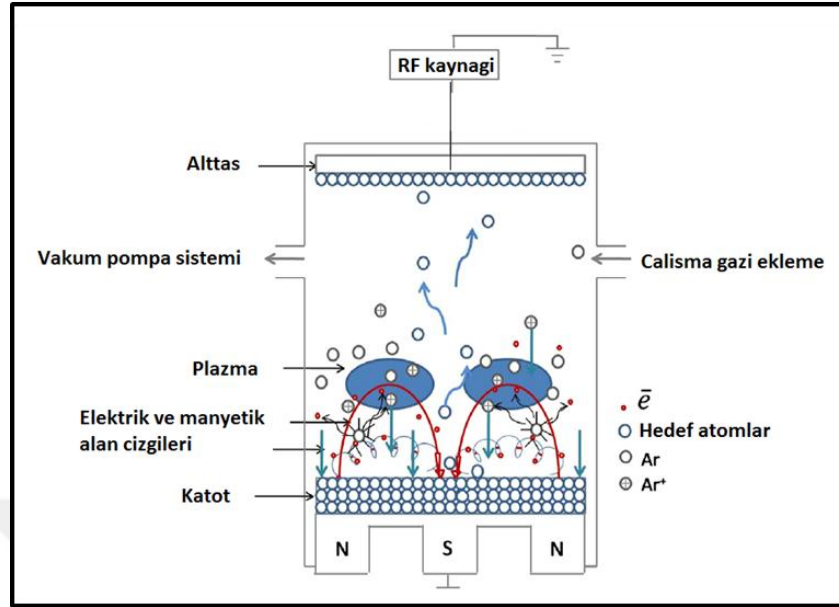
Vakum odası istenilen basınç değerine geldiğinde vakum odasına bir soy gaz pompalanır. Daha sonra radyo frekansı güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Bu dalgalar vakum odası içinde titreşim frekansı oluştururlar. Oluşan titreşim frekansı ile vakum odası içindeki soygazın plazması oluşturulur (Johnson, 2005). RF saçtırma tekniğiyle film oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. RF saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi (Johnson, 2005)

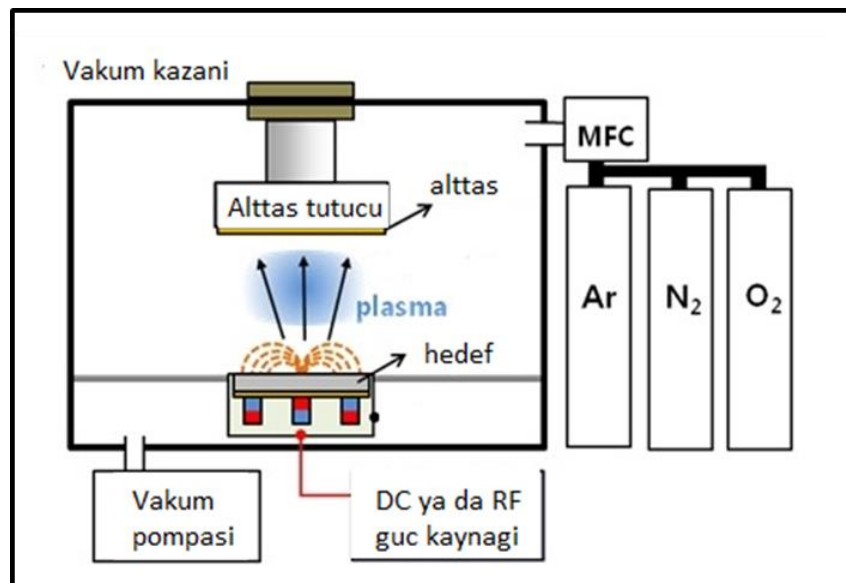
Saçtırma işleminin verimliliğini artırmak için, anoda ulaşmadan önce her ikincil elektron tarafından yapılan çarpışmaların sayısını arttırmak gerekir. Bu, elektronları katoda yakın yörüngede sınırlamak için bir manyetik alan uygulayarak yapılır. Bir magnetronun kullanılması, bir materyalin saçtılabileceği hızı önemli ölçüde arttırırken, aynı zamanda hedef materyalin daha az verimli kullanılmasına yol açar.

Reaktif saçtırmada ise argon plazmaya ek olarak saçtırma çember içine reaktif gaz gönderilir. Bileşik, saçtırma materyali ile birleşen gazın elementleri tarafından oluşturulur.



Şekil 3.6. RF magnetron saçtırmanın şeması

Şekil 3.6’te RF magnetron saçtırma şematik gösterimi görülmektedir. Katot hedefin arkasında magnet kullanılmasının sebepleri; iyonizasyon sürecinin bir parçası olan elektronların Ar atomları ile çarpışma olasılıklarını artırmak ve elektronların izlediği uçuş yolunu artırmak ve hızlandırmak olarak belirtilebilir.



Şekil 3.7. Reaktif magnetron saçtırma şeması

Bir metalik hedef, asal püskürtücü gazın (genellikle argonun) yerine veya buna ilave olarak bir reaktif gaz kaynağı gazı (yani oksijen) ile kullanılıyorsa, DC sputter kullanarak bir oksit gibi bir yalıtkan filminin çökeltilmesi mümkündür. Nitrürler, karbitler ve sülfidler gibi diğer bileşikler bu şekilde uygun bir reaktif gazı kullanarak çöktürülebilir (Şekil 3.7). Ayrıca, biriktirilen filmin stokiometrisini kontrol etmek için bir izolasyon hedefinden biriktirirken reaktif bir saçtırma gazı kullanmak da gerekebilir. Reaktif gazla ince film büyütme oranı azalır.

Saçtırılabilen malzemeler arasında elementler (saf metaller ve elementel yarıiletkenler gibi), alaşımlar ve bileşikler (oksitler, nitrürler, sülfidler ve karbitler gibi) bulunur. Saçtırma, hedef kaynak ile aynı bileşime sahip filmlerin çökmesine izin verir. Bu, ince film biriktirme tekniği olarak saçtırmanın yaygın olarak kullanılması için birincil nedenidir. Diğer çökeltme teknikleriyle karşılaştırıldığında, saçtırma daha homojen ve tekrarlanabilir sonuçlar verir. Sonuç olarak, saçtırma aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- Hemen hemen tüm materyal türleri için kullanılabilen çok yönlü bir tekniktir.
- Malzemelerin özelliklerini değiştirmek için kullanılabilecek birçok süreç değişkenine sahiptir.
- Katı hedeflerin kullanılması, materyalin türünü ve kompozisyonunu kontrol etmeyi mümkün kılar. Buna ek olarak, bu karmaşık süreç kimyasının kullanılmasını önler.
- Metal–Organik Kimyasal Buhar biriktirme (MOCVD) veya Moleküler Demet Epitaksisi (MBE) gibi diğer ileri teknoloji film kaplama teknikleri ile karşılaştırıldığında, saçtırma şu avantajlara sahiptir: basit aparat, düşük biriktirme sıcaklıkları ve ekonomik olması.

3.2. Deneysel Ölçüm Teknikleri

3.2.1. Soğurma Ölçüm Sistemi

Üretilen ince filmlerin optik analizleri için Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde yer alan Shimadzu

UV-3600 Plus modeline sahip çift ışınlı UV-vis Spektrometre (200-1100 nm) kullanılarak soğurma ölçümleri alınmıştır.



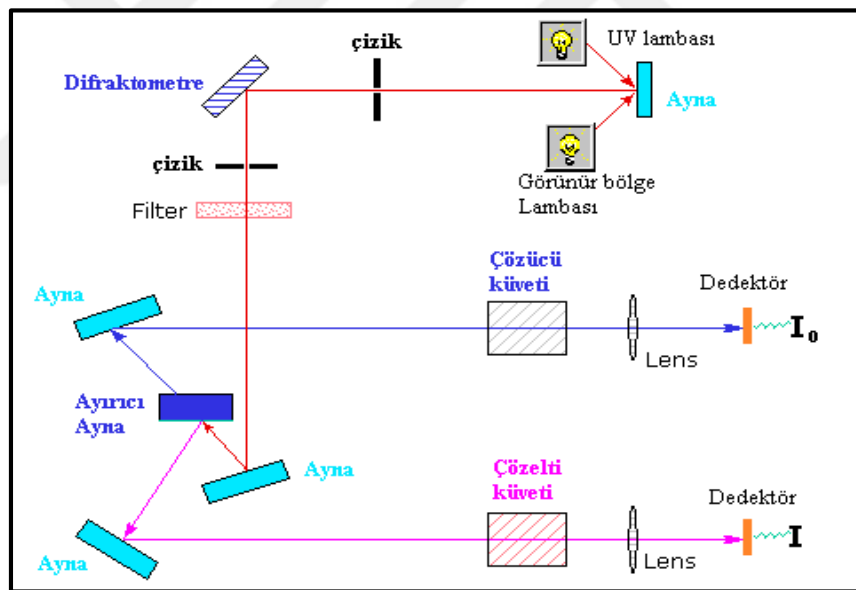
Şekil 3.8. UV-3600 Plus modeline sahip çift ışınlı UV-vis Spektrometre

Spektroskopik çalışmalar, elektromanyetik dalganın (fotonun) madde ile etkileşmesi esasına dayanır. Bu etkileşme, bir elektromanyetik dalganın madde tarafından absorpsiyonu veya emisyonu şeklinde gerçekleşir. İncelenecek olan malzemenin atom veya molekülleri, uygulanan dış etkiler sonucunda uyarılır ve foton emisyonu yaparlar. Malzemeyi oluşturan atom veya moleküllerin kendilerine özgü uyarılma seviyeleri olduğundan, incelenen malzeme ancak belli enerjilerde foton emisyonu yapabilir. Absorpsiyon spektroskopisinde ise elektromanyetik dalga, incelenen malzeme üzerine gönderilir ve enerjisi malzeme içindeki atom veya molekülleri uyarabilecek mertebede olan fotonlar belli olasılıklarla absorblanırlar. Malzemeyi geçen elektromanyetik dalgalar analiz edildiğinde, absorblanan fotonlara karşı gelen dalga boylarında sayım değeri azalır veya bu noktalarda karanlık bölgeler oluşur. Bu sayım değerlerinin azaldığı veya karanlık bölgelerin oluştuğu dalga boyları her atom veya molekül için farklıdır. Gönderilen bu fotonlar spektrofotometre ile analiz edilerek, malzeme hakkında bilgi sahibi olmamız mümkündür (Tansley, 1986). Yarıiletken ince filmlerde yasak enerji aralığı tayininde ve soğurma katsayısı hesaplamalarında en çok kullanılan yöntemlerden birisi soğurma ölçüm metodudur. Soğurma ölçümleri esnasında numune zarar görmez yani tahribatsız bir metottur.

Absorbsiyon spektroskopisinde elektromanyetik dalganın örnek tarafından ne kadar absorblandığı Beer-Lambert yasası ile verilir. Bu yasaya göre, örneği geçen elektromanyetik dalganın şiddeti;

$$I = I_0 e^{-kd} \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir. Burada, I_0 ; malzeme üzerine gönderilen elektromagnetik dalganın şiddetini, I ; d kalınlığındaki materyalden geçen elektromagnetik dalganın şiddetini ve k ; soğurma katsayısını ifade etmektedir (Fox 2001). Şekil 3.9'da soğurma ölçüm sistemlerinin çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 3.9. Soğurma ölçüm sisteminin çalışma prensibi

Işıma kaynağından çıkan ışın, 1. aynadan yansıdıktan sonra, 1. yarıktan, kırınım ızgarasından ve tekrar 2. yarıktan geçtikten sonra filtreye gelir. Filtreden çıkan ışın, 2. aynadan yansyarak ışın bölücü aynaya gelir. Işın burada tüm özellikleri aynı olan iki eşit ışına ayrılır. Bu ışınlardan biri referans hücreden diğeri ise örnek hücresinden geçerek mercekler tarafından detektöre odaklanır. Maddenin belli bir frekansta absorpsiyon yapması sonucu, maddeden ve referanstan geçen ışın demetlerinin

şiddetleri arasındaki fark, dedektörde alternatif akım sinyaline çevrilerek, ekranda absorpsiyon bandı olarak görülür. Bir yarıiletkenin sahip olduğu bant tipi ve yasak enerji aralığı hakkında bilgiyi bu yöntemle elde etmek mümkündür (Gartner, 2006). Bu çalışmada safir altlık üzerine büyütülen InGaN filmlerin yasak enerji aralığı değerleri Tauc denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Tauc yasasına göre, absorpsiyon katsayısının foton enerjisine bağımlılığı şu şekilde verilir (Tauc, 1966):

$$\alpha(h\nu) \approx B(h\nu - E_g)^n \quad (3.3)$$

E_g , yasak enerji aralığı (eV), h Planck sabiti (J.s), B soğurma sabiti, ν ışık frekansı (s^{-1}) ve α sönüm katsayısıdır.

Temel soğurma spektrumu kullanılarak çizilen $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafiğiyle yasak enerji aralığı hesaplanabilir. Bu grafiğin doğrusal kısmının doğrultusunun, $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir. (Aydoğan 2015).

$\hbar\omega < E_g$, $\alpha(\hbar\omega) = 0$ durumu için soğurma yoktur. $\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/n}$ durumu için, optik yasak enerji aralığı genelde bu eşitlikten hesaplanır. Eğer $n=0.5$ ise yasak enerji aralığı direk, $n=2$ ise yasak enerji aralığı indirektir (Tough, 1995).

Silikon altlıklar üzerine büyütülen InGaN filmlerin yasak enerji aralığı değerleri ise Kubelka-Munk denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Kubelka-Munk fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir (Kubelka ve Munk, 1931):

$$f(R) = (1 - R)^2 / 2R \quad (3.4)$$

burada R yansımadır. Modifiye edilmiş bir Kubelka-Munk fonksiyonu, $f(R)$ fonksiyonunun $h\nu$ ile çarpılarak, elektronik geçişle ilişkili katsayı n 'yi kullanarak, aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$[f(R)xhv]^n \quad (3.5)$$

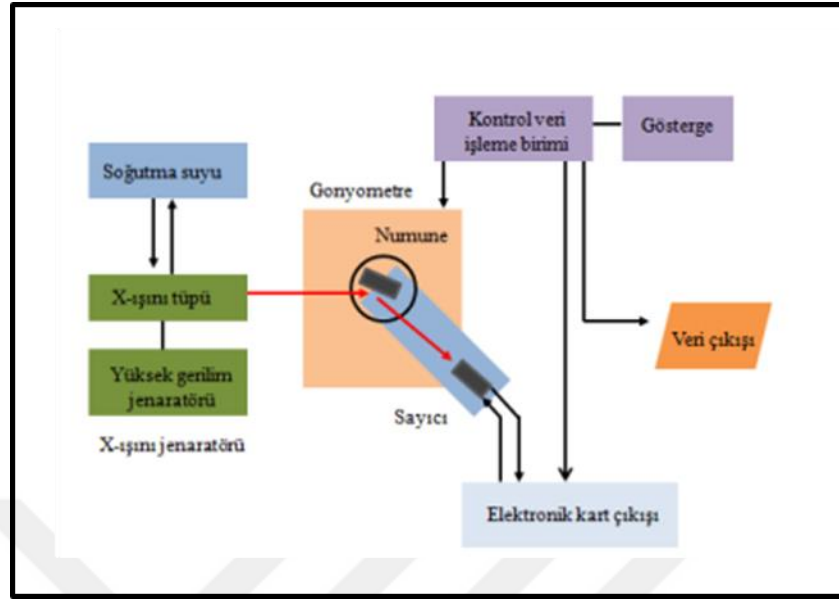
Bu ifadeyi enerjinin bir fonksiyonu olarak eV cinsinden çizerek, bir yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı elde edilebilir (Kubelka, 1948).

3.2.2. XRD ölçüm sistemi

Üretilen ince filmlerin yapısal analizleri için Atatürk Üniversitesi DAYTAM bünyesinde yer alan PANalytical Empyrean X-Ray Difraktometre cihazı kullanılmıştır.

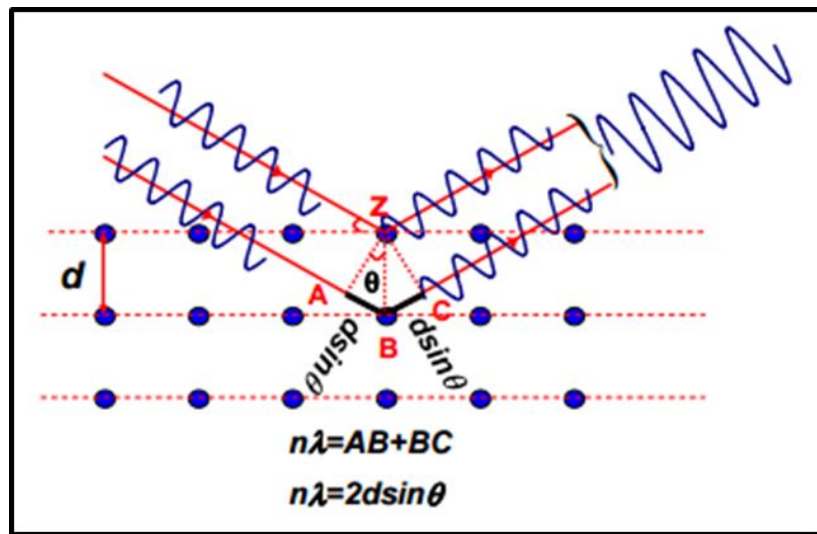


Şekil 3.10. PANalytical Empyrean X-Ray Kırınım cihazı



Şekil 3.11. X-ışınları kırınım tekniği (XRD) çalışma prensibi

XRD çalışma prensibi kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalga boyuna sahip X-ışını dalgalarının kristal ile kırınımına uğraması olayına dayanır (Şekil 3.11). XRD ile malzemenin içerdiği fazlar, tanecik boyutu, tanecik yönelimi, kimyasal kompozisyon ve örgü sabiti belirlemek mümkündür.

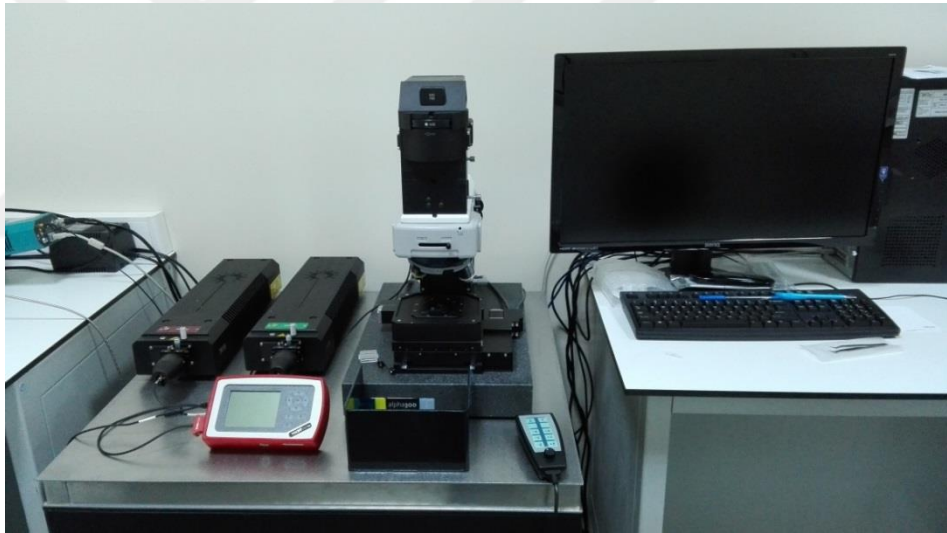


Şekil 3.12. Bragg Yasası: $2d \sin \theta = n\lambda$

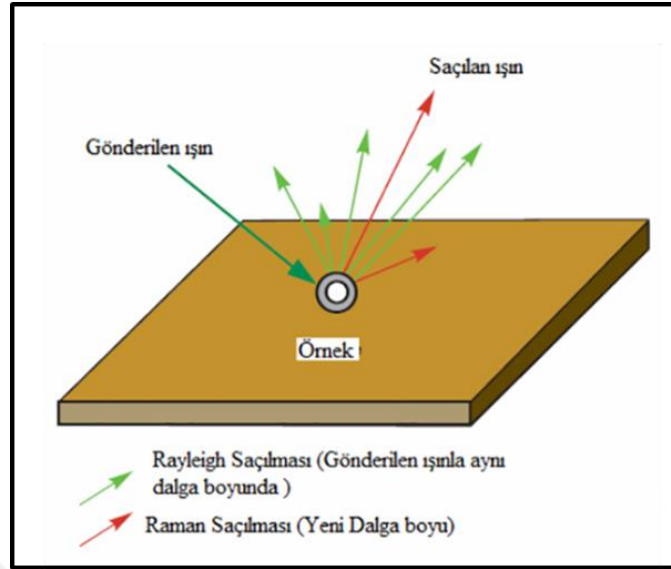
Bragg tarafından geliştirilen teori, X-ışınları kırınım teorileri içinde en yaygın olarak kullanılan teoridir. Aralarında 'd' kadar mesafe bulunan kristal düzlemlerinden saçılan ' λ ' dalga boylu X-ışınları, θ açısını oluştururlar. Deneysel parametre olan 2θ değeri ise saçılan ve geldiği doğrultusunda devam eden X-ışınları demeti arasındaki açıdır. Birbirine paralel bütün kristal düzlemler arasındaki mesafe d kadardır (Şekil 3.12).

3.2.3. Raman Spektroskopi Sistemi

DAYTAM bünyesinde WITec alpha 300 Series Raman High-Resolution Optical and Scanning Probe Microscopy Systems cihazı ile Raman ölçümleri alınmıştır.



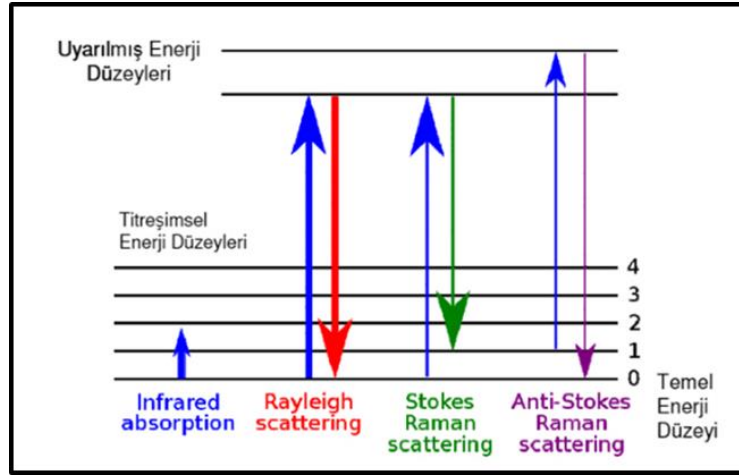
Şekil 3.13. WITec alpha 300 Series Raman Yüksek Çözünürlüklü Optik ve Tarama Mikroskopi Sistemi



Şekil 3.14. Raman Spektroskopisi çalışma prensibi

Raman Spektrometresi çalışma prensibi, bir numunenin monokromatik ışından oluşan güçlü bir lazer kaynağı ile ışınlanmasıyla saçılan ışının belirli bir açıdan ölçümüne dayanır. Işık saçılması sırasında saçılan ışığın büyük bir kısmının enerjisi madde ile etkileşen ışığın enerjisine eşit olur bu tür elastik saçılma olayına ‘Rayleigh saçılması’ denir (Harima, 2002). Rayleigh saçılması olayında Raman saçılmasına göre daha şiddetli saçılmış ışık oluşur. Ancak Rayleigh saçılması tek bir pik verir ve titreşim geçişleri hakkında bilgi vermez. Raman saçılması ile moleküllerin titreşim enerji düzeyleri hakkında bilgi edinilebilir (Şekil 3.14).

Raman spektrometresi sisteminde molekül ile etkileşen ışığın dalgaboyuna göre saçılan ışığın dalgaboyunda oluşan farklar ölçülür (Şekil 3.15). Bu farklar Raman kayması olarak adlandırılır (Smith and Dent 2005). Yani bu enerji farkında kaynaklanan moleküllerdeki dönme, titreşim ve frekans geçişleri hakkında bilgi verir. Diğer bir deyişle fotonların fononlarla olan etkileşmesidir (Skoog et al. 2006).



Şekil 3.15. Raman saçılması ile moleküllerin titreşim enerji düzeyleri

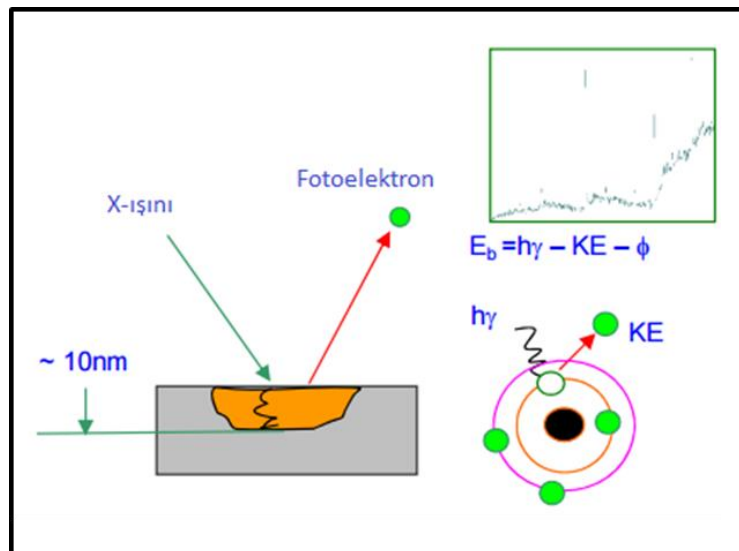
3.2.4. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS)

X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) ölçümleri ise DAYTAM bünyesinde yer alan Specs-Flex XPS cihazı ile analizi yapılmıştır.

Kimyasal analiz için elektron spektroskopisi olarak bilinen XPS, yüzeylerin kimyasal bileşimini araştırmak için yaygın kullanılan bir tekniktir. XPS cihazı toplanan tüm elektronların kinetik enerjisini ölçer ve fotoelektrik etkiyi temel alır (Şekil 3.17). X-ışını demeti numune yüzeyine yönlendirildiğinde, X-ışını fotonunun enerjisi, bir atomun çekirdek elektronuyla tamamen adsorbe edilir. Foton enerjisi, $h\nu$, yeterince büyükse, çekirdek elektron atomdan kaçıp yüzeyden dışarı çıkacaktır. XPS cihazı yüksek vakum ortamı altında çalışmaktadır. Bunun sebepleri ise: numune yüzey bütünlüğünün korunması, fotoelektron saçılmasını en aza indirmek, fotoelektronların ortalama serbest yolunu en üst seviyeye çıkarmak ve X-ışını kaynak katotunda tungsten filaman veya diğer elektron kaynağının kullanılmasına olanak sağlamasıdır (Anonim, 2016).



Şekil 3.16. Specs-Flex XPS cihazı



Şekil 3.17. XPS cihazı temel çalışma prensibi

3.2.5. Alan Emisyon Tabancalı Taramalı Elektron Mikroskopisi (FEG-SEM)

Üretilen ince filmlerin morfolojik analizleri için Atatürk Üniversitesi, DAYTAM’da Sigma 300 Model Zeiss Gemini marka FEG-SEM cihazı ile SEM görüntüleri alınmıştır.

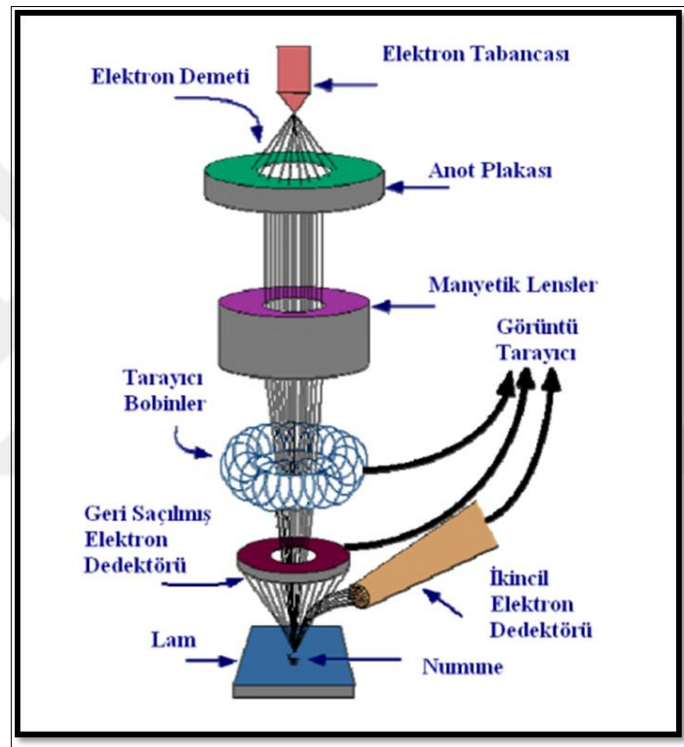


Şekil 3.18. Sigma 300 Model Zeiss Gemini marka FEG-SEM cihazı

Taramalı elektron mikroskobu, yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle inceltilen elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme imkanı sunar. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile etkileşiminden ortaya çıkan ışımlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur. SEM’ de vakum sistemi oldukça önemlidir, basınç elektron tabancasının çalışmasını engellemeyecek kadar düşük olmalıdır. Elektron yayan yüzeylerin koroze olmasını engellemek için düşük olması istenir.

Taramalı Elektron Mikroskobu Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.19). Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune

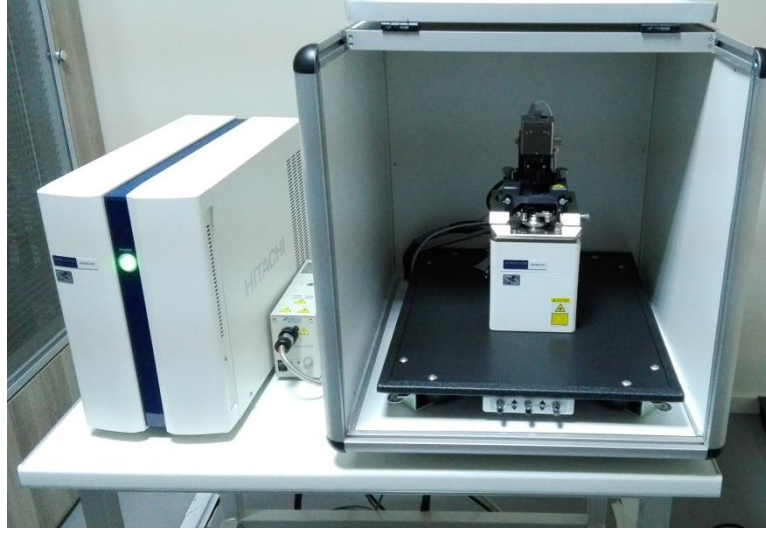
yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışınları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.



Şekil 3.19. SEM cihazının şematik görüntüsü

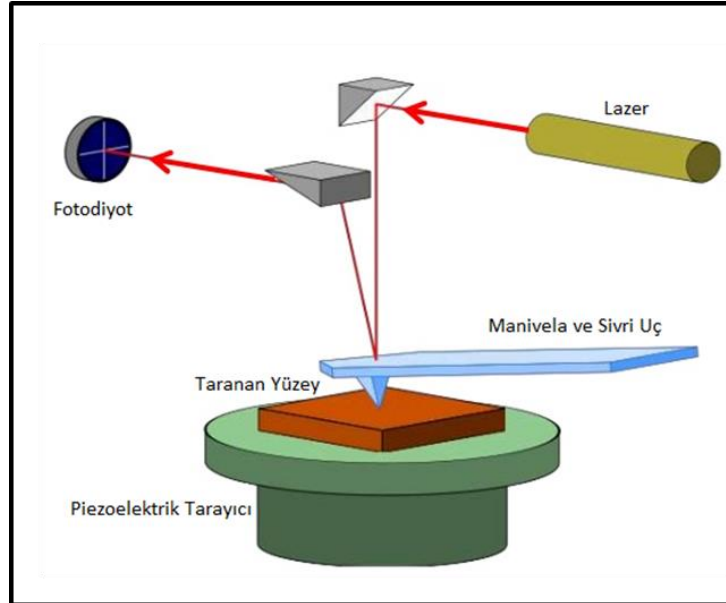
3.2.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Üretilen ince filmlerin morfolojileri Hitachi marka AFM 5000 II Model cihaz ile AFM (dinamik kuvvet modunda ölçüm alınmıştır) cihazıyla alınmıştır.



Şekil 3.20. Hitachi marka AFM 5000 II Model cihaz

Atomik kuvvet mikroskobu nano boyutta görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme konusunda en gelişmiş araçlardan biridir. AFM esnek bir maniveladan ve (yüzeyi taramak için kullanılan) buna bağlı sivri bir uçtan oluşur. Nanometre ölçeğinde eğrilik yarıçapı olan bir uç taşır.



Şekil 3.21. AFM'nin çalışma prensibi

Manivela çeşitli amaçlar için çeşitli malzemelerden üretilse de genellikle silikon nitrür ve silikon karbürdür. Malzeme ile temas halinde, hareketli uç ile malzeme arasında nano newton büyüklüğünde kuvvet uygulanır ve bu kuvvet sabit tutulur. Böylece gezici uç herhangi bir engel veya çıkıntı ile karşılaştığında söz konusu kuvveti dengelemek için hareket eder ve kuvveti sabitler (Şekil 3.21). Böylece yüzeyin 3 boyutlu görüntüsünü çıkarmak mümkündür (Anonim, 2016).



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu çalışmada InGaN ince filmler RF saçtırma yöntemi kullanılarak n-Si(111), p-Si(100) ve Al₂O₃ (safır) altlıklar üzerine farklı büyütme parametreleri altında elde edilmiştir. Altlık sıcaklığı, ortama verilen azot gazı miktarı, RF gücü ve büyütme basıncındaki değişimlerine bağlı olarak InGaN ince filmleri üretilmiş ve bu değişimlerin yapısal, optik ve yüzey özellikleri üzerine etkileri incelenerek büyütme parametrelerinin değişimine göre en iyi film yapısı belirlenmiştir. Bu yöntemde hedef materyal olarak %99.95 saflıkta 5.08 cm çapında 317.5 cm kalınlığında In(0.2)Ga(0.8)N (Lot No. 22709-16-01) alaşımı kullanılmıştır. Çalışma gazı olarak ise inert gaz Ar ve reaktif gaz olarak N₂ gazı kullanılarak argon-nitrojen gazı karışımı plazması ortamında InGaN hedef malzemeden sökülen atomların altlık üzerine ince filmleri oluşturulmuştur. Bu reaksiyon sırasında reaksiyondaki In, Ga, N atomları miktarına ve büyütme parametrelerine bağlı olarak InGaN ince filmlerinin yapılarında bir takım değişiklikler olmuştur. Özellikle tez başlığında kullanılan In_xGa_{1-x}N ifadesindeki x bileşeni farklı büyütme parametreleri altında farklı değerlerde elde edilip ayarlanabildiği için, büyütme parametreleri ile In atomik yüzdesinin değişebileceği gösterilmiştir. Bu değişikliklerin yapısal, optik, yüzey özellikleri belirlemek için XRD cihazı, UV-Vis spektrometresi, SEM, AFM cihazları, Raman, XPS cihazları kullanılmıştır. XRD ölçümlerinde standart $\theta - 2\theta$ ölçümü yerine süpürme açısı konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu durum altlık malzeme etkisini en aza indirerek, film içerisindeki X-ışını yolunu arttırmıştır. Elde edilen XRD grafiklerinde altlıktan kaynaklanan herhangi bir pik görülmemesi bu sebeptendir.

Bu çalışma sonucunda farklı konsantrasyonlardaki gaz karışımları, altlık sıcaklığı, büyütme basıncı ve RF güç değişimlerine göre farklı yapısal özellikler incelenmiş ve kalınlık, absorban, yansıma, yasak enerji aralıkları, Raman kaymaları, filmlerdeki In ve Ga oranları ile yapısal ve yüzey parametreleri ölçülmüştür.

4.2. Düşük azot gazı değişim oranlarında elde edilen InGaN ince filmler

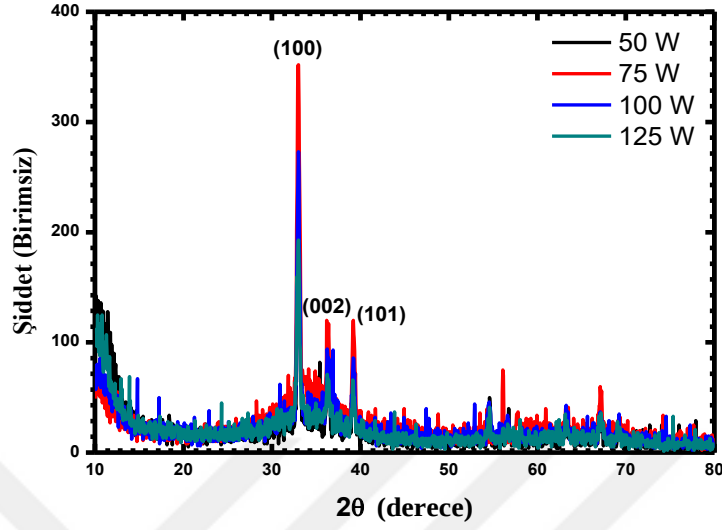
RF saçtırma cihazında ortama argon asal gazına ilave olarak gönderilen reaktif azot gazı miktarları 0 - 5 sccm aralığında değişmektedir. Bu cihaz için maksimum gönderilebilen azot gazı miktarı 5 sccm dir. Düşük azot gazı değişim oranı olarak adlandırılan bu kısımda ortama verilen azot gazı değişim miktarları 0, 0.4, 0.8 ve 1.2 sccm olarak belirlenmiştir. Diğer büyütme parametrelerinde elde edilen filmler için ise azot gazı değişim miktarı 0 sccm olarak sabit tutulmuştur.

4.2.1. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi

Farklı RF güç değerlerinde (50, 75, 100, 125 Watt) saçtırma yöntemi ile edilen InGaN yapısının PANalytical Empyrean X-ışını Kırınım cihazı ile XRD analizi sonuçlarında hekzagonal yapıya sahip olduğu görülmüş olup polikristal yapı mevcuttur. Örgü sabitleri $a=b=3,33 \text{ Å}$, $c=5,39 \text{ Å}$ değerlerine sahiptir, üç belirgin piki olup en şiddetli pik (100) yöneliminde görülmüştür. Elde edilen sonuçlara ait büyütme parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Büyütülen numunelerin kalınlıkları büyütme sistemi esnasında kalınlık ölçer sensörü yardımıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca profilometre yardımıyla da büyütme sonrası film kalınlıkları teyit edilerek, tüm elde edilen filmlerin kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı RF gücü değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri

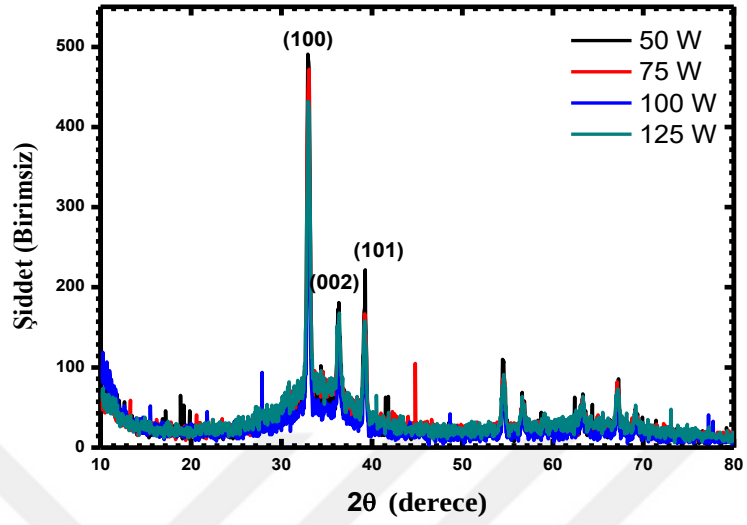
RF Gücü (Watt)	Büyütme Sıcaklığı (C°)	Vakum Basıncı (Torr)	Çalışma Basıncı (Torr)	Büyütme Oranı (Å/s)	Büyütme Süresi (dakika)	Argon Gaz Akış Miktarı (sccm)	Azot Gaz Akış Miktarı (sccm)
50	500	1.3×10^{-6}	1.4×10^{-2}	0.1	280	100	0
75	500	9.2×10^{-7}	1.4×10^{-2}	0.1	149	100	0
100	500	9.8×10^{-7}	1.4×10^{-2}	0.1	136	100	0
125	500	9.4×10^{-7}	1.4×10^{-2}	0.1 – 0.2	109	100	0



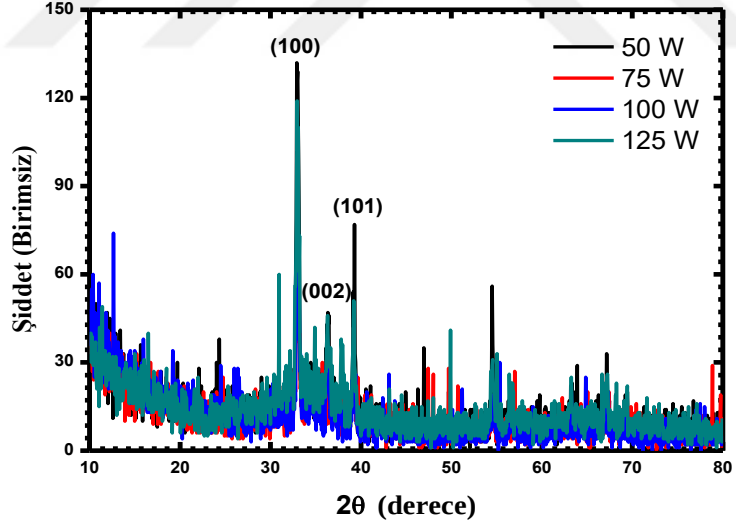
Şekil 4.1. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

RF gücü değişiminin etkisi elde edilen grafiklerden görülmektedir. Şekil 4.1, 4.2, 4.3’de n-Si ve p-Si altlıklar için 50 W ve 75 W RF gücünde büyütülen InGaN ince filminin daha büyük şiddette olduğu görülürken, safir altlık içinse 50 W ve 125 W RF gücünde büyütülen InGaN ince filminin daha büyük şiddette olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2’de InGaN ince filmlerin silisyum altlık üzerine RF saçırma yöntemi ile büyütülen filmin XRD kırınım desenlerinden elde edilen yapısal özelliklerini belirten parametrelerinden görüldüğü gibi hekzagonal InGaN yapısı oluşmuştur.



Şekil 4.2. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



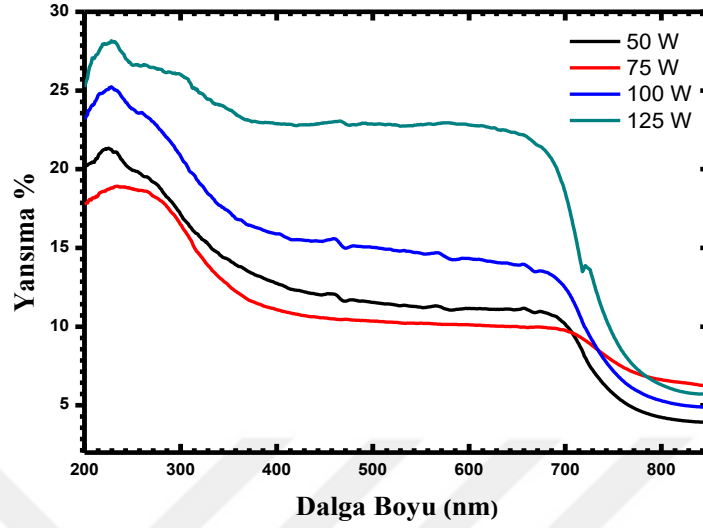
Şekil 4.3. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

Çizelge 4.2. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım desenlerinden elde edilen yapısal özelliklerini belirten parametreler

	Okunan $2\theta^\circ$	(hkl)	FWHM	d-değeri (Å)	Kristal sistemi	Örgü sabitleri	Referans kodu
50 W	32.90	100	0.417	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	36.35	002	0.572	2.69	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	39.25	101	0.443	2.54	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
75 W	33.05	100	0.468	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	36.30	002	0.595	2.69	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	39.20	101	0.519	2.54	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
100 W	33.05	100	0.443	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	36.35	002	0.440	2.69	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	39.20	101	0.494	2.54	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
125 W	32.95	100	0.468	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	36.40	002	0.777	2.69	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	39.20	101	0.466	2.54	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099

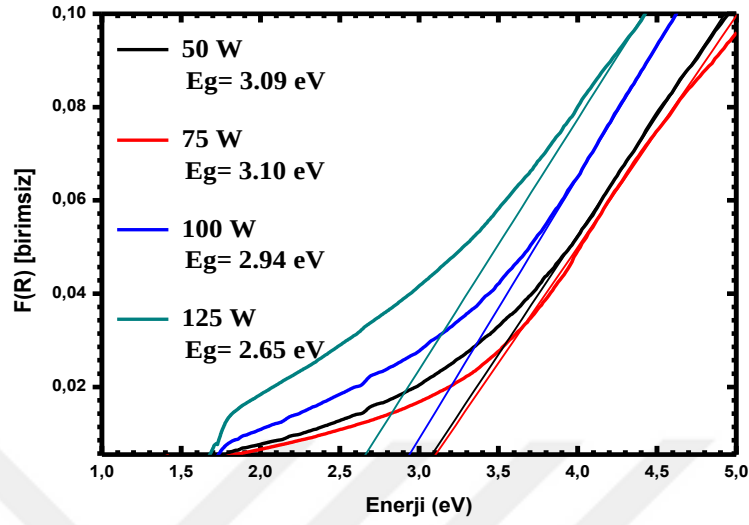
4.2.2. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi

Yarıiletkenlerin optik soğurma aralığı ve yasak enerji aralığını belirlemede en çok kullanılan yöntemlerden birisi soğurma ölçüm metodudur. n-Si (111), p-Si (100) ve safir (0001) altlıklar üzerindeki ince filmlerin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında UV/Visible spektrometresi yardımıyla alınmıştır. Kullanılan spektrometrik ölçüm aralığı 200–900 nm dir. Yapılan ölçümlerde malzemeye ait soğurma, yansıma ve yasak enerji aralığı dalga boyuna karşılık elde edildi.



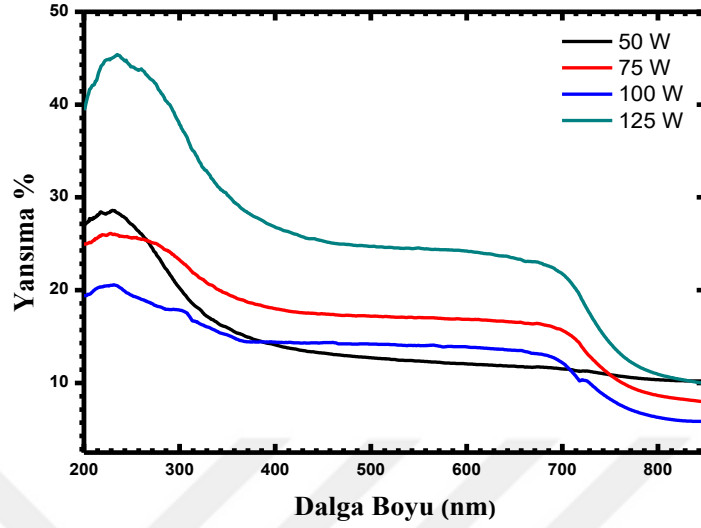
Şekil 4.4. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Şekil 4.4’de dalga boyuna karşı yansımaya grafiğinden görüldüğü gibi 125 W RF gücünde n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin daha büyük dalga boylarında yansımaya vermeye başladığı görülmektedir. Bu durum yasak enerji aralığının düşük olduğunu göstermekte olup Şekil 4.5’te verilen $F(R)$ ’ye karşı enerji grafiği ile de uyumludur. Çok daha küçük dalga boylarında soğurmaya başlayan 50 W ve 75 W RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filmleri ise daha geniş yasak enerji aralığına sahiptir. RF gücü etkisinin soğurma ve yansımaya grafikleri ile yasak enerji aralığı değerlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

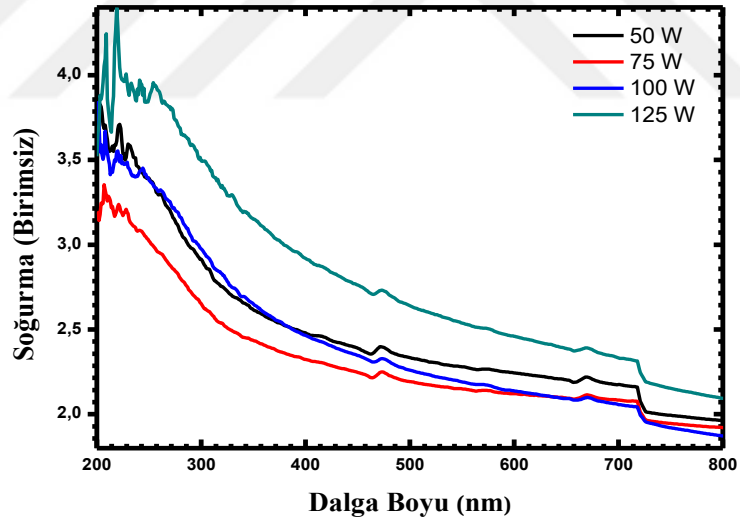


Şekil 4.5. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği

Şekil 4.6'da verilen grafikte p-Si altlık üzerine farklı RF gücü değişimlerinde büyütülen InGaN filminin 125 W RF gücünde daha büyük dalga boylarında yansıma vermeye başladığı görülmektedir. 100 W RF gücünde büyütülen film ise düşük dalga boylarında düşük yansıma verirken, 400-700 nm aralığında ise bir miktar yüksek yansıma değerine ulaşmış olsa da 200 nm dalga boyu sınırında yine en düşük yansıma değerine sahip film olarak görülmektedir.



Şekil 4.6. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği



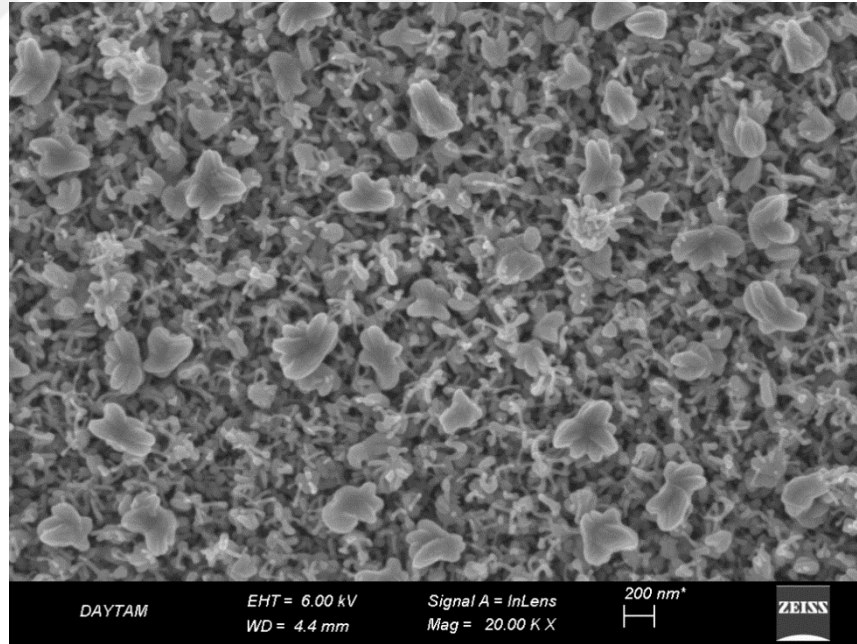
Şekil 4.7. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği

Şekil 4.7’de verilen grafikte safir altlık üzerine farklı RF gücü değişimlerinde büyütülen InGaN filminin silisyum altlıklarda olduğu gibi 125 W RF gücünde daha büyük dalga boylarında soğurmaya başladığı görülmektedir. 75 W RF gücünde büyütülen filmin ise düşük dalga boylarında soğurmaya sahip olduğu görülmektedir.

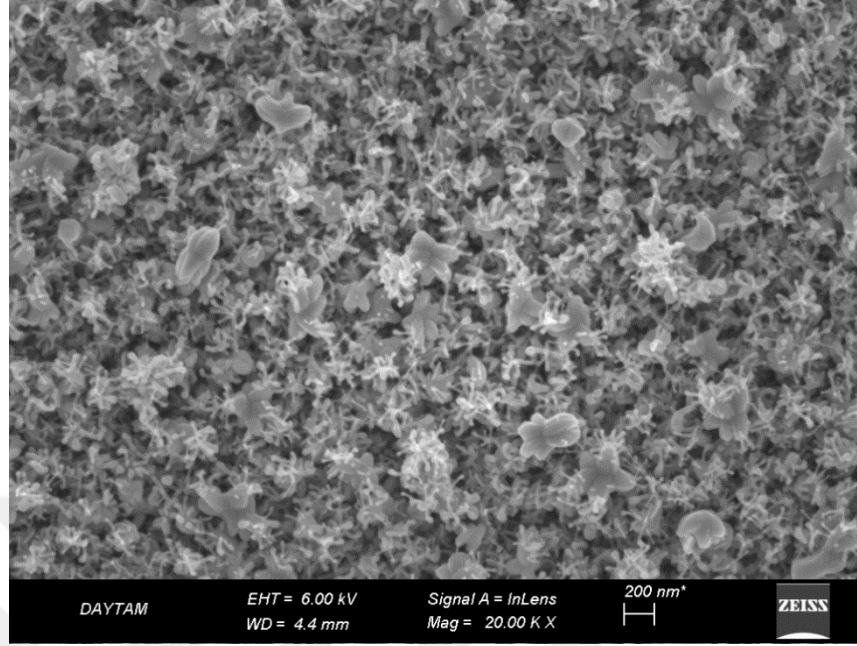
Soğurma ölçümleri incelendiğinde her üç altlık için de 125 W değerinde büyütülen filmlerin yüksek soğurma ve yansımaya değerlerine sahip olduğunu görmekteyiz.

4.2.3. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi

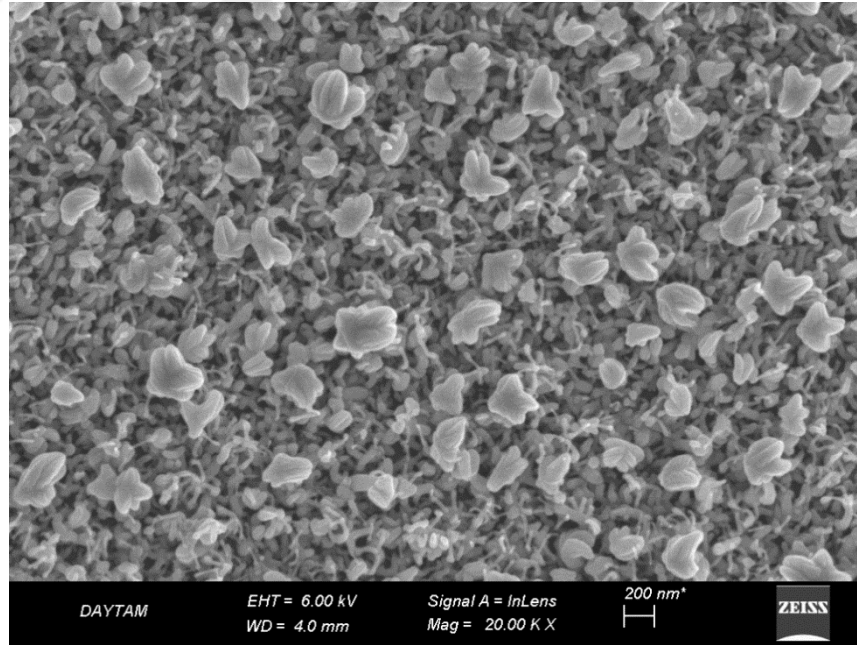
Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10’da 100 W RF gücünde sırasıyla n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 4.4 mm çalışma mesafesinde 200.000 büyütmede 200 nm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey görüntüleri filmlerin homojen nanoboyutlu tanecikleri ile kompakt ve pürüzsüz bir yüzey olduğunu göstermektedir. Ayrıca daha büyük boyutlu taneciklerin, küçük boyutlu tanecikler üzerinde biriktiği görülmektedir. SEM sonuçları, farklı RF gücü değişimlerinde InGaN filmlerinin büyümesinin, optoelektronik uygulamalara fayda sağlayabilecek iyi yüzey morfolojileri sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.8. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.9. RF saçırma yöntemi ile p-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



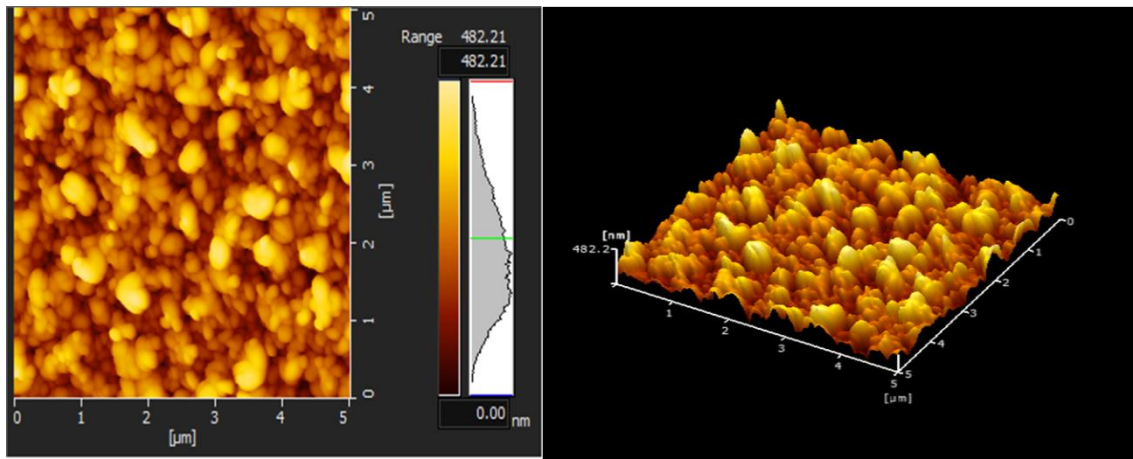
Şekil 4.10. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

4.2.4. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi

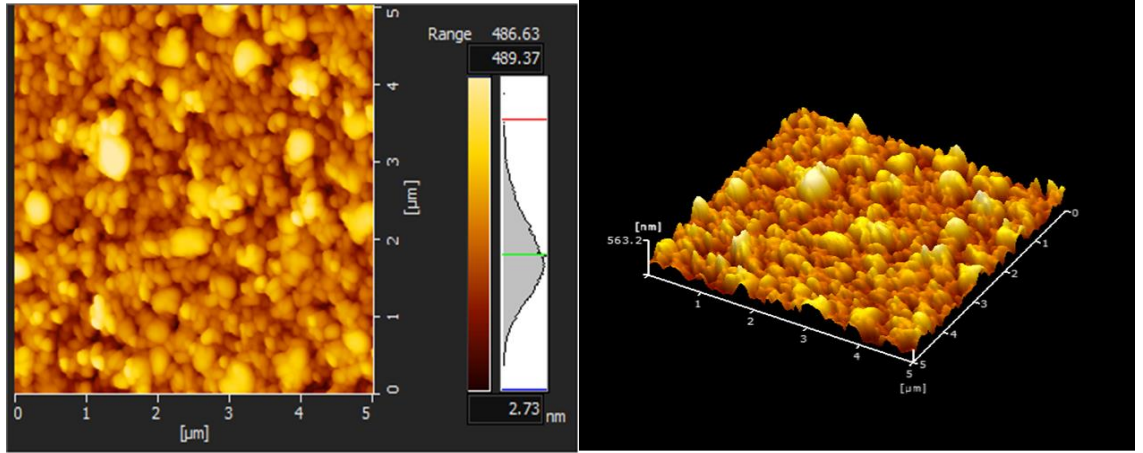
Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14’de RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde yer yer tepecikler oluşmuş olup, topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir.

RF güç değerleri karşılaştırıldığında güç değeri arttıkça yapının daha sıkı ve iç içe geçmiş taneciklerden oluştuğu ve filmin yüzeyinin daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.3’de verildiği gibi çizgi boyu pürüzlülük değeri ile ortalama pürüzlülük değerinin RF gücü artması ile azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde çukur ve tepeciklerin değerlerinde de azalma görülmektedir. Bu durum yapının var olan ince uçlu sivri yapısının ortadan kalktığı ve yapının yüzeyinde yığılmalara benzer daha sıkı bir yapı olduğu anlaşılmaktadır.

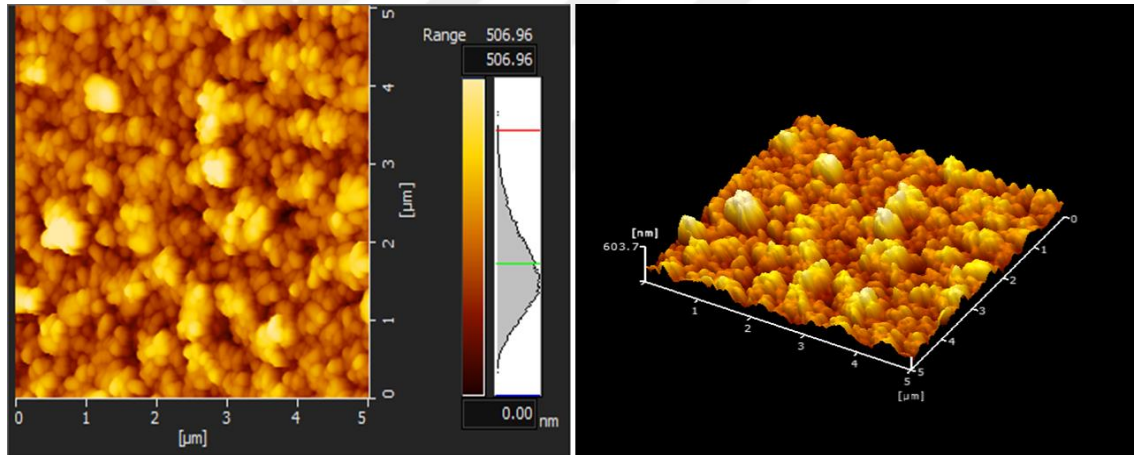
Benzer sonuçların Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18’de safir altlık üzerine büyütülen InGaN filmler içinde söylenebilmesi mümkündür.



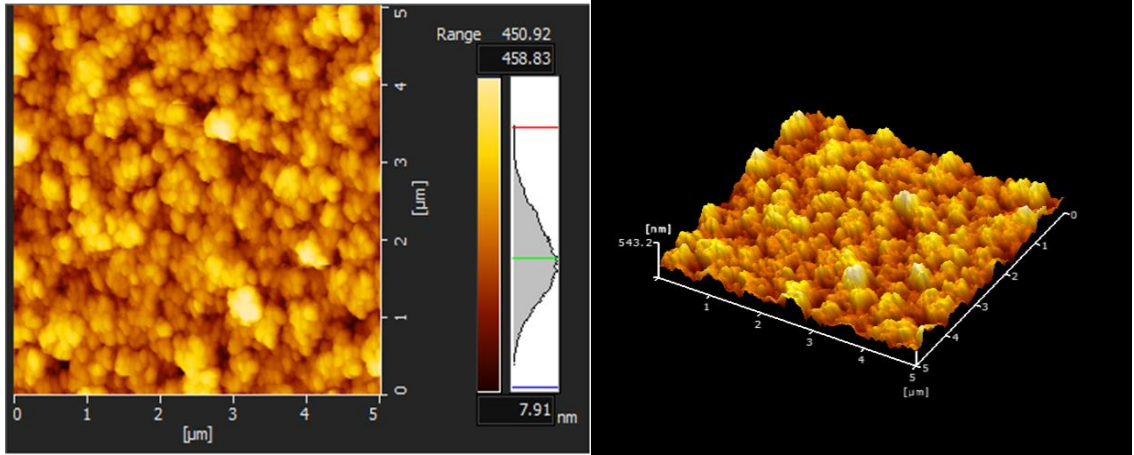
Şekil 4.11. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 50 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



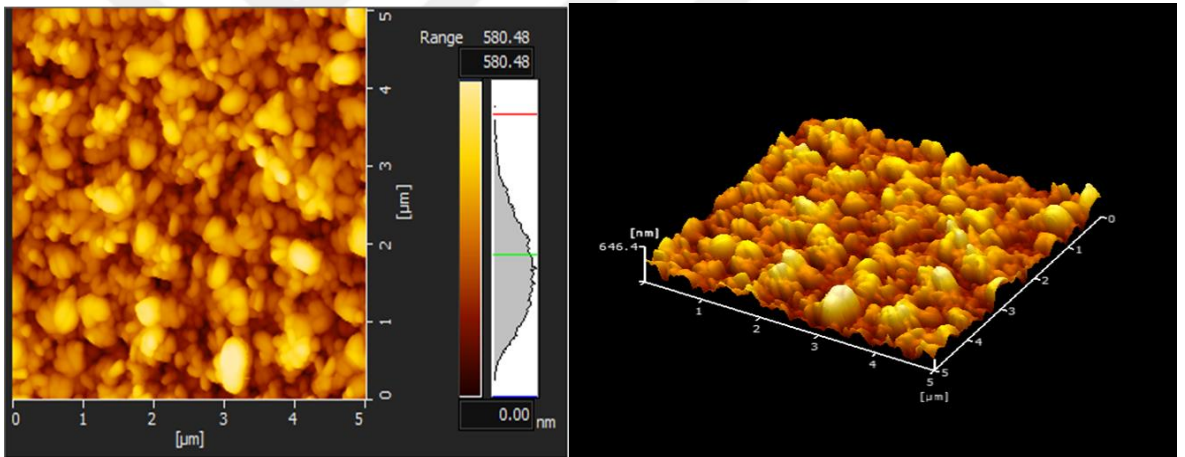
Şekil 4.12. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 75 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



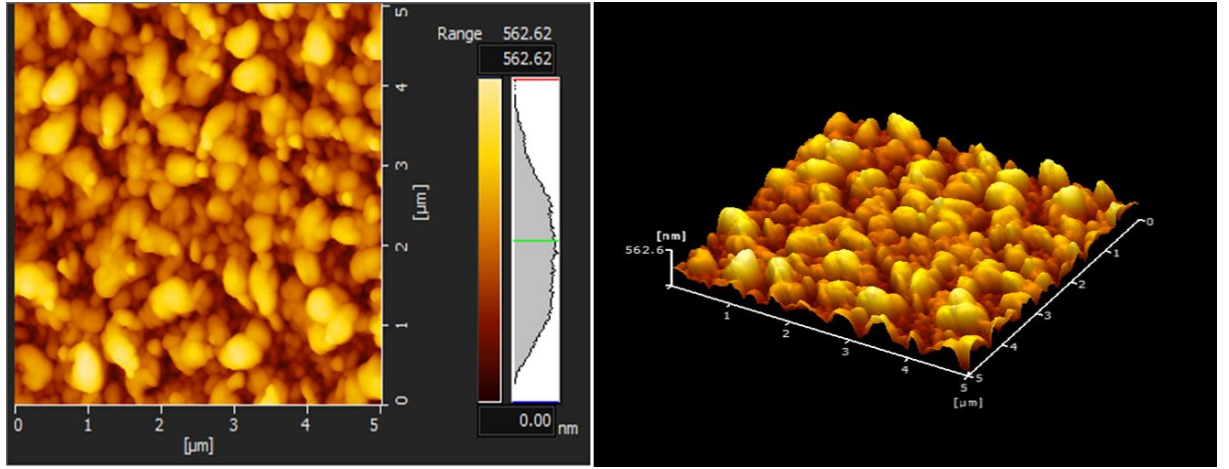
Şekil 4.13. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



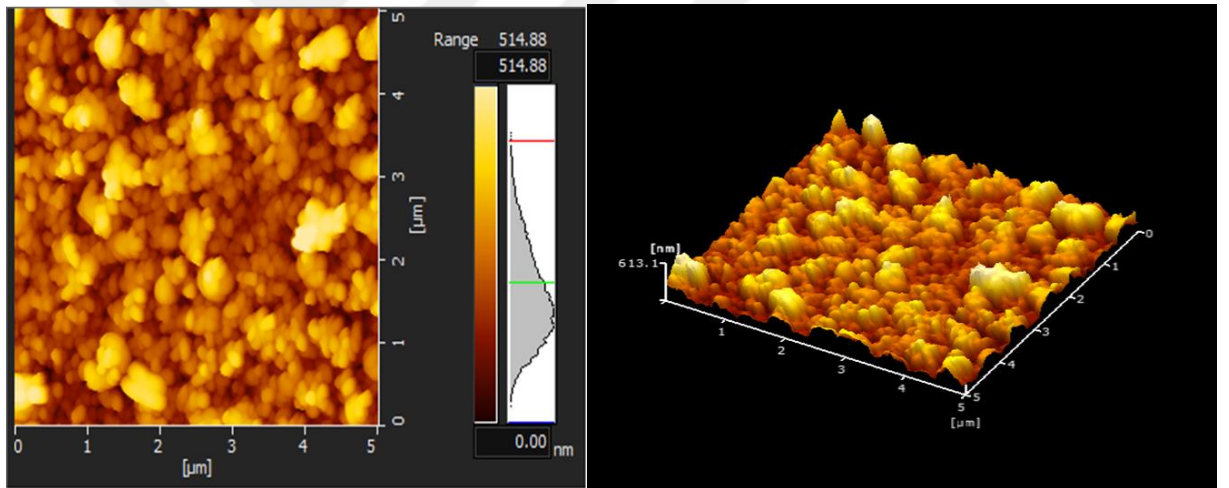
Şekil 4.14. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



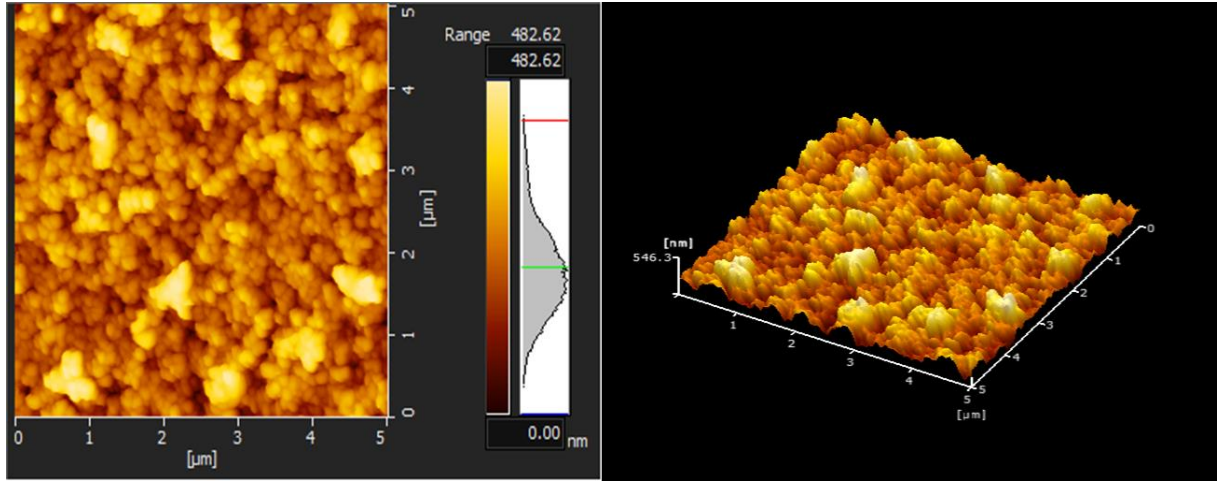
Şekil 4.15. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 50 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.16. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 75 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.17. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.18. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 43.28 nm – 78.71 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptir. 125 W p-Si altlık üzerine büyütülen filmde skewness değeri negatif olarak elde edilmiştir. Bu durum filmin yüzeyinde çukurların tepelerden daha fazla baskın olduğu anlamına gelmektedir. Diğer tüm filmler için skewness değerleri pozitif olduğundan yüzeylerde tepeler çukurlardan daha baskın olmaktadır.

Çizelge 4.3. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

n-Si(111)/InGaN	50 W	75 W	100 W	125 W
Çizgisel pürüzlük (Ra)	66.40	54.61	58.50	50.04
Ortalama pürüzlük (Rq)	82.18	66.85	69.77	60.68
Tepe (Rp)	161.50	137.60	126.50	138.70
Çukur (Rv)	183.00	164.10	172.50	140.80
Tepe - Çukur (Rt)	344.50	301.70	299	279.50
Skewness (Ssk)	1.22	2.01	1.39	1.56
Kurtosis (Skr)	24.64	56.30	28.06	31.22

Çizelge 4.4. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

p-Si(100)/InGaN	50 W	75 W	100 W	125 W
Çizgisel pürüzlük (Ra)	62.21	48.76	43.28	55.46
Ortalama pürüzlük (Rq)	74.06	58.73	50.03	77.05
Tepe (Rp)	150.00	131.60	114.80	275.50
Çukur (Rv)	168.10	157.50	90.70	147.70
Tepe - Çukur (Rt)	318.10	289.10	205.50	423.20
Skewness (Ssk)	0.22	0.25	2.00	-0.02
Kurtosis (Skr)	1.04	2.02	64.07	1.61

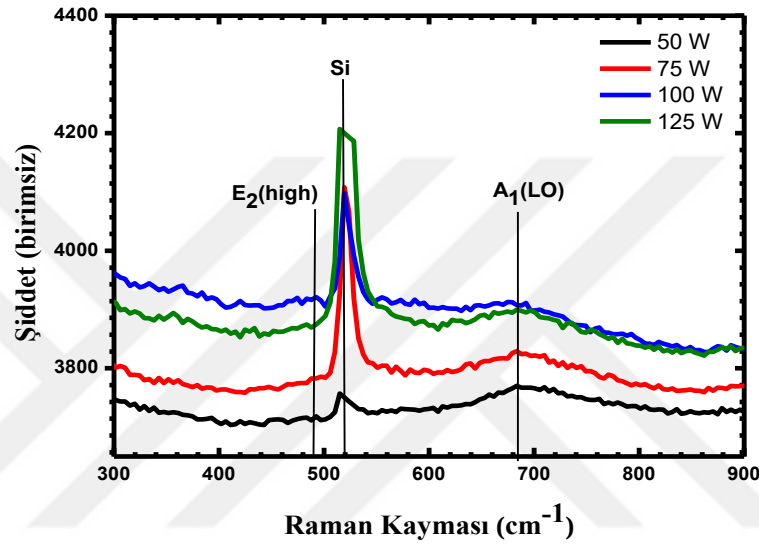
Çizelge 4.5. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

Safir(0001)/InGaN	50 W	75 W	100 W	125 W
Çizgisel pürüzlük (Ra)	78.71	61.24	73.71	43.33
Ortalama pürüzlük (Rq)	100.00	78.34	88.61	57.61
Tepe (Rp)	262.10	145.50	188.20	170.20
Çukur (Rv)	178.10	218.80	163.20	142.40
Tepe - Çukur (Rt)	440.20	364.30	351.40	312.60
Skewness (Ssk)	1.17	0.23	2.42	0.93
Kurtosis (Skr)	27.93	0.81	73.63	26.20

4.2.5. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi

InGaN üçlü bileşiğinde optik fononlar tek mod davranışı sergilemektedir. Boyuna (LO) ve enine optik (TO) fononlar tek bir set oluşturmaktadır. Yani InN ve GaN arasındaki frekans doğrusal bir bağlılık göstermektedir. Bu durumda InGaN bileşiğine ait optik fonon modları $A_1(LO)$ ve $E_2(high)$ olmaktadır. Farklı RF güç değerlerinde p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.19'a bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. Bu piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(high)$ moduna ait pik (yaklaşık 490 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan $A_1(LO)$ moduna ait pik ise yayvan bir şekilde görülmekte olup $670\text{-}720\text{ cm}^{-1}$ aralığında oluşmuştur. Bu aralığın her bir RF gücü değerinde farklı olmasının sebebi büyütülen filmlerdeki In oranının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu piklerin daha yayvan ve şiddetinin düşük olması polikristal yapının oluşmasından kaynaklı olduğu

düşünülmektedir. RF gücünün artırılması ile büyütülen ince filmlerde Raman piklerinin şiddetinin daha fazla olduğu görülmektedir. Raman spektrumunda, $A_1(LO)$ ve $E_2(high)$ fonon modları gözlemlenmekte olup, bu çalışmada elde edilen InGaN filminin, XRD sonuçlarıyla tutarlı olan hekzagonal yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



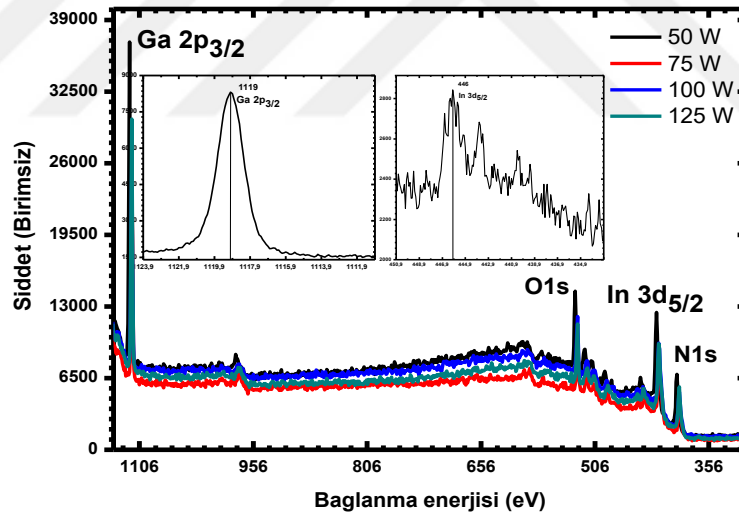
Şekil 4.19. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği

4.2.6. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XPS analizi

XPS incelenen yüzeylerin elementel ve kimyasal hal bilgisinin analizi için kullanılır. Yüzeyden 10 nm derinde elementel ve kimyasal hal analizi yapılabilinmektedir. İncelenen numunenin kimyasal bağlara katılmış iyonlarını ve bağ enerjilerini tespit edebilmektedir. Bu analiz sonuçları Şekil 4.20 ve Çizelge 4.6’da verilen sonuçlar ile yorumlanmıştır. Çizelge 4.6’da elde edilen In, Ga, N ve O elementlerine ait orbitallere göre bağlanma enerjisi değerleri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.6’da elementlerin bağ yaptığı orbital, pik şiddetini ve yapıdaki elementlerin atomik yüzdesi verilmiştir.

Yüzey kirliliğinin boyutunu incelemek için, InGaN filmleri XPS ile analiz edildi. İncelenen InGaN ince filminin, farklı RF güçlerinde biriktirilen genel XPS tarama eğrileri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Spektrumdan Ga, N, In ve O da dâhil olmak üzere

dört çeşit element, hem yüzeyde hem de InGaN filmi içerisinde gözlemlenmektedir. Göreceli olarak yüksek yoğunluklu O-ilişkili XPS (O1s) özelliği ile belirtildiği gibi, büyütülen InGaN filmlerin yüzeyi önemli derecede oksitlenmiştir. Burada oksijen yüzdelik verileri azot elementi içerisine dahil edilerek verilmiştir. Burada asıl gözlemlenmek istenen In ve Ga elementleridir. Ayrıca büyütülen InGaN filmlerin kimyasal durumları da XPS ile incelendi. Bu analiz için Şekil 4.20'de gösterildiği gibi O (1s), In (3d_{5/2}), Ga (2p_{3/2}) ve N (1s) fotoelektron pikleri seçildi. Ga (2p_{3/2}) spektrumunun geniş spektral özellikleri sadece 1119 eV bağlama enerjisindeki GaN fazındaki Ga-N bağı olan bir keskin pik noktasından ayrılabilir. Şekil 4.20'de gösterilen In (3d_{5/2}) fotoelektron hattı ise birden fazla karmaşık piklere ayrılmıştır, en şiddetli pik ise In-N bağında 446 eV bağlama enerjisine ile gösterilmektedir, diğer piklerin ise yapıdaki In-O bağı ya da In-In metalik bağına karşılık gelebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.20. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XPS analizi

Şekil 4.20'de ve Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminde 50 W RF gücü için var olan elementlerden In (3d_{5/2}) bağlama enerjisi 446 eV, Ga (2p_{3/2}) elementinin bağlama enerjisi 1119 eV tur. N elementine ait 1s orbitali bağlama enerjisi ise 398 eV tur.

Çizelge 4.6. Bileşiklerdeki elementlerin bağ yaptığı orbital, bağlanma enerjileri, pik şiddetleri ve yapıdaki atomik yüzdeleri

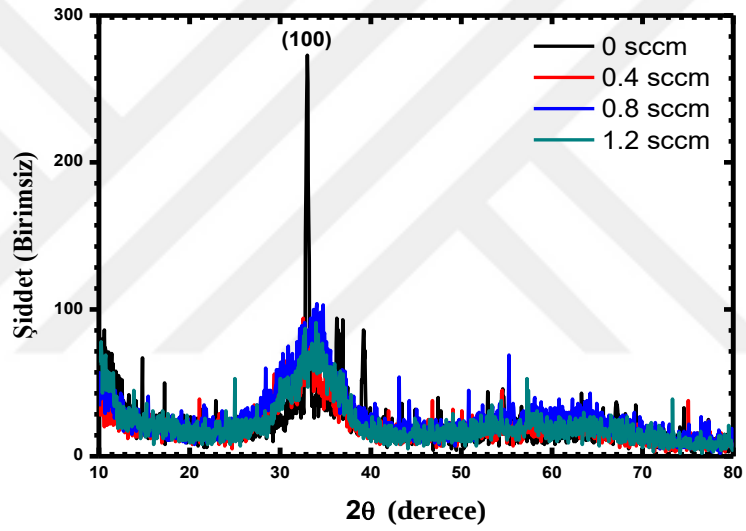
	Elementler ve Orbitaller	Bağlanma enerjisi (eV)	Pik Şiddetleri	Atomik yüzdeler (%)
50 W	In (3d _{5/2})	446	12486.52	2.33
	Ga (2p _{3/2})	1119	37243.59	24.07
	N (1s)	398	6973.71	73.60
75 W	In (3d _{5/2})	440	8228.17	4.37
	Ga (2p _{3/2})	1116	25070.89	26.01
	N (1s)	395	4583.36	69.62
100 W	In (3d _{5/2})	443	9787.95	3.60
	Ga (2p _{3/2})	1116	25876.17	20.65
	N (1s)	395	5369.78	75.75
125 W	In (3d _{5/2})	442	9906.72	3.20
	Ga (2p _{3/2})	1116	30110.68	23.38
	N (1s)	395	5887.15	73.42

4.2.7. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi

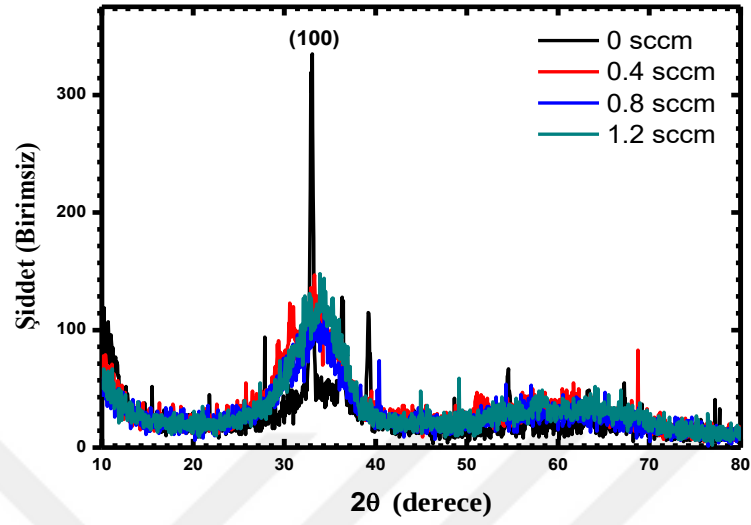
Değişen azot gazı akış miktarlarında (0, 0.4, 0.8, 1.2 sccm) saçırma yöntemi ile edilen InGaN yapısının XRD analizi sonuçlarında dentritik yapıya sahip olduğu görülmüş olup yayvan pikler elde edilmiştir. Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23’den görüleceği üzere azot gazı akış oranı büyüdükçe elde edilen filmlerin hekzagonal kristal yapısı bozulmakta olup dentritik bir yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Elde edilen XRD sonuçlarını SEM görüntüleri de desteklemektedir. Elde edilen sonuçlara ait büyütme parametreleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Büyütülen numunelerin kalınlıkları büyütme esnasında sistem üzerindeki kalınlık ölçer sensörü yardımıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca profilometre yardımıyla da büyütme sonrası film kalınlıkları teyit edilerek, tüm elde edilen filmlerin kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.7. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri

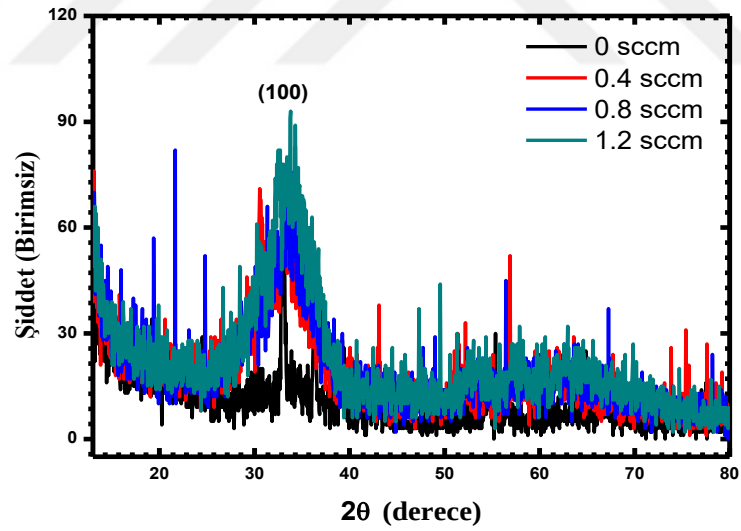
Azot Gaz Akış Miktarı (sccm)	Büyütme Sıcaklığı (C°)	Vakum Basıncı (Torr)	Çalışma Basıncı (Torr)	Büyütme Oranı (Å/s)	Büyütme Süresi (dakika)	Argon Gaz Akış Miktarı (sccm)	RF gücü (Watt)
0	500	9.8×10^{-7}	1.4×10^{-2}	0.1	136	100	100
0.4	500	1.2×10^{-6}	1.4×10^{-2}	0.1	143	100	100
0.8	500	1.0×10^{-6}	1.4×10^{-2}	0.1	138	100	100
1.2	500	9.5×10^{-7}	1.4×10^{-2}	0.1	138	100	100



Şekil 4.21. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



Şekil 4.22. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

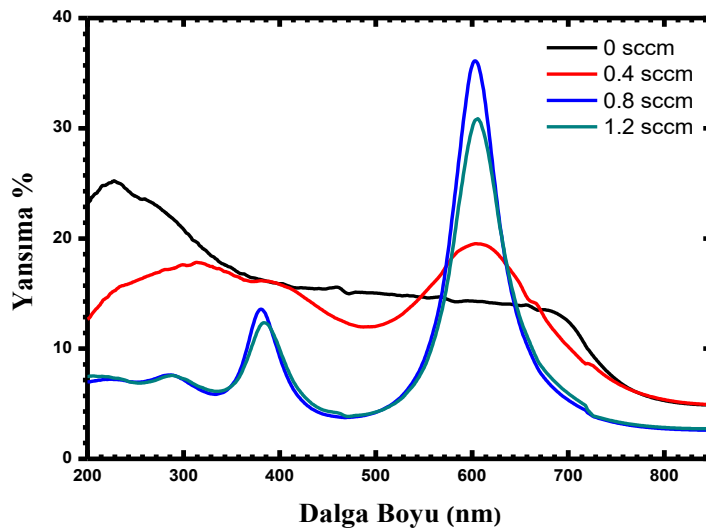


Şekil 4.23. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

4.2.8. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi

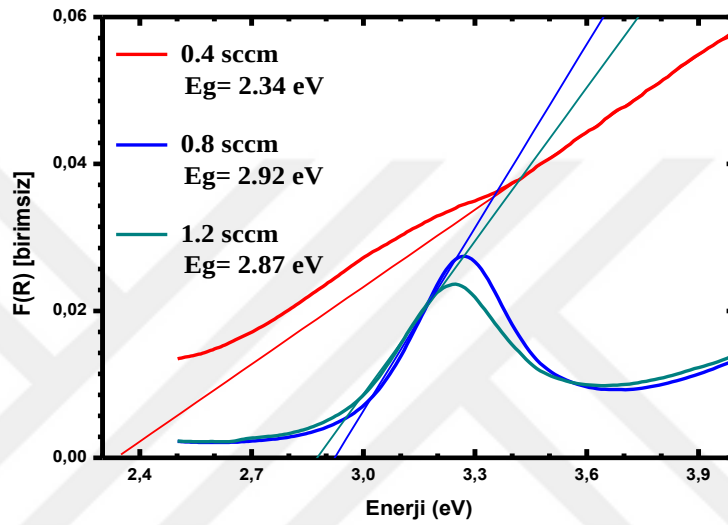
n-Si (111), p-Si (100) ve safir (0001) altlıklar üzerindeki ince filmlerin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında UV/Visible spektrometresi yardımıyla alınmıştır. Kullanılan spektrometrik ölçüm aralığı 200–900 nm’dir. Yapılan ölçümlerde malzemeye ait soğurma, yansımaya ve yasak enerji aralığı dalga boyuna karşılık elde edildi.

Şekil 4.24’de dalga boyuna karşı yansımaya grafiğinden görüldüğü gibi 0.8 sccm ve 1.2 sccm azot gazı akış miktarlarında n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin 380 nm ve 600 nm civarında şiddetli ve keskin pikler verdiğini görmekteyiz. Bu durum yansımaya değerlerinin ve yasak enerji aralığının bu azot gazı akış değerlerinde daha yüksek olduğunu göstermekte olup, Şekil 4.25’te verilen $F(R)$ ’ye karşı enerji grafiği ile de uyumludur. 0.4 sccm azot azı akış miktarında ise daha düşük şiddette ve daha yayvan pik elde edildiğini görmekteyiz. Bu durumdaki yasak enerji aralığı daha düşük olmaktadır. Azot gazı akış miktarı etkisinin soğurma ve yansımaya grafikleri ile yasak enerji aralığı değerlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



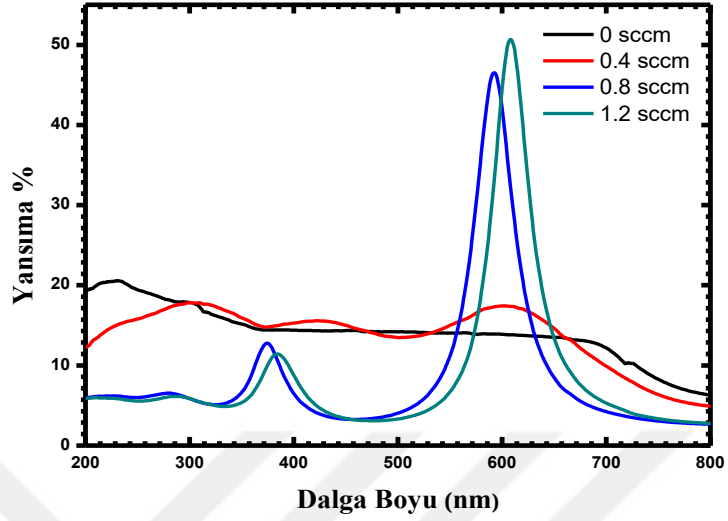
Şekil 4.24. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Azot gazı akış miktarı arttıldığında özellikle 0.4 sccm akış gazından 0.8 sccm akış gazına çıkıldığında büyük oranda bir yasak enerji aralığı artışı görülmektedir. Daha sonra ise 1.2 sccm azot gazı akış oranında bir miktar yasak enerji aralığı değerinde düşüş gözlenmektedir. Ancak bu değişim oranı yeterince büyük değildir.



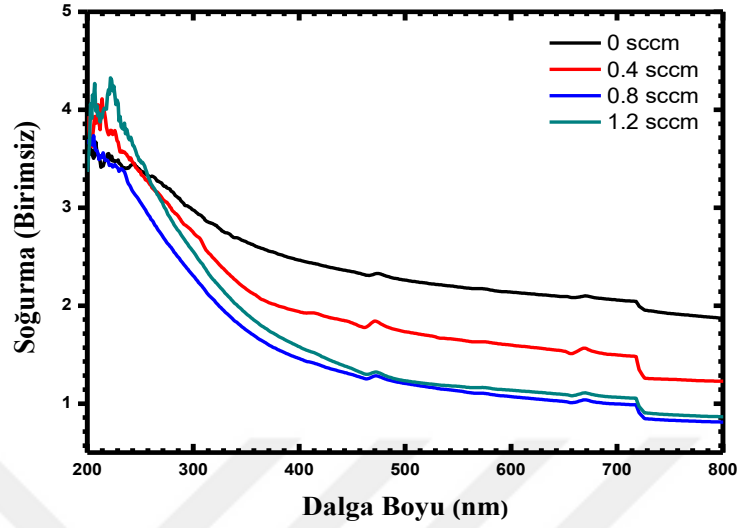
Şekil 4.25. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin $F(R)$ karşı enerji grafiği

Şekil 4.26'da verilen grafikte p-Si altlık üzerine büyütülen filmde de n-Si altlık üzerine büyütülen yapıyla benzer bir yansıma grafiği elde edildiği görülmektedir. Özellikle 0.8 ve 1.2 sccm azot gazı akış oranlarında elde edilen filmlerin 600 nm civarında n-Si altlığa göre daha fazla oranda yansıma değerine sahip olduğunu görmekteyiz.



Şekil 4.26. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

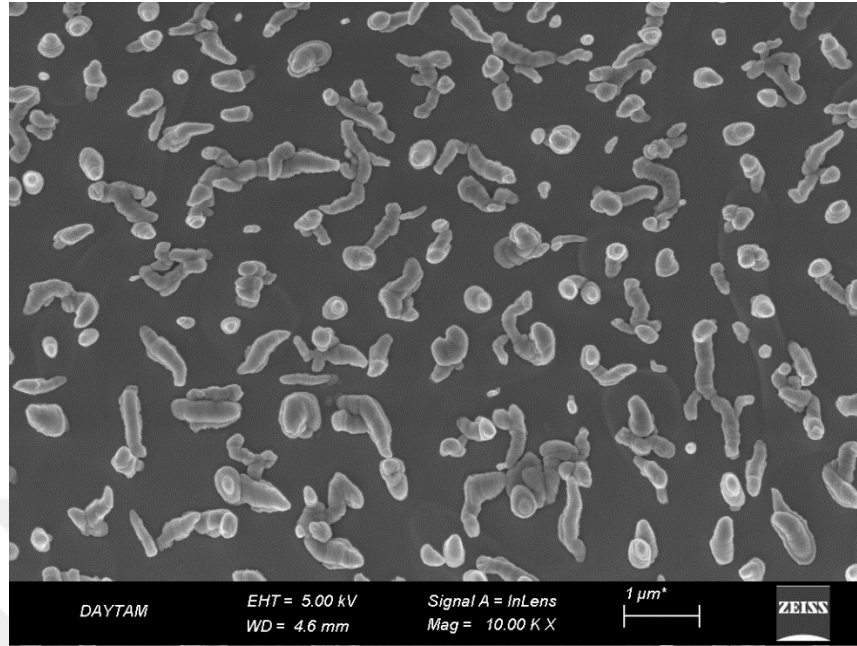
Şekil 4.27’de dalga boyuna karşı soğurma grafiğinden görüldüğü gibi, safır altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin düşük azot gazı akış miktarlarında daha büyük dalga boylarında soğurmaya başladığı görülmektedir. XRD sonuçlarında daha büyük azot gazı akış miktarlarında dentritik yapının elde edildiği ve kristal yapının bozulduğu dikkate alındığında, aynı şekilde azot gazı akış miktarları arttırıldıkça ince filmin soğurma değerlerinin düştüğü görülmektedir.



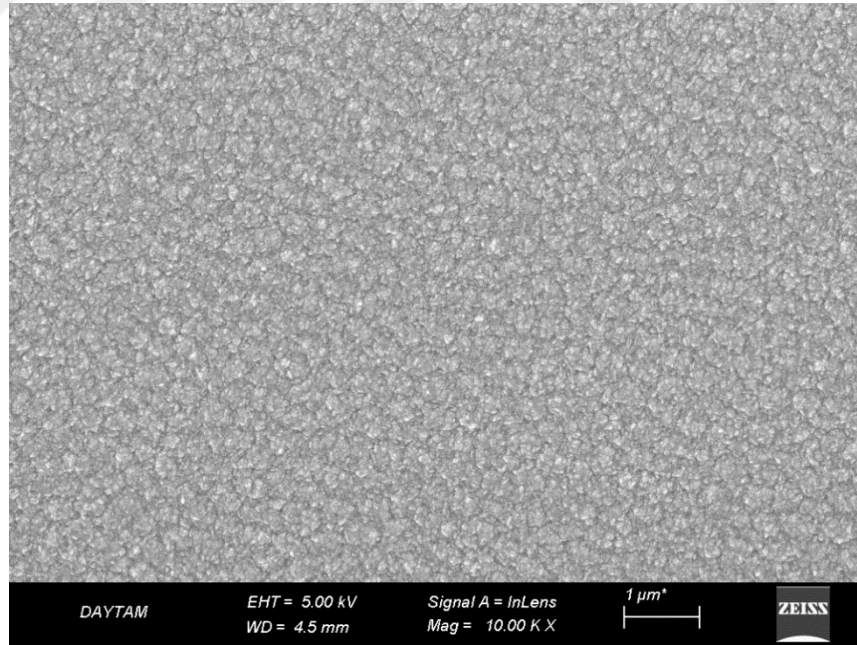
Şekil 4.27. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği

4.2.9. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi

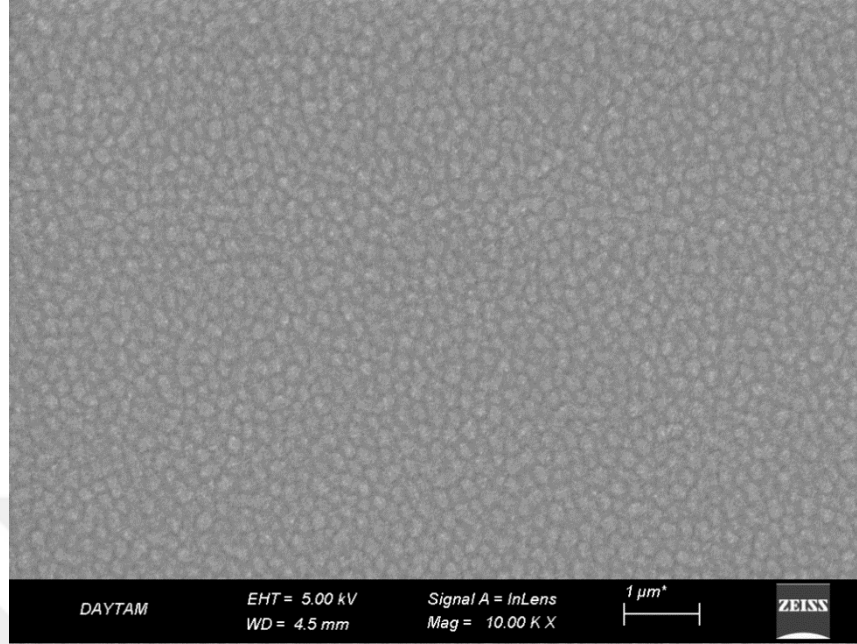
Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da safir altlık üzerine sırasıyla 0.4, 0.8 ve 1.2 sccm azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 4.6 mm çalışma mesafesinde 100.000 büyütmede 1 μ m ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin özellikle 0.4 sccm azot gazı akış miktarında yüzeye düzgün bir şekilde dağılmadığı ve yer yer boşluklar görüldüğü gözlenmektedir. Ayrıca safir altlık da net bir şekilde görülmektedir. Azot gazı akış oranının arttırılması ile dentritik yapının elde edildiği Şekil 4.29 ve 4.30'da görülmektedir.



Şekil 4.28. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 0.4 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.29. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 0.8 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

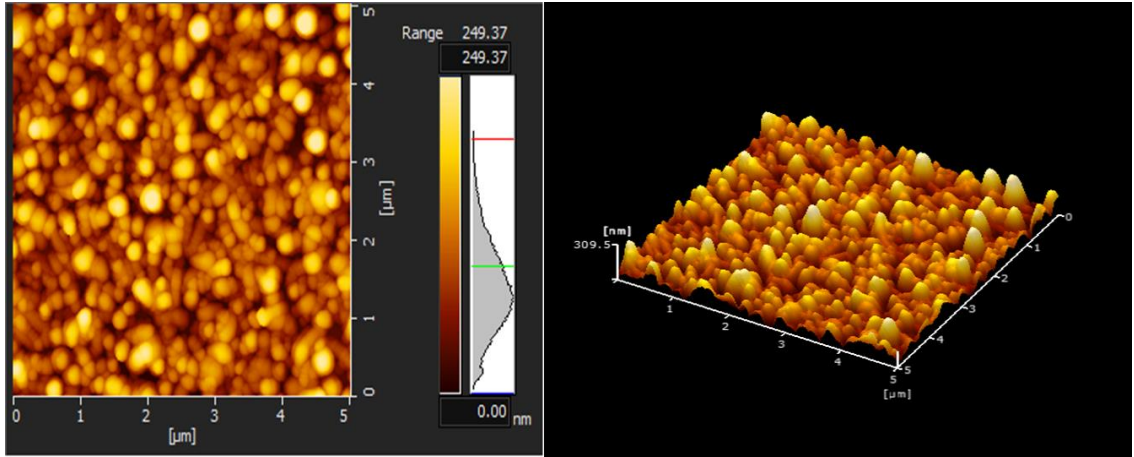


Şekil 4.30. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 1.2 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

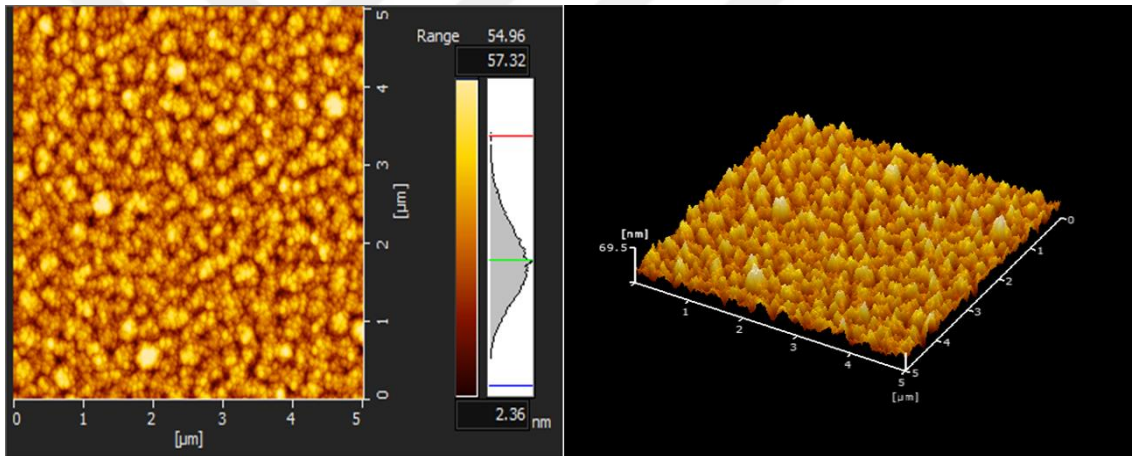
4.2.10. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi

Şekil 4.31’de n-Si altlık üzerine 0.4 sccm azot gazı akış miktarında RF saçtırma yöntemi ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Özellikle safir altlık üzerine Şekil 4.34’te verilen 0.4 sccm azot akış miktarında büyütülen ince filmde ise topaklanmadan ziyade daha sivri yapılar dağınık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Daha yüksek azot gazı akış miktarlarında ise her iki altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminde dentritik yapının var olduğu görülmektedir. Elde edilen AFM görüntüleri XRD ve SEM sonuçlarını destekleyici niteliktedir.

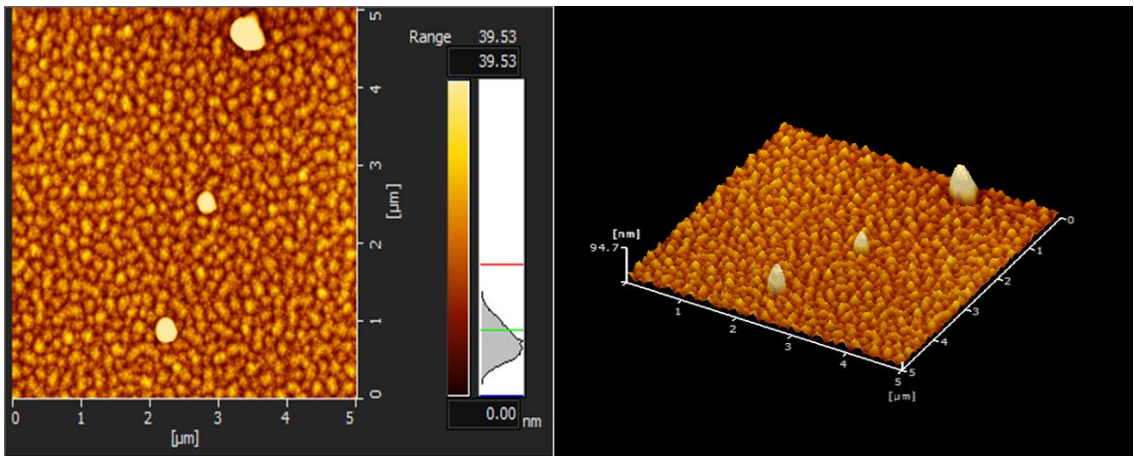
Azot gazı akış miktarları karşılaştırıldığında ve Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10’da verildiği gibi çizgi boyu pürüzlülük değeri ile ortalama pürüzlülük değerinin azot gazı akış miktarı artması ile azaldığı görülmektedir. Bu durum yapının var olan ince uçlu sivri yapısının ortadan kalktığı ve yapının yüzeyinde yığılmalara benzer dentritik bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir.



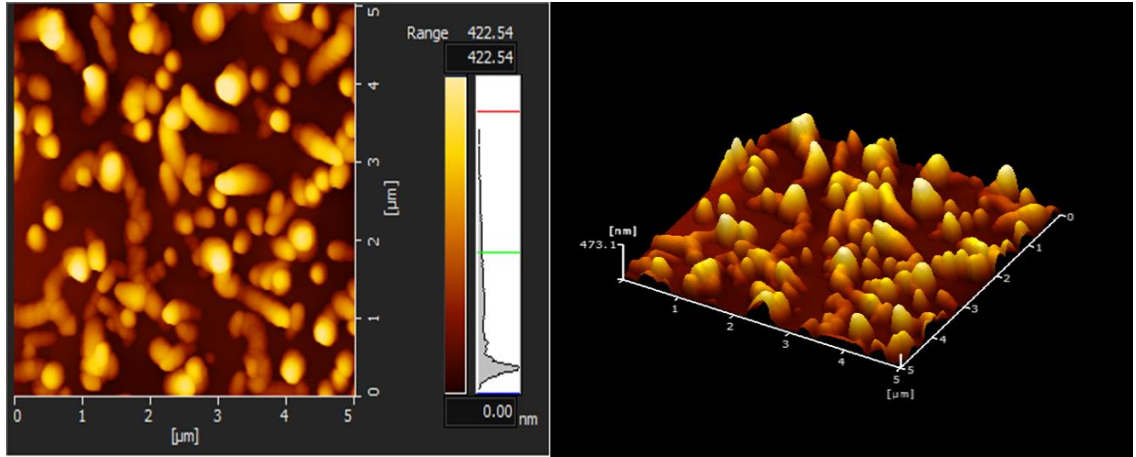
Şekil 4.31. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 0.4 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



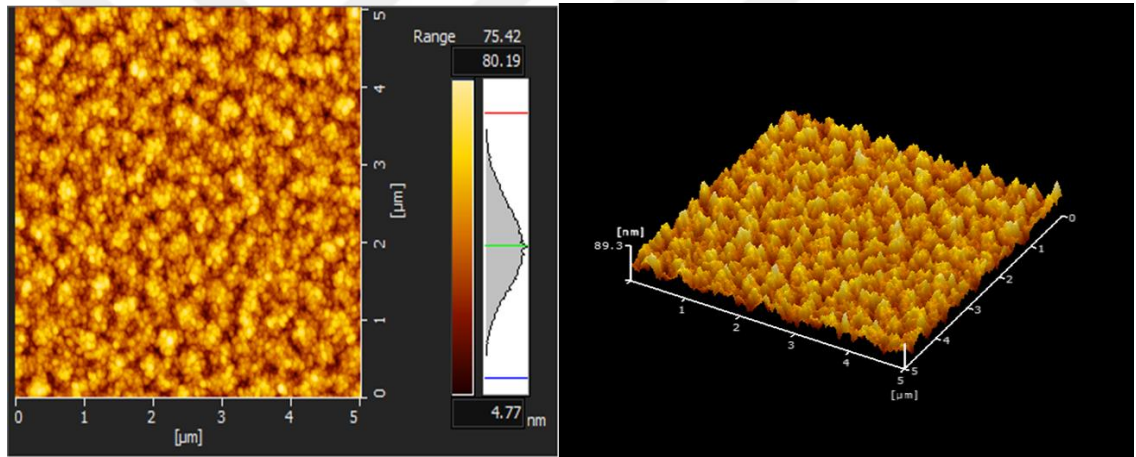
Şekil 4.32. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 0.8 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



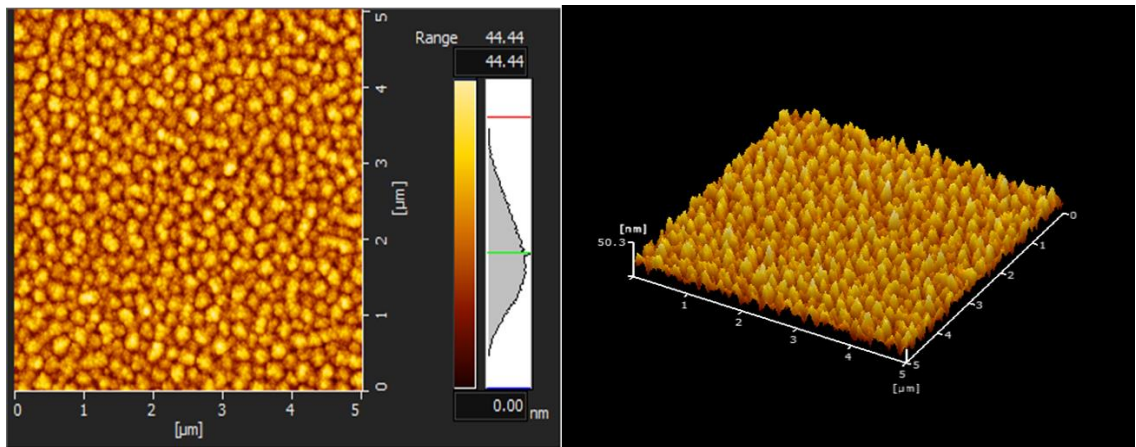
Şekil 4.33. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 1.2 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.34. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 0.4 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.35. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 0.8 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.36. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 1.2 sccm azot akış miktarı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 3.34 nm – 73.71 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahipler. 0,4 sccm azot gazı akış oranında safir altlık üzerine büyütülen filmde skewness değeri negatif olarak elde edilmiştir. Bu durum filmin yüzeyinde çukurların tepelerden daha fazla baskın olduğu anlamına gelmektedir. Diğer tüm filmler için skewness değerleri pozitif olduğundan yüzeylerde tepeler çukurlardan daha baskın olmaktadır.

Çizelge 4.8. RF saçırtma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

n-Si(111)/InGaN	0 sccm	0.4 sccm	0.8 sccm	1.2 sccm
Çizgisel pürüzlük (Ra)	58.50	37.12	6.09	4.33
Ortalama pürüzlük (Rq)	69.77	45.88	7.46	5.26
Tepe (Rp)	126.50	127.00	22.54	15.35
Çukur (Rv)	172.50	101.00	21.00	11.39
Tepe - Çukur (Rt)	299	228.00	43.54	26.74
Skewness (Ssk)	1.39	0.74	1.53	1.63
Kurtosis (Skr)	28.06	13.53	38.18	37.51

Çizelge 4.9. RF saçırtma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

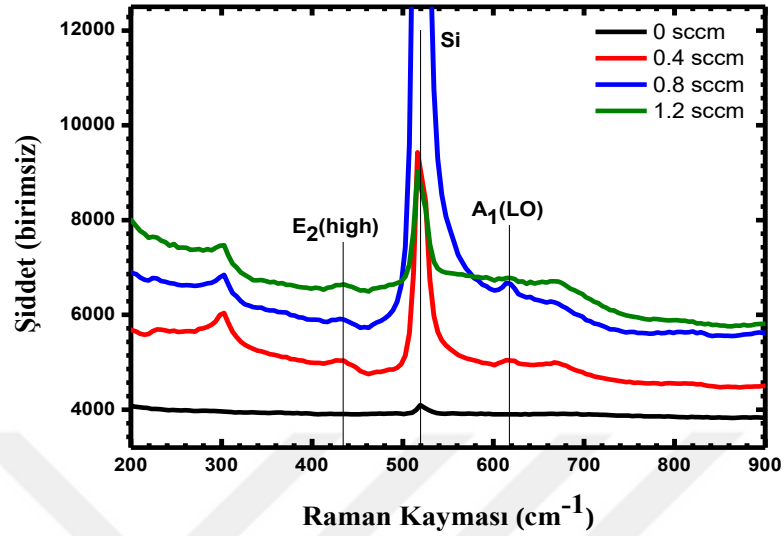
p-Si(100)/InGaN	0 sccm	0.4 sccm	0.8 sccm	1.2 sccm
Çizgisel pürüzlük (Ra)	43.28	31.95	6.39	3.34
Ortalama pürüzlük (Rq)	50.03	39.35	7.93	4.07
Tepe (Rp)	114.80	129.90	20.61	9.51
Çukur (Rv)	90.70	77.10	23.99	7.84
Tepe - Çukur (Rt)	205.50	207	44.60	17.35
Skewness (Ssk)	2.00	0.12	2.20	1.8
Kurtosis (Skr)	64.07	1.31	59.95	38.35

Çizelge 4.10. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

Safir(0001)/InGaN	0 sccm	0.4 sccm	0.8 sccm	1.2 sccm
Çizgisel pürüzlük (Ra)	73.71	42.26	9.13	5.88
Ortalama pürüzlük (Rq)	88.61	53.21	11.03	7.08
Tepe (Rp)	188.20	162.20	26.63	18.30
Çukur (Rv)	163.20	60.55	28.26	16.01
Tepe - Çukur (Rt)	351.40	222.75	54.89	34.31
Skewness (Ssk)	2.42	-0.05	0.40	1.34
Kurtosis (Skr)	73.63	0.29	7.61	61.11

4.2.11. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi

InGaN üçlü bileşiğinde optik fononlar tek mod davranışı sergilemektedir. Boyuna (LO) ve enine optik (TO) fononlar tek bir set oluşturmaktadır. Yani InN ve GaN arasındaki frekans liner bir bağıllık göstermektedir. Bu durumda InGaN bileşiğine ait optik fonon modları $A_1(LO)$ ve $E_2(high)$ olmaktadır. Farklı azot gazı akış değerlerinde p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.37'ye bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. Bu piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(high)$ moduna ait pik (yaklaşık 435 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan $A_1(LO)$ moduna ait pik ise yaklaşık 620 cm^{-1} civarında oluşmuştur. Bu değer hemen hemen tüm azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin tüm Raman değerlerinde aynıdır. Azot gazı değişim miktarının Raman kaymasına etkisi olmamakla birlikte sadece Raman şiddetinde bir değişime sebebiyet verdiği görülmektedir.



Şekil 4.37. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği

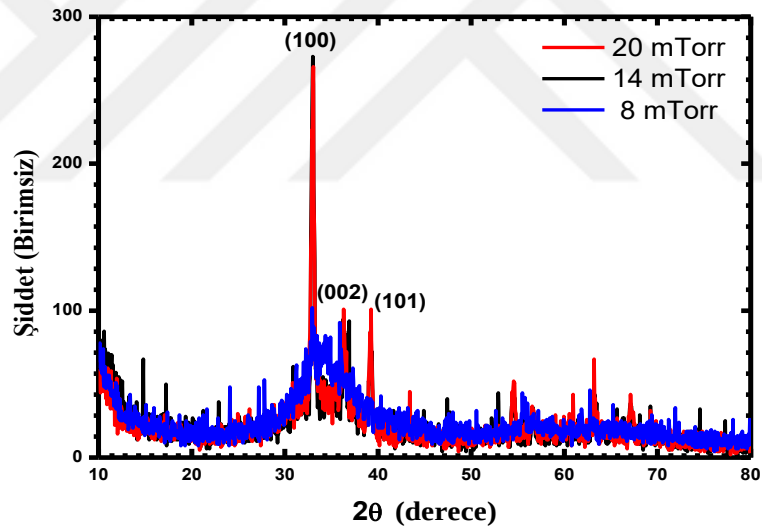
4.2.12. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi

Farklı çalışma basınç değerlerinde (8, 14, 20 mTorr) saçırma yöntemi ile edilen InGaN yapısının XRD analizi sonuçlarında özellikle 14 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınç değerlerinde hegzagonal yapıya sahip olduğu görülmüş olup polikristal yapı mevcuttur. 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN yapısının ise (100) düzlemindeki küçük XRD piki haricinde dentritik yapıda büyüdüğü görülmektedir. Altlık farkları açısından bakıldığında 14 mTorr çalışma basıncında n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN filminin (100) yönelimli XRD pikin daha şiddetli olduğunu görmekteyiz. p-Si altlık üzerine 20 mTorr çalışma basıncında büyütülen InGaN filminin yine aynı yönelimli XRD pikinin ise daha şiddetli olduğunu görmekteyiz. Örgü sabitleri $a=b=3,33 \text{ Å}$, $c= 5,39 \text{ Å}$ değerlerine sahiptir, üç belirgin piki olup en şiddetli pik (100) yöneliminde görülmüştür. Elde edilen sonuçlara ait büyütme parametreleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. 14 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınçları karşılaştırıldığında, artan çalışma basıncı ile XRD piklerinin çok az bir şekilde sola kaydığı görülmektedir. Büyütülen numunelerin

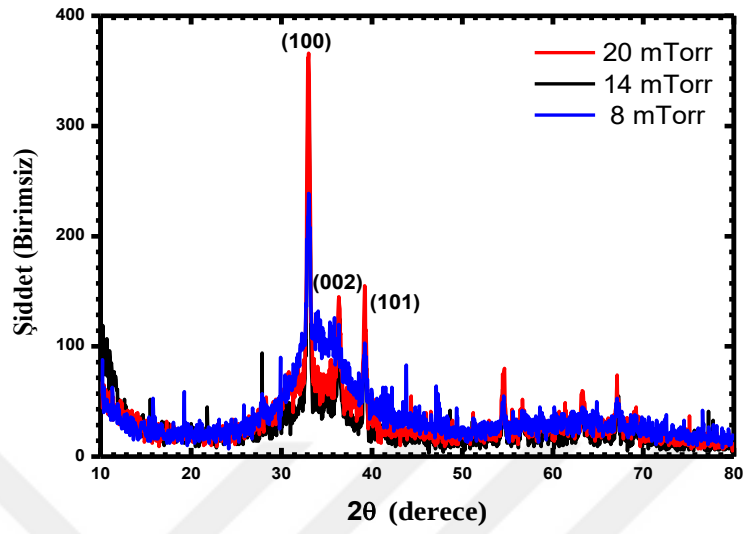
kalınlıkları büyütme sistemi esnasında kalınlık ölçer sensörü yardımıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca profilometre yardımıyla da büyütme sonrası film kalınlıkları teyit edilerek, tüm elde edilen filmlerin kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.11. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri

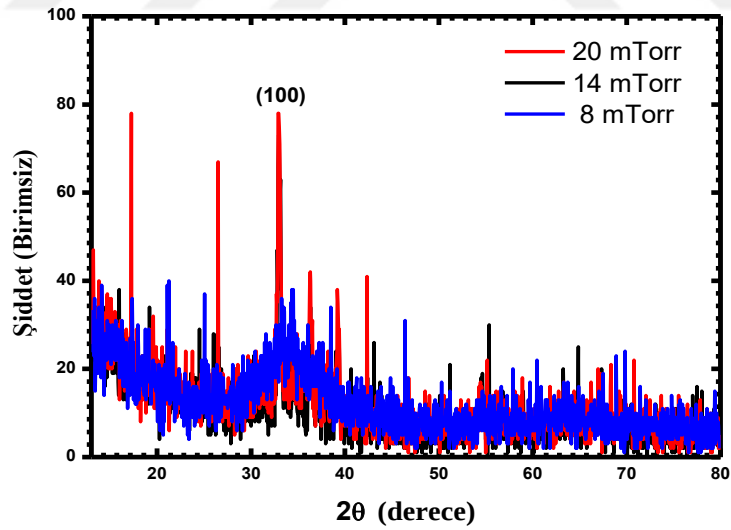
Çalışma Basıncı (Torr)	Büyütme Sıcaklığı (C°)	Vakum Basıncı (Torr)	RF Gücü (Watt)	Büyütme Oranı (Å/s)	Büyütme Süresi (dakika)	Argon Gaz Akış Miktarı (sccm)	Azot Gaz Akış Miktarı (sccm)
8.0×10^{-3}	500	8.4×10^{-7}	100	0.2	99	100	0
1.4×10^{-2}	500	9.8×10^{-7}	100	0.1	136	100	0
2.0×10^{-2}	500	1.2×10^{-6}	100	0.0 - 0.1	198	100	0



Şekil 4.38. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



Şekil 4.39. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



Şekil 4.40. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

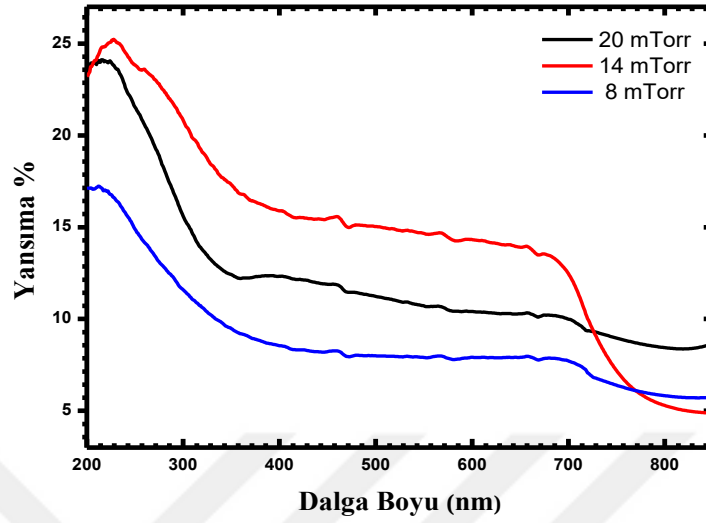
Çizelge 4.12. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım desenlerinden elde edilen yapısal özelliklerini belirten parametreler

	Okunan 2 θ°	(hkl)	FWHM	d-değeri (Å)	Kristal sistemi	Örgü sabitleri	Referans kodu
20 mTorr	33.00	100	0.468	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	36.25	002	0.857	2.69	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	39.20	101	0.466	2.54	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
14 mTorr	33.05	100	0.443	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	36.35	002	0.440	2.69	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	39.20	101	0.494	2.54	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
8 mTorr	33.00	100	0.623	2.88	Hekzagonal	a=b=3.33 c=5.39	01-080-4099
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

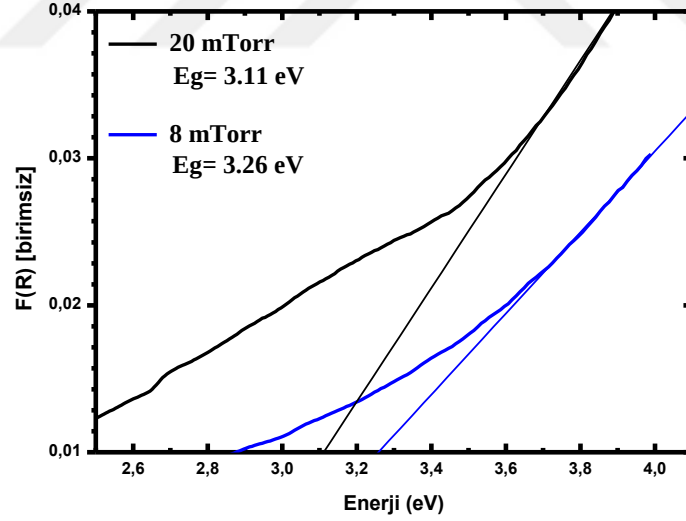
4.2.13. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi

n-Si (111), p-Si (100) ve safir (0001) altlıklar üzerindeki ince filmlerin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında UV/Visible spektrometresi yardımıyla alındı. Kullanılan spektrometrik ölçüm aralığı 200–900 nm’dir. Yapılan ölçümlerde malzemeye ait soğurma, yansıma ve yasak enerji aralığı dalga boyuna karşılık elde edildi.

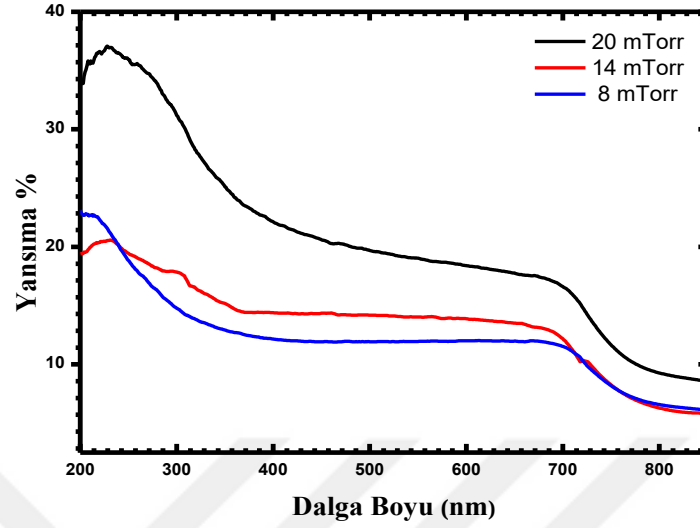
Şekil 4.41’de dalga boyuna karşı yansıma grafiğinden görüldüğü gibi n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN filminde 14 mTorr çalışma basıncında malzemenin yansıma değerlerinin daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.42’de ise n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN filmine ait 20 mTorr ve 8 mTorr çalışma basıncı değerlerinde yasak enerji aralığı değerleri görülmektedir. Bu değerler 20 mTorr çalışma basıncında büyütülen film için 3.11 eV olarak elde edilirken 8 mTorr çalışma basıncı değerinde yasak enerji aralığı değeri 3.26 eV olmaktadır.



Şekil 4.41. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği



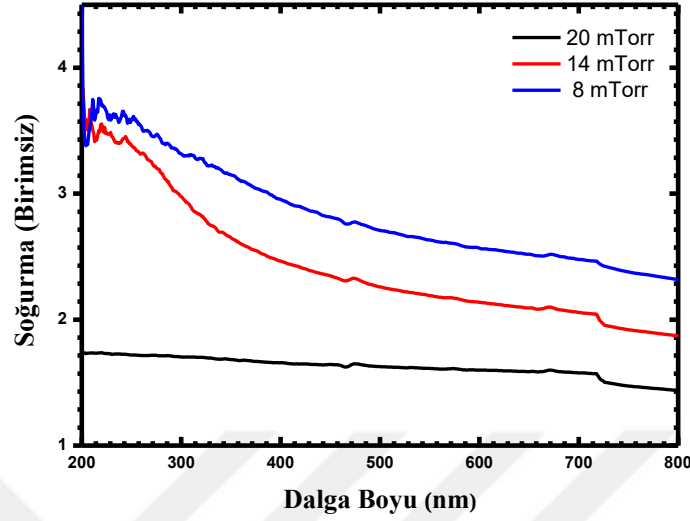
Şekil 4.42. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği



Şekil 4.43. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Şekil 4.43’de p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN filminde ise 20 mTorr çalışma basıncında malzemenin yansımaya değerlerinin daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Çalışma basıncının malzemenin soğurma ve yansımaya grafikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

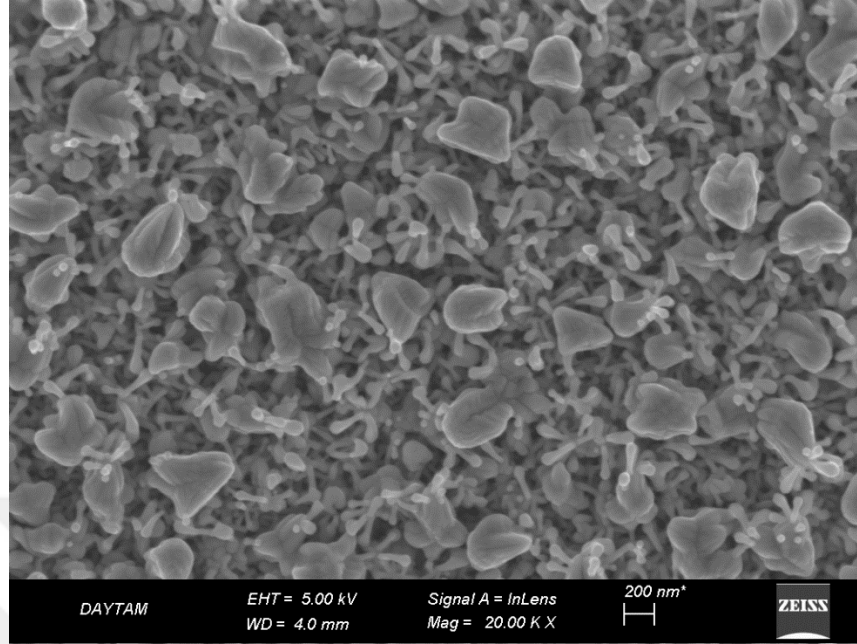
Şekil 4.44’de dalga boyuna karşı soğurma grafiğinden görüldüğü gibi, safir altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin düşük çalışma basıncı değerlerinde daha büyük dalga boylarında soğurmaya başladığı görülmektedir. Silisyum altlıklar ile karşılaştırıldığında safir altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin soğurma grafiğinin artan basınç değerlerinde daha küçük dalga boylarında soğurmaya başladığını göstermektedir.



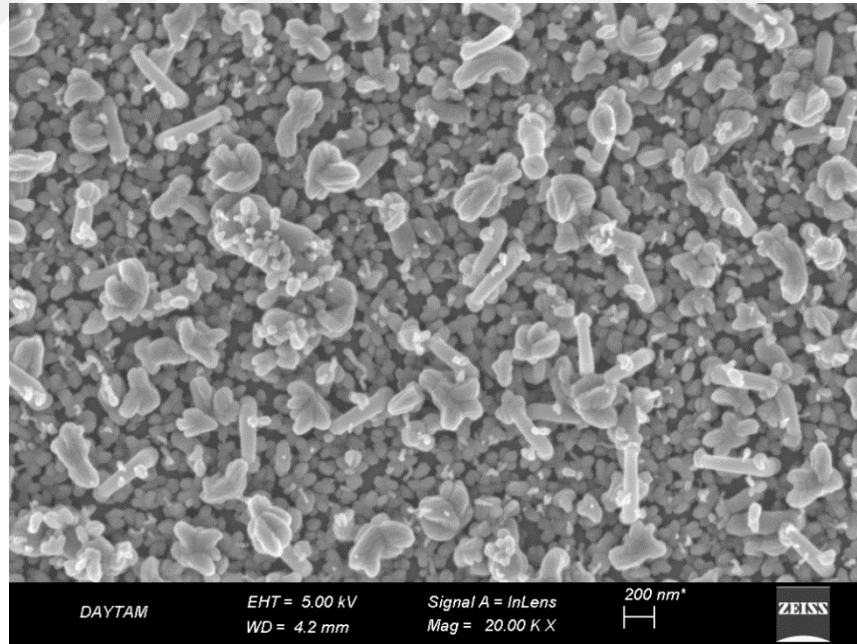
Şekil 4.44. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği

4.2.14. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin SEM analizi

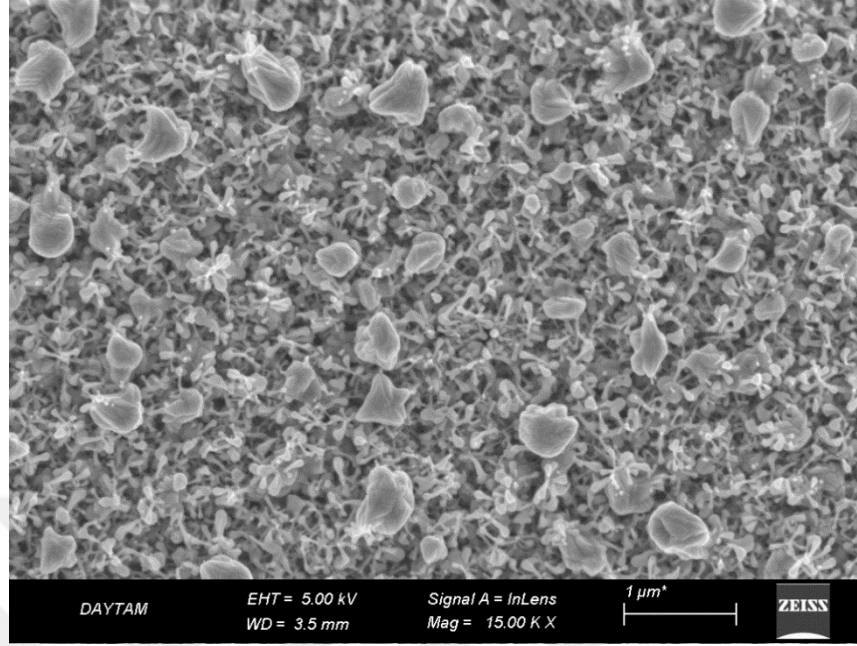
Şekil 4.45 ve 4.46'da n-Si altlık üzerine 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 4.0 mm ve 4.2 mm çalışma mesafesinde 200.000 büyütmede 200 nm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde özellikle 8 mTorr çalışma basıncında büyütülen filmin dentritik bir yapıda olduğu görülmektedir. 20 mTorr çalışma basıncı altında büyütülen filmde ise dentritik yapının giderek bozulduğu ve kristal yapıya daha yakın bir büyümenin gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Elde edilen SEM görüntüleri XRD sonuçları ile de desteklenmektedir. Şekil 4.47 ve 4.48'de safir altlık üzerine 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 3.5 mm ve 3.7 mm çalışma mesafesinde 150.000 büyütmede 1 μ m ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde elde edilen yapının tamamiyle dentritik olduğu görülmektedir.



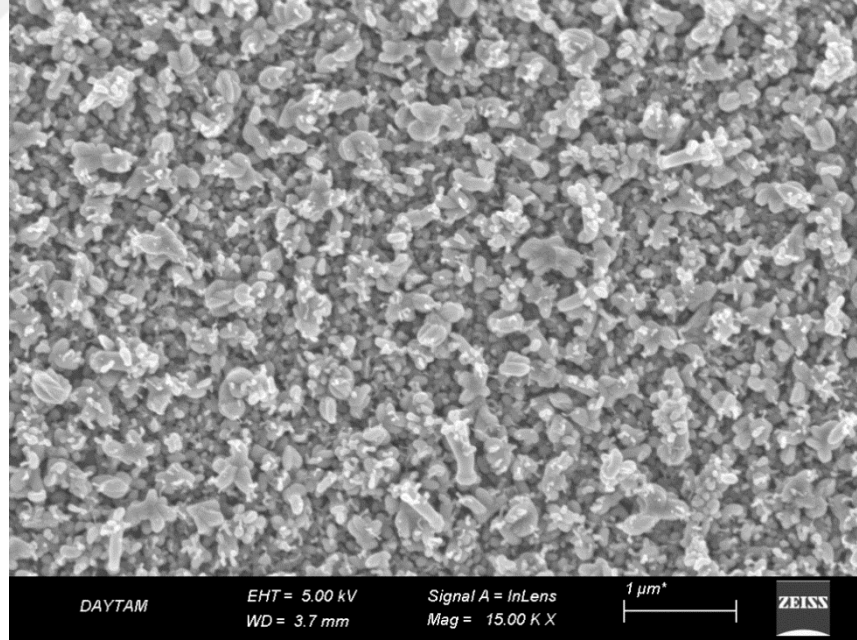
Şekil 4.45. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.46. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.47. RF saçtırma yöntemi ile safır altlık üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

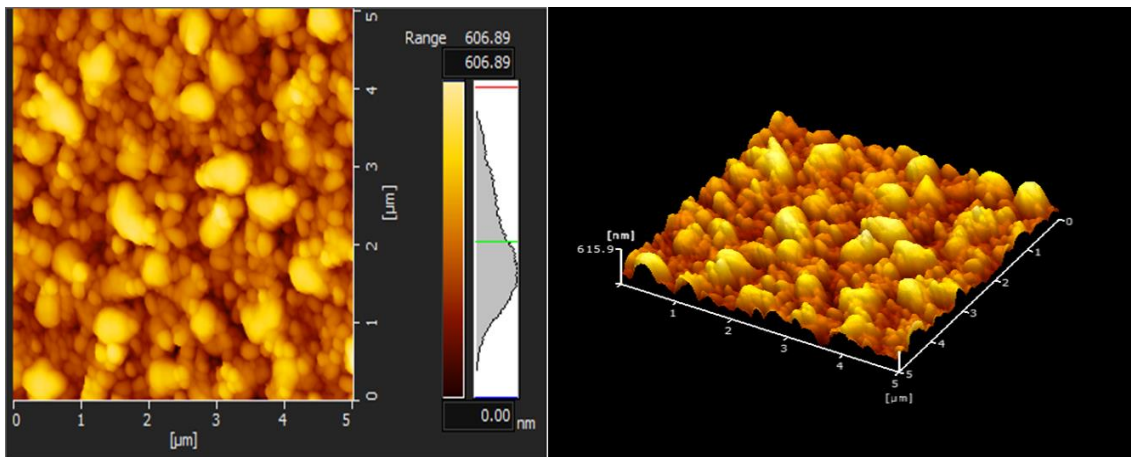


Şekil 4.48. RF saçtırma yöntemi ile safır altlık üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

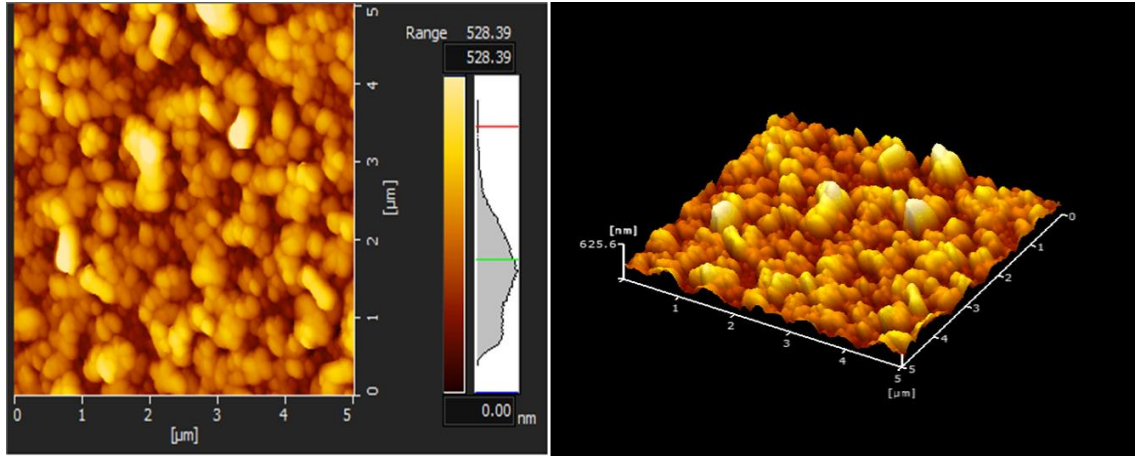
4.2.15. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi

Şekil 4.49 ve 4.50’de n-Si altlık üzerine sırasıyla 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınçlarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Elde edilen yapılar arasında çok büyük farklılıklar gözlenmedi. Aynı şekilde Şekil 4.51 ve 4.52’de safir altlık üzerine sırasıyla 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınçlarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Her iki altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminde dentritik yapının var olduğu görülmektedir. Elde edilen AFM görüntüleri XRD ve SEM sonuçlarını destekleyici niteliktedir.

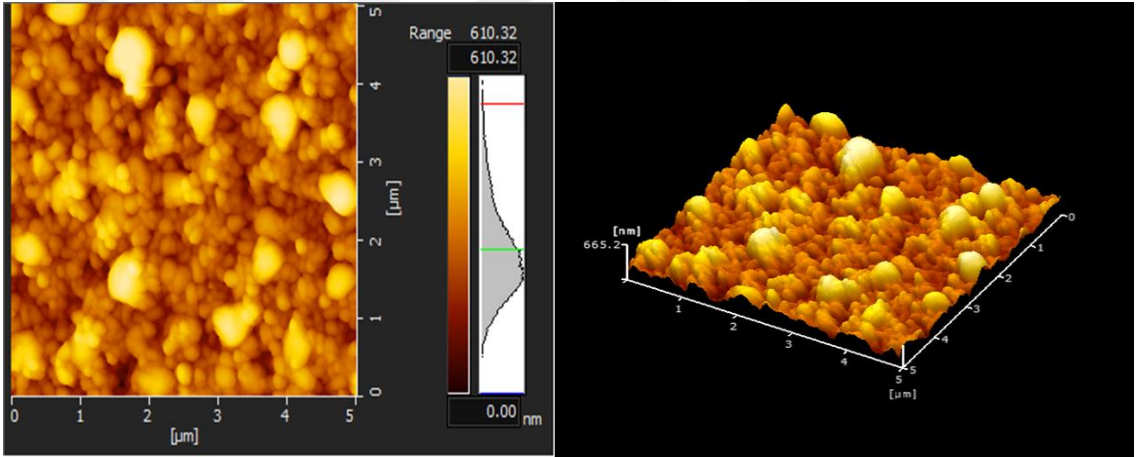
Çalışma basıncı değerleri karşılaştırıldığında ve Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15’de verildiği gibi çizgi boyu pürüzlülük değeri ile ortalama pürüzlülük değerinin çalışma basıncı değerleri artması ile azaldığı görülmektedir. Bu durum yapının yüzeyinde yığılmalara benzer dentritik bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir.



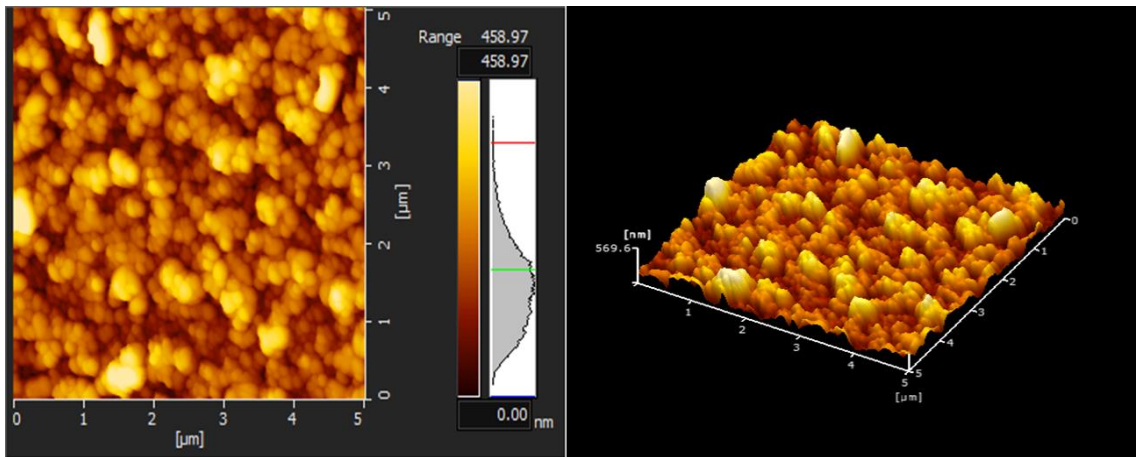
Şekil 4.49. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.50. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.51. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.52. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 20 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 40.62 nm – 85.48 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptir. Tüm büyütülen filmlerde skewness değerleri pozitif olarak elde edilmiştir. Bu durum filmin yüzeyinde tepelerin çukurlardan daha fazla baskın olduğu anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.13. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

n-Si(111)/InGaN	8 mTorr	14 mTorr	20 mTorr
Çizgisel pürüzlük (Ra)	85.48	58.50	69.61
SuRFace roughness (Rq)	100.80	69.77	83.42
Tepe (Rp)	185.50	126.50	158.50
Çukur (Rv)	214.70	172.50	164.50
Tepe - Çukur (Rt)	400.20	299	323.00
Skewness (Ssk)	0.62	1.39	1.84
Kurtosis (Skr)	15.59	28.06	40.16

Çizelge 4.14. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

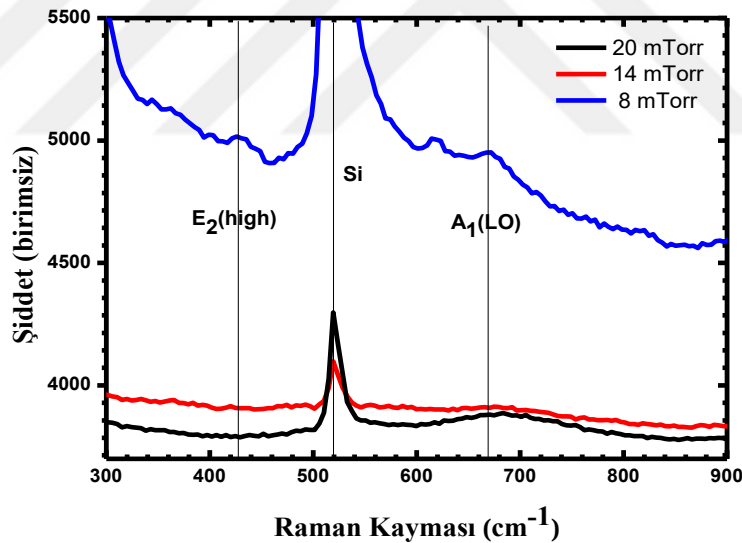
p-Si(100)/InGaN	8 mTorr	14 mTorr	20 mTorr
Çizgisel pürüzlük (Ra)	82.58	43.28	40.62
Ortalama pürüzlük (Rq)	98.93	50.03	48.24
Tepe (Rp)	221.70	114.80	119.30
Çukur (Rv)	199.40	90.70	130.80
Tepe - Çukur (Rt)	421.10	205.50	250.10
Skewness (Ssk)	0.09	2.00	0.23
Kurtosis (Skr)	0.98	64.07	1.48

Çizelge 4.15. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

Safir(0001)/InGaN	8 mTorr	14 mTorr	20 mTorr
Çizgisel pürüzlük (Ra)	83.64	73.71	58.64
Ortalama pürüzlük (Rq)	105.80	88.61	70.98
Tepe (Rp)	314.60	188.20	173.80
Çukur (Rv)	229.20	163.20	143.30
Tepe - Çukur (Rt)	543.80	351.40	317.10
Skewness (Ssk)	1.09	2.42	2.10
Kurtosis (Skr)	26.32	73.63	58.83

4.2.16. Çalışma basıncı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi

InGaN üçlü bileşiğinde optik fononlar tek mod davranışı sergilemektedir. Boyuna (LO) ve enine optik (TO) fononlar tek bir set oluşturmaktadır. Yani InN ve GaN arasındaki frekans liner bir bağıllık göstermektedir. Bu durumda InGaN bileşiğine ait optik fonon modları $A_1(LO)$ ve $E_2(high)$ olmaktadır. Farklı çalışma basıncı değerlerinde p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.53'e bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. Bu piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(high)$ moduna ait pik (yaklaşık 430 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır.



Şekil 4.53. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı çalışma basınç değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği

Diğer taraftan $A_1(LO)$ moduna ait pik 8 mTorr çalışma basıncı altında elde edilen film için 668.94 cm^{-1} değerinde olmaktadır. Diğer çalışma basıncı değerlerinde ise bu pik değerinin $670\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ aralığında çok yayvan bir şekilde olduğu görülmektedir. Bu aralığın her bir çalışma basıncı değerinde farklı olmasının sebebi büyütülen filmlerdeki In oranının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu piklerin daha yayvan ve şiddetinin

düşük olması polikristal yapının oluşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Çalışma basıncının azaltılması ile büyütülen ince filmlerde Raman piklerinin şiddetinin daha fazla olduğu görülmektedir.

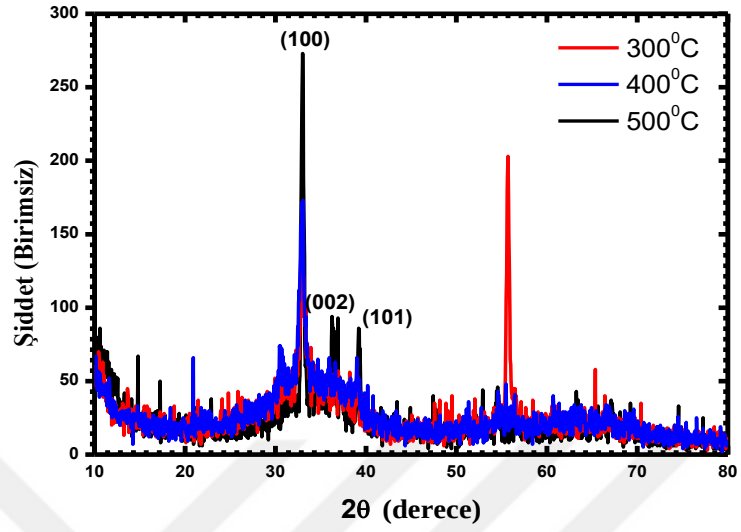
4.2.17. Altlık sıcaklığı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi

Farklı altlık sıcaklığı değerlerinde (300°C, 400°C ve 500°C) saçtırma yöntemi ile edilen InGaN yapısının XRD analizi sonuçlarında 500°C’de büyütülen film hekzagonal kristal yapısına sahiptir. Zaten bu altlık sıcaklık değerimiz diğer büyütme parametreleri değiştirildiğinde elde edilen yapılar için sabit bir altlık sıcaklığı olarak ele alınmıştır. Altlık sıcaklığı değeri düşürüldüğünde InGaN filmlerinin kristal yapısının giderek bozulduğu ve dentritik bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu durumda altlık sıcaklığının özellikle InGaN filmlerin kristal yapıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu söyleyebiliriz. Elde edilen sonuçlara ait büyütme parametreleri Çizelge 4.16’da verilmiştir. Büyütülen numunelerin kalınlıkları büyütme sistemi esnasında kalınlık ölçer sensörü yardımıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca profilometre yardımıyla da büyütme sonrası film kalınlıkları teyit edilerek, tüm elde edilen filmlerin kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür.

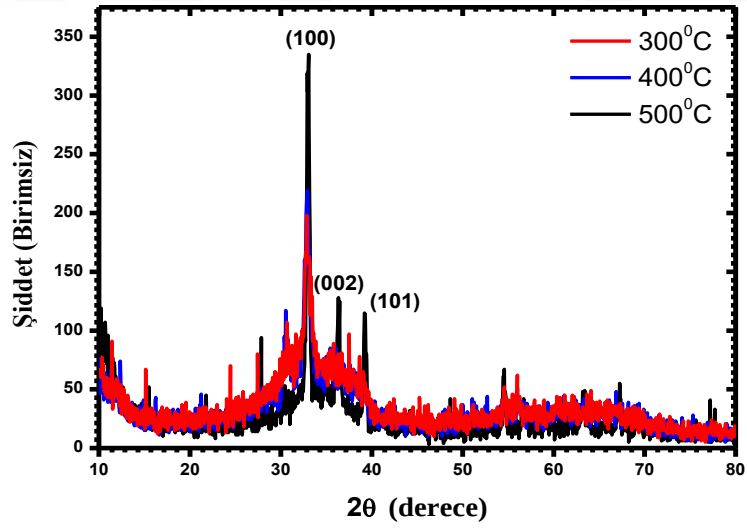
Çizelge 4.16. RF saçtırma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı altlık sıcaklığı değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri

Büyütme Sıcaklığı (°C)	Çalışma Basıncı (Torr)	Vakum Basıncı (Torr)	RF Gücü (Watt)	Büyütme Oranı (Å/s)	Büyütme Süresi (dakika)	Argon Gaz Akış Miktarı (sccm)	Azot Gaz Akış Miktarı (sccm)
300	1.4×10^{-2}	1.4×10^{-6}	100	0.0 - 0.1	153	100	0
400	1.4×10^{-2}	1.2×10^{-6}	100	0.0 - 0.1	150	100	0
500	1.4×10^{-2}	9.8×10^{-7}	100	0.1	136	100	0

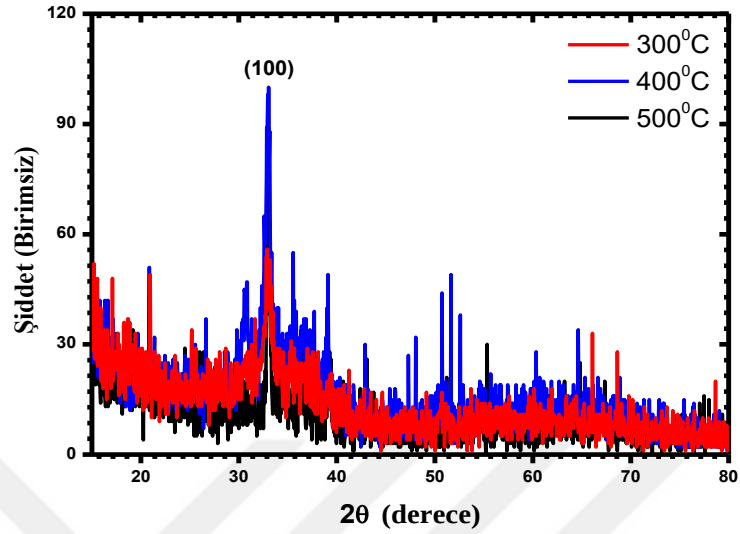
Şekil 4.54’te n-Si altlık üzerine 300°C’de büyütülen filmde yaklaşık 57°’de bir pik gözlemlendi. Bu pikin altlık malzemeden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.54. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



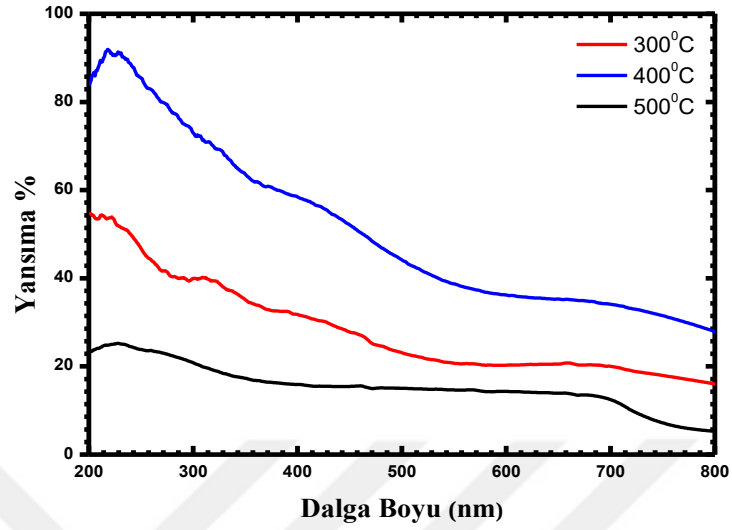
Şekil 4.55. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



Şekil 4.56. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

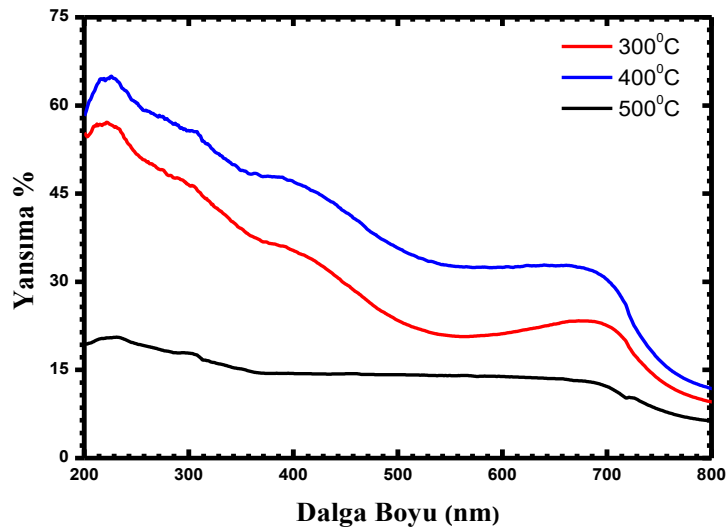
4.2.18. Altlık sıcaklığı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi

Şekil 4.57’de dalga boyuna karşı yansıma grafiğinden görüldüğü gibi 400°C altlık sıcaklık değerinde n-Si üzerine büyütülen InGaN ince filminin daha büyük dalga boylarında daha fazla yansıma değerine sahip olduğunu görmekteyiz ve 200 nm değerinde yaklaşık olarak %85 lik bir yansıma değerine ulaştığını görmekteyiz. Aynı şekilde 500°C altlık sıcaklık değerinde büyütülen filmde ise daha düşük yansıma değerleri elde ettiğimiz görülmektedir.



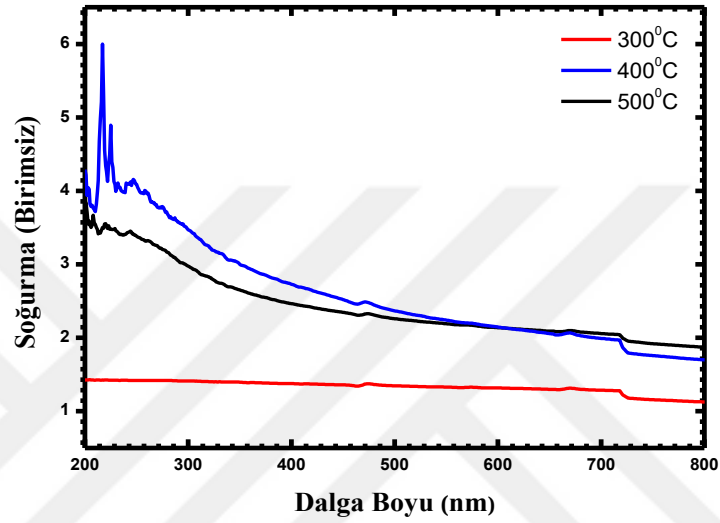
Şekil 4.57. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Benzer sonuçlar Şekil 4.58’de verilen p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerde de elde edilmiştir ancak yüzdelik yansımaya değerleri farklılık göstermektedir. Altlık sıcaklığı değişiminin filmlerin soğurma ve yansımaya grafikleri ile yasak enerji aralığı değerlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



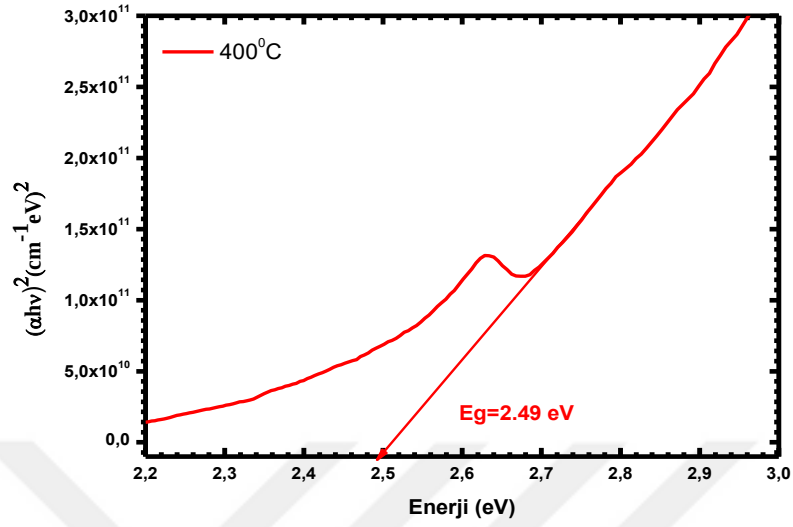
Şekil 4.58. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Şekil 4.59’da dalga boyuna karşı soğurma grafiğinden görüldüğü gibi, safir altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin yüksek altlık sıcaklığı değerlerinde daha büyük dalga boylarında soğurmaya başladığı görülmektedir. Her üç altlık içinde 400°C’de büyütülen filmler en yüksek soğurma ve yansıma değerlerine sahiptirler.

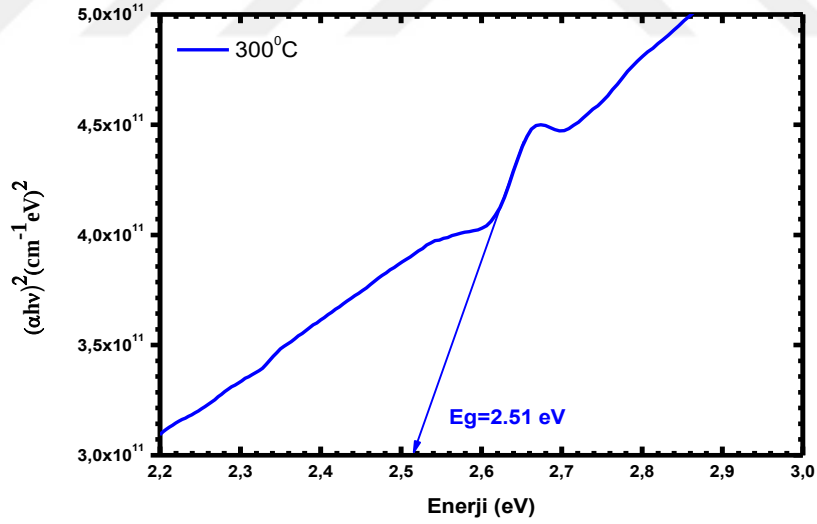


Şekil 4.59. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği

Şekil 4.60 ve 4.61’de elde edilen yasak enerji aralığı değerlerini incelediğimizde, safir altlık üzerine büyütülen InGaN filmlerde 400°C için 2.49 eV ve 300°C için 2.51 eV yasak enerji aralığı değerleri bulunmuştur. Altlık sıcaklık değerleri düşürüldüğünde yasak enerji aralığı değerlerinin arttığı görülmektedir.



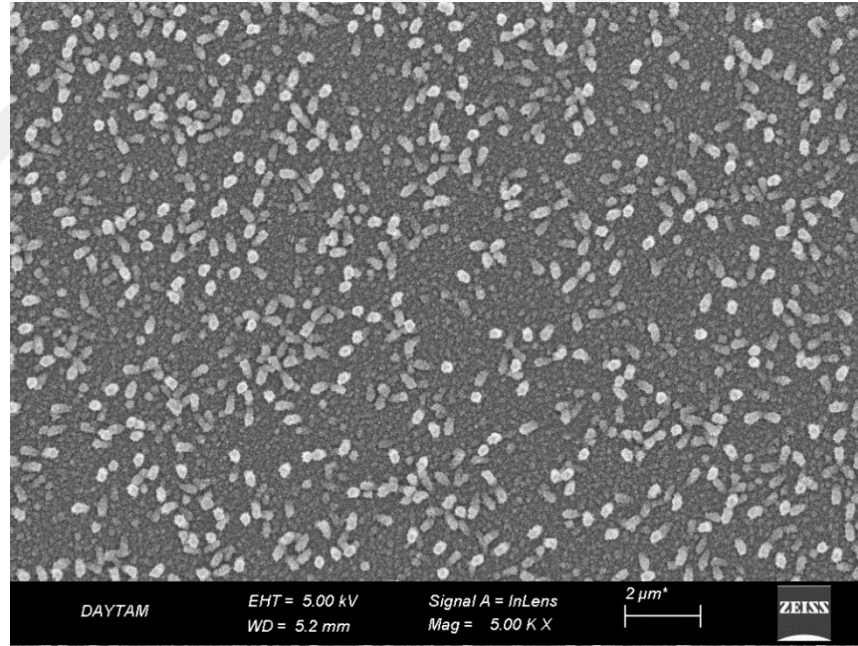
Şekil 4.60. RF saçırma yöntemi ile safır altlık üzerine 400°C de büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2$ ($\text{cm}^{-1} \text{eV}^2$) karşı enerji grafiği



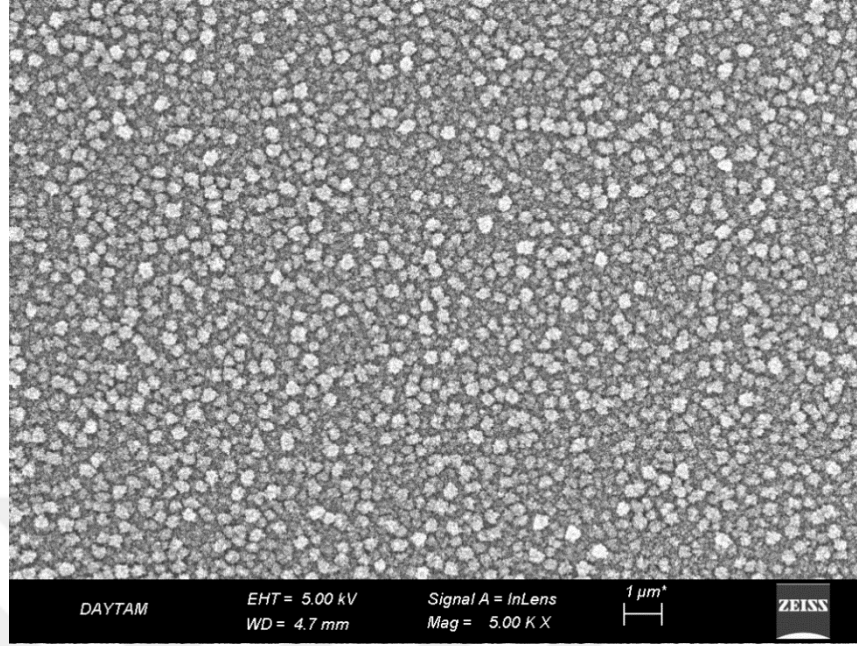
Şekil 4.61. RF saçırma yöntemi ile safır altlık üzerine 300°C de büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2$ ($\text{cm}^{-1} \text{eV}^2$) karşı enerji grafiği

4.2.19. Altlık sıcaklığı değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi

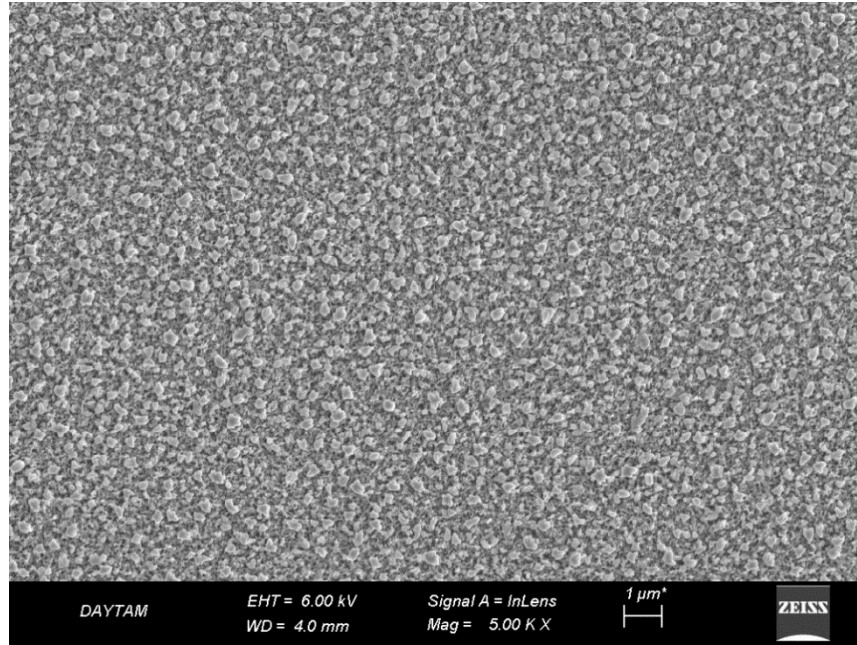
Şekil 4.62, 4.63 ve 4.64’de safir altlık üzerine sırasıyla 300°C, 400°C ve 500°C altlık sıcaklık değerlerinde büyütölen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 5.2 mm, 4.7 mm ve 3.5 mm çalışma mesafesinde 50.000 büyütmede 1 µm ölçekli SEM görüntöleri incelendiğinde filmin özellikle 300°C altlık sıcaklık değerinde yüzeye düzgün bir şekilde dağılmadığı ve yer yer boşluklar göröldüğü gözlenmektedir. Ayrıca safir altlık da net bir şekilde görölmektedir. Altlık sıcaklık değerinin artması ile elde edilen filmlerde daha yoğun bir yapının elde edildiğı ve yer yer boşlukların böylelikle dolduğı görölmektedir.



Şekil 4.62. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 300°C de büyütölen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.63. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 400°C de büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.64. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine 500°C de büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

4.3. Yüksek azot gazı değişim oranlarında elde edilen InGaN ince filmler

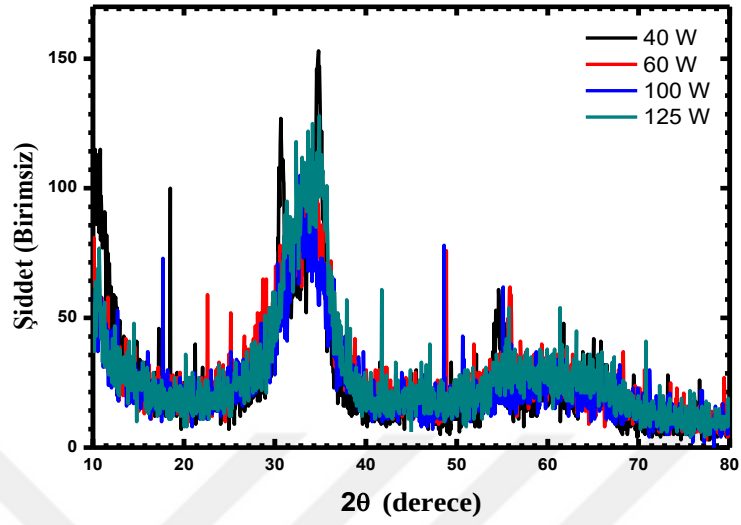
Yüksek azot gazı değişim oranı olarak adlandırılan bu kısımda ortama verilen azot gazı değişim miktarları 3, 4 ve 5 sccm olarak belirlenmiştir. Diğer büyütme parametresi olan RF gücü değişimi ile elde edilen filmler için ise azot gazı değişim miktarı 5 sccm olarak sabit tutulmuştur.

4.3.1. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi

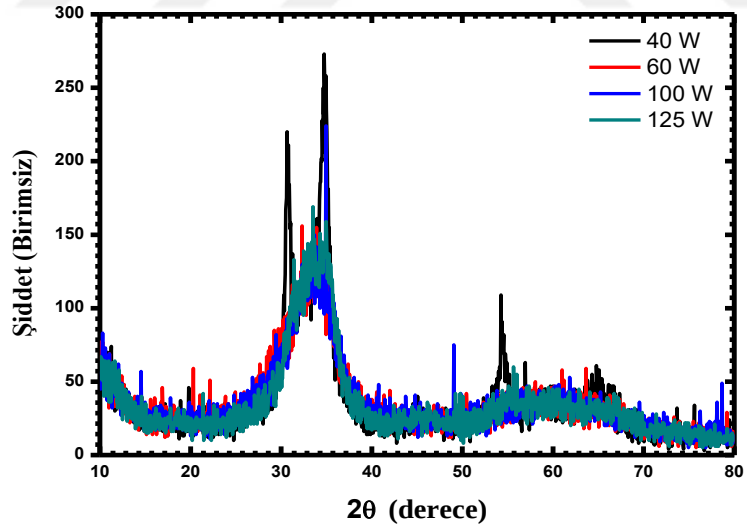
Farklı RF güç değerlerinde (40, 60, 100, 125 Watt) saçırtma yöntemi ile sabit 5 sccm azot gazı akış oranında edilen InGaN yapısının XRD analizi sonuçlarında Şekil 4.65, 4.66 ve 4.67’de görüldüğü gibi farklı altlıklar üzerinde dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. SEM ve AFM sonuçları da dentritik yapının varlığını desteklemektedir. Elde edilen sonuçlara ait büyütme parametreleri Çizelge 4.17’de verilmiştir. Büyütülen numunelerin kalınlıkları büyütme sistemi esnasında kalınlık ölçer sensörü yardımıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca profilometre yardımıyla da büyütme sonrası film kalınlıkları teyit edilerek, tüm elde edilen filmlerin kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.17. RF saçırtma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı RF gücü değerlerinde büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri

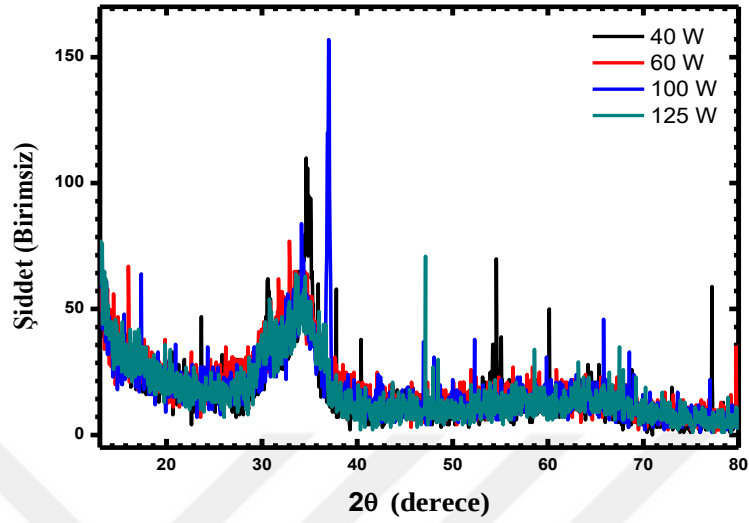
RF Gücü (Watt)	Büyütme Sıcaklığı (C°)	Vakum Basıncı (Torr)	Çalışma Basıncı (Torr)	Büyütme Oranı (Å/s)	Büyütme Süresi (dakika)	Argon Gaz Akış Miktarı (sccm)	Azot Gaz Akış Miktarı (sccm)
40	500	1.2×10^{-6}	1.5×10^{-2}	0.0 - 0.1	372	100	5
60	500	1.1×10^{-6}	1.5×10^{-2}	0.1	273	100	5
100	500	1.1×10^{-6}	1.5×10^{-2}	0.1	138	100	5
125	500	1.3×10^{-6}	1.5×10^{-2}	0.1 – 0.2	97	100	5



Şekil 4.65. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



Şekil 4.66. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



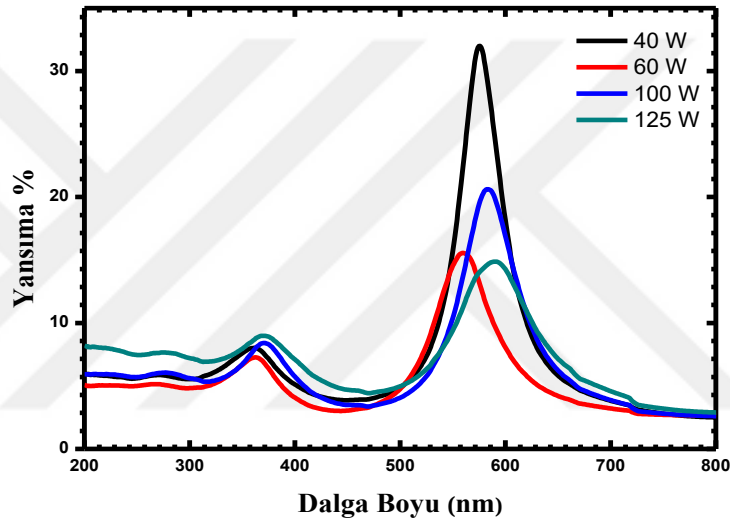
Şekil 4.67. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

4.3.2. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi

Yarıiletkenlerin optik soğurma aralığı ve yasak enerji aralığını belirlemede en çok kullanılan yöntemlerden birisi soğurma ölçüm metodudur. n-Si (111), p-Si (100) ve safir (0001) altlıklar üzerindeki ince filmlerin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında UV/Visible spektrometresi yardımıyla alınmıştır. Kullanılan spektrometrik ölçüm aralığı 200–900 nm’dir. Yapılan ölçümlerde malzemeye ait soğurma, yansıma ve yasak enerji aralığı dalga boyuna karşılık elde edildi.

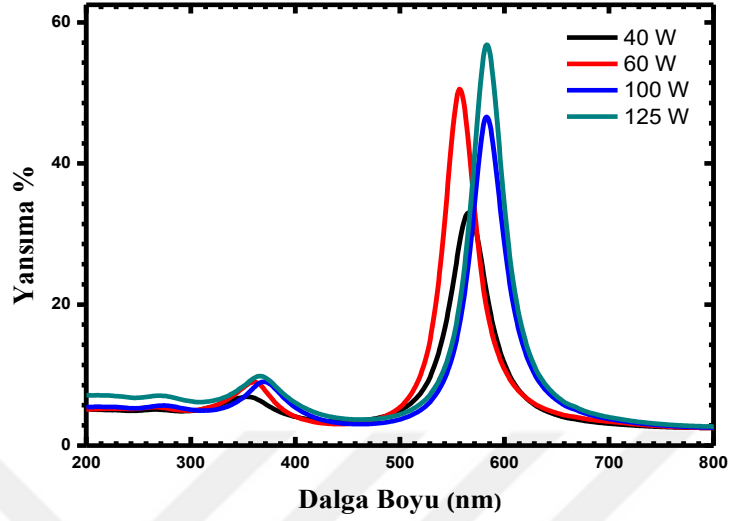
Şekil 4.68’de dalga boyuna karşı yansıma grafiğinden görüldüğü gibi tüm RF güç değişimlerinde n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin 380 nm ve 600 nm civarında şiddetli ve keskin pikler verdiğini görmekteyiz. Özellikle 40 W RF gücünde büyütülen film için yaklaşık %30 oranında görünür bölgede bir yansıma değeri elde edildiğini görmekteyiz. Diğer RF gücü değerlerinde büyütülen filmler için ise yine aynı bölgede ise nispeten daha düşük oranda yansıma değerleri elde edilmiştir. Özellikle 125 W RF gücünde büyütülen filmde görünür bölgede 600 nm civarında en düşük yansıma

değeri gözlemlenirken, yakın morötesi bölgede ise yaklaşık %10 civarında bir rekleftans değerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Düşük yansımaya değerleri elde edilen filmlerin anti-rekleftans kaplamalar için uygun olduğunu göstermektedir. Farklı bölgelerde yani yakın görünür bölgede yüksek yansımaya değerleri mevcutken yakın morötesi bölgede düşük yansımaya değerleri mevcuttur. Bu malzeme için böylelikle farklı uygulamalar söz konusu olabilmektedir.



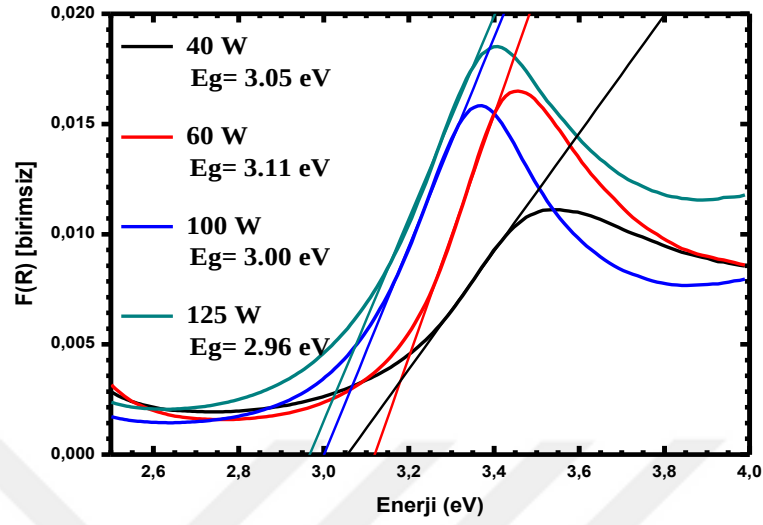
Şekil 4.68. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Benzer sonuçların ve yorumların Şekil 4.69’da verilen grafikte p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmler için de kullanılması mümkündür. Özellikle 60 W ve 125 W RF güçlerinde büyütülen filmlerin görünür bölgede en yüksek yansımaya değerlerine sahip olduğunu görmekteyiz.



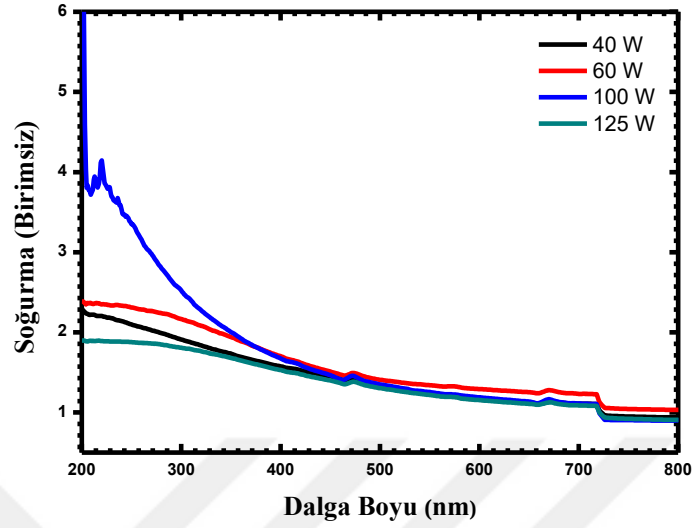
Şekil 4.69. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

Şekil 4.70 p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN filmi için eV cinsinden enerji değerine karşılık $F(R)$ fonksiyonunun bir grafiğini göstermektedir. Bu grafikten elde edilen yasak enerji aralığı değerlerine bakıldığında, RF gücünün azaltılması ile yasak enerji aralığı değerlerinin arttığını görmekteyiz, ancak 40 W RF gücü için bu değerin yeniden arttığını görmekteyiz. 60 W RF gücünde büyütülen film için 3.11 eV ile en yüksek yasak enerji aralığı değeri elde edilirken, 125 W RF gücünde büyütülen film için ise 2.96 eV ile en düşük yasak enerji aralığı değeri elde edilmiştir.



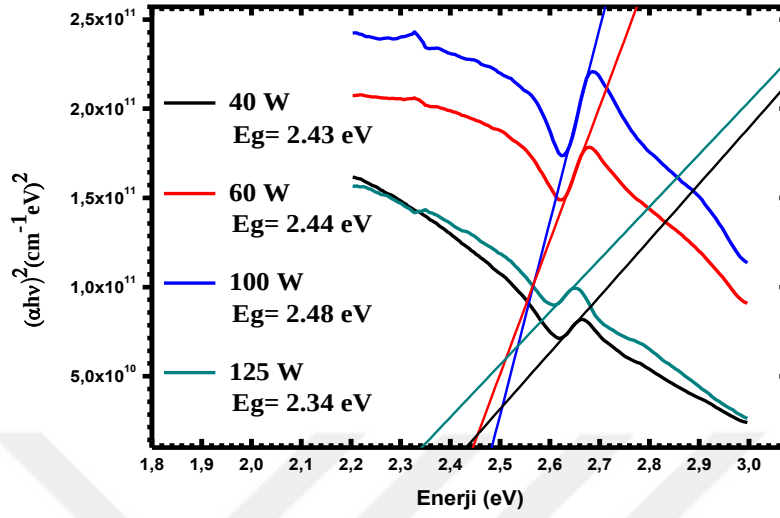
Şekil 4.70. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin $F(R)$ karşı enerji grafiği

Şekil 4.71’de safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği görülmektedir. 125 W RF gücünde elde edilen film için soğurma grafiği daha düşük dalga boylarında başlamakta ve 200 nm sınırında düşük bir soğurma değerine karşılık gelmektedir. 60 W RF gücünde büyütülen film için daha büyük dalga boylarında soğurmaya başladığını söylebiliriz, fakat 100 W RF gücünde büyütülen film için soğurma değerleri yaklaşık 350-360 nm den itibaren keskin bir şekilde artmaya başlamış ve 200 nm sınırında en yüksek soğurma değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.71. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği

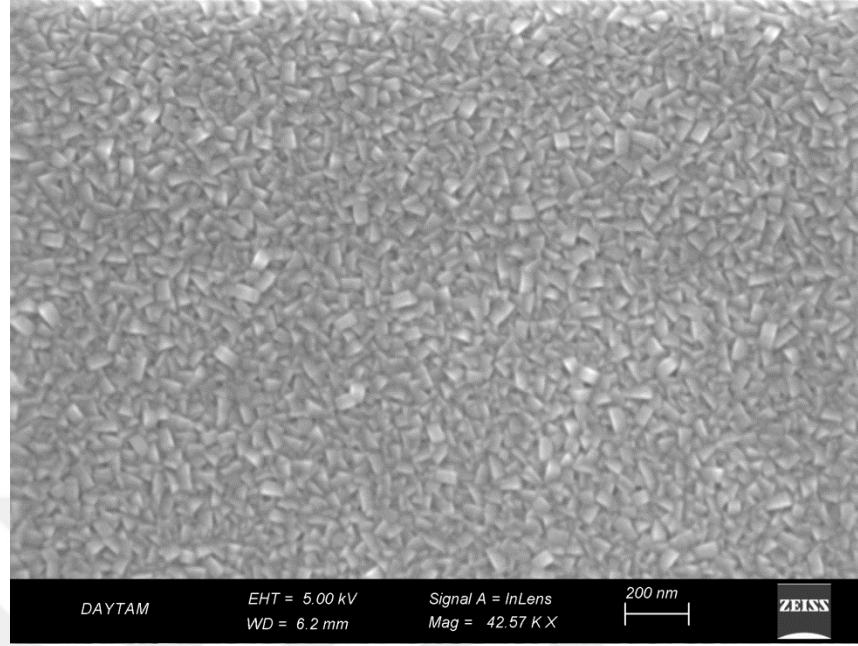
Şekil 4.72’de ise safir altlık üzerine büyütülen InGaN filmi için $(\alpha h\nu)^2 (\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği görülmektedir. Burada ise RF gücünün arttırılması ile yasak enerji aralığı değerlerinin 125 W değerine kadar arttığı görülmektedir. 125 W RF gücünde büyütülen filmde ise yasak enerji aralığı değeri düşüş göstermektedir, 2.34 eV ile en düşük yasak enerji aralığı değerine sahiptir. 100 W RF gücünde büyütülen film için ise 2.48 eV ile en yüksek yasak enerji aralığı değeri gözlemlenmiştir.



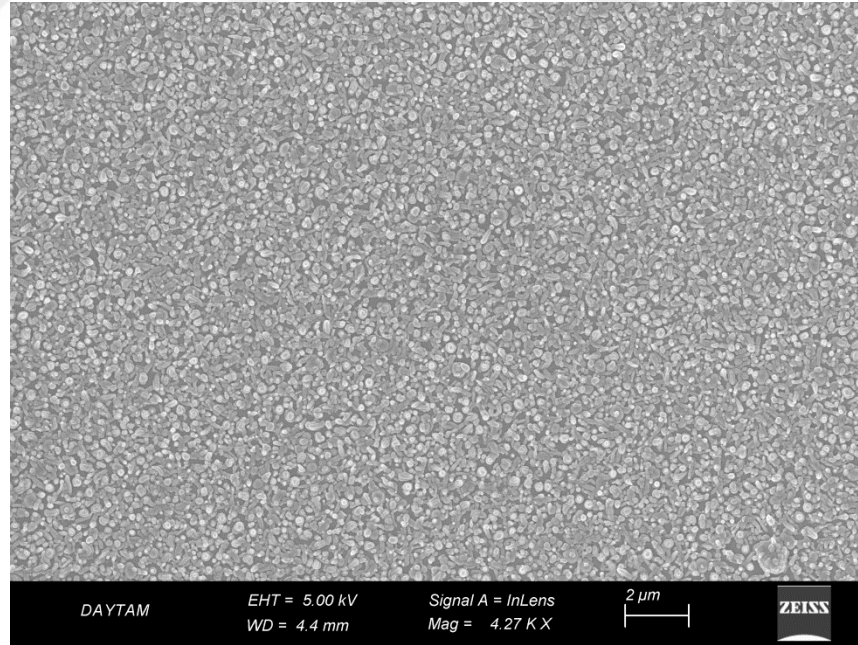
Şekil 4.72. RF saçırma yöntemi ile safır altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2 (\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği

4.3.3. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi

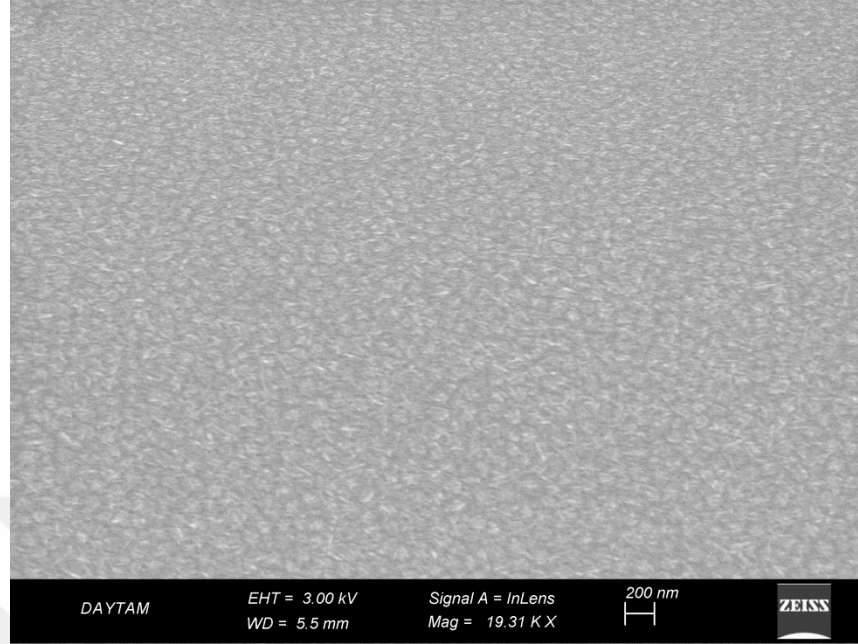
Şekil 4.73, 4.74, 4.75 ve 4.76'da safır altlık üzerine sırasıyla 40W, 60W, 100W ve 125 W RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile farklı çalışma mesafelerinde ve farklı büyütmelerde 200 nm ve 2 μm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



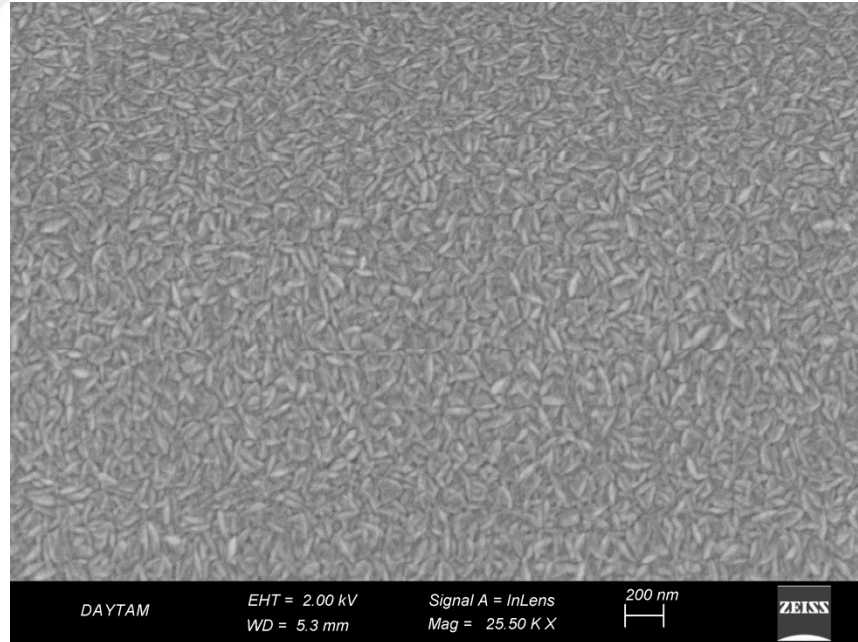
Şekil 4.73. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 40 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.74. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 60 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.75. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



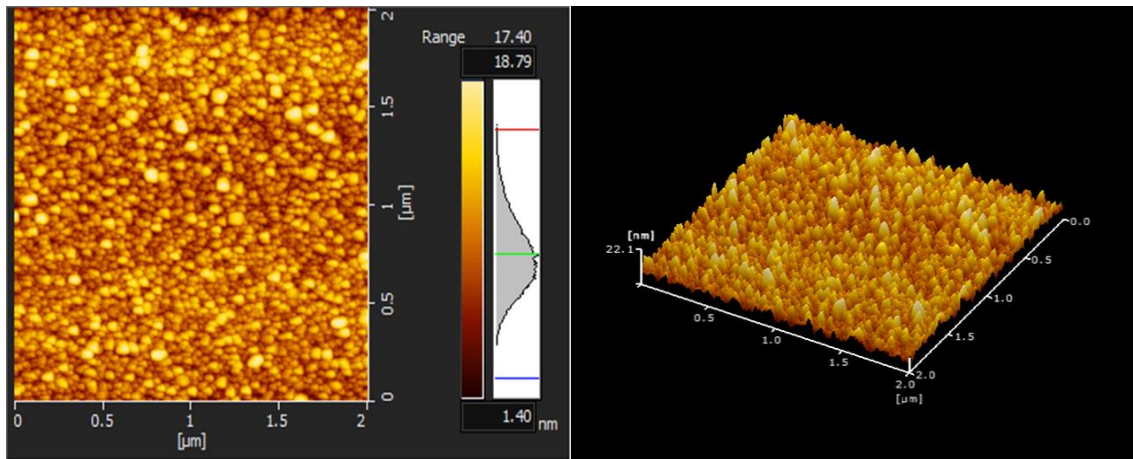
Şekil 4.76. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

4.3.4. RF güç değişimine göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi

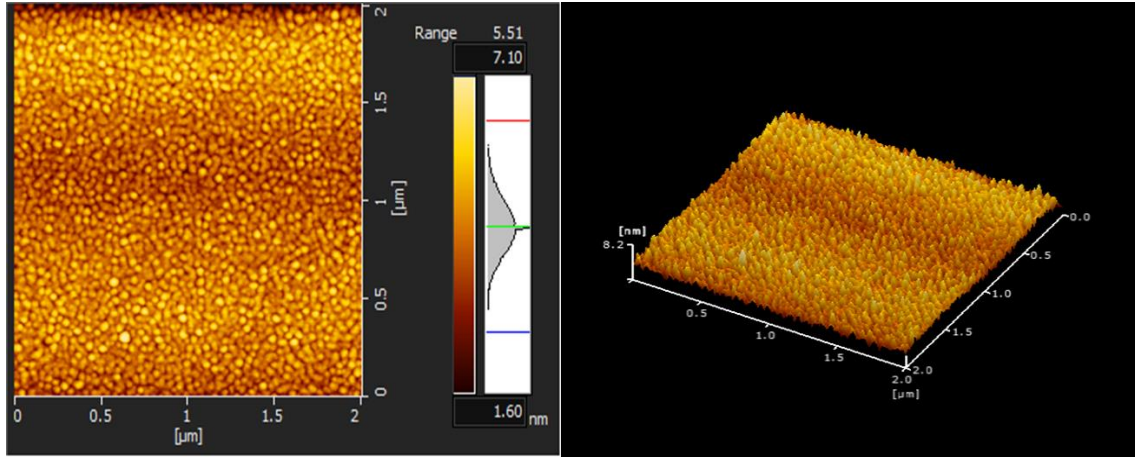
RF saçtırma yöntemi ile n-Si ve safir altlıklar üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde yer yer tepecikler oluşmuş olup, topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular genelde düzgün bir şekilde yerleşmiştir. Bu durum dentritik bir yapının varlığını ortaya koymaktadır ve bu görüntüler SEM görüntüleri ve XRD grafikleri ile de uyumludur.

Çizelge 4.18, 4.19 ve 4.20'ye bakıldığında her bir altlık üzerine büyütülen filmler için yüzey pürüzlülüğü ve çizgi pürüzlülüğü değerlerinin birbirlerine uyumlu oldukları görülmektedir. Tüm skewness parametreleri pozitif bir değerde görüldüğünden, tüm filmler için yüzeyde tepelerin çukurlardan daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Filmlerin yüksek kurtosis değerleri bu filmlerin mühendislikte sürtünme uygulamaları için uygun birer yapı olduklarını belirtmektedir.

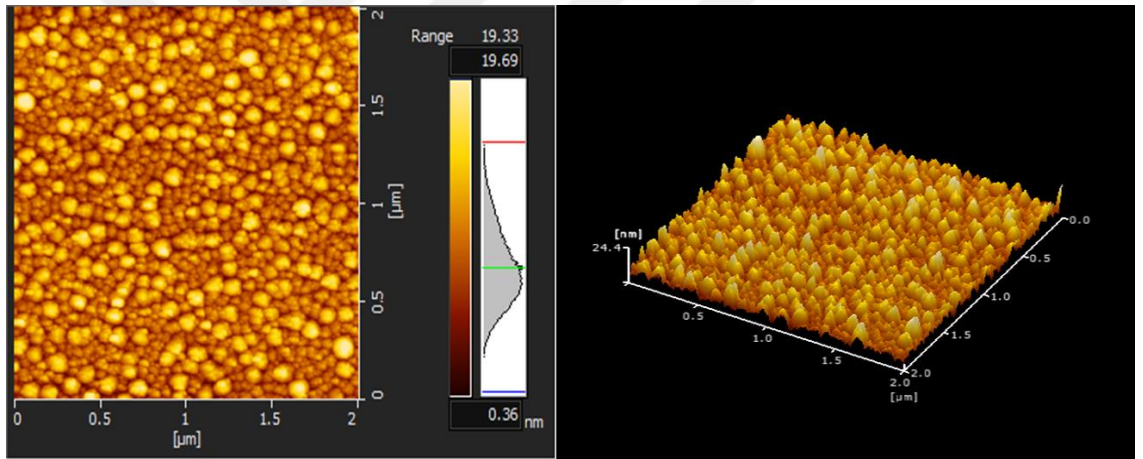
AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 0.48 nm – 5.20 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptirler. Büyütülen filmlerin çok pürüzsüz yüzeylere sahip oldukları bu değerlerden anlaşılmaktadır.



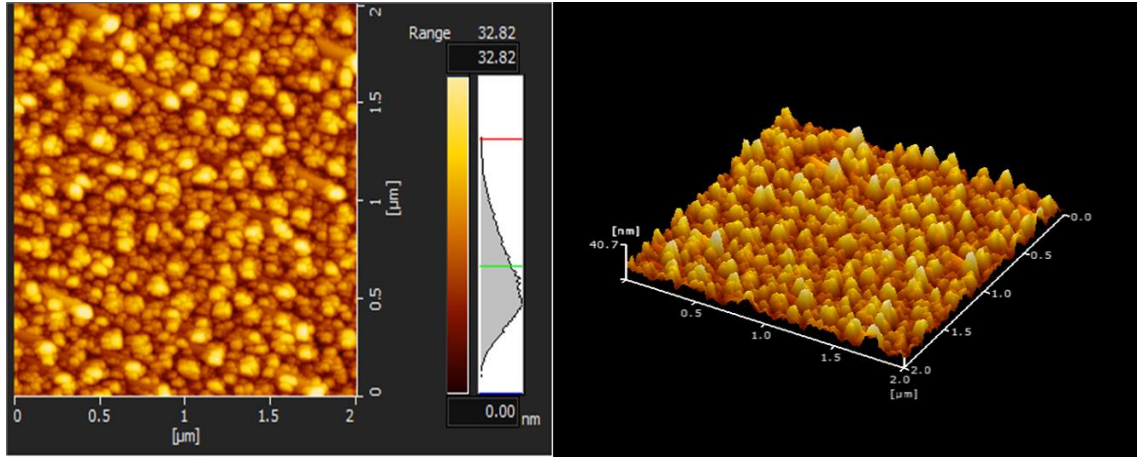
Şekil 4.77. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 40 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



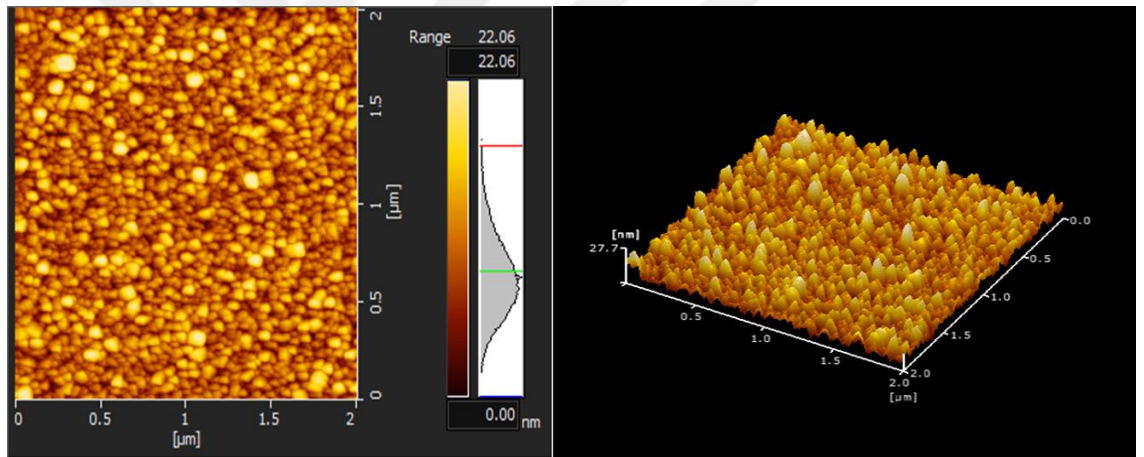
Şekil 4.78. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 60 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



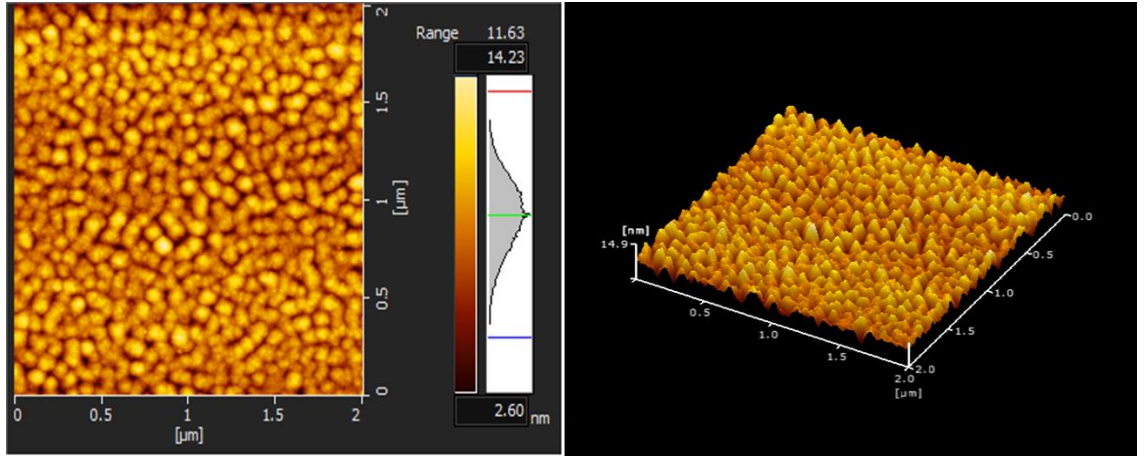
Şekil 4.79. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



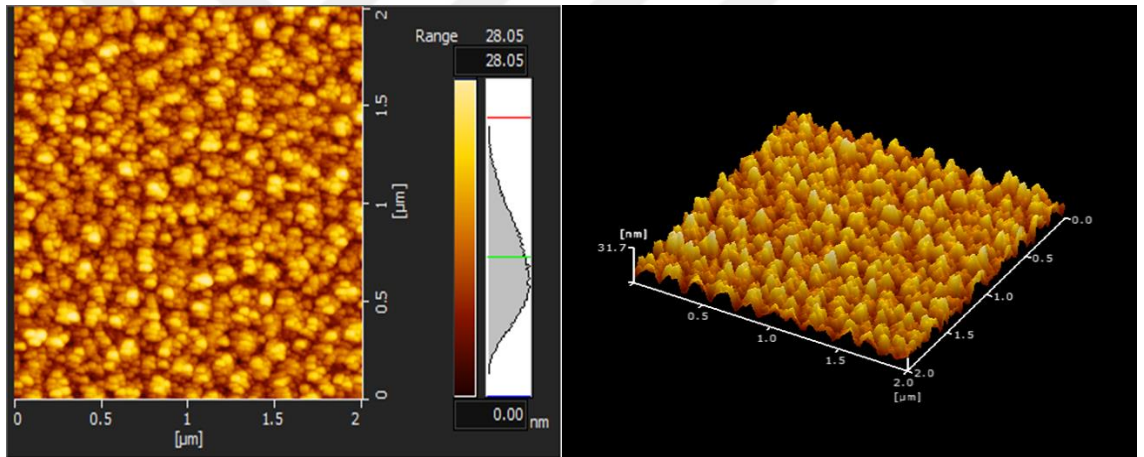
Şekil 4.80. RF saçırma yöntemi ile n-Si üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



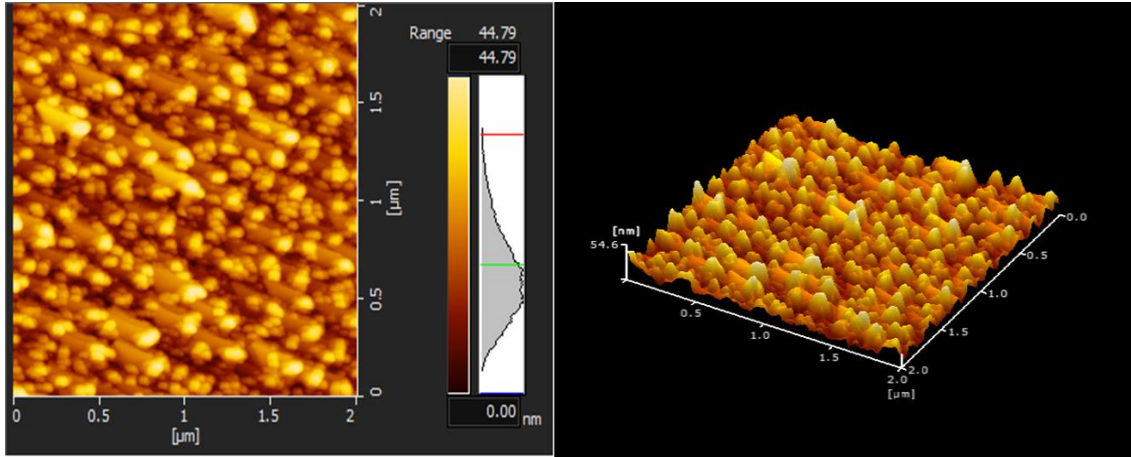
Şekil 4.81. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 40 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.82. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 60 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.83. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 100 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.84. RF saçırma yöntemi ile safir üzerine 125 W RF gücü ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü

Çizelge 4.18. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

nSi(111)/InGaN				
	40 W	60 W	100 W	125 W
Çizgisel pürüzlük (Ra)	2.14	0.50	1.91	4.05
Ortalama pürüzlük (Rq)	2.65	0.61	2.38	5.02
Tepe (Rp)	7.48	1.71	6.11	11.55
Çukur (Rv)	6.63	1.61	5.20	12.23
Tepe - Çukur (Rt)	14.41	3.32	11.31	23.78
Skewness (Ssk)	1.39	0.28	1.28	1.05
Kurtosis (Skr)	26.59	4.41	26.38	25.61

Çizelge 4.19. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

pSi(100)/InGaN				
	40 W	60 W	100 W	125 W
Çizgisel pürüzlük (Ra)	1.78	0.48	1.21	4.34
Ortalama pürüzlük (Rq)	2.15	0.63	1.74	5.35
Tepe (Rp)	4.97	2.40	6.45	13.81
Çukur (Rv)	5.29	1.40	4.94	13.58
Tepe - Çukur (Rt)	10.26	3.80	11.39	27.39
Skewness (Ssk)	2.11	3.25	2.61	1.27
Kurtosis (Skr)	54.40	144.53	108.48	37.03

Çizelge 4.20. RF saçırtma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

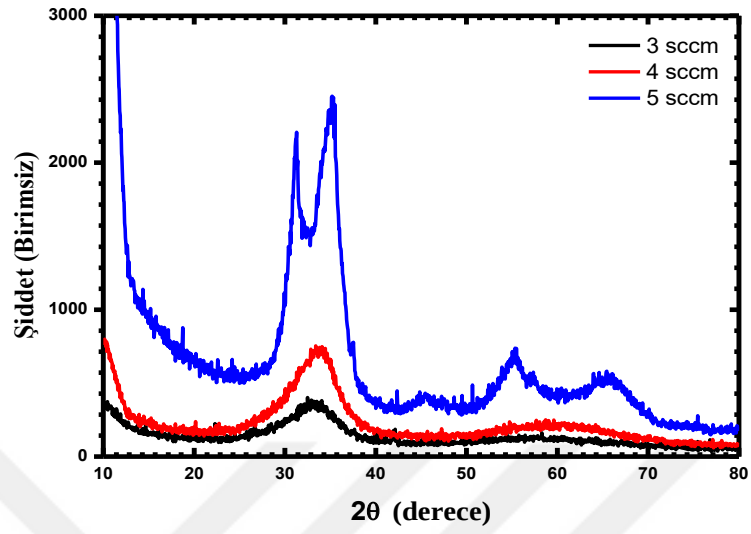
Safir(0001)/InGaN	40 W	60 W	100 W	125 W
Çizgisel pürüzlük (Ra)	2.85	1.12	4.01	5.20
Ortalama pürüzlük (Rq)	3.63	1.36	4.80	6.31
Tepe (Rp)	10.92	3.32	14.17	15.62
Çukur (Rv)	9.35	3.42	9.50	13.79
Tepe - Çukur (Rt)	20.27	6.74	23.67	29.41
Skewness (Ssk)	0.93	0.50	0.73	0.33
Kurtosis (Skr)	24.30	16.35	17.28	8.91

4.3.5. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XRD analizi

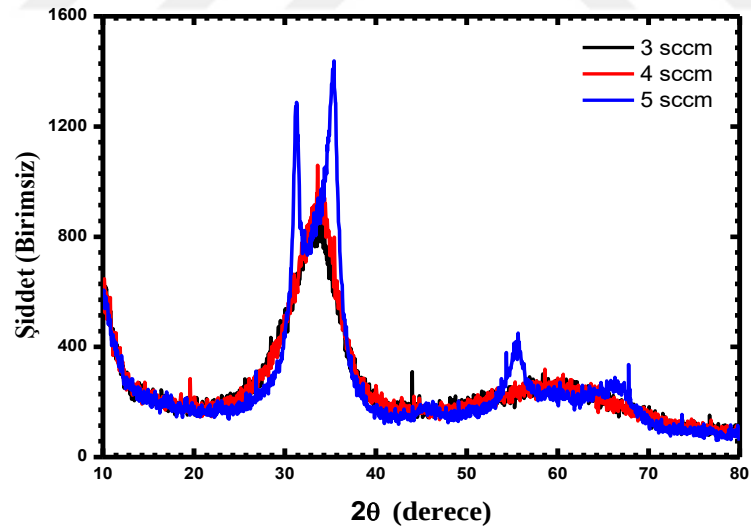
Farklı azot gazı akış oranlarında (3, 4 ve 5 sccm) saçırtma yöntemi ile edilen InGaN yapısının PANalytical Empyrean X-Ray Difraktometre cihazı ile XRD analizi sonuçlarında Şekil 4.85, 4.86 ve 4.87’de görüldüğü gibi n-Si ve p-Si altlıklar için özellikle 3 sccm ve 4 sccm azot gazı akış oranlarında elde edilen yapılarda dentritik bir büyümenin gerçekleştiği görülmektedir. 5 sccm azot gazı akış oranında ise yine aynı dentritik yapının gözlemlendiği ancak piklerin ikiye yarıldığı görülmektedir. Safir altlık üzerine ise tüm azot gazı akış oranlarında aynı tür büyüme görülmekte ve önemli bir değişikliklik bulunmamaktadır. Elde edilen sonuçlara ait büyütme parametreleri Çizelge 4.21’de verilmiştir. Büyütülen numunelerin kalınlıkları büyütme sistemi esnasında kalınlık ölçer sensörü yardımıyla kontrol edilmiştir. Ayrıca profilometre yardımıyla da büyütme sonrası film kalınlıkları teyit edilerek, tüm elde edilen filmlerin kalınlığı 150 nm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.21. RF saçırtma yöntemi ile n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin büyütme parametreleri

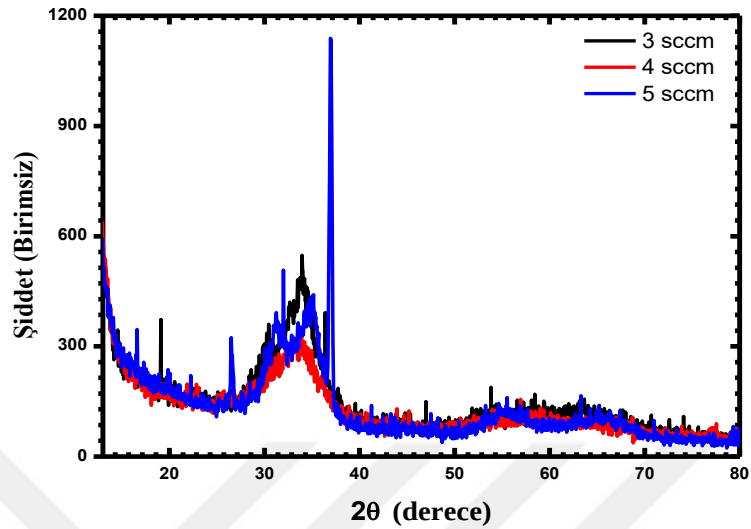
Azot Gaz Akış Miktarı (sccm)	Argon Gaz Akış Miktarı (sccm)	Büyütme Sıcaklığı (C°)	Çalışma Basıncı (Torr)	Vakum Basıncı (Torr)	RF Gücü (Watt)	Büyütme Oranı (Å/s)	Büyütme Süresi (dakika)
3	100	500	1.5×10^{-2}	8.3×10^{-7}	75	0.1	165
4	100	500	1.5×10^{-2}	6.2×10^{-7}	75	0.1	170
5	100	500	1.5×10^{-2}	8.3×10^{-7}	75	0.1	189



Şekil 4.85. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



Şekil 4.86. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni



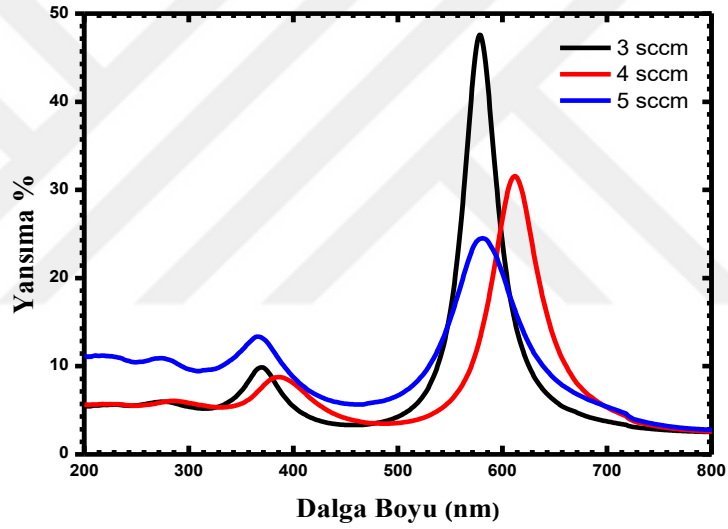
Şekil 4.87. RF saçırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin XRD kırınım deseni

4.3.6 Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin soğurma analizi

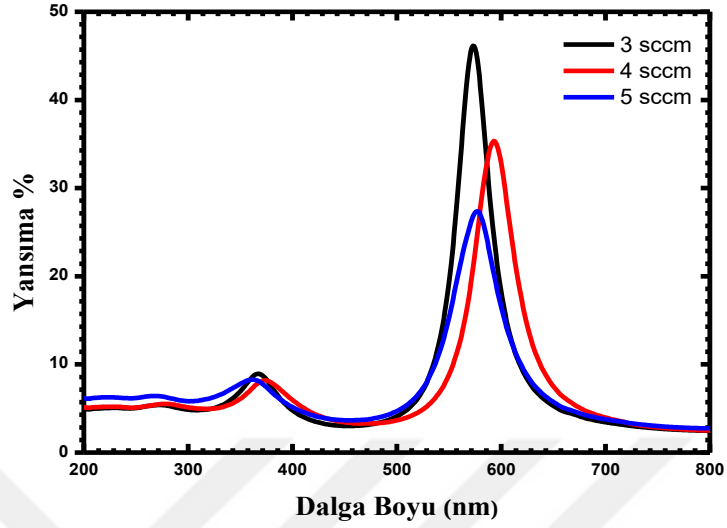
n-Si (111), p-Si (100) ve safir (0001) altlıklar üzerindeki ince filmlerin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında UV/Visible spektrometresi yardımıyla alınmıştır. Kullanılan spektrometrik ölçüm aralığı 200–900 nm’dir. Yapılan ölçümlerde malzemeye ait soğurma, yansımaya ve yasak enerji aralığı dalga boyuna karşılık elde edildi.

Şekil 4.88’de dalga boyuna karşı yansımaya grafiğinden görüldüğü gibi tüm azot gazı akış miktarlarında n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminin 380 nm ve 600 nm civarında şiddetli ve keskin pikler verdiğini görmekteyiz. Özellikle 3 sccm azot gazı akış miktarında yaklaşık %50 oranında görünür bölgede bir yansımaya değeri elde edildiğini görmekteyiz. 4 sccm ve 5 sccm azot gazı akış oranlarında yine aynı bölgede ise nispeten daha düşük oranda yansımaya değerleri elde edilmiştir. 4 sccm azot gazı akış oranında ise yansımaya değerinin sağa doğru kaydığı görülmektedir. Benzer durumlar 280 nm civarında yani yakın morötesi bölgede de gözlemlenmiştir. 200 nm sınırında ise 3

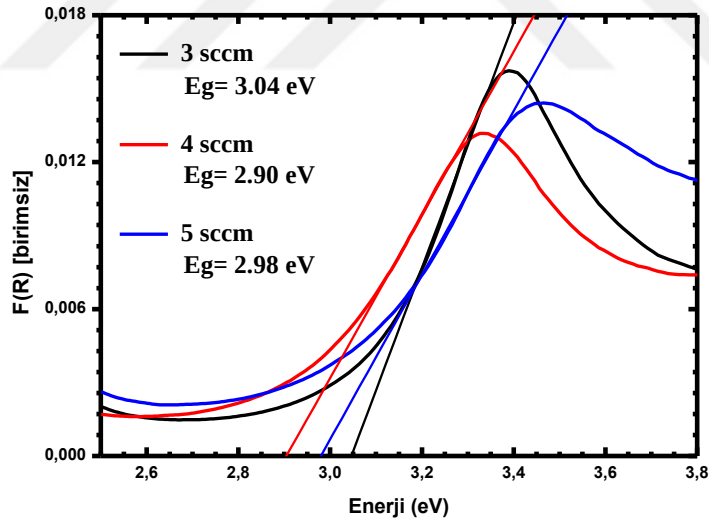
sccm ve 4 sccm de elde edilen filmlerin yansımaları yaklaşık %5 civarında iken, 5 sccm de elde edilen film için yansımaları %10 değerinin biraz üzerinde görülmektedir. Düşük yansımaları elde edilen filmlerin anti-reflectans kaplamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Farklı bölgelerde yani yakın görünür bölgede yüksek yansımaları mevcutken yakın morötesi bölgede düşük yansımaları mevcuttur. Bu malzeme için böylelikle farklı uygulamalar söz konusu olabilmektedir. Benzer sonuçların ve yorumların Şekil 4.89’da verilen grafikte p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmler için de kullanılması mümkündür.



Şekil 4.88. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaları grafiği



Şekil 4.89. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı yansımaya grafiği

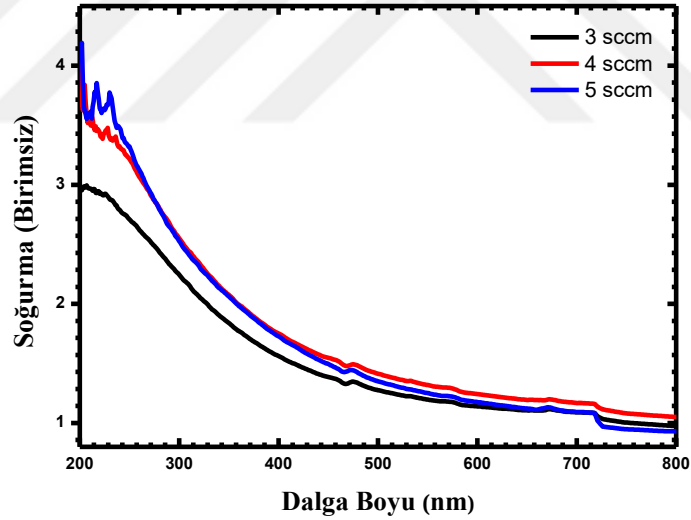


Şekil 4.90. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filmlerin F(R) karşı enerji grafiği

Şekil 4.90'da p-Si altlık için F(R)'ye karşı enerji grafiğinden elde edilen yasak enerji aralığı değerlerine bakıldığında artan ya da azalan şekilde bir eğilim gözükmemekle birlikte 4 sccm de büyütülen film için 2.90 eV değerinde en düşük yasak enerji aralığı

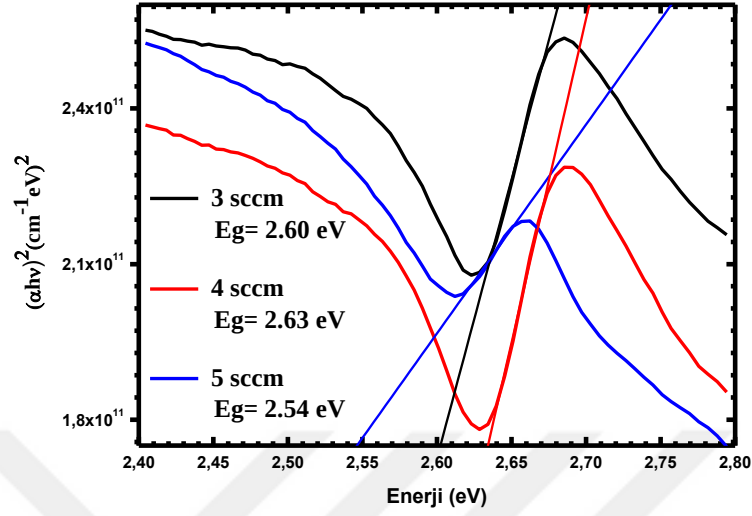
değeri elde edilirken 3 sccm de büyütülen film için ise 3.04 eV değerinde en yüksek yasak enerji aralığı değeri elde edilmiştir.

Şekil 4.91’de safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği görülmektedir. 3 sccm’de elde edilen film için soğurma grafiği daha düşük dalga boylarında başlamakta ve 200 nm sınırında düşük bir soğurma değerine karşılık gelmektedir. 4 sccm’de büyütülen film için 5 sccm’de büyütülen film ile karşılaştırıldığında nispeten daha büyük dalga boylarında soğurmaya başladığını söylebiliriz. Özellikle yakın morötesi bölgede aynı soğurma değerlerine sahip oldukları görülmekte ve 200 nm sınırında ise hemen hemen aynı soğurma değerlerine karşılık gelmektedirler.



Şekil 4.91. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin dalga boyuna karşı soğurma grafiği

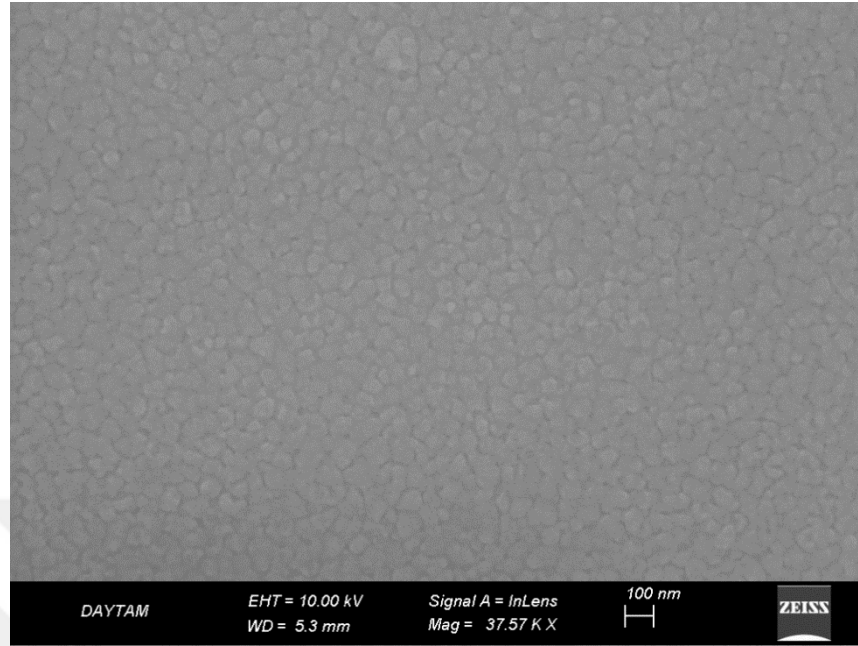
Şekil 4.92’de ise safir altlık için $(\alpha h\nu)^2 (\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2)$ karşı enerji grafiği verilmiştir. p-Si altlık ile karşılaştırıldığında daha düşük yasak enerji aralığı değerleri elde edilmiştir. 5 sccm’de büyütülen film için 2.54 eV değerinde en düşük yasak enerji aralığı değeri elde edilirken 4 sccm’de büyütülen film için ise 2.63 eV değerinde en yüksek yasak enerji aralığı değeri elde edilmiştir.



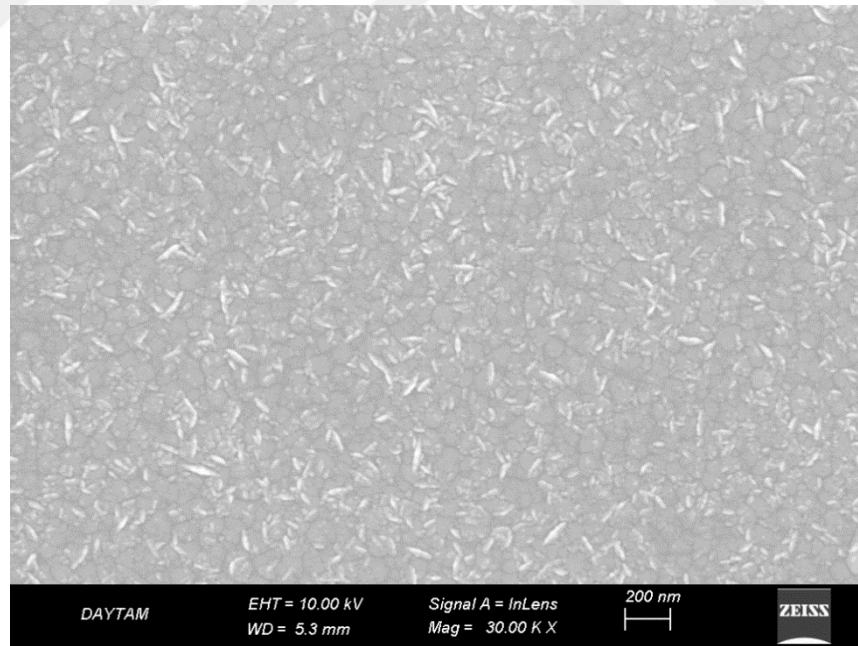
Şekil 4.92. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin $(\alpha h\nu)^2 (\text{cm}^{-1} \text{eV})^2$ karşı enerji grafiği

4.3.7. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin FEG-SEM analizi

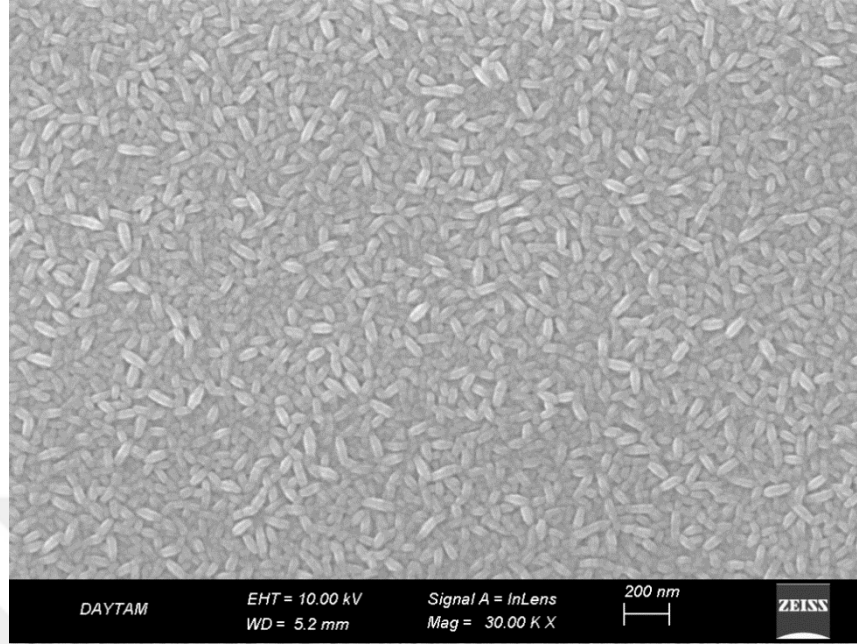
Şekil 4.93, 4.94 ve 4.95’de n-Si altlık üzerine sırasıyla 3, 4 ve 5 sccm azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 5.3 mm çalışma mesafesinde 30.000 büyütmede 100 ve 200 nm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin özellikle 3 sccm azot gazı akış miktarında XRD sonuçları ile uyumlu olarak dentritik bir yapıda büyüdüğü görülmektedir. Azot gazı akış oranının artırılması ile dentritik yapının elde edildiği Şekil 4.94 ve 4.95’de görülmektedir. Dentritik yapı yine 4 sccm’de büyütülen filmde de görülmekte, 5 sccm’de büyütülen filmde ise dentrik yapı ile InGaN film yapısını iç içe geçtiği görülmektedir. Aynı şekilde safir altlık üzerine büyütülen film için de dentrik yapının gözlemlendiği SEM görüntüleri Şekil 4.96, 4.97 ve 4.98’de görülmektedir.



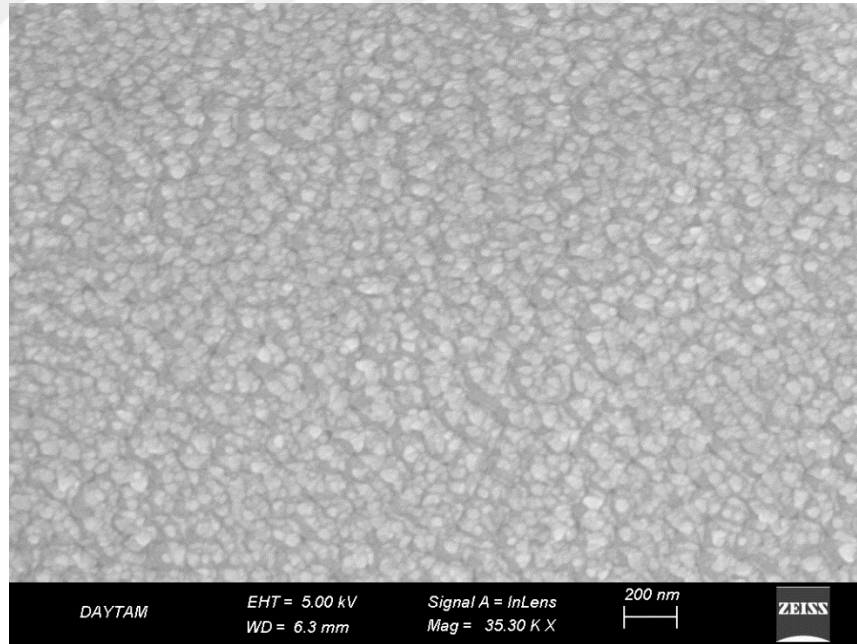
Şekil 4.93. RF saçırma yöntemi ile nSi üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



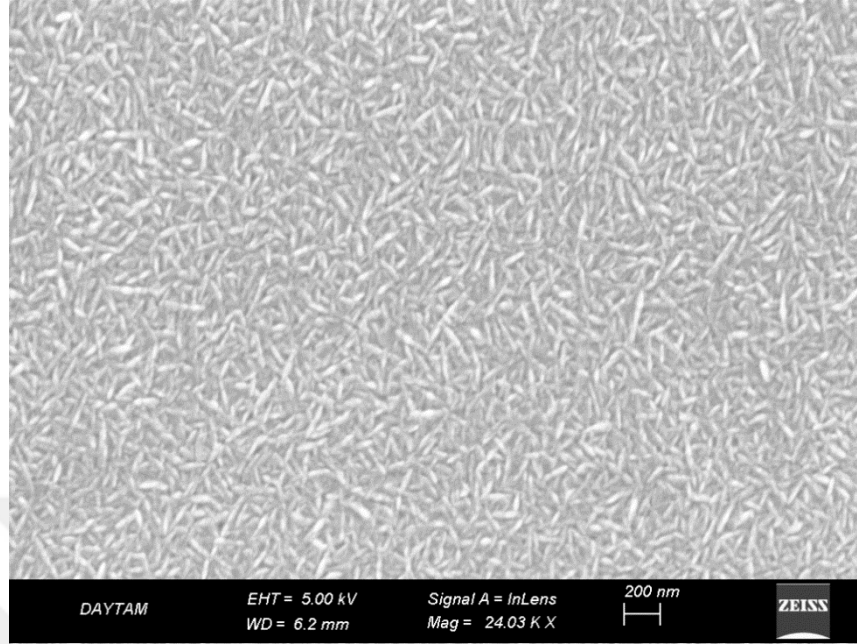
Şekil 4.94. RF saçırma yöntemi ile nSi üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



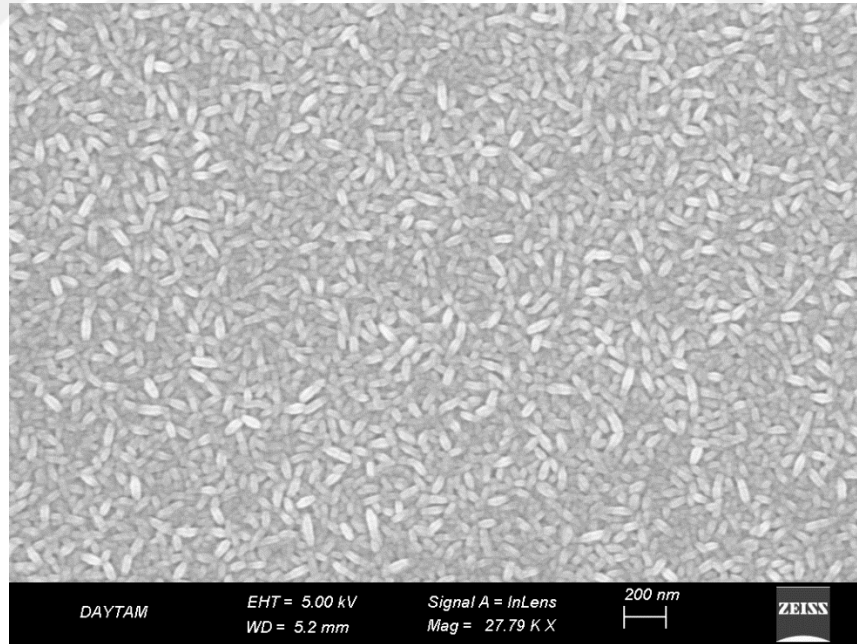
Şekil 4.95. RF saçtırma yöntemi ile nSi üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



Şekil 4.96. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



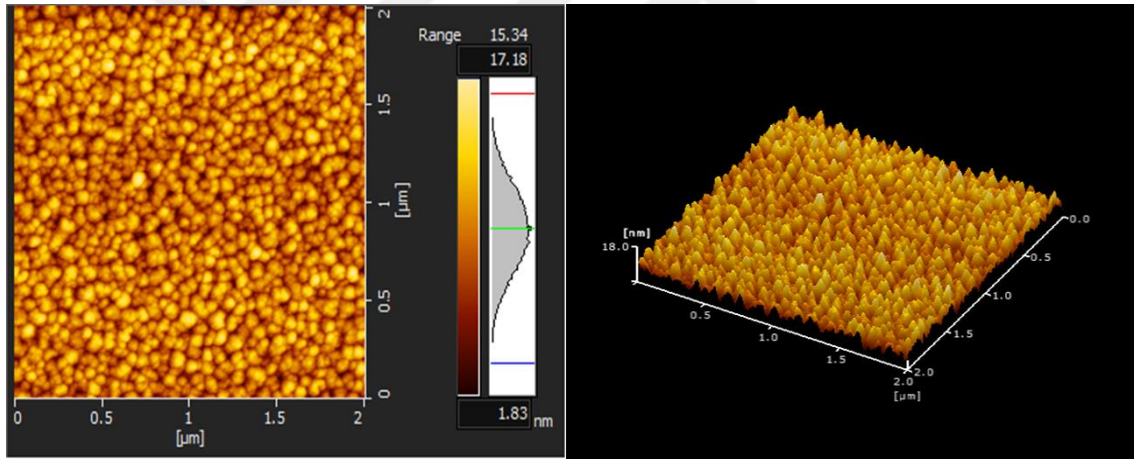
Şekil 4.97. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü



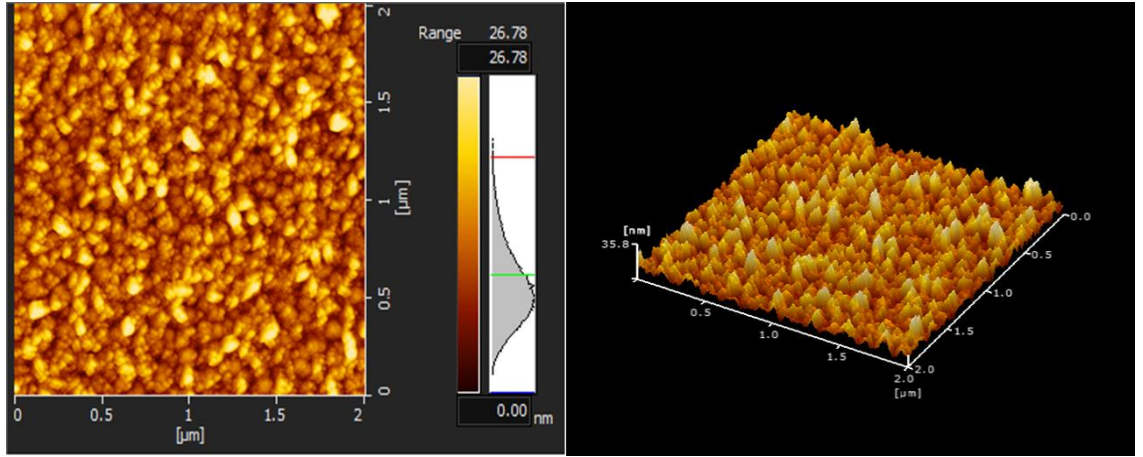
Şekil 4.98. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin FEG-SEM görüntüsü

4.3.8. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin AFM analizi

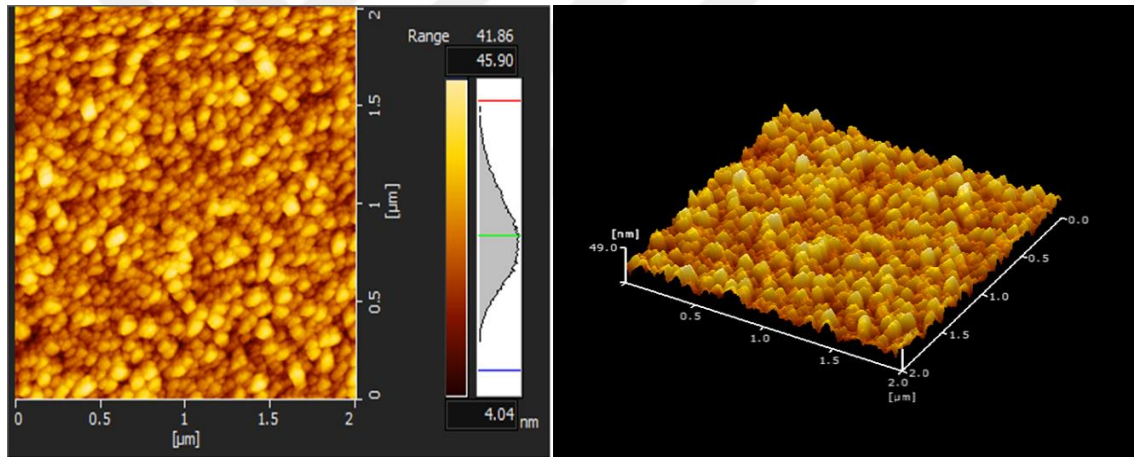
Şekil 4.99, 4.100 ve 4.101’de n-Si altlık üzerine 3, 4 ve 5 sccm azot gazı akış miktarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular düzgün bir şekilde yerleşmiştir. Özellikle n-Si altlık üzerine 4 ve 5 sccm azot akış miktarında büyütülen ince filmde ise topaklanmadan ziyade daha sivri yapılar dağınık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Elde edilen InGaN ince filmlerde dentritik yapının var olduğu görülmektedir. Elde edilen AFM görüntüleri XRD ve SEM sonuçlarını destekleyici niteliktedir. Aynı sonuçlar ve yorumların Şekil 4.102, 4.103 ve 4.104’te verilen safir altlık üzerine büyütülen fimler içinde yapılması mümkündür.



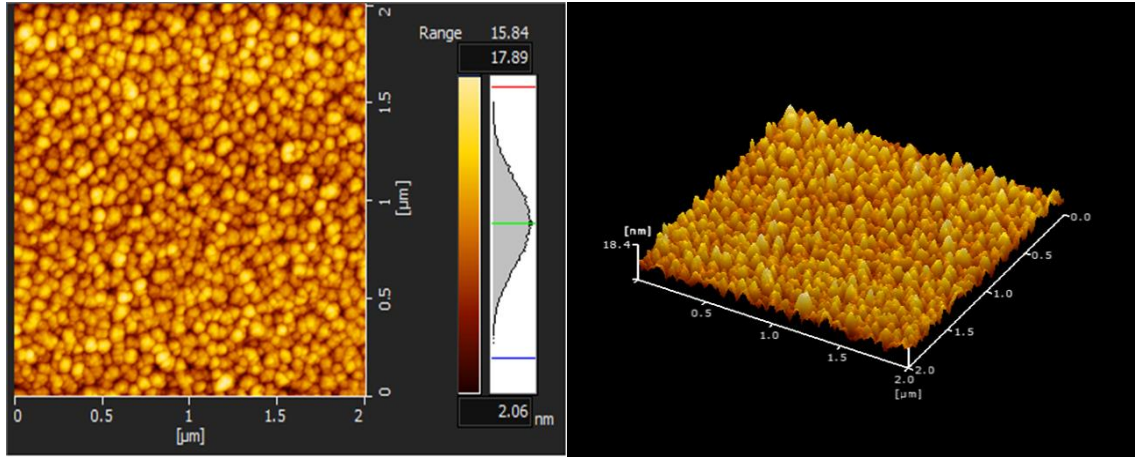
Şekil 4.99. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



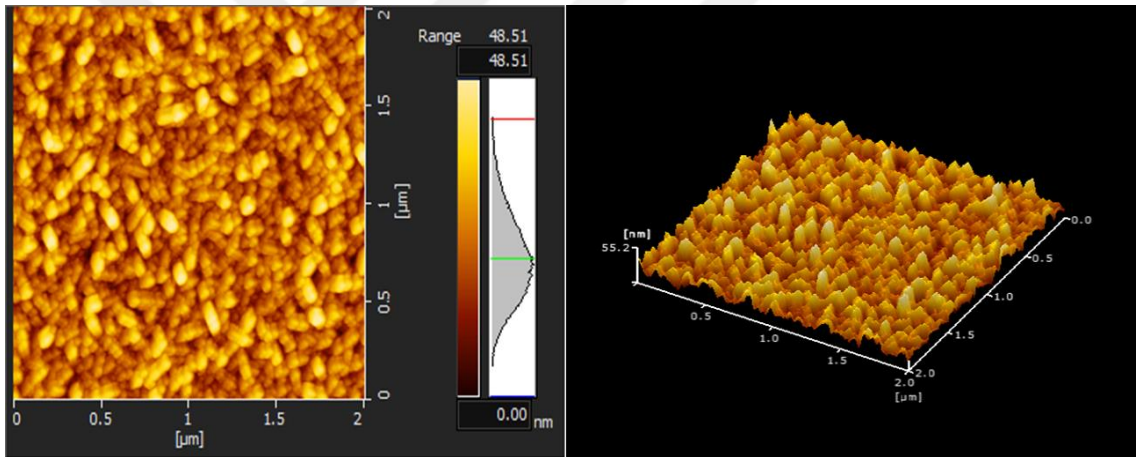
Şekil 4.100. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



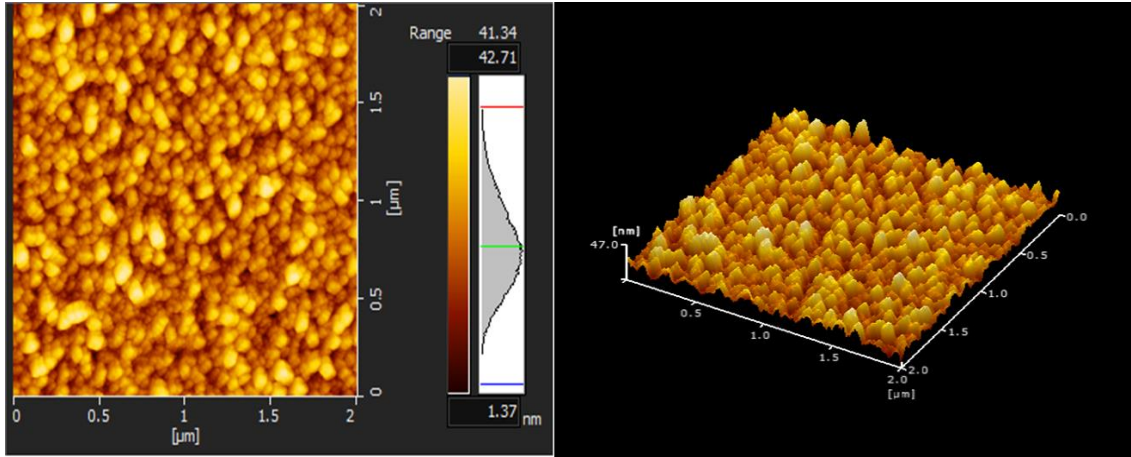
Şekil 4.101. RF saçtırma yöntemi ile n-Si üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.102. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 3 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.103. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 4 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.104. RF saçtırma yöntemi ile safir üzerine 5 sccm azot akış oranı ile büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu AFM görüntüsü

AFM yazılımı yardımı ile elde edilen bazı önemli yüzey parametreleri farklı altlıklar için aşağıda verilmiştir. Azot gazı akış oranlarının değiştirilmesi ile bazı yüzey parametrelerinin arttığı bazı parametrelerin ise azaldığı görülmektedir. Özellikle safir altlık üzerine 3 sccm’de büyütülen film için negatif skewness değerinin elde edilmesi yüzeyde çukurların tepelere göre daha belirgin olduğunu belirtmektedir. n-Si ve p-Si altlıklar üzerine büyütülen filmlerde yüksek kurtosis değerleri bu filmlerin mühendislikte sürtünme uygulamaları için uygun birer yapı olduklarını belirtmektedir. AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 1.41 nm – 6.92 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahipler. Büyütülen filmlerin çok pürüzsüz yüzeylere sahip oldukları bu değerlerden anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.22. RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

nSi(111)/InGaN	3 sccm	4 sccm	5 sccm
Çizgisel pürüzlük (Ra)	2.04	3.26	4.51
Ortalama pürüzlük (Rq)	2.52	4.30	5.44
Tepe (Rp)	5.77	14.98	12.03
Çukur (Rv)	2.52	9.39	15.47
Tepe - Çukur (Rt)	8.29	24.37	27.50
Skewness (Ssk)	1.16	2.92	2.08
Kurtosis (Skr)	26.27	136.26	67.51

Çizelge 4.23. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

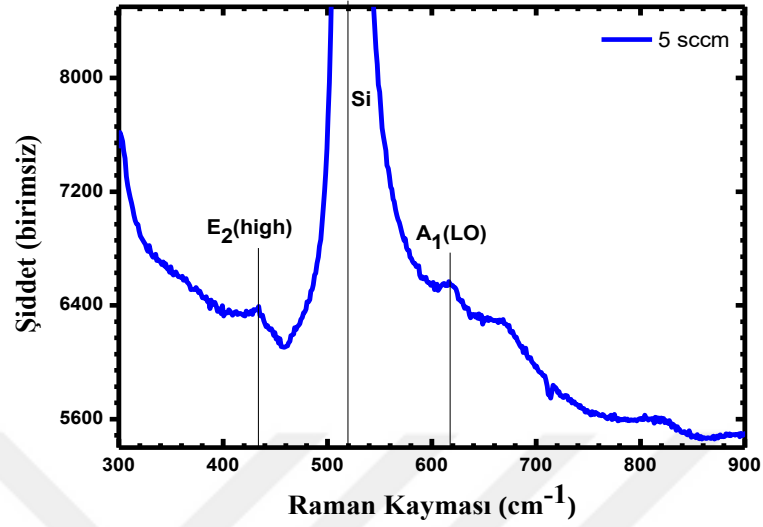
pSi(100)/InGaN	3 sccm	4 sccm	5 sccm
Çizgisel pürüzlük (Ra)	1.41	3.48	2.73
Ortalama pürüzlük (Rq)	1.79	4.37	3.54
Tepe (Rp)	4.13	15.68	11.11
Çukur (Rv)	5.27	7.69	6.46
Tepe - Çukur (Rt)	9.40	23.37	17.57
Skewness (Ssk)	0.99	1.12	1.15
Kurtosis (Skr)	21.82	24.24	23.37

Çizelge 4.24. RF saçtırma yöntemi ile safir altlık üzerine farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

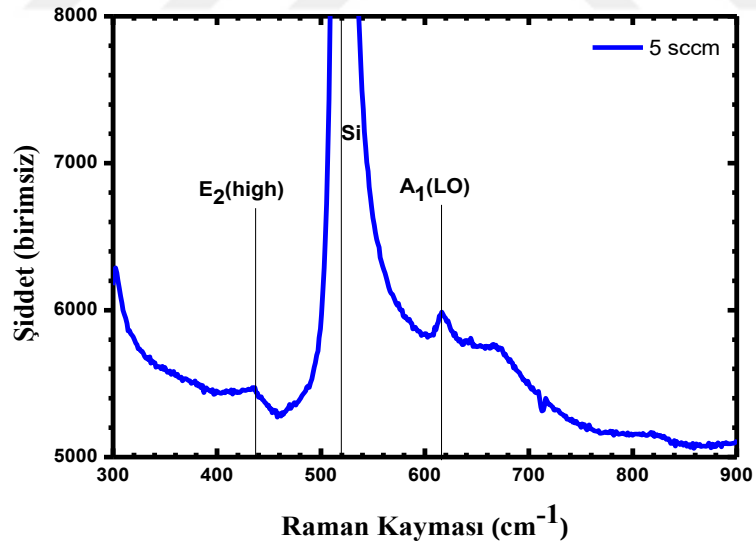
Safir(0001)/InGaN	3 sccm	4 sccm	5 sccm
Çizgisel pürüzlük (Ra)	1.92	6.92	4.46
Ortalama pürüzlük (Rq)	2.46	8.60	5.49
Tepe (Rp)	5.32	20.52	13.36
Çukur (Rv)	6.67	18.55	10.28
Tepe - Çukur (Rt)	11.99	39.07	23.64
Skewness (Ssk)	-0.12	0.02	0.09
Kurtosis (Skr)	0.17	2.14	2.70

4.3.9. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin Raman analizi

5 sccm azot akış değerinde n-Si ve p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.105 ve 4.106'ya bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. n-Si altlık için bu piklerden silisyum altlığa ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(\text{high})$ moduna ait pik (433 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan $A_1(\text{LO})$ moduna ait pik ise yine çok zayıf bir şekilde görülmekte ve 617 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. p-Si altlık için ise $E_2(\text{high})$ moduna ait pik (437 cm^{-1}) ve $A_1(\text{LO})$ moduna ait pik ise 616 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.105. RF saçırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine 5 sccm azot gazı akış miktarında büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği



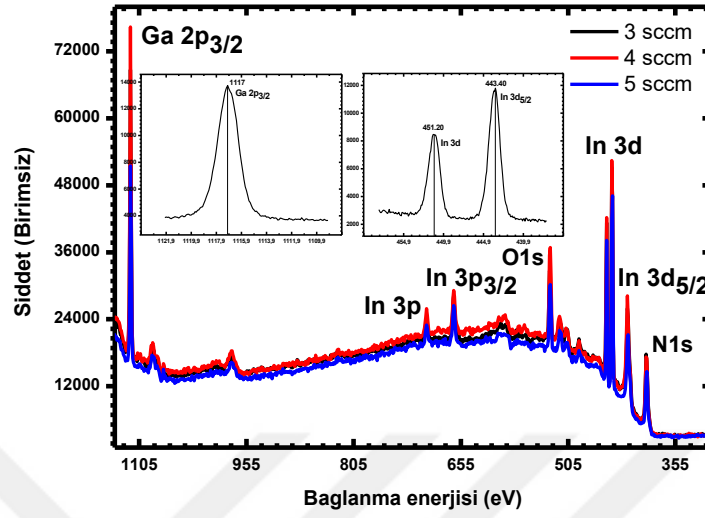
Şekil 4.106. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine 5 sccm azot gazı akış miktarında büyütülen InGaN ince filminin Raman değişimi grafiği

4.3.10. Azot gazı akış oranına göre elde edilen InGaN ince filmlerinin XPS analizi

XPS incelenen yüzeylerin elementel ve kimyasal durum bilgisinin analizi için kullanılır. Yüzeyden 10 nm derinde elementel ve kimyasal durum analizi yapılabilmektedir. İncelenen numunenin kimyasal bağlara katılmış iyonlarını ve bağ enerjilerini tespit edebilmektedir. Bu analiz sonuçları Şekil 4.107 ve Çizelge 4.25'te verilen sonuçlar ile yorumlanmıştır. Çizelge 4.25'te elde edilen In, Ga ve N elementlerine ait orbitallere göre bağlanma enerjisi değerleri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.25'te elementlerin bağ yaptığı orbital, pik şiddetini ve yapıdaki elementlerin atomik yüzdesi verilmiştir.

İncelenen InGaN ince filminin, farklı azot gazı akış oranlarında biriktirilen genel XPS tarama eğrileri Şekil 4.107'de gösterilmiştir. Spektrumdan Ga, N, In ve O da dâhil olmak üzere dört çeşit element, hem yüzeyde hem de InGaN filmi içerisinde gözlemlenmektedir. Göreceli olarak yüksek yoğunluklu O-ilişkili XPS (O1s) özelliği ile belirtildiği gibi, büyütülen InGaN filmlerin yüzeyi önemli derecede oksitlenmiştir. Burada O yüzdelik verileri N elementi içerisine dahil edilerek verilmiştir. Burada asıl gözlemlenmek istenen In ve Ga elementleridir. Ayrıca büyütülen InGaN filmlerin kimyasal durumları da XPS ile incelendi. Bu analiz için Şekil 4.107'de gösterildiği gibi O (1s), In (3d), In (3d_{5/2}), Ga (2p_{3/2}) ve N (1s) fotoelektron pikleri seçildi. Çok az pik şiddetinde mevcut durumda olan In (3p) ve In (3p_{5/2}) fotoelektron pikleri ise dikkate alınmadı. Ga (2p_{3/2}) spektrumunun geniş spektral özellikleri sadece 1117 eV bağlama enerjisindeki GaN fazındaki Ga-N bağı olan bir keskin pik noktasından ayrılabilir. Şekil 4.107'de gösterilen In (3d) ve In (3d_{5/2}) fotoelektron hattı ise iki farklı pik olarak gözlemlenmiştir ve bu pikler In-N bağında olup In(3d) ve In (3d_{5/2}) için sırasıyla 451.2 eV ve 443.4 eV bağlanma enerjileri ile gösterilmektedir.

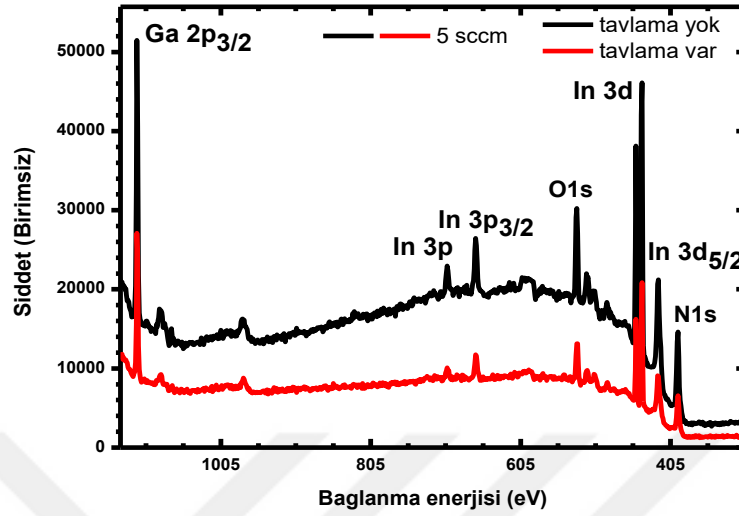
Şekil 4.107'de ve Çizelge 4.25'de görüldüğü gibi farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminde azot gazı akış oranı arttıkça elementlere ait bağlanma enerjileri azalmaktadır. In elementinin atomik yüzde oranı azot gazı akış oranı arttıkça artış göstermektedir. En büyük pik şiddetleri Ga (2p_{3/2}) elementine aittir.



Şekil 4.107. RF saçırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin XPS analizi

Çizelge 4.25. Bileşiklerdeki elementlerin bağ yaptığı orbital, bağlanma enerjileri, pik şiddetleri ve yapıdaki atomik yüzdeleri

	Elementler ve Orbitaller	Bağlanma enerjisi (eV)	Pik Şiddetleri	Atomik yüzdeler (%)
3 sccm	In (3d)	443.7	51534.69	9.81
	Ga (2p _{3/2})	1117.1	68946.19	10.30
	N (1s)	395.8	18151.06	79.89
4 sccm	In (3d)	443.7	52527.15	10.37
	Ga (2p _{3/2})	1117.1	76591.49	10.95
	N (1s)	395.6	17876.62	78.68
5 sccm	In (3d)	443.4	46451.37	11.31
	Ga (2p _{3/2})	1117	51709.64	9.05
	N (1s)	395.3	14657.98	79.64



Şekil 4.108. RF saçtırma yöntemi ile p-Si altlık üzerine farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminin tavlama sonrası XPS analizi

Şekil 4.108’de 5 sccm azot gazı akış oranında büyütülen film için tavlama yapıldıktan sonraki XPS grafiği ve buna bağlı olarak Çizelge 4.26’da elde edilen değişiklikler gösterilmiştir. Elde edilen numuneler 400⁰C’de 400 sn boyunca N₂ ortamında tavlandı. Tavlama sonrası filmin pik şiddetlerinde azalma olduğu görülmektedir. Burada en dikkat çekici sonuç ise Ga elementinin atomik yüzdesi tavlama sonrası belirgin bir biçimde artmış, N elementinin atomik yüzdesi ise azalmıştır. In elementinde az da olsa atomik oranda artış görülmüştür.

Çizelge 4.26. Bileşiklerdeki elementlerin tavlama durumuna bağlı bağ yaptığı orbital, bağlanma enerjileri ve yapıdaki atomik yüzdeleri

	Elementler ve Orbitaller	Bağlanma enerjisi (eV)	Atomik yüzdelere (%)
Tavlama var	In (3d)	443.7	11.74
	Ga (2p _{3/2})	1117.1	12.71
	N (1s)	395.8	75.55
Tavlama yok	In (3d)	443.4	11.31
	Ga (2p _{3/2})	1117	9.05
	N (1s)	395.3	79.64

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında radyo frekanslı magnetron saçtırma tekniği kullanılarak $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ üçlü bileşiği incelenmiştir. InGaN bileşiğinin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Optik özellikleri için soğurma ölçüm tekniği; yapısal analiz için XRD, XPS, Raman ölçüm teknikleri; morfolojik özellikleri için SEM ve AFM ölçüm teknikleri kullanılmıştır.

Saçtırma tekniğiyle yapılan büyütmelerde optimum şartlar sağlamak için altlık, altlık sıcaklığı, RF güç değişimi, azot gazı akış oranı ve çalışma basıncı gibi birçok parametre dikkatte alınmıştır. Altlık için p-Si(100), n-Si(111) ve safır(0001) kullanılmıştır ve altlık olarak kullanılan silisyumlar RCA-1 ve RCA-2 olarak adlandırılan standart temizleme prosedürleri kullanılarak temizlenmiştir. Büyütme sistemi vakum ortamında gerçekleştirilmiştir ve farklı büyütme parametreleri kullanıldığından her bir büyütme farklı sürelerde tamamlanmıştır. Asal gaz olarak Argon gazı kullanılmıştır, azot gazı akış oranına göre büyütülmek istenen filmlerde ise reaktif gaz olarak Azot gazı vakumlu ortama gönderilmiştir. Film büyütme sürecinde farklı altlıklar da denenmiştir. Yapılan bu çalışma ile öncelikle en uygun alltaş belirlenmeye çalışıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda hem örgü uyumu sağlaması açısından hem de elde edilen XRD yapı analiz sonuçlarına bakıldığında genel anlamda p-Si(100) altlığının en uygun altlık olduğu tespit edildi. Dört farklı büyütme parametresi altında her bir altlık için büyütme gerçekleştirildiğinden her bir parametre altında elde edilen sonuçlar kendi aralarında yorumlandı ve en iyi büyütülen film tespit edilmeye çalışıldı.

Optik özellikleri incelemek için ilk olarak soğurma ölçüsü alınmıştır. Optik özellikleri bakıldığında safır altlık için soğurma ölçümlerinde Tauc denkleminde yararlanılmıştır. Bu denkleme göre elde edilen soğurma ve geçirgenlik değerlerinden soğurma katsayısı bulunmuş ve sonrasında $(\alpha h\nu)^2$ ($\text{cm}^{-1} \text{ eV}^2$) karşı enerji grafiği çizilmiştir. Silisyum altlıklar için ise sadece yansıma ölçümleri alınabildiğinden dolayı Kubelka-Munk denklemi yardımıyla $F(R)$ 'ye karşı enerji grafiği çizilmiştir. Çizilen fit ile düşük azot gazı yani 0 sccm azot gazı akış oranında RF gücü değişimine bağlı olarak büyütülen

InGaN filmlerde yasak enerji aralığı değerleri 50 W, 75 W, 100 W ve 125 W için sırasıyla n-Si altlık için 3.09 eV, 3.10 eV, 2.94 eV, 2.65 eV ve p-Si altlık için 2.76 eV, 2.35 eV, 2.53 eV, 2.88 eV olup, p-Si altlık için 125 W RF gücündeki film haricinde diğer yasak enerji aralığı değerleri XPS sonuçları ile uyumludur. Bu değerler arasında en yüksek yasak enerji aralığına sahip 50 W RF gücünde büyütülen InGaN yapının 2.76 eV ile en düşük In atomik oranına olduğu görülmektedir. Ayrıca en düşük yasak enerji aralığına sahip 75 W RF gücünde büyütülen InGaN filmi 2.35 eV yasak yasak enerji aralığı değeri ile en yüksek In atomik oranına sahiptir. In atomik oranının artması yapıda yasak enerji aralığı değerinin düşmesi gerektiğini gösterdiğinden, elde edilen sonuçlar uyumludur. Azot gazı değişim oranına göre büyütülen filmler için 0 sccm, 0.4 sccm, 0.8 sccm ve 1.2 sccm azot gazı akış oranları için yasak enerji aralığı değerleri sırasıyla 2.94 eV, 2.34 eV, 2.92 eV ve 2.87 eV olarak elde edilmiştir. 0.4 sccm azot gazı akış oranında elde edilen film haricinde azot gazı akış miktarı arttırıldıkça yasak enerji aralığı değerleri azalmaktadır. Azot gazı akış oranının belirli miktarlarda değiştirilmesi ile istenilen yasak enerji aralığına sahip yapının elde edilmesi mümkün olmaktadır. Çalışma basıncı değişimlerine göre elde edilen InGaN fimlerinde ise farklı değerlerde yasak enerji aralıkları bulunmuştur. 20 mTorr ve 8 mTorr çalışma basıncı değerlerinde sırasıyla 3.11 eV ve 3.26 eV yasak enerji aralığı değerleri elde edilmiştir. Çalışma basıncı değerlerinin düşürülmesi ile yasak enerji aralığı değerlerinin arttığı görülmüştür. Altlık sıcaklığı değişim parametreleri dikkate alındığında safir altlık üzerine 400°C ve 300°C altlık sıcaklığında büyütülen InGaN ince filmler için ise sırasıyla 2.49 eV ve 2.51 eV yasak enerji aralığı değerleri elde edilmiştir. Altlık sıcaklığı değerleri azaltığında yasak enerji aralığı değerlerinin arttığı görülmüştür. Tüm büyütme parametreleri dikkate alındığında yasak enerji aralığı değerlerinin en düşük 2.34 eV ve en yüksek 3.26 eV olduğu tespit edilmiştir. Optik özellikler dikkate alındığında büyütülen filmler için geniş bir spektrum aralığında yasak enerji aralığı değerleri elde edilmiştir ve istenilen yasak enerji aralığı değerlerinde InGaN filmlerin farklı uygulamalar için kullanılması mümkün olmaktadır. Özellikle güneş pili ve hücreleri uygulamaları için gelen güneş ışığının görünür bölgeden yakın mor ötesi bölgeye kadarlık kısmının soğurulmasında elde ettiğimiz farklı yasak enerji aralıklarından uygun olan filmlerin kullanılması mümkün olabilmektedir. Kısacası, bir güneş hücresinin verimliliğini arttırmada güneş enerjisinin maksimum absorpsiyonunu elde etmek için RF güç değerlerini değiştirerek

silisyum ve safir altlıklar üzerinde büyüyen InGaN filmlerin yasak enerji aralığının geniş aralıkta kontrol edilebileceği açıkça gösterilmektedir.

Büyütülen filmlerin örgü parametreleri, düzlemler arası mesafenin ve kristal yapıları hakkında bilgi edinmek için yapısal analize XRD analizi ile başlanmıştır. XRD analizinde birçok numunede kristal fazlar gözlemliyoruz. Bu, temel olarak altlık ve hedef arasındaki nispeten küçük bir mesafede plazmadan altlığa yapılan küçük ısı transferine atfedilebilir. Bu biriktirme koşullarında, alaşımlardaki baskın yapısal fazların, harici ısı kaynağı kullanılmadığında nispeten düşük sıcaklık büyümesi nedeniyle dentritik olduğu beklenmektedir. Büyütülen bazı filmlerde dentritik yapının elde edildiğini gözlemledik. InGaN filmi farklı parametre altında büyütülmüş ve birçok film hekzagonal kristal yapı sergilemiştir. Farklı çalışma parametreleri altında büyütülen filmlerin XRD piklerinin yönelimi ve şiddeti değişmiştir. Çizelge 4.1 büyütme parametrelerini göstermektedir. Çizelge 4.2’de InGaN ince filmlerin silisyum altlık üzerine RF saçırma yöntemi ile büyütülen filmin XRD kırınım desenlerinden elde edilen yapısal özelliklerini belirten parametrelerinden görüldüğü gibi genel itibarıyla hekzagonal InGaN yapısı oluşmuştur. Özellikle p-Si altlık üzerine farklı RF gücü değişimlerinde büyütülen InGaN filmleri için (100), (002) ve (101) yönelimlerinde polikristal yapının elde edildiği görülmektedir. RF gücü değişiminin etkisi elde edilen grafiklerden görülmektedir. Şekil 4.1, 4.2, 4.3’de n-Si ve p-Si altlıklar için 50 W ve 75 W RF gücünde büyütülen InGaN ince filminin daha büyük şiddette olduğu görülürken, safir altlık içinse 50 W ve 125 W RF gücünde büyütülen InGaN ince filminin daha büyük şiddette olduğu görülmektedir. Saçırma RF gücü arttıkça, elektron ve iyonların sayıları veya enerjileri artacaktır. Hedefe çarpan pozitif iyonların enerjileri artacaktır. RF gücünün artması, altlık yüzeyini yüksek enerjili elektronlar ile bombardıman edeceği için kristal büyümesini teşvik edici termal enerjinin bir formu olan bir ek enerji anlamına gelmektedir. Aynı zamanda RF gücünün fazla aşılması, tercih edilen yönlendirmenin bozulmasına yol açabilir ve kristal taneciğinin büyümesini sınırlar. Film yapısı yüksek kusur yoğunluğu ve küçük tanecik boyutu ile sonuçlanabilir. Film, yüksek enerjili parçacıkların bombardımanından zarar görebilir ve filmde iç kusurlara yol açabilir.

Değişen azot gazı akış miktarlarında (0, 0.4, 0.8, 1.2 sccm) saçırtma yöntemi ile elde edilen InGaN yapısının XRD analizi sonuçlarında dentritik yapıya sahip olduğu görülmüş olup yayvan pikler elde edilmiştir. Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23'den görüleceği üzere azot gazı akış oranı büyüdükçe elde edilen filmlerin kristal yapısı bozulmakta olup dentritik bir yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durumda 0 sccm azot gazında elde edilen film kristal yapıya sahip olduğu için diğer büyütme parametrelerinde büyütülecek filmler için azot gazı akış oranı 0 sccm'de sabit tutulmuştur. Düşük azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN filmler için en uygun azot gazı akış parametresi 0 sccm olup, bu oranda büyütülen filmlerin XRD sonuçları yapının kristal bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Azot gazının akışının artması, Argon kısmi basıncını düşürecek ve bombardıman edilen Argon iyonlarını hedefe doğru azaltacaktır. Bu durum daha düzensiz örgü oluşumuna neden olmaktadır.

Farklı çalışma basınç değerlerinde (8, 14, 20 mTorr) saçırtma yöntemi ile edilen InGaN yapısının XRD analizi sonuçlarında özellikle 14 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınç değerlerinde hekzagonal yapıya sahip olduğu görülmüş olup polikristal yapı mevcuttur. 8 mTorr basınç değerinde büyütülen InGaN yapısının ise (100) düzlemindeki küçük XRD piki haricinde dentritik yapıda büyüdüğü görülmektedir. Altlık farkları açısından bakıldığında 14 mTorr çalışma basıncında n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN filminin (100) yönelimli XRD pikinin daha şiddetli olduğunu görmekteyiz. p-Si altlık üzerine 20 mTorr çalışma basıncında büyütülen InGaN filminin yine aynı yönelimli XRD pikinin ise daha şiddetli olduğunu görmekteyiz. 14 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınçları karşılaştırıldığında, artan çalışma basıncı ile XRD piklerinin çok az bir şekilde sola kaydığı görülmektedir. Gaz basıncı düştükçe, elektronun ortalama serbest yolu artar. Daha uzun ortalama serbest yola sahip elektronlar Argon gaz molekülleri ile çarpışmadan önce daha fazla enerji depolayabilirler ve çarpışma ile aktif iyonlaşma üretebilirler. Daha yüksek enerjili birçok pozitif iyon hedefe çarpabilir ve daha fazla molekülü hedeften saçtırarak birikim oranında artış gösterebilir ve film kalitesini artırabilir. Düşük büyütme basıncında, parçacıklar altlık yüzeyine vardığında düşük hareket kabiliyeti nedeniyle yeterli enerjiye sahip olamayabilirler. Bu durum daha düzensiz örgü oluşumuna neden olabilir. Bu çalışmada, etkin bir iyonizasyon ve

saçtırma ile plazma oluşturulmasına izin vermek için en etkili gaz basıncı 14 mTorr olarak kabul edilmektedir.

Farklı altlık sıcaklığı değerlerinde (300°C, 400°C ve 500°C) saçtırma yöntemi ile elde edilen InGa_N yapısının XRD analizi sonuçlarında 500°C’de büyütülen film hekzagonal kristal yapısına sahiptir. Zaten bu altlık sıcaklık değerimiz diğer büyütme parametreleri değiştirildiğinde elde edilen yapılar için sabit bir altlık sıcaklığı olarak ele alınmıştır. Altlık sıcaklığı değeri düşürüldüğünde InGa_N filmlerinin kristal yapısının giderek bozulduğu ve dentritik bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Altlık üzerine biriken atom kümelerinin hareketliliği, enerjileri ile uyumlu olarak altlık sıcaklığının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Altlık üzerindeki atomların hareketliliğindeki bu artış, filmlerin tercihli yönelimlerine sebep olacaktır. Altlık sıcaklığı artmasıyla ince filmlerin tane boyutu artar. Bu artma yoğunlaşan parçacıkların enerjileri ile ilgilidir. Düşük altlık sıcaklığı değerlerindeki filmlerde birtakım kusur ve tane sınırları vardır. İntirinsik gerilme/sıkıştırma, bu kusurlar ve tane sınırlarında, tabaka sınırları boyunca atomlar arası kuvvetler nedeniyle bitişik taneler arasındaki mesafenin daralmasıyla ve filmin alt tabakaya yapışmasıyla birlikte üretilir. Bununla birlikte kristalit boyutu artar. Bundan dolayı, tane sınırlarının sayısı daha yüksek altlık sıcaklıklarında azalır ve biriktirme sırasındaki ısı işlem, kristal yapısındaki örgü kusurlarının konsantrasyonunu azaltır. Bu nedenle, yüksek altlık sıcaklığının filmler üzerinde gerilme/sıkıştırma durumunu azalttığı ve böylece kristalleşmeyi geliştirdiği düşünülmektedir.

XPS incelenen yüzeylerin elementel ve kimyasal durum bilgisinin analizi için kullanılır. Yüzeyden 10 nm derinde elementel ve kimyasal durum analizi yapılabilir. İncelenen numunenin kimyasal bağlara katılmış iyonlarını ve bağ enerjilerini tespit edebilmektedir. İncelenen InGa_N ince filminin, farklı RF güçlerinde (50 W, 75 W, 100 W, 125 W) biriktirilen genel XPS tarama eğrileri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Spektrumdan Ga, N, In ve O da dâhil olmak üzere dört çeşit element, hem yüzeyde hem de InGa_N filmi içerisinde gözlemlenmektedir. Göreceli olarak yüksek yoğunluklu O-ilişkili XPS O (1s) özelliği ile belirtildiği gibi, büyütülen InGa_N filmlerin yüzeyi önemli derecede oksitlenmiştir. Burada O yüzdelik verileri N elementi içerisine dâhil edilerek

verilmiştir. Burada asıl gözlemlenmek istenen In ve Ga elementleridir. Ayrıca büyütülen InGaN filmlerin kimyasal durumları da XPS ile incelendi. Bu analiz için Şekil 4.20’de gösterildiği gibi O (1s), In (3d_{5/2}), Ga (2p_{3/2}) ve N (1s) fotoelektron pikleri seçildi. Ga (2p_{3/2}) spektrumunun geniş spektral özellikleri sadece 1119 eV bağlama enerjisindeki GaN fazındaki Ga-N bağı olan bir keskin pik noktasından ayrılabilir. Şekil 4.20’de gösterilen In (3d_{5/2}) fotoelektron hattı ise birden fazla karmaşık piklere ayrılmıştır, en şiddetli pik ise In-N bağında 446 eV bağlama enerjisi ile gösterilmektedir, diğer piklerin ise yapıdaki In-O bağı ya da In-In metalik bağına karşılık gelebileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.20’de ve Çizelge 4.6’da görüldüğü gibi farklı RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filminde 50 W RF gücü için var olan elementlerden In (3d_{5/2}) bağlama enerjisi 446 eV, Ga (2p_{3/2}) elementinin bağlama enerjisi 1119 eV tur. N elementine ait 1s orbitali bağlama enerjisi ise 398 eV tur. Tez başlığında verilen In_xGa_{1-x}N ifadesindeki x oranı RF güç değişimlerine göre kontrol edildi. Örneğin 100 W RF gücünde büyütülen film için In_{0.036}Ga_{0.206}N_{0.757} bileşiği elde edilirken, 50 W RF gücünde büyütülen film için In_{0.023}Ga_{0.240}N_{0.736} bileşiği elde edildi. Bu durumda değişen RF gücüne bağlı olarak bileşik içerisindeki In atomik oranının ayarlanabileceği görülmektedir.

Farklı azot gazı akış oranlarında biriktirilen InGaN filmleri genel XPS tarama eğrileri Şekil 4.107’de gösterilmiştir. Spektrumdan Ga, N, In ve O da dâhil olmak üzere dört çeşit element, hem yüzeyde hem de InGaN filmi içerisinde gözlemlenmektedir. Göreceli olarak yüksek yoğunluklu O-ilişkili XPS (O1s) özelliği ile belirtildiği gibi, büyütülen InGaN filmlerin yüzeyi önemli derecede oksitlenmiştir. Burada O yüzdelik verileri N elementi içerisine dâhil edilerek verilmiştir. Burada asıl gözlemlenmek istenen In ve Ga elementleridir. Ayrıca büyütülen InGaN filmlerin kimyasal durumları da XPS ile incelendi. Bu analiz için Şekil 4.107’de gösterildiği gibi O (1s), In (3d), In (3d_{5/2}), Ga (2p_{3/2}) ve N (1s) fotoelektron pikleri seçildi. Çok az pik şiddetinde mevcut durumda olan In (3p) ve In (3p_{5/2}) fotoelektron pikleri ise dikkate alınmadı. Ga (2p_{3/2}) spektrumunun geniş spektral özellikleri sadece 1117 eV bağlama enerjisindeki GaN fazındaki Ga-N bağı olan bir keskin pik noktasından ayrılabilir. Şekil 4.107’de gösterilen In (3d) ve In (3d_{5/2}) fotoelektron hattı ise iki farklı pik olarak gözlemlenmiştir

ve bu pikler In-N bağında olup In(3d) ve In (3d_{5/2}) için sırasıyla 451.2 eV ve 443.4 eV bağlanma enerjileri ile gösterilmektedir. 5 sccm azot gazı akış oranında büyütülen filmde In_{0.113}Ga_{0.090}N_{0.796} bileşiği elde edilirken, 3 sccm azot gazı akışında ise In_{0.098}Ga_{0.103}N_{0.798} bileşiği elde edilmiştir. Bu durumda değişen azot gazı akış oranına bağlı olarak bileşik içerisindeki In atomik oranının ayarlanabileceği görülmektedir.

Şekil 4.107’de ve Çizelge 4.25’de görüldüğü gibi farklı azot gazı akış oranlarında büyütülen InGaN ince filminde azot gazı akış oranı arttıkça elementelere ait bağlanma enerjileri azalmaktadır. In elementinin atomik yüzde oranı azot gazı akış oranı arttıkça artış göstermektedir. En büyük pik şiddetleri Ga (2p_{3/2}) elementine aittir.

Şekil 4.108’de 5 sccm azot gazı akış oranında büyütülen film için tavlama yapıldıktan sonraki XPS grafiği ve buna bağlı olarak Çizelge 4.26’da elde edilen değişiklikler gösterilmiştir. Elde edilen numuneler 400⁰C’de 400 sn boyunca N₂ ortamında tavlandı. Tavlama sonrası filmin pik şiddetlerinde azalma olduğu görülmektedir. Burada en dikkat çekici sonuç ise Ga elementinin atomik yüzdesi tavlama sonrası belirgin bir biçimde artmış, N elementinin atomik yüzdesi ise azalmıştır. In elementinde az da olsa atomik oranda artış görülmüştür.

InGaN üçlü bileşiğinde optik fononlar tek mod davranışı sergilemektedir. Boyuna (LO) ve enine optik (TO) fononlar tek bir set oluşturmaktadır. Yani InN ve GaN arasındaki frekans liner bir bağıllık göstermektedir. Bu durumda InGaN bileşiğine ait optik fonon modları A₁(LO) ve E₂(high) olmaktadır. Düşük azot gazı akışında, farklı RF güç değerlerinde p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.19’a bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. Bu piklerden silisyum altlığa ait olan pik 520 cm⁻¹ değerinde çok güçlü olduğundan E₂(high) moduna ait pik (yaklaşık 490 cm⁻¹) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan A₁(LO) moduna ait pik ise çok yayvan bir şekilde görülmekte olup 670-720 cm⁻¹ aralığında oluşmuştur. Bu aralığın her bir RF gücü değerinde farklı olmasının sebebi büyütülen filmlerdeki In oranının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu piklerin daha yayvan ve şiddetinin düşük olması polikristal yapının oluşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. RF gücünün artırılması ile büyütülen ince filmlerde

Raman piklerinin şiddetinin daha fazla olduğu görülmektedir. Raman spektrumunda, $A_1(LO)$ ve $E_2(high)$ fonon modları gözlemlenmekte olup, bu çalışmada elde edilen InGaN filminin, XRD sonuçlarıyla tutarlı olan hekzagonal yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Düşük azot gazı akış değerlerinde (0 sccm, 0.4 sccm, 0.8 sccm ve 1.2 sccm) p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.37'ye bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. Bu piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(high)$ moduna ait pik (yaklaşık 435 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan $A_1(LO)$ moduna ait pik ise yaklaşık 620 cm^{-1} civarında oluşmuştur. Bu değer hemen hemen tüm azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin tüm Raman değerlerinde aynıdır. Azot gazı değişim miktarının Raman kaymasına etkisi olmamakla birlikte sadece Raman şiddetinde bir değişime sebebiyet verdiği görülmektedir.

Düşük azot gazı akışında farklı çalışma basıncı değerlerinde p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.53'e bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. Bu piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(high)$ moduna ait pik (yaklaşık 430 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan $A_1(LO)$ moduna ait pik 8 mTorr çalışma basıncındaki film için 668.94 cm^{-1} değerinde olmaktadır Diğer çalışma basıncı değerlerinde ise bu pik değerinin $670\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ aralığında çok yayvan bir şekilde olduğu görülmektedir. Bu aralığın her bir RF gücü değerinde farklı olmasının sebebi büyütülen filmlerdeki In oranının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu piklerin daha yayvan ve şiddetinin düşük olması polikristal yapının oluşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Çalışma basıncının azaltılması ile büyütülen ince filmlerde Raman piklerinin şiddetinin daha fazla olduğu görülmektedir.

Yüksek azot gazı akışında (5 sccm azot akış değerinde) n-Si ve p-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin raman değişimleri ve modlarını gösteren Şekil 4.105 ve 4.106'ya bakıldığında InGaN filmine ait raman değişimlerini gösteren pikler görülmektedir. n-Si altlık için bu piklerden silisyum altlığına ait olan pik 520 cm^{-1} değerinde çok güçlü olduğundan $E_2(\text{high})$ moduna ait pik (433 cm^{-1}) çok zayıf olmaktadır. Diğer taraftan $A_1(\text{LO})$ moduna ait pik ise yine çok zayıf bir şekilde görülmekte ve 617 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. p-Si altlık için ise $E_2(\text{high})$ moduna ait pik (437 cm^{-1}) ve $A_1(\text{LO})$ moduna ait pik ise 616 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da düşük azot gazı akışında 100 W RF gücünde sırasıyla n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 4.4 mm çalışma mesafesinde 200.000 büyütmede 200 nm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey görüntüleri filmlerin homojen nanoboyutlu tanecikleri ile kompakt ve pürüzsüz bir yüzey olduğunu göstermektedir. Ayrıca daha büyük boyutlu taneciklerin, küçük boyutlu tanecikler üzerinde biriktiği görülmektedir. SEM sonuçları, farklı RF gücü değişimlerinde InGaN filmlerinin büyümesinin, optoelektronik uygulamalara fayda sağlayabilecek iyi yüzey morfolojileri sergilediğini göstermektedir.

Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da safir altlık üzerine sırasıyla düşük azot gazı akışlarında yani 0.4, 0.8 ve 1.2 sccm azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 4.6 mm çalışma mesafesinde 100.000 büyütmede $1\text{ }\mu\text{m}$ ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin özellikle 0.4 sccm azot gazı akış miktarında yüzeye düzgün bir şekilde dağılmadığı ve yer yer boşluklar görüldüğü gözlenmektedir. Ayrıca safir altlık da net bir şekilde görülmektedir. Azot gazı akış oranının artırılması ile dentritik yapının elde edildiği Şekil 4.29 ve 4.30'da görülmektedir.

Şekil 4.45 ve 4.46'da n-Si altlık üzerine 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 4.0 mm ve 4.2 mm çalışma mesafesinde 200.000 büyütmede 200 nm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde özellikle 8 mTorr çalışma basıncında büyütülen filmin dentritik bir yapıda olduğu görülmektedir. 20 mTorr çalışma basıncı altında büyütülen filmde ise

dentritik yapının giderek bozulduğu ve kristal yapıya daha yakın bir büyümenin gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Elde edilen SEM görüntüleri XRD sonuçları ile de desteklenmektedir. Şekil 4.47 ve 4.48’de safir altlık üzerine 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basıncı değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 3.5 mm ve 3.7 mm çalışma mesafesinde 150.000 büyütmede 1 μ m ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde elde edilen yapının tamamı ile dentritik olduğu görülmektedir.

Şekil 4.62, 4.63 ve 4.64’de safir altlık üzerine sırasıyla 300°C, 400°C ve 500°C altlık sıcaklık değerlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 5.2 mm, 4.7 mm ve 3.5 mm çalışma mesafesinde 50.000 büyütmede 1 μ m ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin özellikle 300°C altlık sıcaklık değerinde yüzeye düzgün bir şekilde dağılmadığı ve yer yer boşluklar görüldüğü gözlenmektedir. Ayrıca safir altlık da net bir şekilde görülmektedir. Altlık sıcaklık değerinin artması ile elde edilen filmlerde daha yoğun bir yapının elde edildiği ve yer yer boşlukların böylelikle dolduğu görülmektedir.

Şekil 4.73, 4.74, 4.75 ve 4.76’da safir altlık üzerine yüksek azot gazı akışında sırasıyla 40W, 60W, 100W ve 125 W RF güçlerinde büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile farklı çalışma mesafelerinde ve farklı büyütmelerde 200 nm ve 2 μ m ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 4.93, 4.94 ve 4.95’de n-Si altlık üzerine sırasıyla yüksek azot gazı akışında yani 3, 4 ve 5 sccm azot gazı akış miktarlarında büyütülen InGaN ince filmlerin inlens dedektör ile 5.3 mm çalışma mesafesinde 30.000 büyütmede 100 ve 200 nm ölçekli SEM görüntüleri incelendiğinde filmin özellikle 3 sccm azot gazı akış miktarında XRD sonuçları ile uyumlu olarak dentritik bir yapıda büyüdüğü görülmektedir. Ayrıca safir altlık da net bir şekilde görülmektedir. Azot gazı akış oranının artırılması ile dentritik yapının elde edildiği Şekil 4.94 ve 4.95’de görülmektedir. Dentritik yapı yine 4 sccm’de büyütülen filmde de görülmekte, 5 sccm’de büyütülen filmde ise dentrik yapı ile InGaN film yapısının iç içe geçtiği görülmektedir. Aynı şekilde safir altlık üzerine

büyütülen film için de dentrik yapının gözlemlendiği SEM görüntüleri Şekil 4.96, 4.97 ve 4.98’de görülmektedir.

Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14’te RF saçtırma yöntemi ile n-Si altlık üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde yer yer tepcikler oluşmuş olup, topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir.

RF güç değerleri karşılaştırıldığında güç değeri arttıkça yapının daha sıkı ve iç içe geçmiş taneciklerden oluştuğu ve filmin yüzeyinin daha yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.3’de verildiği gibi çizgi boyu pürüzlülük değeri ile ortalama pürüzlülük değerinin RF gücü artması ile azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde çukur ve tepciklerin değerlerinde de azalma görülmektedir. Bu durum yapının var olan ince uçlu sivri yapısının ortadan kalktığı ve yapının yüzeyinde yığılmalara benzer daha sıkı bir yapı olduğu anlaşılmaktadır. Benzer sonuçların Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18’de safir altlık üzerine büyütülen InGaN filmler içinde söylenebilmesi mümkündür.

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 43.28 nm – 78.71 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptir. 125 W p-Si altlık üzerine büyütülen filmde skewness değeri negatif olarak elde edilmiştir. Bu durum filmin yüzeyinde çukurların tepelerden daha fazla baskın olduğu anlamına gelmektedir. Diğer tüm filmler için skewness değerleri pozitif olduğundan yüzeylerde tepeler çukurlardan daha baskın olmaktadır.

Şekil 4.31’de n-Si altlık üzerine 0.4 sccm azot gazı akış miktarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Özellikle safir altlık üzerine 0.4 sccm azot akış miktarında büyütülen ince filmde ise topaklanmadan ziyade daha sivri yapılar dağınık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Daha yüksek azot gazı akış miktarlarında ise her iki altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminde dentritik yapının var olduğu görülmektedir. Elde edilen AFM görüntüleri XRD ve SEM sonuçlarını destekleyici niteliktedir.

Azot gazı akış miktarları karşılaştırıldığında ve Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10'da verildiği gibi çizgi boyu pürüzlülük değeri ile ortalama pürüzlülük değerinin azot gazı akış miktarı artması ile azaldığı görülmektedir. Bu durum yapının var olan ince uçlu sivri yapısının ortadan kalktığı ve yapının yüzeyinde yığılmalara benzer dentritik bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir.

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 3.34 nm – 73.71 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptir. 0.4 sccm azot gazı akış oranında safir altlık üzerine büyütülen filmde skewness değeri negatif olarak elde edilmiştir. Bu durum filmin yüzeyinde çukurların tepelerden daha fazla baskın olduğu anlamına gelmektedir. Diğer tüm filmler için skewness değerleri pozitif olduğundan yüzeylerde tepeler çukurlardan daha baskın olmaktadır.

Şekil 4.49 ve 4.50'de n-Si altlık üzerine sırasıyla 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınçlarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Elde edilen yapılar arasında çok büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Aynı şekilde Şekil 4.51 ve 4.52'de safir altlık üzerine sırasıyla 8 mTorr ve 20 mTorr çalışma basınçlarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Her iki altlık üzerine büyütülen InGaN ince filminde dentritik yapının var olduğu görülmektedir. Elde edilen AFM görüntüleri XRD ve SEM sonuçlarını destekleyici niteliktedir.

Çalışma basıncı değerleri karşılaştırıldığında ve Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15'te verildiği gibi çizgi boyu pürüzlülük değeri ile ortalama pürüzlülük değerinin çalışma basıncı değerleri artması ile azaldığı görülmektedir. Bu durum yapının yüzeyinde yığılmalara benzer dentritik bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir.

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 40.62 nm – 85.48 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe

sahipler. Tüm büyütülen filmlerde skewness değerleri pozitif olarak elde edilmiştir. Bu durum filmin yüzeyinde tepelerin çukurlardan daha fazla baskın olduğu anlamına gelmektedir.

RF saçtırma yöntemi ile yüksek azot gazı akış oranında (5 sccm) n-Si, p-Si ve safir altlıklar üzerine büyütülen InGaN ince filmlerin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde yer yer tepecikler oluşmuş olup, topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular genelde düzgün bir şekilde yerleşmiştir. Bu durum dentritik bir yapının varlığını ortaya koymaktadır ve bu görüntüler SEM görüntüleri ve XRD grafikleri ile de uyumludur.

Çizelge 4.18, 4.19 ve 4.20'ye bakıldığında her bir altlık üzerine büyütülen filmler için yüzey pürüzlülüğü ve çizgi pürüzlülüğü değerlerinin birbirlerine uyumlu oldukları görülmektedir. Ayrıca tüm skewness parametreleri pozitif bir değerde görüldüğünden, tüm filmler için yüzeyde tepelerin çukurlardan daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca filmlerin yüksek kurtosis değerleri bu filmlerin mühendislikte sürtünme uygulamaları için uygun birer yapı olduklarını belirtmektedir.

AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 0.48 nm – 5.20 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahipler. Büyütülen filmlerin çok pürüzsüz yüzeylere sahip oldukları bu değerlerden anlaşılmaktadır.

Şekil 4.99, 4.100 ve 4.101'de n-Si altlık üzerine 3, 4 ve 5 sccm azot gazı akış miktarında RF saçtırma yöntemi büyütülen InGaN ince filminin iki boyutlu ve üç boyutlu 5 mikronluk AFM görüntülerinde topaklanmaya benzer daire şeklinde yumrular düzgün bir şekilde yerleşmiştir. Özellikle safir altlık üzerine 4 ve 5 sccm azot akış miktarında büyütülen ince filmde ise topaklanmadan ziyade daha sivri yapılar dağınık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Elde edilen InGaN ince filmlerde dentritik yapının var olduğu görülmektedir. Elde edilen AFM görüntüleri XRD ve SEM sonuçlarını

destekleyici niteliktedir. Aynı sonuçlar ve yorumların Şekil 4.102, 4.103 ve 4.104'te verilen safir altlık üzerine büyütülen filmler içinde yapılması mümkündür.

AFM yazılımı yardımı ile elde edilen bazı önemli yüzey parametreleri farklı altlıklar için aşağıda verilmiştir. Azot gazı akış oranlarının değiştirilmesi ile bazı yüzey parametrelerinin arttığı bazı parametrelerin ise azaldığı görülmektedir. Özellikle safir altlık üzerine 3 sccm de büyütülen film için negatif skewness değerinin elde edilmesi yüzeyde çukurların tepelere göre daha belirgin olduğunu belirtmektedir. n-Si ve p-Si altlıklar üzerine büyütülen filmlerde yüksek kurtosis değerleri bu filmlerin mühendislikte sürtünme uygulamaları için uygun birer yapı olduklarını belirtmektedir. AFM yazılımı vasıtası ile filmlerin yüzey görüntülerinden elde edilen parametreler dikkate alındığında tüm filmler 1.41 nm – 6.92 nm arasında çizgisel pürüzlülüğe sahiptir. Büyütülen filmlerin çok pürüzsüz yüzeylere sahip oldukları bu değerlerden anlaşılmaktadır.

Saçtırma tekniği kullanılarak büyütülen filmleri uygulamaları açısından değerlendirdiğimizde; elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde özellikle düşük yansıma değerlerine sahip filmlerin anti-yansıma kaplama uygulamaları, geniş bir yasak enerji aralığı değerlerine sahip olan filmlerin istenilen yasak enerji aralığı değeri ile çok eklemli güneş pili uygulamalarında bir solar hücrenin verimliliğini arttırmada güneş enerjisinin maksimum soğrulmasını elde etmek için, iyi yüzey morfolojisi sergileyen filmlerin optoelektronik uygulamalar, yüksek değerde yüzey parametresine sahip olan filmlerin mühendislikte sürtünme uygulamaları, hekzagonal kristal yapısına sahip olan filmlerin ise LED, lazer diyot gibi uygulamalar için uygun olduklarını söyleyebiliriz. Yapılan tez çalışmasında büyütmüş olduğumuz filmlere ait geniş çaplı inceleme yapılmış olup ayrıca filmlerin uygulama alanları ile ilgili önemli sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abud, Saleh H., Z. Hassan, and F. K. Yam. "Physical properties of porous $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$." *International Journal of Nanoelectronics & Materials* 8.1 (2015).
- Akan, T., 2003, Termiyonik vakum ark (TVA) nın temel fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye
- Akter, Nargis. "Design and simulation of Indium Gallium nitride multijunction tandem solar cells." *IJRET* 3 (2014): 315-321.
- Ambacher, O., "Growth and applications of Group III-nitrides", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31: 2653-2655 (1998).
- Amidani, L., et al. "X-ray absorption spectra of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys with insight from atom-specific simulations." *Physical Review B* 86.15 (2012): 155211.
- Anonim, 2016. <http://www.aku.edu.tr/> Malzeme Karakterizasyon Teknikleri Atomik Kuvvet Mikroskobu
- Anonim, 2016. https://tr.wikipedia.org/wiki/Atomik_kuvvet_mikroskobu
- Anonim, 2016. www.gazi.academia.edu/ibrahimuslu. XPS ders notları
- Balakrishnam R. Jampana et al, Design and Realization of Wide-Band-Gap ($\sim 2.67\text{eV}$) InGaN p-n Junction Solar Cell, *IEEE Electron Device Letter*, Vol.31, No.1, January (2010).
- Belyaev, K. G., et al. "Phase separation in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.10 < x < 0.40$)." *physica status solidi (c)* 10.3 (2013): 527-531.
- Bernardini, F. and Fiorentini, V. and Vanderbilt, D., "Spontaneous polarization and piezoelectric constants in III-V nitrides", *Phys. Rev. B*, 56 (1997)
- Bhuiyan A., K. Sugita, A. Hashimoto, and A. Yamamoto: *IEEE J. of Photovoltaics*, (2012), vol. 2, pp. 276–93
- Bloom, S., "Band structures of GaN and AlN ", *J. Chem. Phys. Sol.*, 32(9): 2027-2032 (1971).
- Bulutay, C., Ridley, B.K., Zakhleniuk, N.A., "Full band polar optical phonon scattering analysis and negative differential conductivity in hexagonal GaN ", *Phys. Rev. B*, 62: 15754-15763 (2000)
- Bunshah, R. F., 1994, *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings Science: Technology and Applications*, Second Edition, University of California at Los Angeles, Los Angeles, California, USA, 888 p
- Butcher, K.S.A., Wintrebert-Fouquet, M., Chen, P.P.T., Timmers, H., Shrestha, S.K., "Detailed analysis of absorption data for indium nitride", *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 6: 351-354 (2003)
- Campbell, D. S., 1978, *Active and passive thin films devices*, Academic press, London, chapt.2.
- Chopra, K., Paulson, P. and Dutta, V., "Thin- Film Solar Cells: An Overview." *Progress in Photovoltaics*, 12, 69-92, (2004).
- Chuah L. S., Z. Hassan, and H.A. Hassan: *Microelectron. Int.*, (2008), vol. 25 (2), pp. 3–8.
- Collazo, Ramón, and Nikolaus Dietz. *The group III-nitride material class: From preparation to perspectives in photoelectrocatalysis*. RSC Publishing, (2013).

- Cutler T., and J. Zimmerman, *Anim. Health Res. Rev.* 12, 15 (2011)
- Ebdah, Mohammad Ahmad, Daniel R. Hoy, and Martin E. Kordesch. "Structural, Optical and Electrical Properties of InGaN Sputtered Thin Films." *MRS Proceedings*. Vol. 1151. Cambridge University Press, (2008).
- Faleev N., B. Jampana, O. Jani, H. Yu, R. Opila, I. Ferguson, and C. Honsberg: *Appl. Phys. Lett.*, (2009), vol. 95 (5), pp. 051915- 1–051915-3.
- Fischer A. M., Y. O. Wei, F. A. Ponce, M. Moseley, B. Gunning, and W. A. Doolittle, "Highly luminescent, high-indium-content InGaN film with uniform composition and full misfit-strain relaxation", *Applied Physics Letters* 103, 131101 (2013).
- Fox M. 2001. *Optical Properties of Solids*, Oxford University Press, 305, Newyork.
- Gartner M., C. Kruse, M. Modreanu, A. Tausendfreund, C. Roder, D. Hommel, "Optical characterization of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys", *Applied Surface Science*, 253: 254–257 (2006).
- Grill A., 1993, *Cold Plasma in Materials Fabrication*, IEEE Press
- Guo, Ying, Alan L. Porter, and Lu Huang. "Nanotechnology enhanced thin-film solar cells: analysis of global research activities with future prospects." *Proceedings of 18th International Conference for the International Association of Management of Technology*, Orlando, FL. (2009).
- Guo Q., Y. Kusunoki, Y. Ding, T. Tanaka, M. Nishio, "Properties of InGaN Films Grown by Reactive Sputtering" *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 (2010) 081203.
- Guo Qixin, Tomoya Nakao, Takaya Ushijima, Wangzhou Shi, Feng Liu, Katsuhiko Saito, Tooru Tanaka, Mitsuhiro Nishio, "Growth of InGaN layers on (111) silicon substrates by reactive sputtering", *Journal of Alloys and Compounds* 587 (2014) 217–221
- Hadis Morkoç, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices, Materials Properties, Physics and Growth*, John Wiley & Sons, (2009)
- Hamady, Sidi Ould Saad, Abdoulwahab Adaine, and Nicolas Fressengeas. "Numerical simulation of InGaN Schottky solar cell." *Materials Science in Semiconductor Processing* 41 (2016): 219-225.
- Han Sang-Heon, Dong-Yul Lee, Jin-Young Lim, Jeong Wook Lee, Dong-Joon Kim, Young Sun Kim, Sung-Tae Kim, and Seong-Ju Park, Effect of Internal Electric Field in Well Layer of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Light Emitting Diodes on Efficiency Droop", *Japanese Journal of Applied Physics* 51 (2012) 100201
- Harima H., "Properties of GaN and related compounds studied by means of Raman scattering", *Journal of Physics: Cond. Matter* 14 (2002) R967-R993
- Hoffbauer, Mark A., et al. "In-rich InGaN thin films: Progress on growth, compositional uniformity, and doping for device applications." *Journal of Vacuum Science & Technology B* 31.3 (2013): 03C114.
- Holec D., Y. Zhang, D. V. Sridhara Rao, M. J. Kappers, C. McAleese, and C. J. Humphreys, "Equilibrium critical thickness for misfit dislocations in III-nitrides," *J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 12, pp. 123514-1–123514-7, Dec. (2008).
- Itoh, Takashi, et al. " $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films deposited by reactive RF-sputtering." *Journal of Non-Crystalline Solids* 358.17 (2012), 2362-2365
- Jain S. C., M. Willander, J. Narayan and R. Van Overstraeten, "III-nitrides: Growth, characterization, and properties", *J. Appl. Phys.* 87, 965 (2000)

- Jakkala, Pratheesh, and Martin E. Kordesch. "InGaN thin films grown by RF sputtering for HIT solar cells." MRS Online Proceedings Library Archive 1738 (2015).
- Jakkala, Pratheesh, and Martin E. Kordesch. "Electrical properties of InGaN thin films grown by RF sputtering at different temperatures, varying nitrogen and argon partial pressure ratios." Materials Research Express 3.10 (2016): 106406.
- Jakkala, Pratheesh, and Martin E. Kordesch. "Bandgap tuning and spectroscopy analysis of $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ thin films grown by RF sputtering method." Materials Research Express 4.1 (2017): 016406.
- Jani, Omkar, et al. "Design and characterization of Ga N/In Ga N solar cells." Applied Physics Letters 91.13 (2007): 132117.
- Joglekar, Sameer, Mohamed Azize, and Tomás Palacios. "Reactive sputtering of III-N materials for applications in electronic devices." MRS Advances 1.2 (2016), 141-146.
- Johnson R. L., 2005 Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers, Master Thesis, Electrical Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa, 98 p.
- Kaufmann, N., A., K. (2013) Investigation of indium-rich InGaN alloys and kinetic growth regime of GaN. Doktora Tezi, École Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse.
- Krischbrown J., RF/DC magnetron sputtering, (2007)
- Kubelka, Paul, and Franz Munk. "A contribution to the optics of pigments." Z. Tech. Phys 12 (1931): 593-599.
- Kubelka, Paul. "New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. Part I." Josa 38.5 (1948): 448-457.
- Kuo, Dong-Hau, Cheng-Che Li, Thi Tran Anh Tuan and Wei-Chun Yen, "Effects of Mg Doping on the PeRFormance of InGaN Films Made by Reactive Sputtering", Journal of Electronic Materials, Vol. 44, No. 1, (2015).
- Kuo, Dong-Hau, Thi Tran Anh Tuan, Cheng-Che Li, Wei-Chun Yen, "Electrical and structural properties of Mg-doped $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \leq 0.1$) and p-InGaN/n-GaN junction diode made all by RF reactive sputtering", Materials Science and Engineering B 193 (2015) 13–19
- Laref, A., A. Altujar, and S. J. Luo. "The electronic and optical properties of InGaN-based solar cells alloys: First-principles investigations via mBJLDA approach." The European Physical Journal B 86.11 (2013): 1-11.
- Lee S. (2016). Growth and characterization of InGaN-based solar cells. Doktora Tezi, Graduate School of Engineering, Nagoya University.
- Levinshtein M. E., S. L. Rumyantsev, and M. S. Shur, (eds), Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, and SiGe, John Wiley and Sons, ISBN 0-471-35827-4, New York, (2001).
- Leszczynski M., R. Czernecki, S. Krukowski, M. Krysko, G. Targowski, P. Prystawko, J. Plesiewicz, P. Perlin, and T.J. Suski: J. Cryst. Growth, (2011), vol. 318, pp. 496–99.
- Li, Cheng-che; Kuo, Dong-hau; Hsieh, Pin-wei; Huang, Ying-sheng. Journal of Electronic Materials; Warrendale Vol. 42, Iss. 8, (2013), 2445-2449.
- Li, Cheng-Che, Dong-Hau Kuo, and Ying-Sheng Huang. "The effect of temperature on the growth and properties of green light-emitting $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ films prepared by reactive sputtering with single cermet target." Materials Science in

- Semiconductor Processing 29 (2015), 170-175.
- Liou, B.T., Lin, C.Y., Yen, S.H., Kuo, Y.K., "First-principles calculation for bowing parameter of hexagonal $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ", Optics Communications, 249: 217–223 (2005)
- McLaughlin D. V. P., and J. M. Pearce, "Progress in Indium Gallium Nitride Materials for Solar Photovoltaic Energy Conversion", The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International (2013).
- Monemar B., Paskov P. P., Kasic A., "Optical properties of InN—the bandgap question", Superlattices and Microstructures, Volume 38, Issue 1, July (2005), Pages 38-56
- Muller M., G.D.W. Smith, B. Gault, C.R.M. Grovenor, "Phase separation in thick InGaN layers – A quantitative, nanoscale study by pulsed laser atom probe tomography", Acta Materialia 60 (2012) 4277–4285
- Neufeld, Carl J., et al. "High quantum efficiency InGaN/GaN solar cells with 2.95 eV band gap." Applied Physics Letters 93.14 (2008): 143502.
- Nipko J. C., and C.-K. Loong, "Phonon excitations and related thermal properties of aluminum nitride", Phys. Rev. B, 57, 10550-10554 (1998)
- Nipko J. C., C.-K. Loong, C. M. Balkas and R. F. Davis, "Phonon density of states of bulk gallium nitride", Appl. Phys. Lett., 73, 34-36 (1998)
- Northrup J. E., J. Neugebauer, S.F. Chichibu, D.C. Look, H. Riechert, (eds) Mat. Res. Soc. Symp. Proc. "GaN and related Alloys, Vol. 693, (2001).
- Özen, Soner, et al. "The influence of voltage applied between the electrodes on optical and morphological properties of the InGaN thin films grown by thermionic vacuum arc." Scanning (2015).
- Pat et. al., GaN thin film deposition on glass and PET substrates by thermionic vacuum arc (TVA), Materials Chemistry and Physics (2015).
- Pat S., N. Ekem, T. Akan, Ö. Küsmüş, S. Demirkol, R. Vladoiu, C. P. Lungu, G. Musa, "Study on Thermionic Vacuum Arc - A Novel and Advanced Technology For SuRFace Coating", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 7, No. 5, October (2005), p. 2495 – 2499
- Pearson, Stephen J., ed. GaN and related materials II. Vol. 7. CRC Press, (2000).
- Popovici G. and Morkoc H., GaN and related materials II, ser. Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices. Volume 7 , Gordon and Breach Science: Amsterdam, (2000), pp. 93–172.
- Razeghi, M., Henini, M., "Optoelectronic devices: III-Nitrides", Elsevier Ltd., London, 1-8 (2004).
- Seshan, K., 2002, Deposition Processes and Techniques: Principles, Methods, Equipment and Applications, Second Edition, Santa Clara, California, USA, 629 p
- Seshan, K., 2012, Handbook of thin film deposition. William Andrew
- Seong, Tae-Yeon, et al., eds. III-Nitride based light emitting diodes and applications. Dordrecht: Springer Netherlands, (2013).
- Shur M. S., and R. Gaska, IEEE Trans. Electron Devices 57, 12 (2010).
- Sohmer, A. J., Off, H. Bolay, V. Harle, V. Syganow, J.S. Im, V. Wagner, F. Adler, A. Hangleiter, A. Dornen, F. Scholz, D. Brunner, O. Ambacher, and H. Lakner: MRS Int. J. N. S. R., (1997), vol. 2 (13–15), p. 14.

- Tansley, T.L., Foley, C.P., "Optical band gap of indium nitride", J. Appl. Phys., 59: 3241-3244 (1986)
- Tarımcı C., Sarı H., 2006, Vakum tekniği, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 1.Baskı, 168 s
- Tauc, J., Radu Grigorovici, and Anina Vancu. "Optical properties and electronic structure of amorphous germanium." *physica status solidi (b)* 15.2 (1966): 627-637.
- Thornton, J. A., 1983, Plasma asisted deposition process: Theory, mechanism and applications. *Thin Solid Film*, vol. 107, 3-19
- Tough, R. J. A. "Contacts to semiconductors—fundamentals and technology." *Optical and Quantum Electronics* 27.8 (1995): 761-764.
- Trautman, P., Pakula, K., Witowski, A.M., Baranowski, J.M., "An Estimate of the Energy Gap of InN from Measurements of the Fundamental Absorption Edge", *Acta Physica Polonica A*, 108(5): 903-908 (2005)
- Tuan, Thi Tran Anh, et al. "Temperature dependence of electrical characteristics of n-In_xGa_{1-x}N/p-Si hetero-junctions made totally by RF magnetron sputtering." *Thin Solid Films* 589 (2015): 182-187.
- Tüzemen, Ş. E., "ZnO İnce Filmlerinin Eldesi Ve Aygıt Üretimi İçin Parametrelerinin Optimizasyonu", Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ADANA, 1-208 (2007)
- Van de Walle, C.G., McCluskey, M.D., Master, C.P., Romano, L.T., Johnson, N.M., "Large and composition-dependent band bowing in In_xGa_{1-x}N alloys", *Materials Science and Engineering B*, 59: 274-278 (1999).
- Vilbois, L. A., et al. "Simulation of a solar cell based on InGaN." *Energy Procedia* 18 (2012): 795-806.
- Walukiewicz W., Li S. X., Wu J., Yu K. M., Ager J. W., Haller E. E., Hai Lu, William J. Schaff, "Optical properties and electronic structure of InN and In-rich group III-nitride alloys", *Journal of Crystal Growth*, Volume 269, Issue 1, 15 August (2004), Pages 119-127
- Wang, K. and R.R. Reeber, "Thermal expansion and elastic properties of InN", *Appl. Phys. Lett.*, 79, 1602-1604 (2001).
- Wang J., X.J. Shi, J. Zhu, "Low-temperature growth of In_xGa_{1-x}N films by radio-frequency magnetron sputtering", *Applied Surface Science*, 265 (2013) 399–404
- Wang J., X.H. Hou, X.J. Shi and J. Zhu, "Effects of Nitrogen Flow Ratio on the Properties of Radiofrequency-Sputtered InGaN Films", *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 44, No. 4, (2015).
- Wang, Xuwen, et al. "Structural and Morphological Characteristics of In_xGa_{1-x}N Films Grown on Si (111) by Reactive Magnetron Sputtering." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 67. EDP Sciences, (2016).
- Wasa K., Kitabatake M., *Thin Film Materials Technology sputtering of compound Materials*, William Andrew Publishing, (2004).
- Wei, Y. 2014, *Structural Properties of III-Nitride Semiconductors*. Doktora Tezi, Arizona State University.
- Wright, A. F., "Elastic properties of zinc-blende and hekzagonal AlN, GaN, and InN", *J. Appl. Phys.* 82 (1997) 2833.
- Wu J et al, Unusual properties of the fundamental band gap of InN, *Appl. Phys, Letter.* (2002) 80 3967

- Wu J., W. Walukiewicz, K. M. Yu, W. Shan, J. W. Ager III, E. E. Haller, Hai Lu, W. J. Schaff, W. K. Metzger, and S. Kurtz, "Superior radiation resistance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys: Full-solar-spectrum photovoltaic material system," J. Appl. Phys., vol. 94, no. 10, pp. 6477–6482, Nov.(2003).
- Wu Y.R, Singh M., and Singh J., Polarization effects in semiconductors: From ab initio theory to device applications. New York: Springer, pp. 111–159, 2008
- Wua J., "When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives," J. Appl. Phys., vol. 106, no. 1, pp. 011 101-1–011 101-28, Jul. (2009).
- Yadav, B. S., P.Mohanta, R.S. Srinivasa, S.S. Major, "Electrical and optical properties of transparent conducting $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloy films deposited by reactive co-sputtering of GaAs and indium", Thin Solid Films 555 (2014) 179–184
- Yam F. K., , Z. Hassan," InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms", Superlattices and Microstructures, 43: 1-23 (2008).
- Yu E. T., III-Nitride semiconductors: Applications and devices, ser. Optoelectronic properties of semiconductors and superlattices. Volume 16, Taylor and Francis, New York, (2003),161–192.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Isparta’da doğdu. İlköğretim öğrenimini Isparta’da, lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2002 yılında girdiği Süleyman Demirel Üniversitesi Fizik Bölümü’nü 2006 yılında tamamladı. 1416 sayılı kanun kapsamında 2010-2012 öğretim yılında Amerika Birleşik Devletleri Wisconsin Üniversitesi-Madison’da Malzeme Bilimi alanında Yüksek Lisansını tamamladı. 2014 bahar döneminde Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanomalzeme Bilim Dalı’nda Doktora programını kazandı. 2013 yılında Muş Alparslan Üniversitesi Fizik Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu göreve devam etmektedir.