



**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE
BÜYÜTÜLEN GaN FİLMLERİNDE
AIN TAMPON VARLIĞININ İNCELENMESİ**

Ayça COŞKUN

**Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı
Nano Malzeme Bilim Dalı
Prof. Dr. Emre GÜR
2019
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN GaN FİLMLERİNDE
AIN TAMPON VARLIĞININ İNCELENMESİ**

Ayça COŞKUN

**NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI
Nano Malzeme Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN GaN FİMLERİNDE AIN
TAMPON VARLIĞININ İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Emre GÜR danışmanlığında, Ayça COŞKUN tarafından hazırlanan bu çalışma, 21/12/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı – Nano Malzeme Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Emre GÜR

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Demet İSKENDEROĞLU

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İlkay DEMİR

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 24.01.2019 tarih ve 04. / . . 24 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek lisans Tezi

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN GaN FİMLERİNDE AlN TAMPON VARLIĞININ İNCELENMESİ

Ayça COŞKUN

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

Danışman: Prof. Dr. Emre GÜR

Bu tez çalışmasında RF magnetron saçtırma yöntemi ile silikon, safir, cam alttaş üzerine GaN filmi büyütülürken AlN tampon tabakasının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada ilk olarak farklı büyütme şartlarında ve alttaşlarda AlN ince filmleri büyütülmüş ve optimum şartlar belirlenmiştir. AlN ince filmlerin morfoloji analizleri sonucunda şerit ve adacık yapıları olmak üzere iki farklı yapının değişen N₂ kısmi basınca bağlı olarak oluştuğu gözlenmiştir. İnce filmlerin yüzey pürüzlülükleri AFM görüntüleri ile belirlenmiş ve silisyum alttaşları üzerinde büyüyen AlN ince filmlerinde daha az yüzey pürüzlülükleri gözlenmiştir. Düşük N₂ basınçlarında yüzey pürüzlülük değerleri 1nm civarında iken artan N₂ kısmi basıncı ile 3-4 nm mertebelerinde olduğu gözlenmiştir.

AlN'dan sonra GaN filmi için de optimum büyütme şartları belirlenmiştir. GaN filmleri için N₂ kısmi basıncının düşük olduğu örneklerin amorf yapıda oldukları gözlenmiş ve artan N₂ basıncı ile filmlerin çoklu kristal olarak oluştukları XRD sonuçlarında bulunmuştur. Tezin son kısmı olarak ise ayrı ayrı belirlenen şartlarda AlN tampon filmi üzerine GaN filmleri büyütülmüş ve filmlerin analizleri için XRD, SEM, AFM, XPS teknikleri ile yapısal ve morfolojik özellikleri araştırılmıştır. AlN tampon tabakası kullanılan GaN filmlerinin daha yüksek kalitede büyümesini sağladığı gözlenmiştir. Diğer taraftan artan azot kısmi basınçları ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir.

2018, 130 sayfa

Anahtar Kelimeler: AlN ince film, GaN ince film, tampon tabaka, RF magnetron Püskürtme

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF EXISTENCE OF AlN BUFFER LAYER ON GaN GROWTHS

Ayça COŞKUN

Atatürk University
Faculty of Arts and Sciences
Department of Nanoscience and Nanoengineering
Department of Nano-mater

Supervisor: Prof. Dr. Emre GÜR

In this thesis, AlN buffer layer effects on RF Magnetron Sputtered GaN layers grown on Si, sapphire and glass substrates has been investigated. Firstly, AlN thin films were grown at different growth parameters and substrates, and optimum growth parameters has been determined. Morphological analysis has shown that strip like 3D and islands like structures has been observed as the nitrogen partial pressure increases. Secondly, GaN optimum growth parameters with RF magnetron sputtering has been determined. Thirdly, GaN layers has been grown on AlN substrates and XRD, SEM, AFM, XPS analysis has been performed on each thin films.

Grazing incident angle XRD measuremetn has shown GaN formation on AlN, while amorphous form has been grown on bare Si, sapphire and glass substrates. It has been observed that higher quality GaN growth on AlN buffer layer has been achived. Surface roughness of the thin films has been determined by AFM measurements and AlN thin films grown on Si substrates has shown the lower surface roughness. On the other hand, increasing nitrogen partial pressure has resulted in the increase of the surface roughness.

2018, 130 pages

Keywords: AlN thin film, GaN thin film, buffer layer, RF magnetron Sputtering

TEŞEKKÜR

Danışmanlığımı üstlenerek bu zaman zarfı boyunca bana her konuda yardımlarını esirgemeyen, tez aşaması boyunca sağladığı tüm imkânlar, bilgi ve yöntemleri için Sayın Prof. Dr. Emre GÜR'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca bu süreçte desteklerini her zaman hissettiğim beni maddeten ve manen yalnız bırakmayan aileme ve sevgili eşim Mustafa Reha COŞKUN'a teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitimim boyunca yaklaşımları ve önerileri ile beni yönlendiren saygıdeğer Sevda SARITAŞ, Günay MERHAN MUĞLU, Ahmet Emre KASAPOĞLU ve laboratuvar arkadaşım Soheil MOBTAKARI'ye ayrıca teşekkür ederim.

Gerek tezim konusunda gerekse araştırmalarım hakkında bana yardım edip her daim yanımda olan Ayşe BAĞIRAN'a ve Betül SOSLU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayça COŞKUN

Ocak, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. III-V Nitrit Yarıiletkenler	1
1.2. Nitritlerin Temel Özellikleri.....	2
1.3. Neden AlN Tampon Tabaka?.....	6
1.4. Nitratlı Yarıiletkenlerin Kullanım Alanları	8
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Yarıiletkenler.....	9
2.2. AlN Bileşiği.....	13
2.2.1. AlN bileşiğinin fiziksel özellikleri	13
2.2.2. AlN bileşiğinin ısı ve kimyasal özellikleri	14
2.2.3. AlN bileşiğinin termal ve optik özellikleri.....	15
2.3. GaN Bileşiği	16
2.4. GaN Bileşiğinin Kimyasal Özellikleri	17
2.4.1. GaN bileşiğinin fiziksel özellikleri.....	18
2.4.2. GaN bileşiğinin termal ve optik özellikleri	18
2.5. İnce Film Üretim Yöntemleri	20
2.5.1. Saçtırma yöntemi.....	22
2.5.2. Radyo frekansı (RF) saçtırma sistemi	24
2.5.3. Radyo frekanslı (RF) magnetron saçtırma tekniği	25
2.5.4. Doğru akım (DC) saçtırma tekniği.....	26
2.5.5. Plazma	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	29
3.1. Altaş temizleme prosesi	31

3.1.1. Cam ve safir temizleme	31
3.1.2. Silisyum temizleme	32
3.2. AlN İnce Filmi.....	33
3.2.1. Tampon tabaka olan AlN ince filmlerinin büyütme parametreleri	33
3.3. GaN İnce Filmi	35
3.3.1. GaN ince filmlerinin büyütme parametreleri	35
3.4. AlN Tampon Üzerine GaN Filmi	37
3.5. İnce Filmlerin Ölçüm Yöntemleri	37
3.5.1. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	38
3.5.2. X-ışınları difraksiyonu (XRD)	40
3.5.3. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)	43
3.5.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	48
4.1. Tampon tabaka olan AlN filmlerinin XRD, SEM ve AFM sonuçları.....	48
4.2. GaN Filmlerinin XRD, SEM ve AFM sonuçları.....	75
4.3. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin XRD, SEM ve AFM Sonuçları	89
4.4. AlN Tampon Üzerine GaN Filmi XRD Grafikleri.....	89
4.5. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin AFM Sonuçları	91
4.6. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin SEM Sonuçları.....	92
4.7. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin XPS Sonuçları.....	94
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	96
5.1. AlN İnce Filmi XRD Sonuçları ve Tartışma.....	96
5.2. GaN İnce Filmi XRD Sonuçları ve Tartışma	107
5.3. AlN Tampon Üzerine GaN filmi XRD Sonuçları ve Tartışma	110
5.4. AlN Numunelerinin AFM Görüntü Sonuçları ve Tartışma.....	114
5.5. GaN Numunelerinin AFM Görüntü Sonuçları ve Tartışma	120
5.6. AlN Tampon Üzerine GaN Filmlerinin AFM Götüntü Sonuçları ve Tartışma	121
5.7. AlN İnce Filmi SEM Sonuçları ve Tartışma	122
5.8. GaN İnce Filmi SEM Sonuçları ve Tartışma	123
5.9. AlN Tampon Üzerine GaN Filmi SEM Sonuçları ve Tartışma	124
5.10. AlN Tampon Üzerine GaN filmi XPS Sonuçları ve Tartışma	125
5.11. Sonuçlar	126

KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	131



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

λ	Dalga boyu
N_2	Azot molekülü
$^{\circ}C^{\circ}$	Santigrad Derece
μm	Mikron metre
A	Kesit
A°	Angström
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
Al	Aleminyum
AlN	Aleminyum Nitrit
Ar	Argon
As	Arsenik
DC	Doğru Akım
Eg	Yasak enerji aralığı
et al	Diğerleri
eV	Elektron Volt
FET	Alan Etkili transistör
G	Galyum
GaAs	Galyum Arsenik
GaN	Galyum Nitrit
h	Planck sabiti
HEMT	Yüksek Alan Mobiliteli Transistör
HT	Yüksek Sıcaklık
K	Kelvin
L	Uzunluk
LED	Işık Yayan Diyot
LT	Düşük Sıcaklık
N	Azot atomu
nm	Nanometre
R	Direnç

Ra	izgi boyunca pürüzlölük
RF	Radyo Frekansı
Rq / RMS	Ortalama izgisel pürüzlölük
Sa	Yüzeysel pürüzlölük
SEM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
Sq / RMS	Ortalama yüzey pürüzlölüğü
Sz / Smax	Yüzey pürüzlölüğü yüksekliğı
T	Sıcaklık
UV-Vis	Mor ötesi ve görünür bölge
vd	Diğerleri
XRD	X-Işını kırınımı
ν	frekans
ρ	Özdirenç

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Önemli yarıiletkenlerin kafes parametrelerine göre bant halleri	2
Şekil 1.2. (a) Wurtzite, (b) Zinc blende ve (c) NaCl (kaya tuzu yapıların şematik gösterimi	3
Şekil 1.3. Wurtzite (altıgen) ve zinc blende yapının modellenmesi	4
Şekil 1.4. Wurtzite metal nitrat yapısının şematik gösterimi	4
Şekil 2.1. (a)Yalıtkanlar, (b) yarıiletkenler ve (c) iletkenlerde basitleştirilmiş elektronik enerji bant yapısı ve 0 K sıcaklıktaki fermi enerji seviyeleri.....	11
Şekil 2.2. Uyarılmış $T>0$ K’de yarıiletkenlerin bant yapısı.....	11
Şekil 2.3. Hegzegonal wurtzite yapıya sahip AlN	14
Şekil 2.4. Sıcaklık ile değişen termal iletkenlik grafiği	15
Şekil 2.5. AlN, Wurtzite. Bant yapısı. İletim bandının önemli değeri ve valans bandının maksimumu	16
Şekil 2.6. Farklı sıcaklıklarda bant arlığı grafiği	17
Şekil 2.7. Çinko blende (kübik) GaN bant yapısı, iletim bandının önemli değeri ve valans bandının maksimumu	19
Şekil 2.8. Çinko blende (kübik) GaN bant yapısı	20
Şekil 2.9. Sıçratma mekanizması	22
Şekil 2.10. Saçtırma yönteminin şematik gösterimi	23
Şekil 2.11. RF Saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi	25
Şekil 2.12. RF magnetron saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.13. DC Saçtırma sistemi ile film oluşumunun şematik gösterimi	27
Şekil 3.1. Film büyütme ilk adımı	29
Şekil 3.2. Film büyütme ikinci adım.....	30
Şekil 3.3. Ara tampon tabaka ile üçüncü adım	30
Şekil 3.4. AFM’in çalışma prensibinin sematik gosterimi	38
Şekil 3.5. Bragg’ın kırınımı gösterimi	41
Şekil 3.6 X-ışını tüp yapısı	42

Şekil 3.7. Everhart-Thornley dedektörü tarafından sinyal toplama	44
Şekil 3.8. Yansıma açısı, çalışma mesafesi ve prob çapının şematik gösterimi	46
Şekil 4.1. Cam alttaş üzerinde büyütülen B1 ince filminin XRD sonuçları	48
Şekil 4.2. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B2 ince filminin XRD sonuçları.....	49
Şekil 4.3. Safır alttaş üzerinde büyütülen B3 ince filminin XRD sonuçları	49
Şekil 4.4. Cam üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B1 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü.....	50
Şekil 4.5. Silisyum üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B2 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.6. Safır üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B3 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü.....	51
Şekil 4.7. Cam üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B1 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	52
Şekil 4.8. Silisyum üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B2 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	53
Şekil 4.9. Safır üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B3 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	53
Şekil 4.10. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B4 ince filminin XRD sonuçları.....	54
Şekil 4.11. Cam alttaş üzerinde büyütülen B5 ince filminin XRD sonuçları	54
Şekil 4.12. Safır alttaş üzerinde büyütülen B6 ince filminin XRD sonuçları	55
Şekil 4.13. Silisyum üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B4 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	56
Şekil 4.14. Cam üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B5 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	57
Şekil 4.15. safır üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B6 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	57
Şekil 4.16. Silisyum üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B4 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	58
Şekil 4.17. Cam üzerine büyütülmüş AIN filmlerinden B5 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	58
Şekil 4.18. Safır alttaş üzerinde büyütülen B7 ince filminin XRD sonuçları	59
Şekil 4.19. Cam alttaş üzerinde büyütülen B8 ince filminin XRD sonuçları	60

Şekil 4.20. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B9 ince filminin XRD sonuçları.....	60
Şekil 4.21. Safır üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B7 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	61
Şekil 4.22. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B8 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	61
Şekil 4.23. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B9 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	62
Şekil 4.24. Safır üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B7 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	63
Şekil 4.25. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B8 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	63
Şekil 4.26. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B9 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	64
Şekil 4.27. Safır alttaş üzerinde büyütülen B10 ince filminin XRD sonuçları.....	65
Şekil 4.28. Cam alttaş üzerinde büyütülen B11 ince filminin XRD sonuçları	65
Şekil 4.29. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B12 ince filminin XRD sonuçları	66
Şekil 4.30. Safır üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B10 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	66
Şekil 4.31. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B11 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	67
Şekil 4.32. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B12 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	67
Şekil 4.33. Safır üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B10 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	68
Şekil 4.34. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B11 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	68
Şekil 4.35. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B12 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	69
Şekil 4.36. Safır alttaş üzerinde büyütülen B13 ince filminin XRD sonuçları.....	70
Şekil 4.37. Cam alttaş üzerinde büyütülen B14 ince filminin XRD sonuçları	70
Şekil 4.38. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B15 ince filminin XRD sonuçları	71
Şekil 4.39. Safır üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B13 filminin farklı	

ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	71
Şekil 4.40. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B14 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	72
Şekil 4.41. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B15 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü	72
Şekil 4.42. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B13 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	73
Şekil 4.43. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B14 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	73
Şekil 4.44. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B15 filminin AFM ile alınmış görüntüsü	74
Şekil 4.45. optimum şartlarda AlN tampon tabaka (a)B16, b)B17, c)B18 d)B19) AlN XRD grafikleri.....	75
Şekil 4.46. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C1 numunesinin XRD sonuçları	76
Şekil 4.47. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C2 numunesinin XRD sonuçları	77
Şekil 4.48. Cam alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C3 numunesinin XRD sonuçları	77
Şekil 4.49. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C4 numunesinin XRD sonuçları	78
Şekil 4.50. Cam alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C5 numunesinin XRD sonuçları	79
Şekil 4.51. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C6 numunesinin XRD sonuçları	79
Şekil 4.52. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C7 numunesinin XRD sonuçları	80
Şekil 4.53. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C8 numunesinin XRD sonuçları	81
Şekil 4.54. C7 numunesi SEM görüntüsü.....	82
Şekil 4.55. C8 numunesi SEM görüntüsü.....	82
Şekil 4.56. C7 numunesi AFM görüntüsü	83

Şekil 4.57. C8 numunesi AFM görüntüsü	83
Şekil 4.58. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C9 numunesinin XRD sonuçları	84
Şekil 4.59. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C10 numunesinin XRD sonuçları	85
Şekil 4.60. C9 numunesi SEM görüntüsü	85
Şekil 4.61. C10 numunesi SEM görüntüsü	86
Şekil 4.62. C9 numunesi AFM görüntüsü	86
Şekil 4.63. C10 numunesi AFM görüntüsü	87
Şekil 4.64. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C11 numunesinin XRD sonuçları	88
Şekil 4.65. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C12 numunesinin XRD sonuçları	88
Şekil 4.66. D1 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları	89
Şekil 4.67. D2 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları	90
Şekil 4.68. D3 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları	90
Şekil 4.69. D4 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları	91
Şekil 4.70. D3 numunesinin AFM görüntüsü	91
Şekil 4.71. D4 numunesi AFM görüntüsü	92
Şekil 4.72. D3 numunesinin SEM görüntüsü	93
Şekil 4.73. D4 numunesi SEM görüntüsü	94
Şekil 4.74. D3 numunesi XPS ölçüm sonuçları	95
Şekil 4.75. D4 numunesi XPS ölçüm sonuçları	95
Şekil 5.1. silisyum alttaş XRD ölçüm sonuçları	97
Şekil 5.2. Safir alttaş XRD ölçüm sonuçları	98
Şekil 5.3. AlN kaplı B1, B2, B3 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları	98
Şekil 5.4. AlN kaplı B4, B5, B6 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları	99
Şekil 5.5. AlN kaplı B7, B8, B9 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları	100
Şekil 5.6. AlN kaplı B10, B11, B12 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları	101
Şekil 5.7. AlN kaplı B13, B14, B15 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları	102
Şekil 5.8. Farklı şartlarda ve aynı cins cam alttaş numunelerinin XRD sonuçları	104

Şekil 5.9. Farklı şartlarda ve aynı cins silisyum alttaş numunelerinin XRD s	
onuçları	105
Şekil 5.10. Farklı şartlarda ve aynı cins silisyum alttaş numunelerinin XRD	
ölçüm sonuçları	107
Şekil 5.11. GaN kaplı a) C1, C2, C3 filmlerinin b) C4, C5, C6 c) C7, C8	
filmlerinin XRD ölçüm sonuçları.....	109
Şekil 5.12. GaN kaplı C9 ve C10 numunelerinin XRD ölçüm sonuçları	110
Şekil 5.13. B16, B17, B18 B19 isimli, optimum aşartlarda büyütülmüş AlN	
tampon tabakaların XRD grafikleri.....	111
Şekil 5.14. C9 ve D4 filmleri XRD ölçüm sonuçları.....	112
Şekil 5.15. C10 ve D3 filmleri XRD ölçüm sonuçları.....	113
Şekil 5.16. Kısmi basınç ile ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği.....	116
Şekil 5.17. AlN filmlerinden silisyum alttaşında büyütülen a) B2 numunesinin,	
b) B4 numunesinin, c) B9 numunesinin, d) B12 numunesinin,	
e) B15 numunesinin AFM görüntüleri.....	118
Şekil 5.18. AlN filmlerinden safir alttaşında büyütülen a) B3 numunesinin,	
b) B6 numunesinin, c) B7 numunesinin, d) B10 numunesinin,	
e) B13 numunesinin AFM görüntüleri.....	119
Şekil 5.19. Tampon tabaka kullanılmayan (a) ve kullanılan (b) silisyum	
alttaşlarında büyütülen GaN filmleri görüntüsü.....	121
Şekil 5.20. Tampon tabaka kullanılmayan (a) ve kullanılan (b) safir	
alttaşlarında büyütülen GaN filmleri görüntüsü.....	122
Şekil 5.21. a) C10 (tampon tabkası olmadan) numunesi b) D3 numunesi SEM	
görüntüleri	124
Şekil 5.22. C9 numunesi b) D4 numunesi SEM görüntüsü	124
Şekil 5.23. D3 numunesinin XPS (spektrum) görüntüsü.....	125
Şekil 5.24. D4 numunesinin XPS (spektrum) görüntüsü.....	126

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. AlN, InN, GaN gibi Nitritli bileşiklerinin bazı özellikleri	5
Çizelge 2.1. Katıların elektriksel özdirenç değerleri	10
Çizelge 2.2. Yaygın yarıiletken ve yalıtkanların band aralıkları	12
Çizelge 2.3. Çinko blende yapıda sıcaklığa bağlı band aralıkları	19
Çizelge 2.4. Wurtzite yapının sıcaklığa bağlı band aralıkları	20
Çizelge 2.5. İnce film biriktirme yöntemleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir	21
Çizelge 2.6. Saçtırma yöntemi avantaj ve dezavantajları	24
Çizelge 2.7. DC güç kaynağı ile saçtırma metodu avantaj ve dezavantajları	26
Çizelge 3.1. Farklı azot kısmi basınç değerinde, safir, silisyum, cam üzerinde büyütülmüş AlN ince filmlerinin Büyütme Parametreleri	34
Çizelge 3.2. Farklı azot kısmi basınç değerinde, safir ve silisyum üzerinde büyütülmüş GaN ince filmlerinin Büyütme Parametreleri	36
Çizelge 3.3. Tampon tabaka olan AlN tampon üzerine GaN filmi büyütme parametreleri.....	37
Çizelge 5.1. AlN malzemesi miller indisi ve dereceleri	96
Çizelge 5.2. Aynı şartlar altında cam alttaş numunelerinin değişken parametreleri	103
Çizelge 5.3. Aynı şartlar altında silisyum alttaş numunelerinin değişken parametreleri.....	104
Çizelge 5.4. Aynı şartlar altında safir alttaş numunelerinin değişken parametreleri.....	106
Çizelge 5.5. GaN malzemesi miller indisi ve dereceleri	108
Çizelge 5.6. AlN filmlerinin AFM görüntülerinden elde edilen bazı parametreler.....	114
Çizelge 5.7. Bazı GaN filmlerinin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler.....	120
Çizelge 5.8. AlN numunelerinden bazılarının parametreleri	123

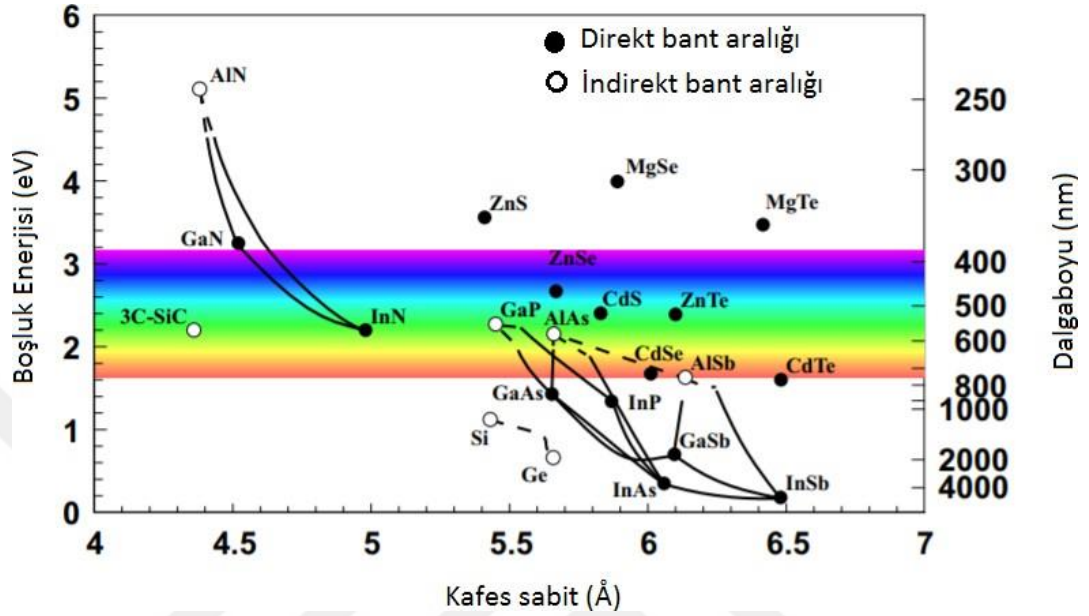
1. GİRİŞ

Günümüzde yarıiletken teknolojisindeki büyütme teknikleri ve işleme proseslerindeki gelişmeler sayesinde özellikle yüksek performans sağlayıcı devre uygulamalarında genellikle kullanılan silisyuma alternatif olarak periyodik cetvelin üçüncü (III) ve beşinci (V) sütunlarındaki elementlerin birleşmesiyle oluşan bileşik yarıiletkenler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeni yarıiletkenler farklı fiziksel özellikleri ve en önemli avantajlarından biri olan heteroyapının oluşmasına olanak sağlamasından dolayı son yıllarda oldukça ilgi çekmiştir. Geleneksel III-As(P) yarıiletken sistemler düşük bant aralıklarına (Şekil 1.1) sahip oldukları için mavi-mor bölgedeki optoelektronik uygulamalarda kullanılamazlar. Bu yarıiletken sistemler genellikle kırmızı-sarı bölgeyi kullanan optoelektronik uygulamalarda tercih edilmektedir. Azotlu bir bileşik epitaksiyel olarak büyütülürken, altta seçiminde dikkat edilmesi gereken kimyasal, ısısal, elektriksel özelliklerinin yanı sıra, kristal yapı ve en önemli husus olan örgü uyumuna dikkat edilmektedir. Safir, GaN, silisyum gibi malzemeler InGaN, AlGaN, AlN ve InN gibi bileşikler için sık kullanılan alttaşlardır (Baş 2014). Silisyum fiziksel özellikleri, kristal kalitesi, katkı kapasitesi, ısıl kararlılığı, düşük maliyeti ve gelişmiş teknolojisiyle nitrit epitaksinde alternatif alttaş olarak dikkat çekmiştir (Kocan 2003). Alüminyum oksit tek kristal yapısı safirdir (Al_2O_3). Safir GaN epitaksisinde hekzagonal simetrisi, kolay olarak işlenebilmesi, maliyetinin ucuz olması gibi nedenlerden dolayı çok çalışılan bir alttaşdır.

1.1. III-V Nitrit Yarıiletkenler

Si, GaAs ve alaşımları yaşamın hemen hemen her alanında uygulamaya sahiptir. Bu malzemeler ile üretilen elektronik cihazlar aşındırıcı ve yüksek sıcaklık bulunan ortamlara karşı toleranssızdırlar. III-V nitritler gibi geniş bantlı yarıiletkenler ile üretilen cihazlar bu eksikliklerden arınmıştır. Sağladıkları avantaj ile havacılık ve enerji şirketleri, yüksek güç teknolojileri gibi çalışmaların ilerlemesinde yardımcı olduğu için III-V nitritlerin kullanımı artmıştır. Nitritlerin geniş bant yapıları, onları daha kısa dalga boylu yayıcılar ve bu yayıcıların kullanıldığı dedektörler için uygun

hale getirmektedir (Mohamad *et al.* 1995).

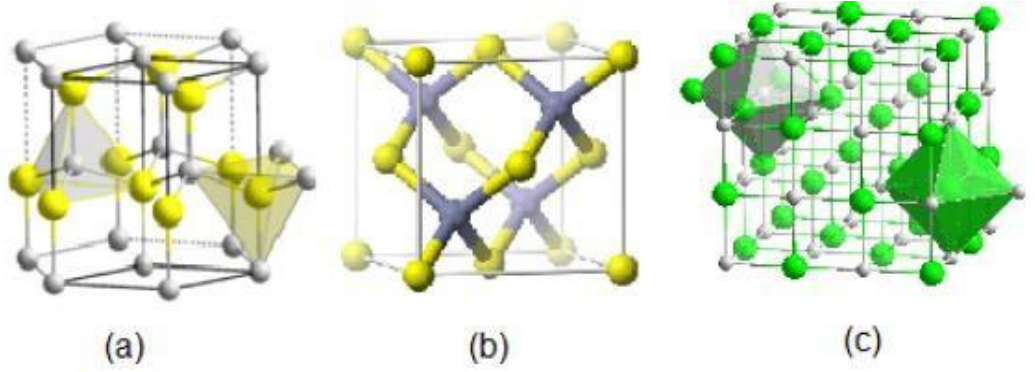


Şekil 1.1. Önemli yarıiletkenlerin kafes parametrelerine göre bant halleri

1.2. Nitritlerin Temel Özellikleri

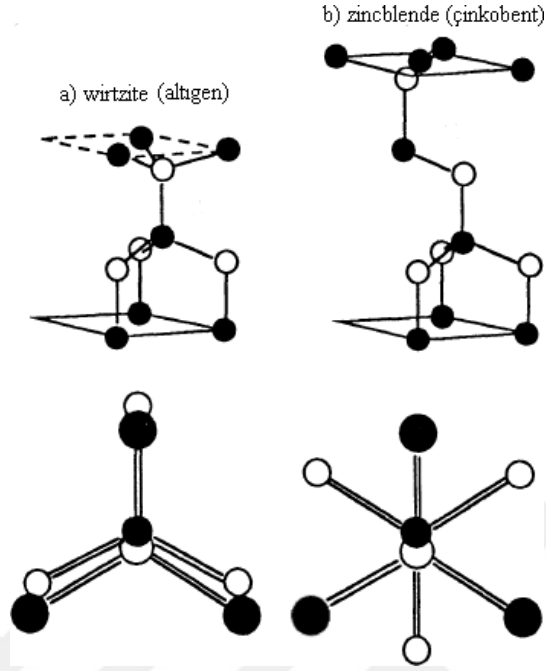
Grup III atomları Al, Ga, In gibi elementlerden oluşur. Nitritli yarıiletken bileşikler, Grup-III atomu ile N atomunun bağ yapmasıyla oluşur. Nitrit yarıiletken bileşikler Şekil 1.2’de görüldüğü gibi 3 şekilde kristalleşebilirler. İlk olanı NaCl (kaya tuzu) yapısında kristalleşebilmedir ve oldukça düşük bir ihtimaldir. Çünkü bu kristalleşme şekli için AlN, GaN, InN malzemelerine yüksek derecede dış basınç gerekmektedir. İkinci kristalleşme şekli olan zinc blende yapıda ise oluşan GaN ve InN bileşikleri sadece Si, SiC, MgO, GaAs gibi kübik alt tabakalar üzerinde heteroepitaksiyel büyütme ile kararlı olabilir. AlN, GaN, bulk yapılar en kararlı halleri termodinamiksel olarak üçüncü kristalleşme şekli olan wurtzite yapıdır (Chin *et al.* 1994). Wurtzite yapıda bağ başına bağlanma enerjisi AlN için 2.88eV (63.5kcal/mol), GaN için 2.20eV (48.5 kcal/mol), InN için 1.93eV (42.5 kcal/mol) olarak belirlenmiştir (Tülek 2010).

Wurtzite GaN, AlN ve InN, sırasıyla 3,4, 6,2 ve 1,9 eV'lik oda sıcaklığı bant aralıklarına sahiptirler. Kübik formda, GaN ve InN direk band aralığına sahipken, AlN ise indirektir (Mohammad *et al.* 1995).



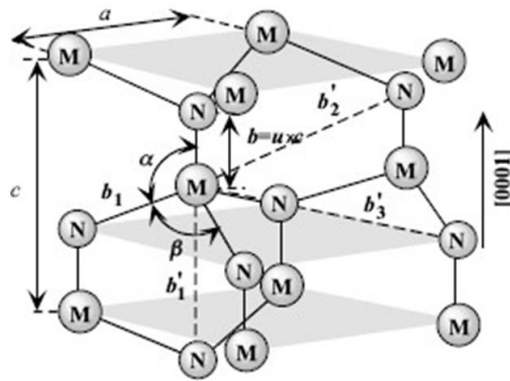
Şekil 1.2. (a) Wurtzite, (b) Zinc blende ve (c) NaCl (kaya tuzu yapıların şematik gösterimi (Tülek 2010)

Çinko blend ve wurtzit yapıları Şekil 1.3’de de görüldüğü gibi sadece ikinci en yakın komşunun bağ açısında farklılık gösterir. Wurtzite yapının c doğrultusu boyunca istifleme sırası, bir ayna görüntüsü anlamına gelmektedir ve bağ açıları, düzlem içi bir dönüş anlamına gelen ABAB'dir. Yönelimi [111] olan çinko blend yapısında, ABC ABC'nin bir istifleme sırasına neden olan 60° 'lik dönüşü vardır (Morkoc 2013).



Şekil 1.3. Wurtzite (altıgen) ve zinc blende yapının modellemesi

Wurtzite (Şekil 1.4) yapı biraz daha detaylı olarak anlatılırsa; bu yapı iki altıgen yapının (hcp) iç içe geçmesinden oluşur ve birim hücrelerin her birinde 4 atom bulunur. Wurtzite yapıda en yakın komşu sayısı 4 dür. İkinci en yakın komşu sayısı ise 12’dir. Tetrehedral bağ yapısına sahiptir ve bu bağ yapısında atomlar arasındaki açı 109 derecedir. Bir kenar uzunluğu ‘a’, yüksekliği ‘c’ ile ifade edilir. İdeal bir wurtzite yapı için c/a oranı 1.633, b/c oranı olan u parametresi ise 0,375 değeri olmaktadır (Chin *et al.* 1994).



Şekil 1.4. Wurtzite metal nitrat yapısının şematik gösterimi (Tülek 2010)

Şekil 1.4’de gösterilen yapıda;

- a, c, u örgü parametreleri
- $u = bc$ en yakın komşu uzaklığı
- b_1, b_2, b_3 ikinci yakın komşu uzaklığı
- a ile β atomlar arası açığı ifade etmektedir.

Kristali oluşturan her atom ve o atomun dengede olduğu bir konumu vardır. Bu konum bir nokta olarak ifade edilir. Bu belirli noktalar kristalin şeklini anlamamız için kolaylık sağlamaktadır.

Genellikle kristal örgü parametresi yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım (HRXRD) tekniği ile oda sıcaklığında belirlenmektedir. Örgü parametresinin bağlı olduğu sıcaklık, dış zorlamalar, serbest elektron yoğunluğu, yabancı atom yoğunluğu, kusurların yoğunluğu gibi faktörleri vardır (Tülek 2010).

Oluşan yarıiletken bileşiklerden GaN, AlN gibi malzemelerin örgü sabiti, bant aralıkları (Çizelge 1.1) ve bağlanma enerjileri farklıdır. Çünkü farklı katyonlara ve farklı iyonik yarıçaplara sahiptir. Würtzite yapıları nitrit yarıiletkenler bağlanma enerjileri yüksek olduğu için güçlü atomlar arası bağlara sahiptir (Chin *et al.* 1994).

Çizelge 1.1. AlN, InN, GaN gibi Nitritli bileşiklerinin bazı özellikleri (Kocan 2003)

	Birim	InN	GaN	AlN
Örgü sabiti a (300K)	Å	3,54	3,189	3,112
Örgü sabiti c (300K)	Å	5,705	5,185	4,982
Erime noktası	K	2146	2791	3487
Termal genleşme katsayısı	$10^{-6} K^{-1}$	3,8	5,59	4,15
Termal iletkenlik(300K)	$Wcm^{-1}K^{-1}$	1,76	4,1	5,9
Enerji bant aralığı (300K)	eV	0,7	3,39	6,2
Optik fonon enerjisi	meV	-	91,2	-

III-V nitrit yarıiletkenlerden, GaN, AlN ve alaşımlarının hepsi geniş bantlı yarı iletkenlerdir. III-nitratlar büyük bant aralığına sahiptirler ve bu özellik onlara büyük elektrik alana dayanma ve yüksek kırılma voltajı gibi avantajları kazandırmaktadır (Mohammad *et al.* 1995).

1.3. Neden AlN Tampon Tabaka?

Gallium nitrat çok çeşitli uygulama alanlarında en çok aranan malzemelerden biri haline gelmiştir (Singh *et al.* 1998). Örneğin aydınlatma, ekranlar veya otomotiv farlarında GaN tabanlı LED (ışık yayan diyot) kullanılmaktadır. GaN tabanlı LED üretim maliyetini düşürmek endüstriyel açıdan önemli bir mevzudur. Altaş olarak SiC ve safir kullanılırken yerini daha çok maliyeti düşürebilen Si metaryali kullanılmaya da başlanmıştır. Si düşük maliyeti, mükemmel kalitesi ve nispeten yüksek ısı iletkenliği nedeniyle GaN büyümesi için çekici bir alternatif altaştır. Fakat Si ile GaN arasında %17, safir ile GaN arasında %14,8 kafes uyumsuzluğu ve termal genleşme katsayısı farkı, yüksek yoğunluklu dislokasyonlar ve epitaksiyel tabakada çatlaklar oluşturur (Kim *et al.* 2010). Kafes uyumsuzluğu, GaN'da önemli derecede gerilme stresi oluşmasına ve büyütme sıcaklığından itibaren soğumaya başladığı zaman malzemenin gerilip çatlamasına sebep olmaktadır (Lin *et al.* 2007; Andersson *et al.* 2009). GaN ve AlN arasındaki kafes sabiti ise %2,5 ve ısıl genleşme katsayısı (oda sıcaklığında) %30 değerindedir. Bu nedenle, yüksek kaliteli GaN elde etmek ve olumsuz etkileri en aza indirmek için, bazı araştırmacılar Al (Ga) N-esaslı ara tabakalar, epitaksiyel yanal aşırı büyüme (ELOG), gibi çeşitli farklı yöntemler önermişlerdir (Reiher *et al.* 2003).

Amano ve arkadaşları (1986) yaptıkları çalışmada ilk defa safir (0001) altaş üzerine AlN tampon tabaka, onunda üzerine yüksek kaliteli GaN filmini üretmişlerdir. Büyütme koşullarının kristal kalitesine bağlılığını araştırmışlardır. GaN tek kristalinin genelde safir altaş üzerine büyütüldüğünü ve bununla birlikte iki malzeme arasının kafes uyumsuzluğunun ve termal genleşme katsayısının büyük farkından dolayı yüksek kaliteli film üretmenin zorluklarından bahsetmişlerdir. İlk olarak safir altaş üzerine ince bir katman halinde AlN büyütülüp, sıcaklık artırılarak üzerine GaN büyütülmüş ve GaN

filmlerinin kalitesi, AlN tabakasının kalınlığından ve üretim sıcaklığından kuvvetle etkilendiği görülmüştür. Optik olarak pürüzsüz ve çatlak içermeyen tek kristalli GaN filmlerin ilk kez MOVPE ile üretildiği kanısına varan H. Amano ve arkadaşları, üretilen filmlerin yüzey morfolojilerini ve lümünesans özelliklerini büyütme koşulları bakımından inceleyip ürettikleri GaN bant aralığının normaline çok yakın bir bant aralığı olarak büyütüldüğünü tespit etmişlerdir (Amano *et al.* 1986; Reiher *et al.* 2003). Reiher ve arkadaşları 2003 yılında kimyasal buhar fazı biriktirme ile yaptıkları çalışmada GaN ince filmini Si alttaş üzerine büyütürlerken GaAs ve AlN filmlerini ara katman olarak kullanmışlardır. Tampon malzemeleri üretirken RF manyetik saçtırma yöntemi kullanan Reiher ve arkadaşları wurtzite ve tek kristalli GaN filmi üretebilmişlerdir. Bu sonucun, herhangi bir büyüme tekniği ile AlN tampon katmanları kullanılarak (111) GaAs üzerindeki tek kristalli wurtzit GaN'ın ilk çalışması olduğunu öne sürmüşlerdir (Reiher *et al.* 2003).

Buna ek olarak, bazı deneylerde, ince tampon SiN_x filmin yerleştirilmesinin, GaN'nin stresini azaltabildiği görülmüştür (Fieger *et al.* 2007; Lin *et al.* 2007). Oh *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada bu teknolojinin parçası olan GaN filmlerinin daha az çatlaklı üretilmesi için birleştirilmiş tampon tabakası çalışmasından yararlanmışlardır. Si(111) alttaş üzerine kademeli sıcaklıkla ürettikleri AlN tamponlarının üzerine düşük basınç metalorganik buhar fazlı epitaksi (LPMOVPE) yöntemi ile üretilen GaN katmanlarının kristal yapısını incelemişlerdir. Üretilen tabakalar yüksek sıcaklık (HT-1100°C) ve düşük sıcaklıklarda (LT-850°C) yapılmaktadır. HT 180 nm AlN ince filmi büyütülerek oluşturulan tabaka referans tabakasıdır. LT 2nm AlN filmi büyütüldükten sonra sıcaklık HT olarak artırılmıştır ve sıcaklık artarken 18 nm daha AlN filmi büyütülmüştür. HT sıcaklığına ulaşıldıktan sonra 180 nm AlN ince filmi büyütülmüştür. Yani toplamda 200nm LT-HT AlN tabakaları ise kontrol tabakasıdır. HT AlN tampon tabakası ile LT-HT AlN tampon tabakasını karşılaştırdıklarında LT-HT AlN tabakasının daha iyi kristalli, daha düzgün yüzeyli ve daha az çukur içermekte olduğunu görmüşlerdir. Buradan üretilen LT-HT kademeli AlN tampon tabakası yüksek kalitede GaN tabakasının üretilmesine olanak sağladığı sonucunu çıkarmışlardır (Oh *et al.* 2018).

1.4. Nitrath Yarıiletkenlerin Kullanım Alanları

Nitrath yarıiletkenlerin bant aralıkları 0.7 eV ile 6.2 eV'a kadar uzanabilir (Çörekçi 2008). Bu özellik III-nitrat yarıiletkenleri, görünür ve morötesi bölgede çalışan ışık yayan diyotlar (LED), fotodetektörler, lazer diyotlar ve anahtarlama gibi birçok optoelektronik aygıtın üretilmesinde, geliştirilmesinde çok önemli bir yere koymaktadır. Yüksek parlaklığa sahip LED'ler gelişmiş ülkelerin reklam panolarında, trafik lamba ve işaretlerinde, alışveriş merkezleri gibi cihazlarda kullanılması güç tüketimi, maliyet ve verimlilik açısından mevcut kullanılan cihazlara göre birçok avantaj sağlamaktadır. Görünür ve morötesi ışık kaynaklarının kullanım alanlarını tıptan, tarım ve spektroskopik ölçüm sistemlerine kadar genişletmek mümkündür (Kocan 2003; Kaya 2010; Tülek 2010).

Nitrit yarıiletkenler geniş bant aralığı, yüksek kopma gerilimi ve yüksek doyma elektronu sürüklenme hızına sahiptir. Bu sebepler GaN ve diğer Grup III nitritlere dayalı elektronik cihazları, yüksek sıcaklık, yüksek güç ve yüksek frekanslı koşullarda uygulama için çok ümit vericidir. Ayrıca optoelektronik cihazlar, UV dalga boylarında ışık yayan diyotlar (LED) ve lazerler gibi cihazlarda kullanılmaktadır (Arabshahi 2006; Chang *et al.* 2010).

Yarıiletken nitritler aynı zamanda güneş, astronomi, füze yada duman algılayıcı gibi alanlarda da kullanılan fotodedektörler içinde iyi adaylardır. Emici tabakanın bant aralığı, dedektörün yaklaşık 280 nm'nin altındaki dalga boylarında seçildiği takdirde, çok düşük seviyeli UV radyasyonu tespit edilebilir (Morkoc 2013).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yarıiletkenler

Doğada malzemeler tanecik yapısına göre katı sıvı ve gaz olarak bulunurlar. Katıların en dikkat çekici sınıfını yarıiletkenler oluşturur. Bunlar metallere, yalıtkanlara uzanan bölgeyi kapsar ve geniş uygulama alanlarına sahiptir (Boylestad 2000). Katı atomları amorf yapı ve kristal yapı olmak üzere iki gruba ayrılan dizilime sahiptirler. Amorf yapıda bulunan katıların atomları, rastgele dizilmiş olup oluşturdukları yapıya amorf yapı denir. Kristal yapı ise o katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküllerin belirli bir düzen halinde bir araya gelmesi ile oluşmaktadır ve bu yapıya da kristal yapı denilmektedir (Gölcür 2012).

Katı haldeki malzemeler iletkenlik bakımından incelendiğinde iletken, yarıiletken, yalıtkanlar olarak üç sınıfa ayrılabilirler. Katıların iletkenlikleri öz dirençler (p) ile ifade edilir. Aşağıda Çizelge 2.1’de öz direnç değerleri gösterilmiştir (Toprak 2013).

Yarıiletkenlerde elektriksel öz direncin değeri, katılama oranı ve sıcaklığın artması ile azalır. Fakat iletkenlerde tam tersidir. İletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalırken, yarıiletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik değeri artar.

İletkenlik malzemenin yük akışına karşı gösterdiği direnç ile ters orantılıdır. Katı malzemelerde direnç düzeylerine bakılacağı zaman genellikle öz direnç değerine bakılır.

$$R = p \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde R malzeme direncini, p öz direncini, A kesitini, L uzunluğunu belirtmektedir. Denklemden de görüldüğü üzere bir malzemenin öz direnci ne kadar

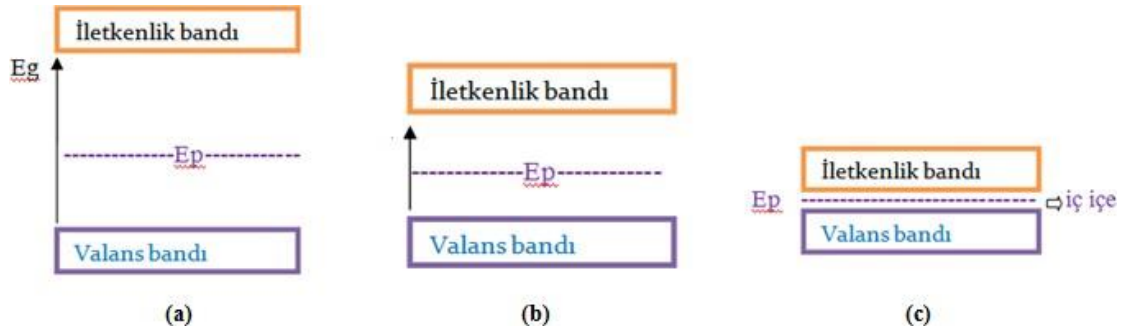
büyük olursa gösterdiği direnç de o kadar büyük olur. Aşağıda yalıtkan, yarıiletken ve iletken malzemelerin öz dirençleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Katıların elektriksel özdirenç değerleri

Yalıtkan	Yarıiletken	İletken
10^{10} ($\Omega.m$) eşit yada daha Büyük	10^{-4} – 10^{-10} ($\Omega.m$) aralığında	10^{-6} – 10^{-4} aralığında

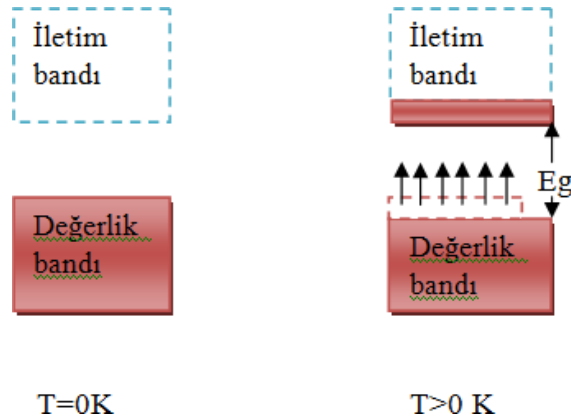
Bir katının yarıiletken sayılabilmesi için özdirenç değerini sağlıyor olması yeterli değildir aynı zamanda yasak enerji aralığı dikkate alınmalıdır (Gölcür 2012). Yarıiletkenlerin yasaklanmış enerji bölgelerine yasak bant aralığı denir ve bu önemli parametre yarıiletkenin birçok özelliğini tanımlar. İzinli enerji bölgeleri yasak bandın altında ve üstünde yerleşir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yasak bandın altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi değerlik bandı yani valans bandı ve üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi iletkenlik bandı olarak adlandırılır. Mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K) tüm elektronlar değerlik bandındadır ve iletkenlik bandında birçok boş seviye bulunur (Toprak 2013).

Katıların enerji-bant teorisine göre iletim bandı tamamen boş olup valans bandı tamamen dolu olan katılara yalıtkan katılar denir. Oda sıcaklığında elektronların valans bandından iletim bandına geçmeleri çok zordur çünkü; bu iki bant arası uzaklık oldukça fazladır (Şekil 2.1). Valans ve iletim bandı arasında neredeyse boşluk yok denecek kadar bitişik olan malzemelere ise iletken malzemeler denir ve tüm metaller bu gruba girmektedirler (Kamaç 2013).



Şekil 2.1. (a)Yalıtkanlar, (b) yarıiletkenler ve (c) iletkenlerde basitleştirilmiş elektronik enerji bant yapısı ve 0 K sıcaklıktaki fermi enerji seviyeleri

Yarıiletkenler iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar. Normal şartlar altında yalıtkan gibi davranan yarıiletkenler ısı, ışık ve manyetik etki gibi etkiler altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında Şekil 2.2’de görüldüğü gibi bir miktar valans elektronu serbest hale geçer. Yani iletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki boşluklar iletkenliğe katkıda bulunur. Farklı şartlar uygulandığı zaman iletkenliğin değişebiliyor olması yarıiletken malzemeleri elektronik uygulamalarda tercih edilen önemli malzemelerden biri haline getirmektedir.



Şekil 2.2. Uyarılmış $T>0$ K’de yarıiletkenlerin bant yapısı

Çoğu kez meteryallerin bant aralığı 3 eV’un aşağısında ise yarıiletkenden, yukarısında ise yalıtkandan söz edilir. Bir yarıiletkenin bant aralığı birkaç eV’dan büyük olamaz aksi halde uyarılmış taşıyıcıların sayısı ihmal edilecek kadar küçük olur. Bazı önemli yarıiletkenler ve yalıtkanların bant aralıkları Çizelge 2.2’de verilmiştir (Köksal 2015).

Çizelge 2.2. Yaygın yarıiletken ve yalıtkanların band aralıkları (Kocan 2003; Morkoc 2013)

Malzeme	Aralığın Büyüklüğü
Ge	0.67 eV
InSb	0.18 eV
GaN	3.39 eV
InN	0,7eV
AlN	6.2eV
Elmas	5.5 ev

Geçmişte en yaygın olarak kullanılan yarıiletkenler silisyum, germanyum ve silisyum oksit gibi malzemelerdir. Bu malzemeler, diyot, alan etkili transistör (FET) ve entegre devreleri gibi yapılarda kullanılıyordu. Fakat gelişen teknoloji ile bu yapılar yetersiz kalmıştır. Arayış sonucu birleşik yarıiletken meteryaller üzerinde denemelere başlanmıştır. II-VI grubu bileşiklerinden CdS, ZnS, IV-VI grubu bileşiklerinden PbTe veya III-V grubu bileşiklerinden GaAs, InSb, GaP, InAs, GaSb çalışmalar yapılmış ve teknolojiye cevap niteliği taşıyan bilgiler elde edilmiştir. Özellikle III-V grubu yarıiletken bileşikler elektronik ve optik devrelerde hızlı perfonması, yüksek sürüklenme hızı, yüksek mobilitesi ve direk yasak bant aralığı ile çeşitli heterojen yapıların üretimine olanak sağlamıştır (Lid *et al.* 2007; Toprak 2013).

İşlenmiş doğal yarıiletkenlerden transistör, LED, lazer, diyot, Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT), fotodedektör gibi elektronik ve optoelektronik cihazlar üretilebilmektedir. Nanoteknolojide yarıiletken malzemelerin tercih edilmesinin diğer sebepleri de küçük ,verimli ve hafif olmalarıdır (Arriaga *et al.* 2003; Lin *et al.* 2007).

2.2. AlN Bileşigi

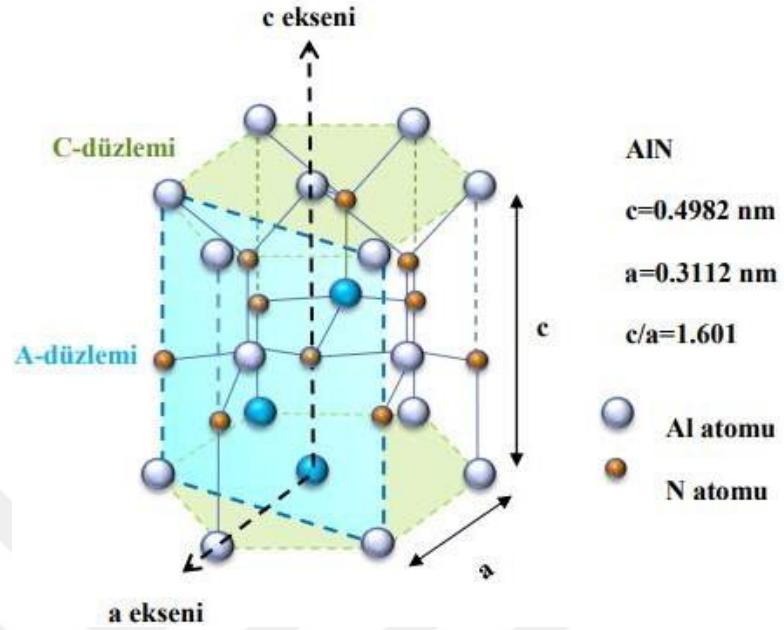
AlN yüksek ısı iletkenliği, kimyasallara direnci gibi birçok kullanışlı, elektronik, mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptir. Uygulama şekline bağlı olarak bu malzemenin çeşitli yapısal ve morfolojik özellikleri farklı olan filmleri elde edilebilir (Oliveria *et al.* 2004). İletken malzemelerde yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir çünkü geniş bant aralığına sahiptir. AlN malzemesi GaN gibi malzemeler ile alaşım oluşturabildiği için elektronik ve optik cihaz üretilmesinde kullanılmaktadır (Vurgaftman *et al.* 2001; Morkoc 2013).

Wurtzite AlN, III-V yarıiletken bileşenler içerisinde doğrudan enerji boşluğuna(direk bant aralığına) sahip Al içeren tek bileşik olma özelliğini taşımaktadır. (Vurgaftman *et al.* 2001). Bu malzeme oksijen ile yüksek tepkimeye girme olasılığı sebebi ile çok kolay üretilen bir malzeme değildir (Oliveira *et al.* 2004). Bu yüzden AlN'ı iyi kalitede büyütebilmek için oksijensiz bir ortam ve yüksek saflıkta bir kaynak malzeme gerekmektedir (Mohammad *et al.* 1995).

Son zamanlarda büyütme ortamlarının daha az kir barındırdığı görülmektedir ve bu sayede daha iyi kalitede AlN üretimi yapılabilmektedir (Morkoc 2013).

2.2.1. AlN bileşiğinin fiziksel özellikleri

Normal şartlar altında altıgen wurtzite olarak kristallenebilen AlN farklı koşullarda zinc blend yapıda da kristalleşebilmektedir (Mohammad *et al.* 1995; Medjani *et al.* 2006).

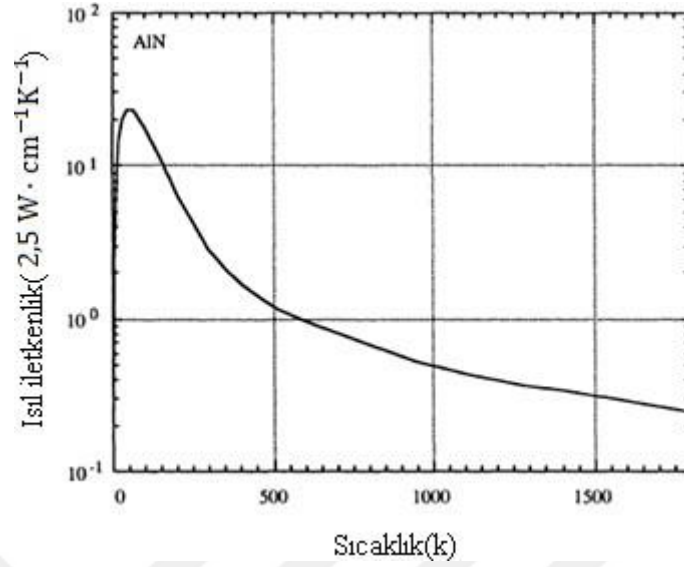


Şekil 2.3. Hegzagonal würtzite yapıya sahip AlN

Paszkowicz *et al.* (2004) yaptıkları çalışmada würtzite tipi malzemelerin yapısal parametrelerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Rietveld-refinements yapan araştırmacılar bu parametrelerden AlN için $a = 3.11197 \text{ Å}$, $c = 4.98089 \text{ Å}$, $c/a = 1,60056$ ve $u = 0.3869$ değerlerini elde etmişlerdir (Kocan 2003).

2.2.2. AlN bileşiğinin ısı ve kimyasal özellikleri

AlN'ın erime noktası 2000°C 'den daha yüksektir. Seramik ve sert bir malzeme olan AlN oda sıcaklığında $\sim 3.2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$, 300 K 'de ölçülen ısı iletkenlik ise $2,5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve $2,85 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak tahmin edilmektedir (Morkoc 2013).

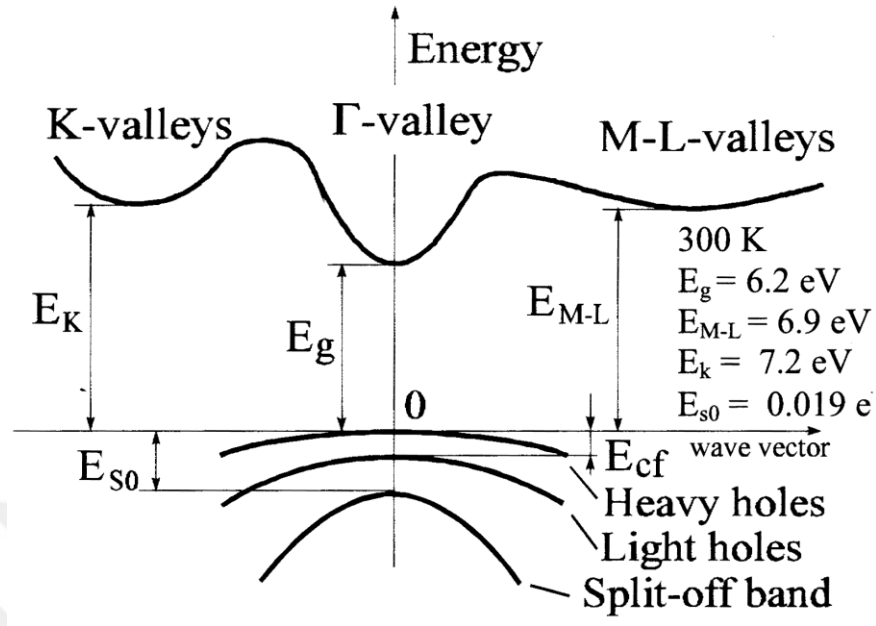


Şekil 2.4. Sıcaklık ile değişen termal iletkenlik grafiği (Morkoc 2013)

Edwards *et al.* (1965) akan nitrojen içinde sıkıştırılmış AlN tozunu sinterleyerek AlN kristallerini elde etmişlerdir.

2.2.3. AlN bileşiğinin termal ve optik özellikleri

AlN band aralığının geçmişten günümüze kadar farklı birçok değeri bulunmuştur. Örneğin; Yim *et al.* (1973) safir alttaş üzerine, 1000°C ve 1100°C’de büyüttüğü AlN tek kristal tabakalarının oda sıcaklığında 6,2 eV luk bir band aralığına sahip olduğunu ölçmüşlerdir. Perry ve Rutz (1978) ise 1800°C’de, safir alttaş üzerine, büyüttüğü AlN kristallerinin bant aralığını 5K’de 6.28 eV olarak ölçmüşlerdir (Mohammad *et al.* 1995). Yani AlN malzemesinin band aralığı 6 eV ile 6,28 eV arasında değişmektedir. Tang *et al.* (1998) yaptıkları çalışmada üç farklı alttaş üzerine büyütme yapmışlar ve en yakın değeri 300K’de 6.11 eV olarak hesaplamışlardır. Bant aralıklarının 6.2 eV’un altında çıkmasının sebebi oksijen kontaminasyonu olabilmektedir (Morkoc 2013). AlN, büyük bir doğrudan boşluğa (direk bant aralığına) sahip bir yarı iletkenidir. Wurtzite kafes içinde kristalleştiği için, bant yapısı diğer III-V bileşiklerinkinden farklıdır. Christensen ve Gorczyza (1994) elde ettiği verilere göre 300K’de wurtzite AlN’ın bant aralığı $E_g=3.2\text{eV}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.5. AlN, Wurtzite. Bant yapısı. İletim bandının önemli değeri ve valans bandının maksimumu (Christensen 1994; Suzuki 1995)

AlN mazemesinin iyi termal iletkenliği, büyük sayılabilen piezoelektrik sabitleri ve iyi sertlik değeri sebeplerinden dolayı optoelektronik uygulamalar için uygun olduğu düşünülmektedir (Medjani *et al.* 2006).

2.3. GaN Bileşiği

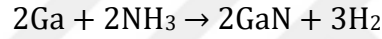
GaN geniş bantlı bir malzemedir. Görünür ışık yayan ve ultraviyole cihazlarda uygulamalara sahiptir. Son zamanlarda, GaN örnekleri yüksek sıcaklıkta yüksek nitrojen basıncı altında büyütülmektedir. GaN geniş iyoniklik, yüksek ısı iletkenliği ve sertliği ile elmasa benzemektedir (Christensen and Gorczyza 1994).

GaN, diğer grup III nitritlerden daha çok çalışılmış olmasına rağmen GaAs gibi teknolojik açıdan önemli materyallerin anlaşılmasına yardımcı olduğu için daha çok araştırılmaya ihtiyaç duyulmaktadır. GaN büyümesi genellikle kusurlar ve safsızlık sebepleri nedeni ile taşıyıcı konsantrasyonu sorun oluşturmaktadır (Morkoc 2013).

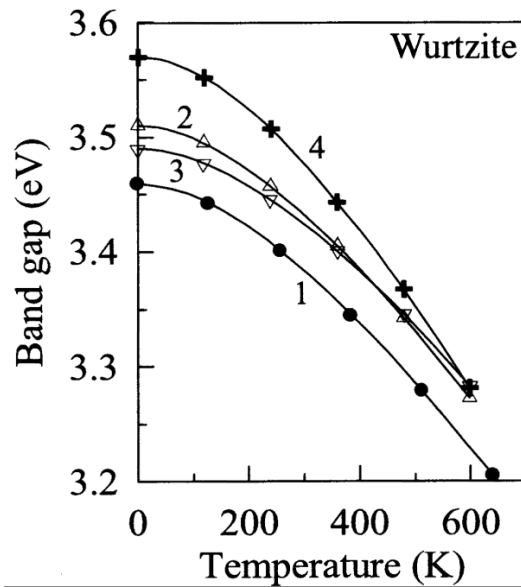
Son zamanlarda daha da artan ilgi büyüme işlemleri ve işletim teknolojisinde iyileşme sağlamakta ve bu sayede de birçok zorluğun üstesinden gelinmesine olanak sunmaktadır (Morkoc 2013). Modern kristal büyüme tekniklerinin ortaya çıkışı, son birkaç yılda GaN kalitesinin hızlı bir şekilde artmasına yol açmıştır (Fieger *et al.* 2007).

2.4. GaN Bileşiğinin Kimyasal Özellikleri

Johnson *et al.* (1932) yaptıkları çalışmada ilk olarak metalik Ga'nın bir NH₃ akımında GaN'ye dönüşümünü göstermişlerdir. Bu sentezlenen malzemenin oldukça sert kararlı bir bileşik olduğunu belirtmişlerdir (Strite and Morkoc 1992; Morkoc 2013).



AlN ve GaN malzemelerinin toz numuneleri akan amonyak altında ve bazı uygun metaryeller eklenerek sentezlenmiştir. III-V nitritli bileşiklerin popüler olan epitaksiyel büyütmelemleri aslında çoğu bu yaklaşımdan gelmektedir (Strite and Morkoc 1992). Dingle *et al.* (1971) tek kristalli GaN nano çubuklarında 3,45 eV civarında uyarılmış emisyon ve lazer etkisi gözlemlemişlerdir (Strite and Morkoc 1992).



Şekil 2.6. Farklı sıcaklıklarda bant aralığı grafiği (ME Levinshtein 2001)

Levinshtein *et al.* (2001) yılında yayınladıkları kitapta GaN örneklerinin farklı teknikler kullanılarak ve farklı alttaşlar üzerinde büyütülmüş verilerini alarak yukarıdaki sıcaklık ve bant aralığı grafiğini çizmişlerdir. Bu grafikten bant aralığının sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir.

Yüksek sıcaklıktaki kimyasal stabilitesi, sertliği sayesinde koruyucu kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Geniş bant aralığına sahip olduğu için cihaz çalışmalarında uygun aday olabilmektedir. GaN araştırmacıların birçoğu yarıiletken uygulamalarında GaN malzemesini kullanma taraftarı olmuşlardır. Fakat bu malzemenin termal stabilitesi yüksek sıcaklıkta işleme kolaylığı sağlasada kimyasal stabilitesi teknolojik zorluk çıkarmaktadır (Morkoc 2013).

2.4.1. GaN bileşiğinin fiziksel özellikleri

GaN, altıgen wurtzite ve çinko blend formlarında kristalleşebilmektedir (Mohammad *et al.* 1995). GaN ve AlN üzerine parametreleri belirtmek amaçlı çalışma yapan Paszkowicz ve arkadaşları GaN için $a = 3.28940(1) \text{ \AA}$, $c = 5.18614(2) \text{ \AA}$, $c/a = 1.62606(1)$, $u = 0.3789(5)$ değerlerini elde etmişlerdir (Kocan 2003).

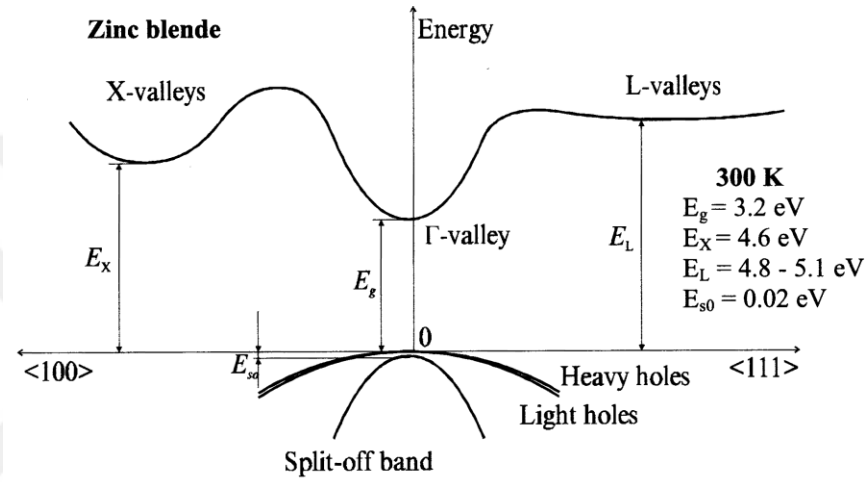
Wurtzite altıgen yapıda olan GaN'ın moleküler ağırlığı 83.728 gm/mol dır. Bu yarıiletkenin kafes parametreleri oda sıcaklığında $a_0 = 3.1892 \pm 0.009 \text{ \AA}$ ve $c = 5.1850 \pm 0.0005 \text{ \AA}$ değerlerindedir (Morkoc 2013).

2.4.2. GaN bileşiğinin termal ve optik özellikleri

Çinko blende kristal yapısı (Levinshtein *et al.* 2001) sıcaklıklara göre bant aralıkları aşağıdaki tablodaki gibi değişmektedir.

Çizelge 2.3. Çinko blende yapıda sıcaklığa bağlı bant aralıkları (Levinshtein *et al.* 2001)

Bant aralığı	3,28 eV	0 K'de
Bant aralığı	3,2 eV	300 K'de
Elektron ilgisi	4,1 eV	300 K'de

**Şekil 2.7.** Çinko blende (kübik) GaN bant yapısı, iletim bandının önemli değeri ve valans bandının maksimumu (Suzuki *et al.* 1995)

Safir üzerindeki wurtzite GaN'ın bant aralığı 3,42 eV dur. Daha önce belirtildiği gibi, GaN genellikle wurtzite yapısında kristalleşen doğrudan geniş bantlı bir yarı iletkenidir. (Mohammad *et al.* 1995) Enerji bant aralığının (E_g) sıcaklığa göre değişimi dE_g/dT ile belirlenmektedir. Optik absorpsiyon çalışmaları gösteriyorki serbest elektron katkısını göz ardı edersek, sıcaklığa bağlı E_g değeri lineer olmaktadır. 300K Sıcaklıktaki bant aralığı katsayısı $-4.5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ dur. Enerji bant aralığının sıcaklık ile bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$E_g = E_{00} - \frac{\alpha_g T^2}{T + T_g}, \text{ eV} \quad (2.2)$$

Monemar (1974)'a göre $T < 295^\circ\text{C}$ 'den düşük olduğu zamanlarda geçerli olan değerler şunlardır; $E_{00} = 3.503 \text{ eV}$, $T_g = -996 \text{ K}$, $\alpha_g = 5,08 \times 10^{-4}$. Wurtzite yapı için bant

Önceleri metal ince filmleri dekorasyon olarak kullanılırken daha sonra gümüş tuzları kullanılarak cam yüzeyler üzerinde gümüş filmleri elde edilmiştir. İnce filmler ile ilgili çalışmalar arttıkça ince film elde etme yöntemleri de artmıştır. Busen kimyasal reaksiyon yöntemi, Grove (1852) sıçratma yöntemi ile Faraday asal gaz içerisinde buharlaştırma yöntemi ile ince film elde etmişlerdir. Fakat bu çalışmalar vakum cihazlarının gelişmesine kadar laboratuvar çalışması olarak kalmışlardır. Nahwold platin ince filmini Joule ısıtması ile elde etmek için ilk defa vakum kullanmıştır. Daha sonraları Kundt aynı yolla metal film elde etmiştir.

Mikroelektronik ve optoelektronik endüstrilerinin temelini oluşturan ince filmler, günümüzde teknolojik imkanların artması ile üretilen ince filmlerin özelliklerinin araştırılması daha kolay olmakta ve üretim yöntemleri de artış göstermektedir. Bu araştırmalar elektronik cihazların gelişiminin temelini oluşturmaktadır (Gölcür 2012).

Çizelge 2.5. İnce film biriktirme yöntemleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Nebi 2013)

• Reaktif buharlaşma • Termal nitrüleme (nitritleme) • Diyot saçtırma • Magnetron saçtırma • İyon demeti saçtırarak biriktirme • Atmosferik basınç KBD • Lazerli indüklemeli KBD • Katodik ark biriktirme • Kimyasal redüksiyon kaplama • Püskürtme proliz • Püskürtme tekniği • Elektrolit anotlama	• Molekül demetli epitaksi • Termal polimerizasyon • İyon ekme • Plazma oksitlenme • İyon kaplama • İyon demeti biriktirme • Reaktif iyon kaplama • Plazma nitrüleme • Plazma anotlama • Plazma polimerizasyon • Plazma redükleme • Kimyasal deplaman kaplama	• Termal oksitleme • Elektron demetiyle • Reaktif saçtırma • Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme • Küme demet biriktirme • KBD epitaksi • Düşük basınç KBD • Metal organik KBD • Işık destekli KBD • Elektro kaplama • Elektrosuz kaplama • Döndürme tekniği • Sıvı faz epitaksi
---	--	--

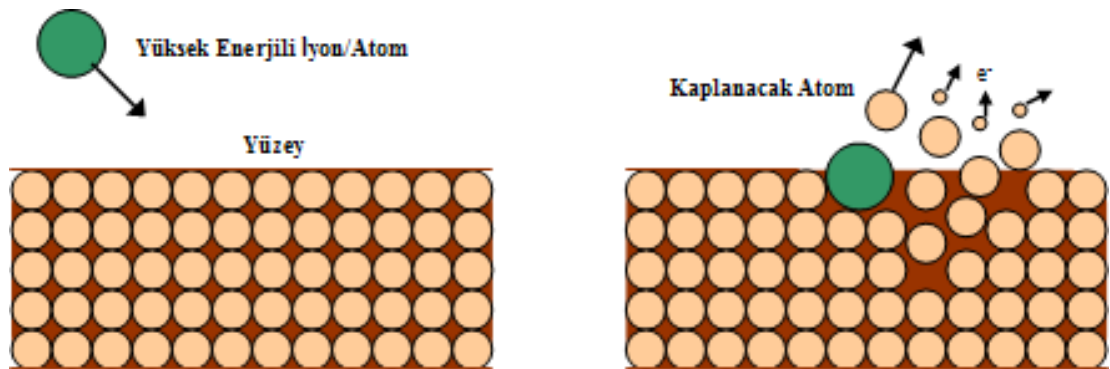
Plazma saçtırma yöntemi, kullanılan diğer tekniklere göre avantajı olan bir tekniktir.

Vakum ve plazma teknolojileri gün geçtikçe gelişmektedir ve bu gelişme ile birlikte daha da kullanışlı hale gelen bu teknik ince film kaplama yöntemleri içerisinde oldukça önemli bir yere sahip olmuştur (Nebi 2013).

2.5.1. Saçtırma yöntemi

Plazma ve iyon tabancası gibi yapılarla hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonları hedef malzeme üzerine bombardıman edilir. Bombardıman sonucu atomlar yüzeyden sıçratılmış ve hedef malzeme yüzeyinden atomlar koparılmış olur. Koparılan bu atomlar buhar haline geçer ve altlık malzeme yüzeyine biriktirilir. Bu biriktirme yöntemi saçtırma yöntemi olarak bilinmektedir (Meriç 2011; Sönmezoğlu vd 2012).

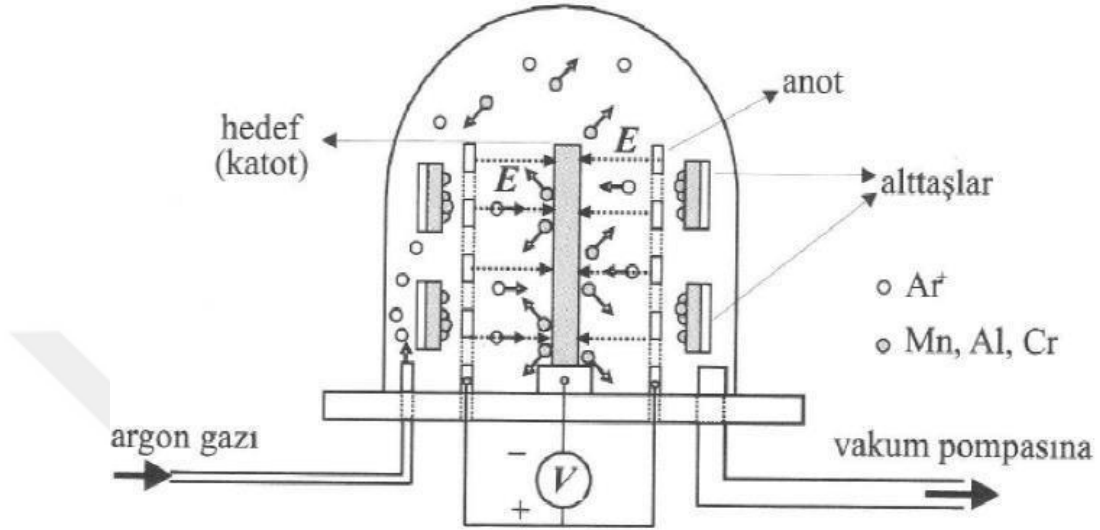
Sıçratma tekniği ile kaplama ilk kez 1852 yılında Grove tarafından yapılmıştır. Grove (1852) tarafından yapılan bu kaplama doğru akım (DC) gaz parlama deşarj tüpünde gözlemlenmiştir. Tüpün katodundan yüksek enerjili iyonlar sıçratılması ile tüpün iç kısımlarında katot malzemesi biriktirilmiştir. O zamanlarda bu olay katodun bozulmasına sebep olabileceği için istenilmeyen bir durumdu. Fakat günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılabilmektedir. Örneğin; yüzey temizliğinde, ince film büyütme, yüzey aşındırmada, kullanılabilmektedir.



Şekil 2.9. Sıçratma mekanizması (Sönmezoğlu vd 2012)

Yukarıdaki şekilde yöntem sıçratma yönteminin mekanizmasında hedef malzeme yüzeyine soygaz iyonları çarpmaktadır. Bu çarpış sonucunda soygaz iyonları enerjilerini hedef

malzemeye vermiş olup ve malzeme yüzeyinden atom koparmış olmaktadır. Bu olaya saçtırma denir (Sönmezoğlu vd 2012).



Şekil 2.10. Saçtırma yönteminin şematik gösterimi (Polater 2016)

İlk III-V nitrit araştırmalarında en popüler ince film büyüme tekniklerinden biri reaktif püskürtmeydi. Nispeten ucuz ve basit bir yaklaşım olan püskürtme yönteminde, bütün püskürtülmüş materyaller şekilsiz olmasına rağmen, bazı önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Strite and Morkoc 1992).

Son yıllarda yapılan saçtırma yöntemleri çoğunlukla manyetik alanda yapılmaktadır. Manyetik alan ile yapılan kaplamalar manyetik diskler, optik diskler, mikroelektronik gibi birçok endüstriyel alanda kullanılabilir (Sönmezoğlu vd 2012; Nebi 2013). Aşağıdaki çizelgede saçtırma yönteminin avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Sönmezoğlu vd 2012).

Çizelge 2.6. Saçtırma yöntemi avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
- Farklı buhar basıncı ve hızına sahip alaşımların bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilmektedir - Film büyütülürken sisteme makro yapıların girme olasılığı çok düşüktür. - Üretilen filmin kalitesi iyidir	- Belirli miktar kaplama yapılmaktadır. - Elektrik tüketimi çok fazladır - Maliyeti yüksektir

Sputtering tekniğinin kendisi içinde farklı sistemlere sahiptir; Diyet Sputtering ve Magnetron püskürtme gibi. Bu sistemlerin her biri hem doğru akım (DC) hem de radyo frekansı (RF) ile çalıştırılabilir (Ahmed 2017). Kullanılan güç kaynağının adı tekniğin adını belirlemektedir (Johnson 2005). Elektronlar arasına uygulanan bir voltaj değeri vardır. Bu voltaj değeri doğru akım üreten bir güç kaynağından elde ediliyor ise DC saçtırma adını almaktadır. Bu voltaj değeri radyo frekans güç kaynağından elde ediliyorsa RF saçtırma olarak adlandırılmaktadır (Polater 2016).

2.5.2. Radyo frekansı (RF) saçtırma sistemi

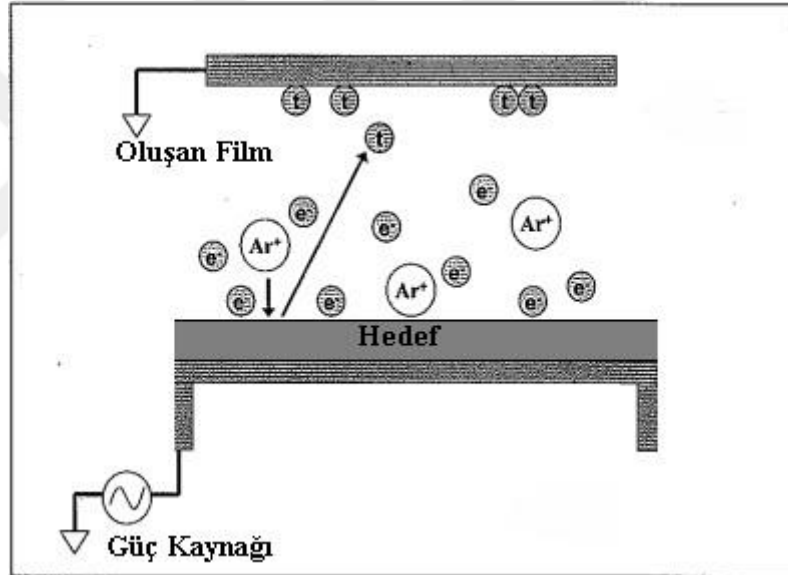
Bu yöntemde kullanılan güç kaynağı RF güç kaynağıdır. RF saçtırma sistemi 4 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; vakum pompası, vakum odası, radyo frekansı ve güç kaynağıdır.

Vakum pompası vakum odasının içerisindeki basınç oranını yeterince düşük miktarlara çekmek için kullanılır. Vakumun düşürülmesi gerekir bunun ilk sebebi iyonize olmuş parçacıkların yüksek enerjili çarpışmalar yapmasını sağlamaktır. Yüksek enerjili çarpışmalar iyonize olmuş parçacıkların serbest elektronlarının serbest yolunu artırmakla mümkün olmaktadır. Bu sayede büyütülmek istenilen malzemenin kalitesinin ve saflığının artırılabilmesi sağlanmış olmaktadır.

Vakum odasında bulunan elektrotlara hedef malzeme ve alttaş malzeme yerleştirilmektedir. Bu odanın istenilen bir basınç değeri vardır ve o basınç değerine

gelindiğinde içeriye bir soygaz pompalanmaktadır.

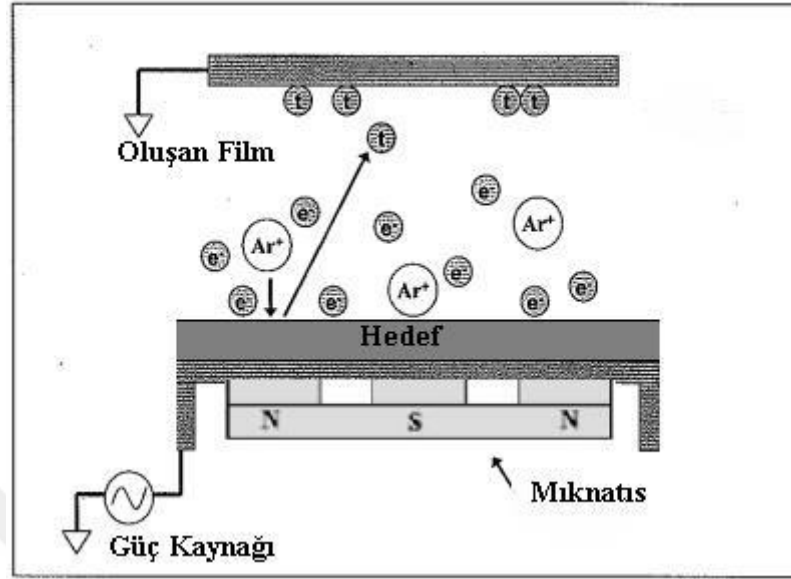
Elektromanyetik dalgalar radyo frekansı güç kaynağı ile oluşturulup bu dalgalar sayesinde titreşimler meydana gelmektedir. Bu oluşan titreşim frekansı yardımı ile içeride bulunan soygazın plazması oluşmuş olur. Bu iyonize olan soygaz atomları hedefe yönelip malzemenin atomlarının saçılmasını sağlamaktadır. Saçılan atomlar alttaş malzeme üzerine yönelirler ve alttaş üzerinde yoğunlaşmaya başlarlar (Thornton 1983; Nebi 2013). RF Saçırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. RF Saçırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi (Johnson 2005)

2.5.3. Radyo frekanslı (RF) magnetron saçırma tekniği

Radyo frekanslı (RF) magnetron saçırma tekniğinde kullanılan elektriksel alana dik doğrultuda manyetik alan uygulanmaktadır. Bu sayede elektronlara sarmal bir yörünge hali kazandırılmış olur. Oluşan sarmal yörünge soygazların yani argon atomlarının mesafelerini artırmaktadır. Artırılan mesafe avantajdır çünkü böylelikle daha çok nötr soy gaz atomları ile çarpışma yaparak hedef üzerine iyon konsantrasyonunu artırırlar. Ayrıca başka avantajları ise hedeften atom koparılması işlemi yoğun biçimde yapılmakta olup, plazma oluşabilmesi için gerekli basınç miktarı düşürülmüş olur (Johnson 2005; Meriç 2011).



Şekil 2.12. RF magnetron saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi (Johnson 2005)

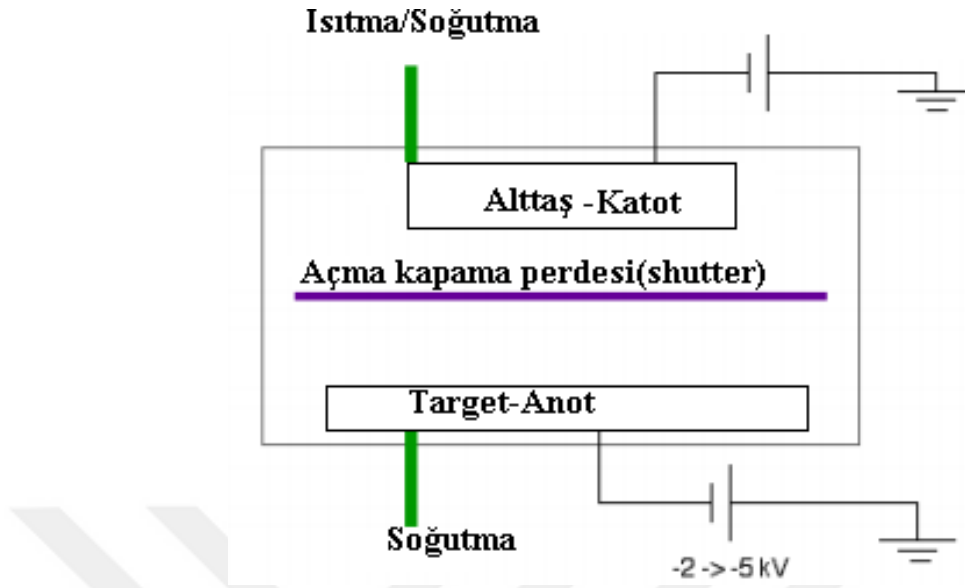
Radyo frekanslı magnetron saçtırma tekniğindeki (Şekil 2.12) manyetik alan, hedeften koparılan iyonların tabana ulaşmasını engellediğinden taban üzerindeki malzemenin ısınması bir nebze azaltılmış olmaktadır (Johnson 2005).

2.5.4. Doğru akım (DC) saçtırma tekniği

Metal malzemelerin kaplanmasında kullanılan bu yöntemde elektronlar arasına uygulanan potansiyel fark doğru akım (DC) güç kaynağı ile uygulanarak elde edilmektedir. Avantaj ve dezavantajları aşağıdaki çizelge de belirtilmiştir (Meriç 2011).

Çizelge 2.7. DC güç kaynağı ile saçtırma metodu avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
• Metal malzeme kaplamada kullanılabilir • Homojen ve iyi tutunmuş malzeme üretilir	• Yalıtkan malzemelerin kullanımı için uygun değildir • Plazma yoğunluğu düşüktür • Depolama oranı düşüktür



Şekil 2.13. DC Saçtırma sistemi ile film oluşumunun şematik gösterimi (Meriç 2011)

RF güç kaynağı ile DC güç kaynağı arasındaki farklara bakacak olursak;

DC saçtırma yöntemi ile ince film büyütme yalıtkan malzemelerin büyütülmesi için uygun değildir. Çünkü hedef yüzeyinde oluşan pozitif iyon yükü akışını geri çevirir ve saçtırma sürecini durdurur.

RF saçtırma yönteminde ise iletken elektrotlar kullanmak zorunlu değildir. RF frekansı, plazma deşarjını sürdürmek için yeteri kadar yüksektir. İyonlardan daha çok elektronun, her iki elektrotta toplandığı için elektrotlarda negatif yük birikimine sebep olur. Böylece, her iki elektrot, plazma voltajına (V_p) göre negatif olan sabit bir DC potansiyel ile devam ettirilmelidir. Pozitif bir V_p potansiyeli, daha yavaş pozitif iyonların ulaşımına yardım eder (Polater 2016).

2.5.5. Plazma

Plazmanın en genel tanımı; maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinin dışında olan yapısıdır. Plazmada eşit miktarda pozitif ve negatif yükler bulunmaktadır. Bu sebepten plazma nötr olarak bilinmektedir. Oluşan plazmanın belirli bir şekli ve hacmi yoktur. Ayrıca

plazma elektriksel olarak iletkenidir. İyonize edilmiş atom molekülleri, fotonlar, serbest elektronlar ve artık nötr türler gibi parçacıklar, bir alttaşa çarptıklarında onu değiştirebilecekleri kadar enerjiye sahiptirler. Bu özellik, sayesinde yüzeye çarptıklarında malzeme yüzeyinden koparma yapar ve yüzey kirliliğini temizlemek için kullanılabilir. Kurudur ve çevre dostudur.

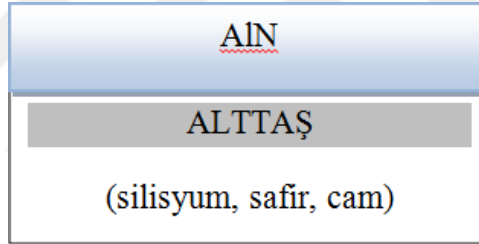
Plazmada, parçacıkların ortalama serbest yolu çalışma basıncı ile belirlenir. Çalışma basıncı azalırken, serbest yol daha çok artar (Meriç 2011).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

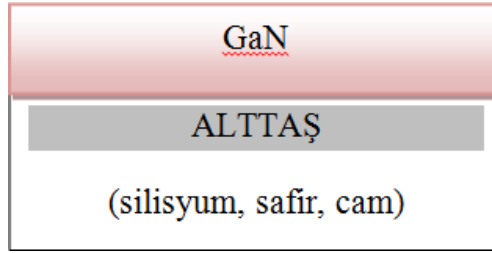
Belirli şartlarda ve aşamalarda RF saçtırma metodu ile büyütülen numunelerin işlem sırası aşağıdaki gibidir.

1. Safir, silisyum, cam alttaşlar üzerine Radyo Frekansı Saçtırma yöntemi ile farklı şartlar altında büyütülen AlN filmlerinin yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Sıcaklık, voltaj değerleri sabit tutulmaya çalışılarak azot ve argon gazlarının miktarları değiştirilerek büyütme yapılmıştır. Değişen gaz miktarları ile basınç orantılı olarak değiştiği için büyütme basıncı ve azot kısmi basıncı değiştirilen parametre olarak belirlenmiştir.



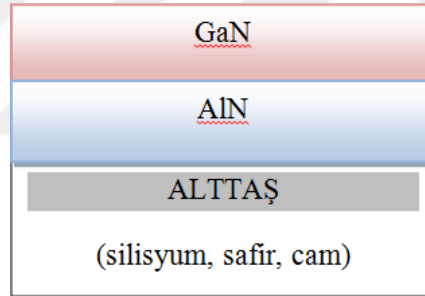
Şekil 3.1. Film büyütme ilk adımı

2. Safir, silisyum, cam alttaşlar üzerine Radyo Frekansı Saçtırma yöntemi ile farklı şartlar altında büyütülen GaN filmlerinin yapısı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Sıcaklık, voltaj değerleri sabit tutulmaya çalışılarak azot ve argon gazlarının miktarları değiştirilerek büyütme gerçekleştirilmiştir. Değişen gaz miktarları ile basınç orantılı olarak değiştiği için büyütme basıncı ve azot kısmi basıncı değiştirilen parametre olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Film büyütme ikinci adım

3. Safir, silisyum, cam alttaşlar üzerine Radyo Frekansı Saçtırma yöntemi ile farklı şartlar altında büyütülen AlN filmi tampon tabaka olarak kullanılarak üzerine GaN filmlerinin büyütülme yapısı Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Burada uygulanan şartlar AlN filmi büyütürken belirlenen en iyi şart ile GaN filmi büyütülürken belirlenen en iyi şart olmuştur. Yani AlN’in ve GaN’in kendine özgü parametreleri bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Ara tampon tabaka ile üçüncü adım

Büyütme parametreleri, XRD, AFM, SEM, XPS karakterizasyon sonuçları araştırma bulguları bölümünde detaylı olarak gösterilmiştir.

RF saçtırma yöntemi ile farklı şartlarda büyütülen AlN ince filmlerinden en iyi olan şartlar belirlendi. Belirlenen şartlar ile üretilen AlN filmi üzerine yine RF saçtırma yöntemi ile GaN ince filmi büyütüldü. GaN ince filmleri büyütülürken aynı chamber içerisine, üzerinde hiç film olmayan silisyum, safir ve cam alttaşlar ile bu alttaşlar üzerine büyütülen AlN ince filmlerini yerleştirildi ve bu dört çeşit numune üzerine GaN ince filmleri büyütüldü. Böylece bu kısımda amaçlanan, aynı şartlar altında büyütülen GaN ince filmlerinin değişimini gözlemlemektir.

AlN ve GaN yarıiletkenlerin miller indislerinin derece ve yönelimleri sonuçlar bölümünde verilmiştir.

3.1. Altaş temizleme prosesi

Ortam kirliliği olduğu kadar filmlerin büyütülmesinde kullanılacak altaşların temizliği oldukça önemlidir. Bu konuda her altaş malzemenin keline has temizleme prosesi mevcuttur. Bu tezde kullanılan temizleme prosesleri şu şekildedir.

3.1.1. Cam ve safir temizleme

1. YOL (Safir-Cam)

- Asetonda 5 dk bekletme, sonra azot ile kurutma
- Deiyonize (DI) suda 5 dk bekletme sonra tekrar kurutma
- Etanolde 5 dk bekletme sonra tekrar kurutma (etanol ya saf olarak kullanılacak yada çözelti olarak)
- Bu yöntem quartz (safir) için de kullanılabilir

2. YOL (Cam)

- Temizlik detarjanı bulunan sıcak su içerisinde camları bekletme deiyonize su içerisinde tekrar yıkama, bekletme ve kurutma.
- Asetonda 5 dk bekletme
- Deiyonize su ile bekletilip kurutma
- Etanolde 5 dk bekletme sonra tekrar kurutma (etanol ya saf olarak kullanılacak yada çözelti olarak)
- Fırına konup 200°C'de 5dk bekletme.

3. YOL (Safir)

- İçinde aseton bulunan kapta safir bekletme

- Ultrasonik cihazında 10 dk. Bekletme
- Aseton, atık aseton kutusuna dökme
- Safirleri içinde aseton bulunan kapta 10-15 dk. Bekletme
- Safirler deiyonize suda yıkama
- Azotla kurutma

3.1.2. Silisyum temizleme

1. YOL – RCA1

- Silisyumlar ilk olarak DI suda yıkama
- 325 ml (DI) su farklı bir kaba konur
- Üzerine Amonum hidroksit (NH_4OH) konur ve 70°C 'de bekletilir.
- Üzerine Hidrojen peroksit (H_2O_2) eklendiğinde kabarcıklar çıkacaktır. 1-2 dk bekletilip içerisine Silisyumlar konulur.

(NH_4OH : H_2O_2 : H_2O karışım oranları sırasıyla 1:1:5 olmalıdır)

- 15 dk bu solüsyonda bekletildikten sonra DI suda temizleme
- DI suda seyreltilmiş HF içinde 30 saniye beklet

(HF: H_2O karışım oranları sırasıyla 1:10)

- Si'lar DI suda yıkanır (HF solüsyonunda 30 saniyeden fazla kalırsa Si'ler etch olur)
- Azot gazı ile kurutma

YOL – RCA2

- 300 ml DI su bir kaba konur
- Üzerine 50 ml HCl eklenir ve 70°C’de 1-2 dk bekletme
- Üzerine 50 ml H₂O₂ eklenip 1-2 dk bekletme

(HCl: H₂O₂: H₂O karışım oranı sırasıyla 1:1:6)

- Silisyumlar bu solüsyonda 60°C’de, 10 dk bekletme
- DI su ile yıkama
- DI suda seyreltilmiş HF içinde 30 saniye beklet

(HF: H₂O karışım oranları sırasıyla 1:10)

- Si’lar DI suda yıkanır (HF solüsyonunda 30 saniyeden fazla kalırsa Si’ler etch olur)
- Deiyonize su ile bekletilip azotla kurutma
- Bu kısımlarda önemli nokta daima asit suya dökülür tam tersi işlem yapılması yanlıştır.

3.2. AlN İnce Filmi

Çalışmanın bu basamağında, AlN malzemesi safır, silisyum ve cam alttaşlar üzerine kristal biçimde büyütülmesi hedeflendi. Büyütme yapılırken kullanılan azot ve argon miktarı farklı şartlarda denendi. Bu değişen azot ve argon miktarları ile basınç değerlerinin de değişebilmesi sağlanmış oldu. Azotun kısmi basınç değeri büyütme şartlarının karşılaştırması açısından oldukça önemli bir parametredir.

Farklı şartlarda elde edilen malzemelerin XRD, SEM, AFM, XPS ölçümleri alındı ve ölçümleri bu bölümde verildi.

3.2.1. Tampon tabaka olan AlN ince filmlerinin büyütme parametreleri

Çizelge 3.1. Farklı azot kısmi basınç değerinde, safir, silisyum, cam üzerinde büyütülmüş AlN ince filmlerinin Büyütme Parametreleri

Malzeme ismi	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
İnce film	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN
Altaş	Cam	Silisyum	Safir	Silisyum	Cam	Safir	Safir	Cam	Silisyum	Safir	Cam	Silisyum	Safir	Cam	Silisyum
Büyütme basıncı (mtorr)	14,42	14,42	14,42	20,65	20,65	20,65	13,96	13,96	13,96	20,47	20,47	20,47	28,38	28,38	28,38
RF gücü	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Altaş sıcaklığı (°C)	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Argon miktarı (sccm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	200	200	200	300	300	300
Azot miktarı (sccm)	25	25	25	100	100	100	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Argon ile oluşan basınç (mtorr)	13,03	13,03	13,03	13,65	13,65	13,65	13,40	13,40	13,40	19,96	19,96	19,96	27,79	27,79	27,79
Azot ile oluşan basınç (mtorr)	14,42	14,42	14,42	20,65	20,65	20,65	13,96	13,96	13,96	20,47	20,47	20,47	28,38	28,38	28,38
Azot kısmi basıncı (%)	9,94	9,94	9,94	34	34	34	4	4	4	2,63	2,63	2,63	2,1	2,1	2,1

3.3. GaN İnce Filmi

Çalışmanın bu basamağında, GaN malzemesi safir ve silisyum alttaşlar üzerine kristal büyütülmesi hedeflenmiştir. Büyütme yapılırken kullanılan azot ve argon miktarını farklı şartlarda denenmiştir. Bu değişen azot ve argon miktarları ile basınç değerlerinin de değişebilmesi sağlanmıştır. Azotun kısmi basınç değeri büyütme şartlarının karşılaştırması açısından oldukça önemli bir parametredir.

Örnek isimlendirmelerinde B ile başlayanlar AlN büyütüldüğü anlamına gelmektedir. C ile başlayanlar ise GaN filminin farklı şartlar ile büyütülmeye çalışılan örneklerdir.

Farklı şartlarda elde edilen malzemelerin XRD, SEM, AFM görüntüleri alınmış ve araştırma bulguları bölümünde verilmiştir.

3.3.1. GaN ince filmlerinin büyütme parametreleri

Çizelge 3.2. Farklı azot kısmi basınç değerinde, safir ve silisyum üzerinde büyütülmüş GaN ince filmlerinin Büyütme Parametreleri

Malzeme İsmi	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
İnce film	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN
Altaş	Silisyum	Safir	Cam	Safir	Cam	Silisyum	Silisyum	Safir	Silisyum	Safir	Silisyum	Safir
Büyütme basıncı (mtorr)				13,20	13,20	13,20	14,23	14,23	12,93	12,93	12,81	12,81
RF gücü	110	110	110	110	110	110	50	50	120	120	50	50
Altaş sıcaklığı (°C)	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Argon miktarı (sccm)	200	200	200	100	100	100	100	100	50	50	50	50
Azot miktarı (sccm)	20	20	20	15	15	15	15	15	40	40	40	40
Argon ile oluşan basınç (mtorr)	26,3	26,3	26,3	13	13	13	13,72	13,72	11,37	11,37	11,10	11,10
Azot ile oluşan basınç (mtorr)	26,98	26,98	26,98	13,20	13,20	13,20	14,23	14,23	12,93	12,93	12,81	12,81
Azot kısmi basıncı (%)	2.5	2.5	2.5	4,43	4,43	4,43	3,6	3,6	12	12	13,35	13,35

3.4. AlN Tampon Üzerine GaN Filmi

3.4.1 AlN tampon üzerine GaN filmi büyütme parametreleri

Çizelge 3.3. Tampon tabaka olan AlN tampon üzerine GaN filmi büyütme parametreleri

AlN/GaN Safir veya Silisyum Altaş üzerine	Sıcaklık	RF güç değeri	Argon miktarı (sccm)	Azot miktarı (sccm)	Azot kısmi basıncı yaklaşık (m torr)
AlN Tamapon (hepsi için aynı)	350	120	100	15	3
GaN D1 Silisyum	350	50	50	40	13,35
GaN D2 Safir	350	50	50	40	13,35
GaN D3 Safir	350	120	50	40	11,9
GaN D4 Silisyum	350	120	50	40	11,9

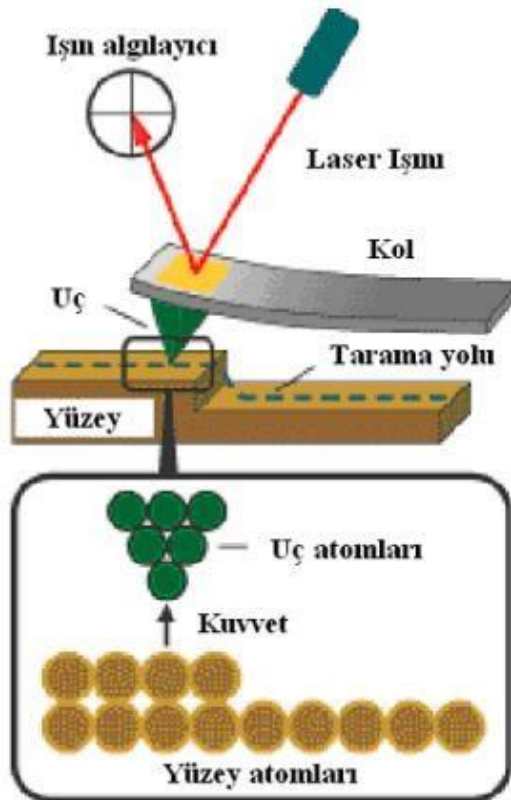
3.5. İnce Filmlerin Ölçüm Yöntemleri

İnce film karakterizasyonu genel olarak mikroyapının kristal, kimyasal bileşimlerinin, optik, elektriksel ve mekanik özelliklerini araştırmak için kullanılmaktadır (Ahmed 2017).

3.5.1. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

İlk taramalı tünelleme mikroskobu (STM), 1980'lerin başında geliştirilmiştir. Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer adlı bilim adamları tarafından geliştirilmiştir. Bu mikroskop ile 1986 yılında Nobel ödülünü kazanmışlardır STM'nin gelişimi AFM'nin de geliştirilebilmesi için bir fırsat oluşturmuştur.

STM'lerin tek kusuru, yalnızca iletken ve yarıiletken yüzeylerde atomları görüntüleyebilmesi idi. Yalıtkanlarda çalışmıyordu. 1986'da Binnig ucunda tek atom olan iğneyle yüzey atomları arasındaki kuvveti ölçebilecek kadar duyarlı bir cihaz olan atomik kuvvet mikroskobunu (AFM) geliştirmiştir (Özdoğan vd 2006).



Şekil 3.4. AFM'in çalışma prensibinin sematik gösterimi (Erkoç 2007)

Ticari kullanımına 1989 yılında başlanan AFM, atomlar arası kuvvet etkileşimini ölçmeye ve topografik yapısını anlamak için kullanılmaya başlanmıştır Bu yöntemle metaller, yarıiletkenler,

polimerler, seramikler, gibi malzemeler karakterize edilebilmektedir. AFM aynı zamanda malzemenin tane büyüklüğünü, kristal yapısını, kristalin yönelimini gösterebilmektedir.

Taramalı uç mikroskopların birisi olan Atomik Kuvvet mikroskobunda çok hassas bir tip (iğne) bulunmaktadır ve yüzeyler bu tip yardımıyla atomik boyutlar mertebesinde taranabilmektedir. Tip yüzeyi tarayarak atomlar arası kuvvetleri nano newtonhassasiyeti ile ölçmüş olur. Ölçülen yüzeyin özelliklerini büyük bir doğrulukla anlaşılabilmesi için ucun pozisyonunu ayarlayan piezoelektrik (Piezoelektriklik, bir kristalin üzerine uygulanan voltaj ile hareket etme özelliğidir.) güç vericileri kullanılır. Bu hareketin verileri bilgisayar ortamına aktarılıp, yazılım aracılığı ile derlenir ve numune görüntüsüne ulaşılmış olur.

AFM'nin kontakt, tıklama ve kontaksız olmak üzere 3 metodu bulunur. Kontakt moda, tip örnek üzerine temas eder ve piezo tarayıcıları Z ekseninde sabit tutulur. Taranacak yüzey sert seçilir çünkü tip yüzeye temas eder. Tip yüzey üzerinde gezinirken belirli bölgelerde kuvvetin değişmesi gözlenir ve bu sayede numunenin sertliği ve elastikliği hakkında bilgi alınmış olunur. Sıvı malzemelerin yüksek absorpsiyon sebebiyle AFM cihazında ölçümü alınamamaktadır Yüzeye temas halinde olduğu için malzemeye zarar verebilir bu yüzden tip ayarlanması dikkatli yapılmalıdır gibi dezavantajlara sahiptir.

Tıklama (Taping) modunda ise sert tipler kullanılır ve kullanılan tip numune yüzeyine titreşim yaptırılarak yaklaştırılır. Tip yüzeye yaklaştıkça temasa çok yakın anda kuvvet etkileşimi oluşur ve bu etkileşim ölçülerek bilgisayara yansıyor. Bu yöntemde uygulanan kuvvet 10nm den daha küçüktür. Genellikle genliğin düşüşü ölçülür. Avantajı her malzemede kullanılabilir ve numuneye zarar vermez.

Kontaksız mod yönteminde tip ölçüm yapacağı numunenin üzerine belirli bir uzaklıkta kalarak salınım yapar. İsmiyle anlaşılacağı üzere tip numuneye temas etmez. Başlangıç salınım frekansı tipin rezonan frekansından daha küçük seçilir. Tip yüzeye yaklaştıkça rezonan frekansı küçülür. Salınımın genliği azaldığı için tip yüzeyden uzaklaştırılır. Görüntü rezülasyonu düşüktür bu dezavantajdır ama ölçüm yaparken numuneye zarar

vermemesi, her türlü malzemenin ölçümünü yapabilir olması gibi avantajları da mevcuttur. Her türlü numunenin ölçümünü yapabilir ama genelde yüzeyi hassas olan numuneler seçilir.

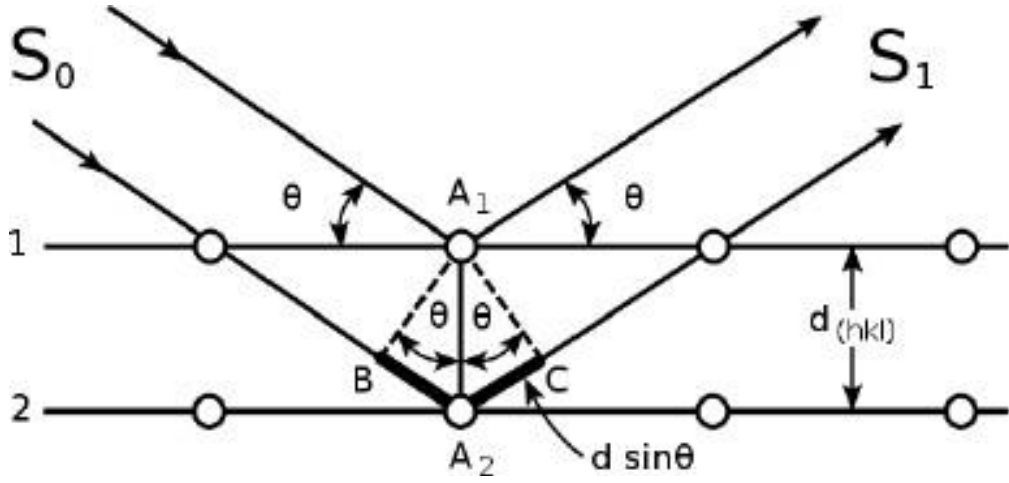
3.5.2. X-ışınları difraksiyonu (XRD)

Üç boyutlu uzayda düzgün tekrarlanan bir deseni temel alan bir atomik yapıya kristal yapı denilir. Bu sebepten katıların geometrisi kendilerine özgü şekilde geometrik olarak bir araya gelen atom grupları ya da moleküllerden oluşur. İlk kez Max van Laue tarafından kristal yapı ve yapı içerisindeki atomların dizilişleri X-ışını kırınım desenleri kullanılarak incelenmiştir.

Şekil 3.5’de şematik gösteriminde görüldüğü gibi kristal bir malzeme yüzeyine X ışını gönderilir, malzeme atomları belirli bir düzlemde dizili olduğundan üzerine çarpan X-ışını saçılır. Bu saçılma miktarına ve açısına bağlı olarak malzemenin çeşitli parameteleri karakterize edilmiş olmaktadır.

XRD, sadece kristal malzemelerde değil amorf materyallerde ve çoklu tabakalarda konsantrasyon profillerini, film kalınlıklarını ve atomik düzenlemeleri belirleyebilir. Ayrıca oluşan kusurları karakterize edebilir. İnce filmlerdeki bu yapısal ve fiziksel bilgileri elde etmek için, XRD aletleri ve teknikleri, ince filmlerin kırılma gücü küçük olduğundan, kırılmış X-ışını yoğunluklarını en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmıştır. Malzemedeki tahribata yol açmaz (Strausser 1993).

Bir XRD sisteminin ışık kaynağı genel olarak elektron tabancası ve bakır plakadan oluşmaktadır. Ölçülecek örnek dönüş açısı ayarlanabileceği bir tabla üzerine yerleştirilmektedir. Döner tablaya yerleştirilen örnek döndürülürken saçılan ışının dedektörden okunur ve bu okunan sinyalin karşı geldiği genlik değeri kayıt edilir. Bu bulunan genlik değerleri ile tepe noktaları belirli olan pikler oluşturulmuş olur. Tepenin genişliği, kayması gibi hususlar mevcut olabilir (Çalışkan 2014).



Şekil 3.5. Bragg'ın kırınımı gösterimi

Yansıyan ışınlar farklı düzlemlere çarpma üzerine farklı bir yola sahip olduğundan, esas olarak bir olay monokromatik X-ışını numunelere tabi tutulur, bir yol farkı ortaya çıkar. Yapıcı bir girişim ancak bu yol farkı atomik aralıkla karşılaştırılabilirse, bu Bragg'ın durumu veya Bragg Yasası olarak bilinir. Yani $n\lambda = 2d \sin \theta$ Bragg kanunu gerçekleştiğinde kırınım meydana gelir

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Yukarıdaki formülün parametrelerinden n bir tamsayıdır. (λ) gelen dalga uzunluğudur, (d) düzlemler arası mesafe, (θ) kırınım açısıdır. Kırık X ışınlarının yoğunluğu, kırınım açısının (2θ) ve numunenin oryantasyonunun bir fonksiyonu olarak ölçülür (Strausser 1993).

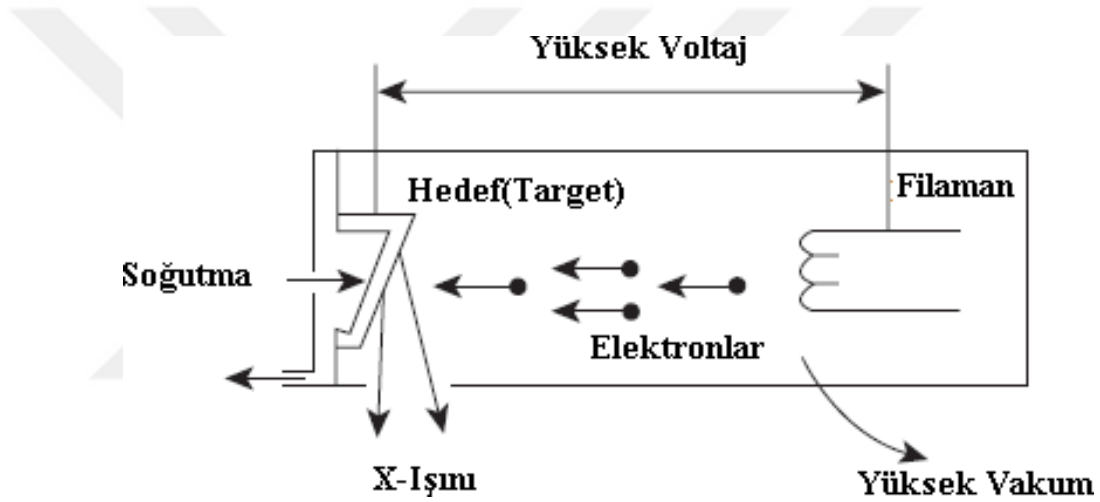
X-ışınlarının üretilmesi;

X-ışınları yüksek enerjili ve kısa dalga boyu elektromanyetik radyasyon ışınlarıdır. X-ışını enerjisi ya foton enerjisi ya da dalga boyu ile karakterize edilir. Metal bir hedefle çarpıtılan elektronlar yüksek voltajlı bir alan sayesinde yüksek hız kazanmış olurlar. Bu yüksek hızlı elektronlar X-ışınlarını oluşturmaktadır. Elektronların hedef üzerinde

aniden yavaşlaması elektronların kinetik enerjilerinin X-ışını radyasyon enerjisine dönüşmesini sağlar (Leng 2008).

$$\lambda = \frac{1,2398 \times 10^3}{V} \text{ (nm)} \quad (3.2)$$

Elektronların ivme voltajı için (V) yukarıdaki denkleme bakıldığında X-ışını radyasyonunun dalga boyu (λ) ile ilgili olduğu görülmektedir.



Şekil 3.6 X-ışını tüpü yapısı

X-ışınları, X-ışını tüpü denilen bir cihaz tarafından üretilir. Yukarıdaki Şekil 3.6'da bir vakum tüpünde bulunan bir elektron kaynağı ve iki metal elektrotun yapısını göstermektedir. Korunan yüksek voltaj hızla elektronları anoda yani hedefe çekmektedir. X-ışınlarının yüzeye değdiği noktada üretilir ve her yönde dağılır. Dağılan X-ışınını yönlendirecek pencereler bulunur.

X-ışını sistemi için oldukça kapsamlı bir soğutma sistemine ihtiyaç vardır. Çünkü elektronların kinetik enerjilerinin yüzde birlik bir kısmı X-ışınına dönüşebilse de geriye kalan kısmı ısıya dönüşmektedir.

Temelde ince filmlerde kullanılabilmesi için iki nedeni vardır. Bunlardan ilki, X-ışınlarının dalga boyları yoğunlaştırılmış maddedeki atomik mesafeler ölçüsündedir.

İkincisi ise X-ışınlarının dalga boylarını atomlar arası mesafelerle kıyaslayabilir. Ve büyüklüğü yaklaşık olarak 0,5Å ile 2,5 Å aralığında değişir.

Atomlar arası mesafe molekül ve kristallerde 0,15-0,4 nm arasında değişmektedir. Bu mesafe 3 keV ve 8 keV arasında foton enerjilerine sahip X-ışını elektromagnetik dalga boylarına karşılık gelir.

3.5.3. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS)

Karakterize yöntemlerinden bir diğeri olan X-ışını fotoelektron spektroskopisi kimyasal ve bağ durumlarını belirlemede faydalanan bir yöntemdir. Bilinen X ışını, ışılandıktan sonra numunelerden elektronlar yayılmaktadır. Yöntemin amacı bu yayılan elektronların kinetik enerjilerini ölçülmesine dayanmaktadır (Strausser 1993).

Bağlanma enerjisi, enerji korunumundan hesaplanabilen niceliksel bir değer halini alır

$$E_b = E_p - (E_k + \phi) \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemde E_b elektron bağlanma enerjisidir. E_p foton enerjisidir. E_k yayılan elektronun kinetik enerjisidir. Φ düzeltme faktörüdür.

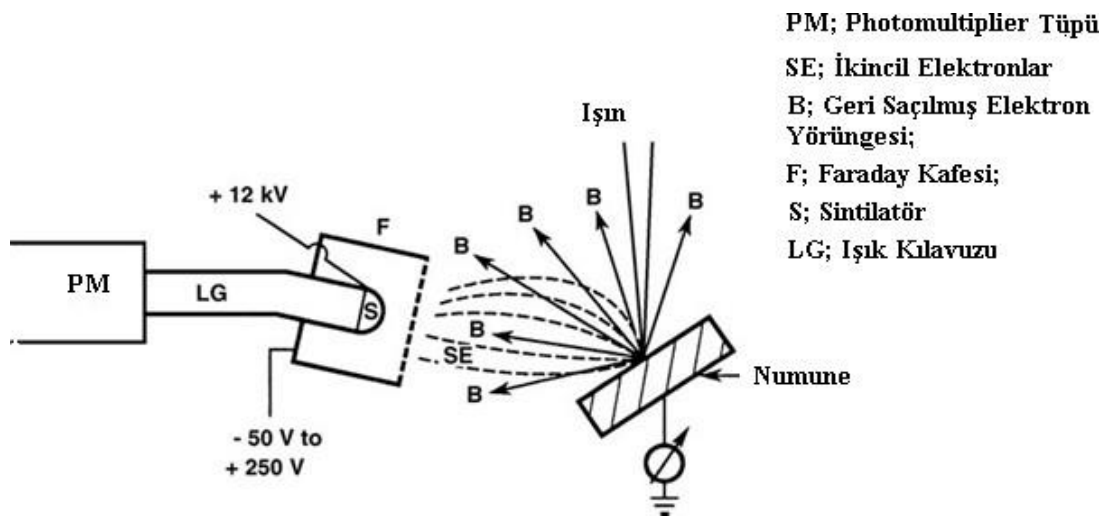
XPS hem malzeme yapısını hemde toplu kimyayı test edebilir. İncelenmek istenilen örnek Ar ile aşındırmaya mağruz kalır. Bağlanma enerjisi; elementin türüne, elektronun söküldüğü orbitale, elementin kimyasal durumuna bağlılık göstermektedir (Ahmed 2017).

3.5.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

En yaygın olarak kullanılan elektron mikroskoplardan birisidir. Konfokal mikroskopların taranmasına benzer, fakat çok daha yüksek çözünürlük ve daha fazla alan derinliği ile malzemelerin yüzeyini tarayarak mikroskopik yapıyı inceler.

Transmisyon Elektron Mikroskopunda (TEM) ölçülecek örneğin tüm alanını anlık olarak aydınlatarak ölçüm yapılmaktadır. Fakat SEM görüntüsü numunenin yüzey üzerinde odaklanmış bir elektron ışını bulur ve bu ışının yüzeyi taramasıyla ölçüm yapılmış olmaktadır. Bir SEM görüntüsü, bir numunenin yüzey alanı üzerinde taranan odaklanmış bir elektron ışını ile oluşturulur; bir TEM için olduğu gibi tüm bir alanın anlık olarak aydınlatılmasıyla oluşmaz (Leng 2008). SEM genellikle malzemede hızlı görünüm gerektiğinde kullanılan ilk cihazdır (Strausser 1993).

SEM görüntüsünün ileri derecede görüntü derinliği mevcuttur. Bu sayede üç boyutlu olarak malzemenin yapısı görülebilir bu özelliği SEM'in en önemli özelliğidir. Üç boyut özelliğinin yanında X-ışını enerji dağılık spektrometre (EDS) ile birleştirilebilir ve numuneden kimyasal bilgi edinebilmemizi sağlayabilir (Leng 2008).



Şekil 3.7. Everhart-Thornley dedektörü tarafından sinyal toplama

Bir taramalı elektron mikroskopu Şekil 3.7’de gösterildiği gibidir. Yapıda bir elektron tabancası, elektromanyetik aralık ve mercekten oluşmaktadır. SEM’de alan emisyonu tabancası kullanılır çünkü yüksek ışın parlaklığına sahiptir. Bu yöntemde elektron tabancasından yüzeyi taramak için elektron ışını gönderilir ve prob ile yoğunlaştırılır (Strausser 1993; Leng 2008). Işın parlaklığı önemlidir çünkü görüntü kalitesini belirleyen bir parametredir. Hızlanma voltajı 1-40kV aralığındadır ve bu voltaj ile elektron ışını üretmek için gereklidir. Bir SEM, yaklaşık 20 ×’den 100,000 ×’den büyük görüntü büyütmesini sağlayabilir (Leng 2008).

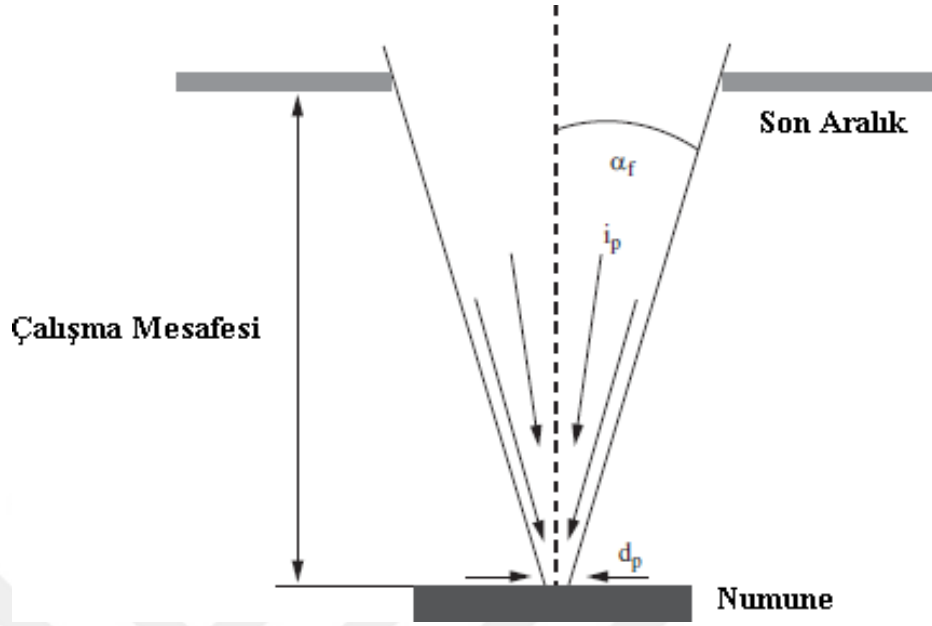
Tarama probunun kesit çapı görüntülemenin çözünürlüğünü belirlemektedir. Böylece, probun boyutu, çözülecek olan numune yüzeyindeki özelliklerin boyutunu sınırlar. Prob boyutunun nasıl en aza indirileceğini bilirse, yüksek çözünürlük elde etmek için uygulanır. Prob çapı yaklaşık olarak d_p olarak ifade edilir.

$$d_p = \left(\frac{4i_p}{\beta \pi^2 a f^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

ışığın parlaklığı β ile gösterilir ve bu parametre elektron tabancasının tipine göre değişmektedir.

$$\beta \propto e v_0 \quad (3.5)$$

Hızlanma voltajı tabancanın tipine bağlı olmaksızın parlaklık ile orantılıdır.



Şekil 3.8. Yansıma açısı, çalışma mesafesi ve prob çapının şematik gösterimi

Şekil 3.8’de görülen i_p , prob akımıdır. α_f , son açıklık çapıdır yani diyafram ve numune arasındaki mesafeyi belirleyen probun kavuşma açısıdır.

Minimum prob boyutu elde etmek için, Denklem 3.5’de belirtildiği gibi parlaklığı ve aynı zamanda kavuşma açısını arttırmalıyız. Küresel sapmalar gibi büyük problemler çıkaran α_f özellikle optimize edilerek büyütülmelidir. Renk sapması ihmal edilirse, optimize edilmiş bir α_f ile minimum prob boyutu, d_{min} olarak tahmin edilir.

$$d_{min} = KC_S^{\frac{1}{4}} \left(\frac{i_p}{\beta} + \lambda^2 \right)^{\frac{3}{8}} \quad (3.6)$$

Bir SEM’de algılanan elektronların sayısına sayım sayısı denilmektedir. Probin bir nesne üzerine bekleme süresi τ , akım i_s , elektron yükü e ile gösterilir.

$$i_s = \frac{\bar{n}e}{\tau} \quad (3.7)$$

Bir SEM’de, sayım sayısı, algılanan sinyal elektronlarının sayısıdır. C kontrast tanımıdır.

Bir nesne üzerindeki prob (τ) bekleme süresi için sinyal elektronları ile sayılar arasındaki akım (i_s) aşağıdaki ifadeler ile hesaplanır.

$$l_p > \frac{25e}{\epsilon C^2 \tau} \quad (3.8)$$

Prob akımının (i_p formülü aşağıda verilmiştir. Verilen C ve D formüllerine bakılırsa; sinyal elektronları ile sayılar arasındaki akım (i_s) prob akımına (i_p) eşit değildir ama orantılıdır. Elektron sayımları için gerekli kriteri prob akımına dönüştürerek, minimum akım gereksinimine sahip olunur.

Özet olarak, bir SEM'in çözünürlüğü, prob boyutu (Denklem 3.6) ve prob akımı (Denklem 3.7) ile belirlenir. Maksimum prob akımı ile minimum prob boyutu aynı anda elde edilememektedir. Eğer iyi bir görüntü alınmak istenirse prob boyutu ve prob akımı arasında optimum bir değer belirlenmelidir (Leng 2008).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

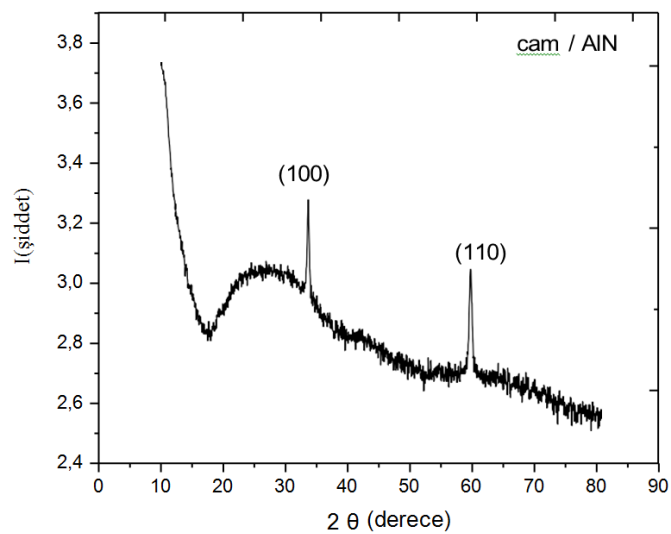
Tezde bulunan numunelerin karakterizasyonları XRD, SEM ve AFM cihazlarında yapılmıştır. ölçümleri sırası ile aşağıda verilmektedir.

4.1. Tampon tabaka olan AlN filmlerinin XRD, SEM ve AFM sonuçları

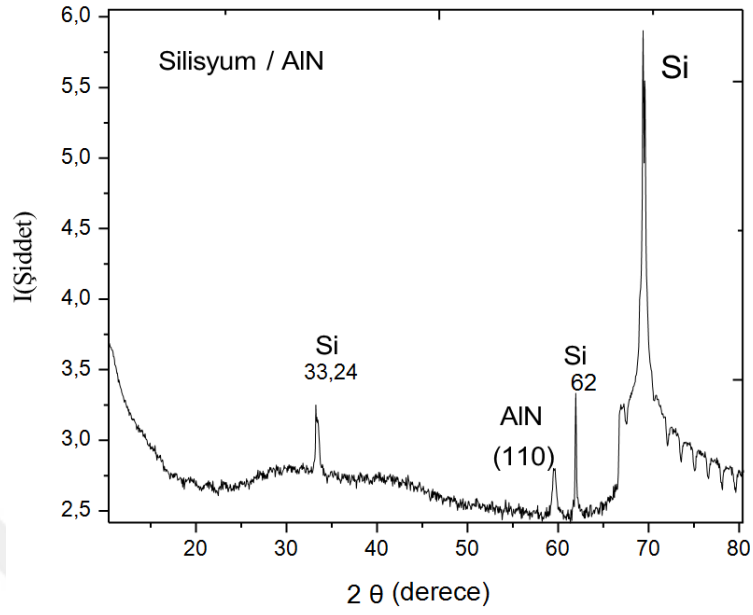
XRD;

- Alttaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 100 sccm,
- Azot miktarı 25sccm,
- Azot kısmi basıncı %9,64

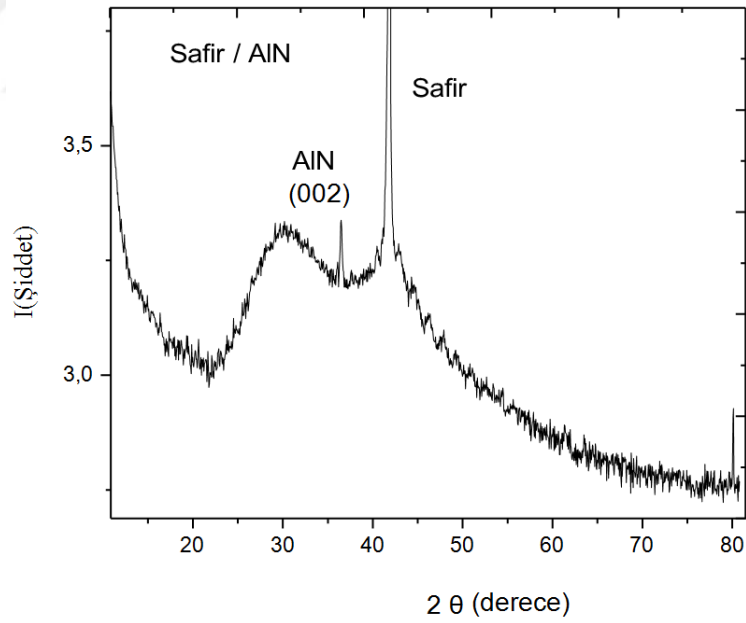
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B1, B2, B3 filmlerinden B1 filmi cam alttaş üzerine, B2 filmi silisyum alttaş üzerine, B3 safır alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1. Cam alttaş üzerinde büyütülen B1 ince filminin XRD sonuçları



Şekil 4.2. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B2 ince filminin XRD sonuçları

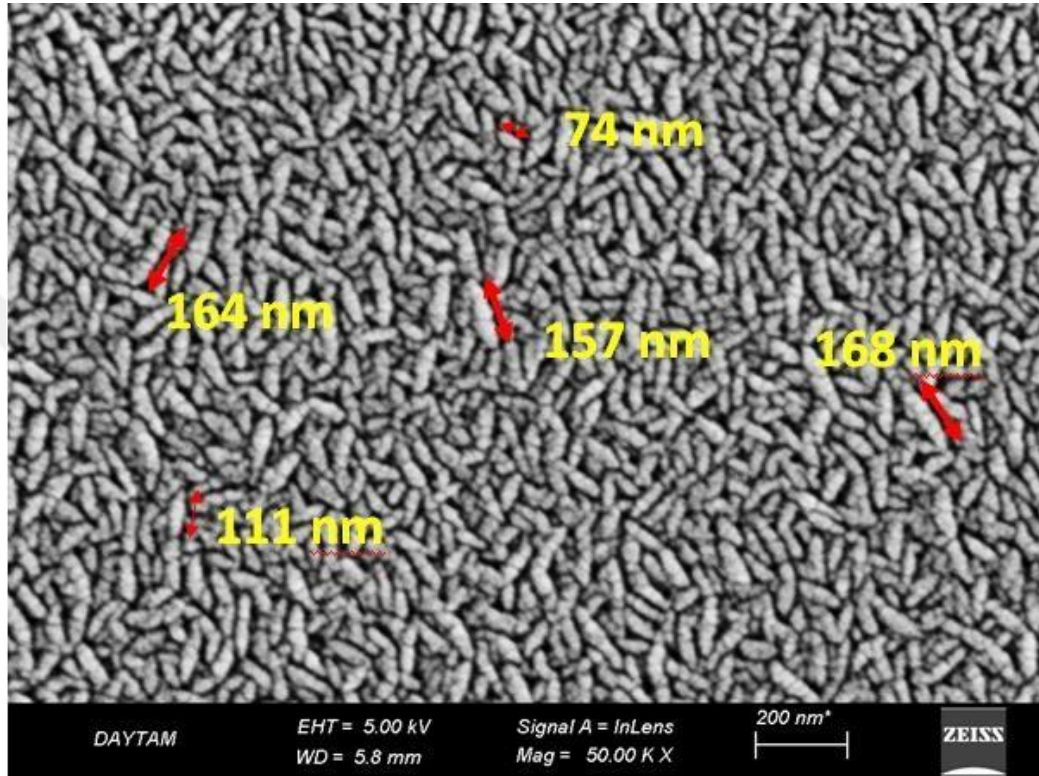


Şekil 4.3. Safir alttaş üzerinde büyütülen B3 ince filminin XRD sonuçları

SEM Görüntüleri;

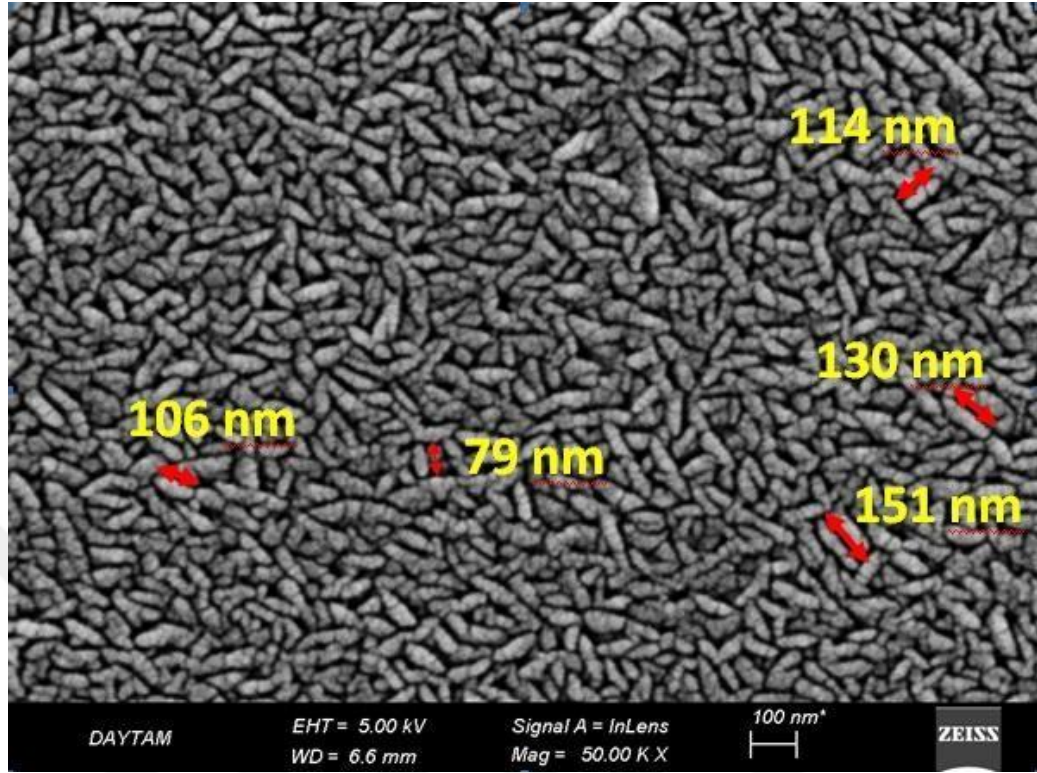
Cam üzerine büyütülen B1-AlN ince filminde uzun çubuk-şerit şeklinde yapılar

görülmektedir ve bu yapının boyları, görüntü aşağısında bulunan 200 nm'yi gösteren skala yardımıyla hesaplanmıştır. Ve oluşan uzun çubuk şeklindeki taneciklerin ortalama boyutları 130 nm civarındadır.

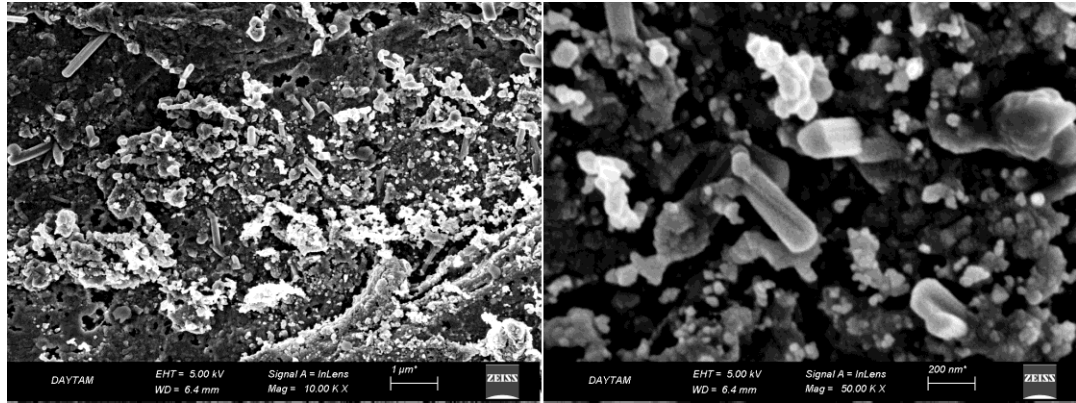


Şekil 4.4. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B1 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

Silisyum üzerine büyütülen B2-AlN ince filminde uzun çubuk-şerit şeklinde yapılar görülmektedir ve bu yapının boyları, görüntü aşağısında bulunan 100 nm'yi gösteren skala yardımıyla hesaplanmıştır. Oluşan uzun çubuk şeklindeki taneciklerin ortalama boyutları 100 nm civarındadır.



Şekil 4.5. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B2 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



Şekil 4.6. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B3 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

Aynı şartlarda büyütülen B1, B2, B3 numunelerinden safir ve cam da gözüken çubuk şeklindeki taneciklerin B3 filminde oluşmadığı görülmüştür.

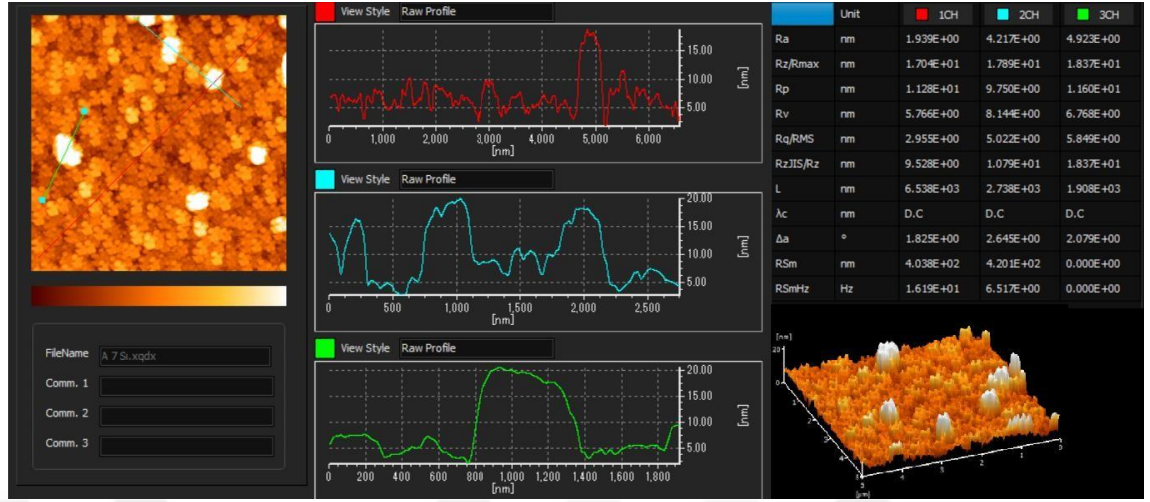
AFM Görüntüleri;

Epitaksiyel tabakaların basamaklı, tabaka-tabaka (2-boyutlu) ve 3-boyutlu ada şeklinde olmak üzere üç genel büyüme modu vardır. Pürüzsüz yüzey morfolojisi sergilediği için basamaklı büyüme aygıt uygulamaları için oldukça önemlidir. Bu tip büyüme yüksek alttaş sıcaklığı ve düşük birikme oranında gerçekleştirilebilir. Sıcaklık çok fazla olmadığı için numune yüzeylerinde tabaka tababaka ve ada şeklinde büyümeler gözükmiştir.

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B1, B2, B3 filmlerinden B1 filmi Cam alttaş üzerine, B2 filmi silisyum alttaş üzerine, B3 safır alttaş üzerine ve aynı ortam içerisinde büyütülmüştür. AFM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.7. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B1 filminin AFM ile alınmış görüntüsü



Şekil 4.8. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B2 filminin AFM ile alınmış görüntüsü



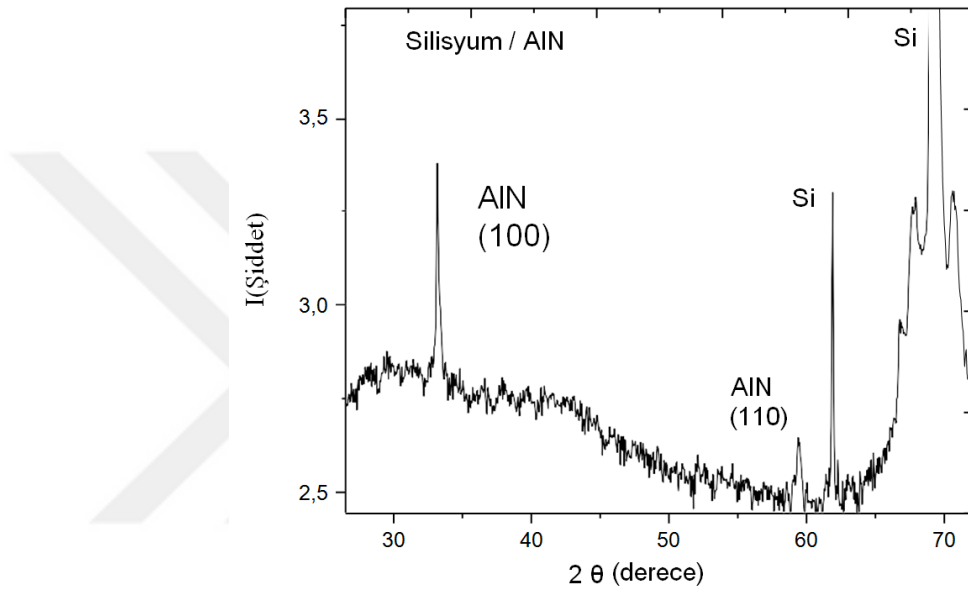
Şekil 4.9. Safır üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B3 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

XRD ölçümleri;

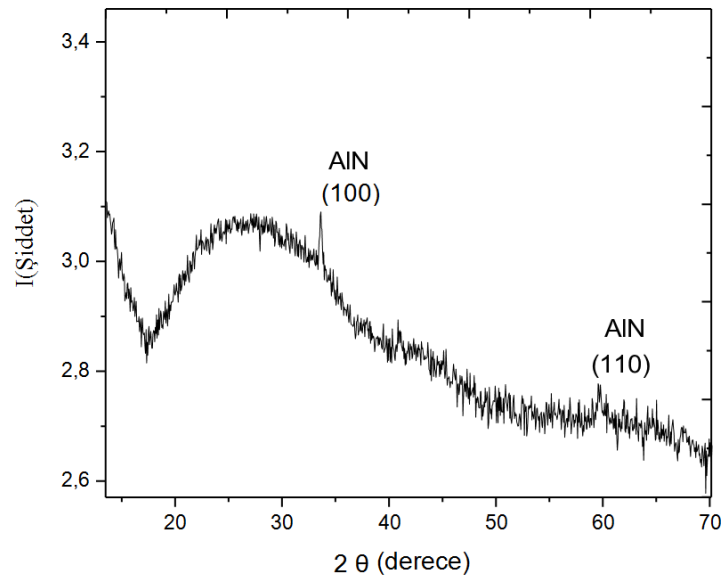
- Altaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 100 sccm,
- Azot miktarı 100 sccm,

- Azot kısmi basıncı %34

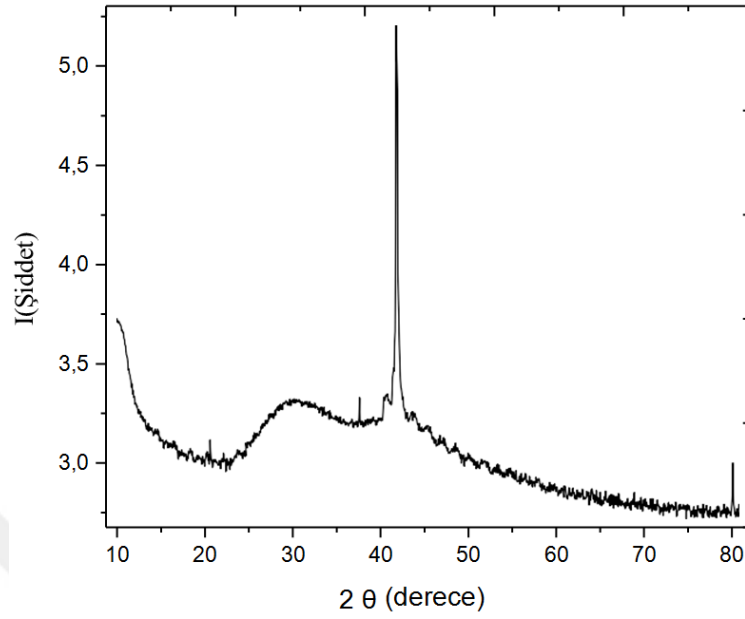
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B4, B5, B6 filmlerinden B4 filmi silisyum alttaşı üzerine, B5 filmi cam alttaşı üzerine, B6 safir alttaşı üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir



Şekil 4.10. Silisyum alttaşı üzerinde büyütülen B4 ince filminin XRD sonuçları



Şekil 4.11. Cam alttaşı üzerinde büyütülen B5 ince filminin XRD sonuçları

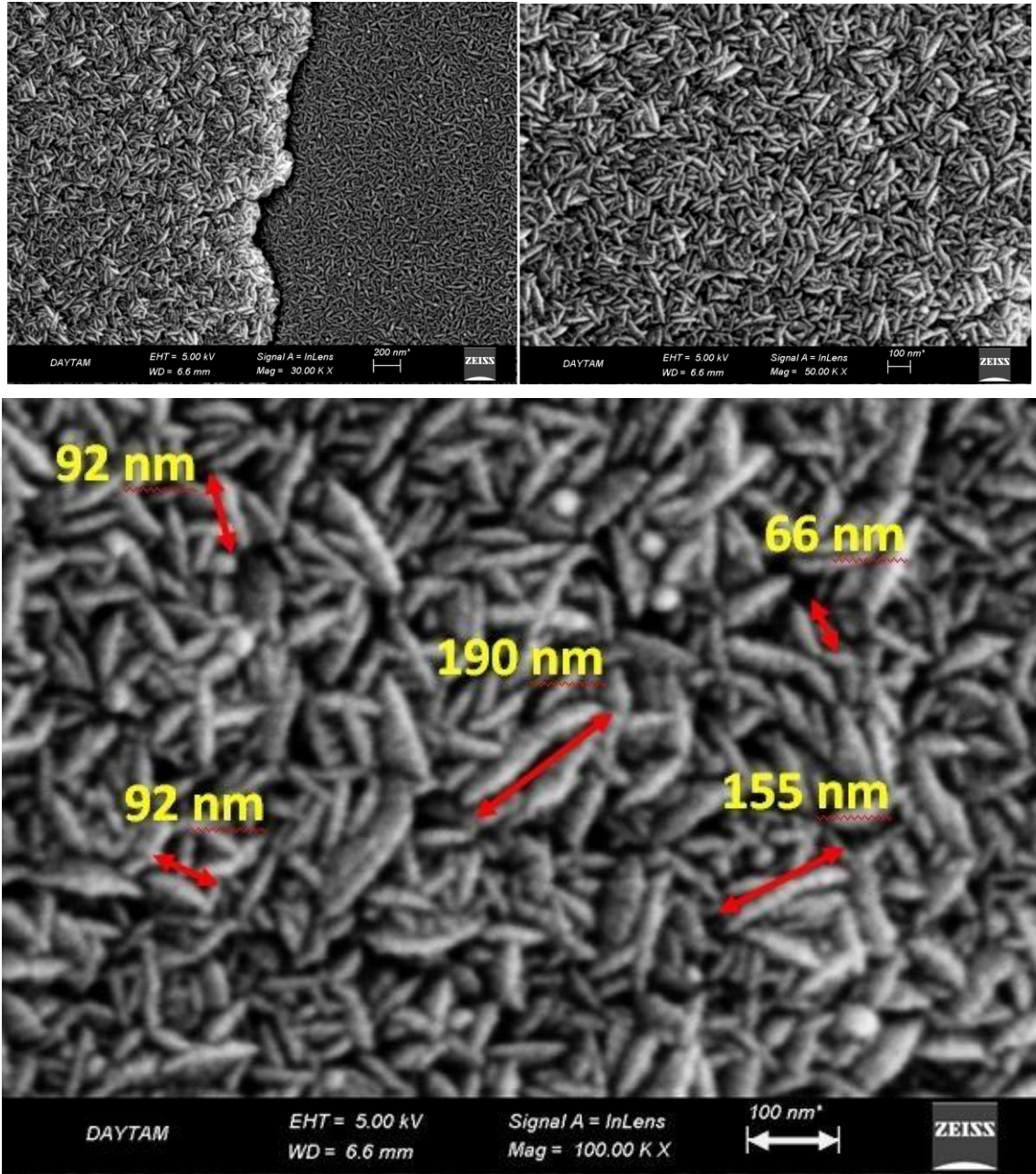


Şekil 4.12. Safir alttaş üzerinde büyütülen B6 ince filminin XRD sonuçları

SEM Görüntüleri;

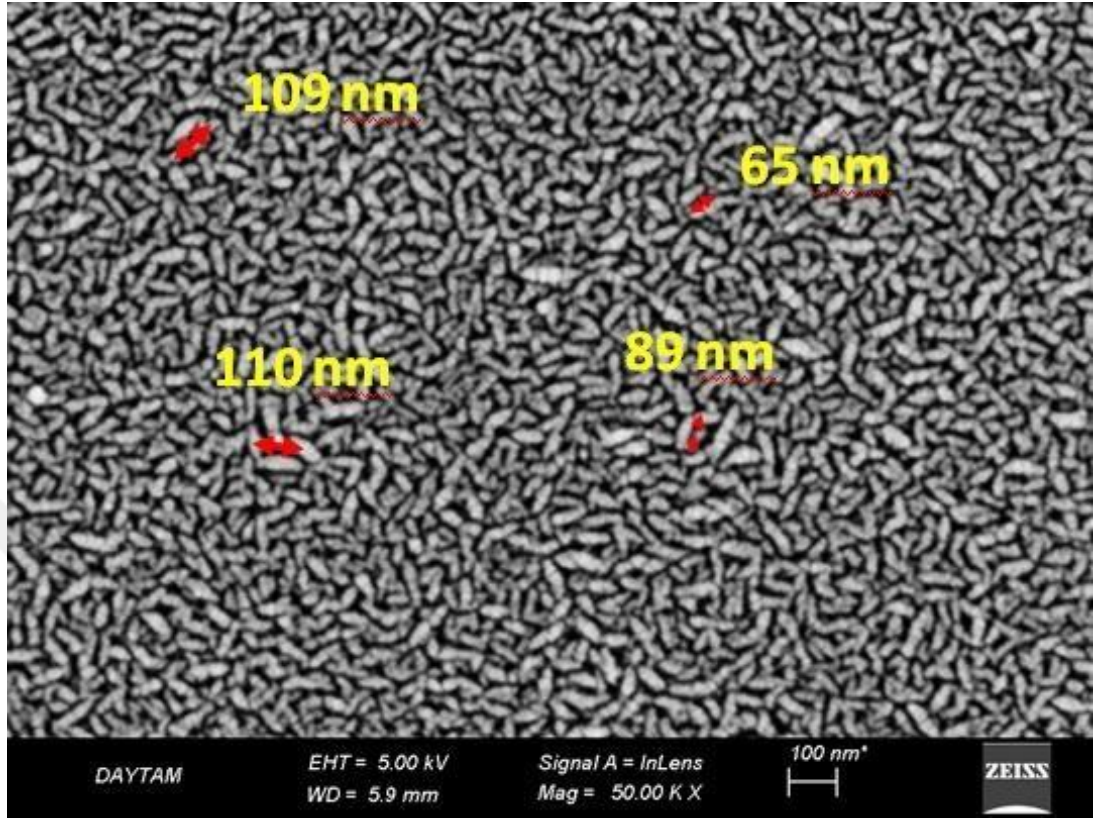
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B4, B5, B6 filmlerinden B4 filmi Silisyum alttaş üzerine, B5 filmi cam alttaş üzerine, B3 safir alttaş üzerine ve aynı ortam içerisinde büyütülmüştür. SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.

Silisyum üzerine büyütülen B4-AlN ince filminde uzun çubuk-şerit şeklinde yapılar yine görülmektedir ve bu yapının boyları, görüntü aşağısında bulunan 100 nm'yi gösteren skala yardımıyla hesaplanmıştır. Oluşan uzun çubuk şeklindeki taneciklerin ortalama boyutları 120 nm civarındadır.



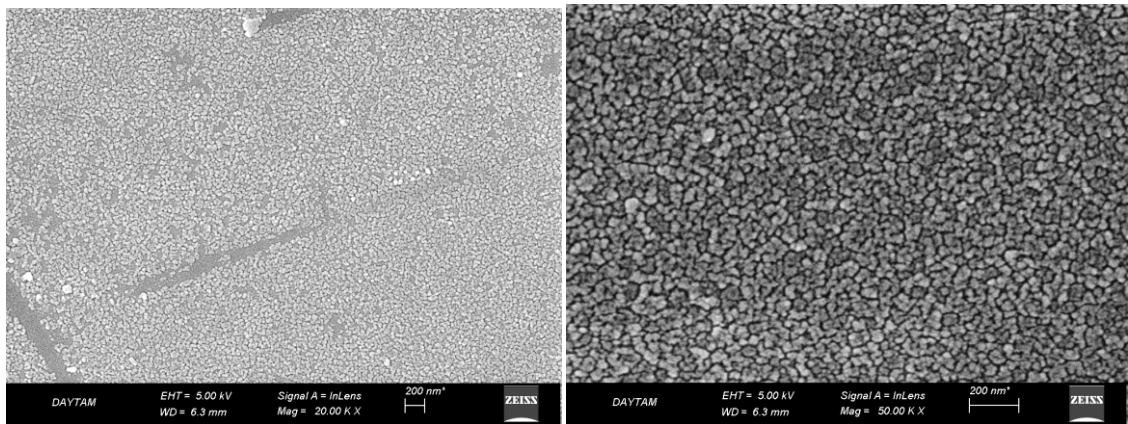
Şekil 4.13. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B4 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

Silisyum üzerine büyütülen B5-AlN ince filminde uzun çubuk-şerit şeklinde yapılar görülmektedir ve bu yapının boyları, görüntü aşağısında bulunan 100 nm'yi gösteren skala yardımıyla hesaplanmıştır. Oluşan uzun şerit şeklindeki taneciklerin ortalama boyutları 95 nm civarındadır.



Şekil 4.14. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B5 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

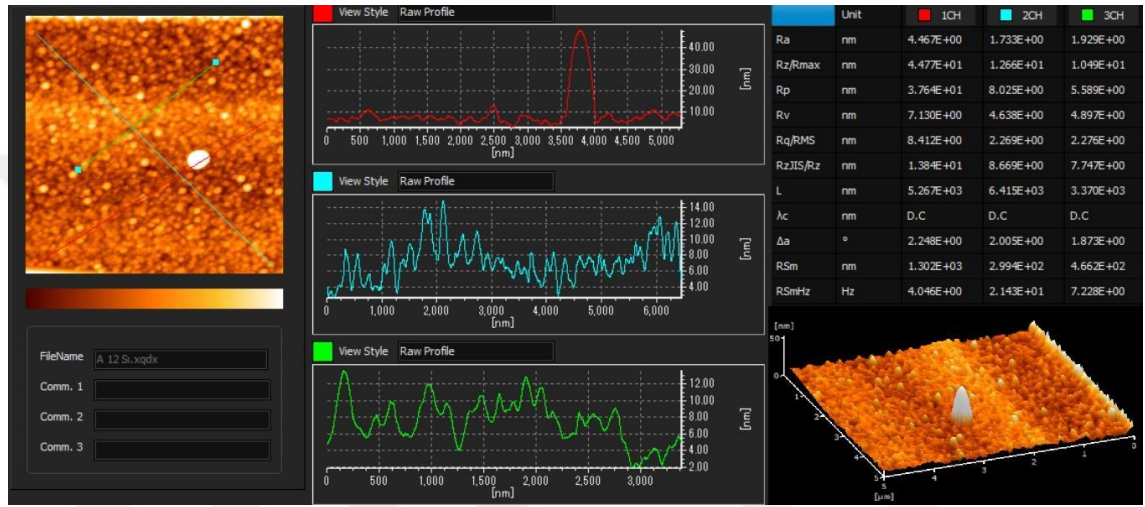
Aynı şartlarda büyütülen B4, B5, B6 numunelerinden safir ve cam da gözüken çubuk şeklindeki taneciklerin safir üzerine olan B6 filminde adacıklı tanecikeler görülmüştür.



Şekil 4.15. safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B6 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

AFM Görüntüleri;

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B4 ve B5 filmlerinden B4 filmi silisyum alttaş üzerine ve B5 filmi cam alttaş üzerine aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. AFM görüntüsü aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.16. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B4 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

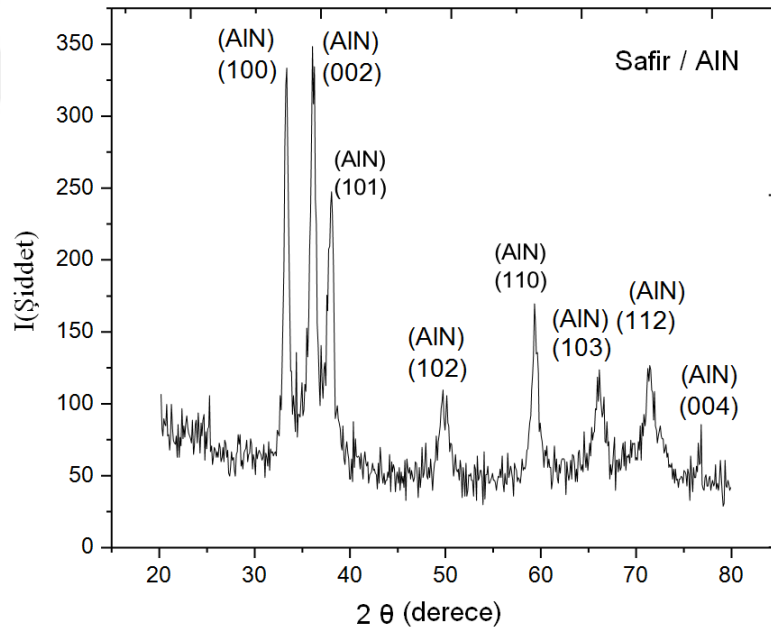


Şekil 4.17. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B5 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

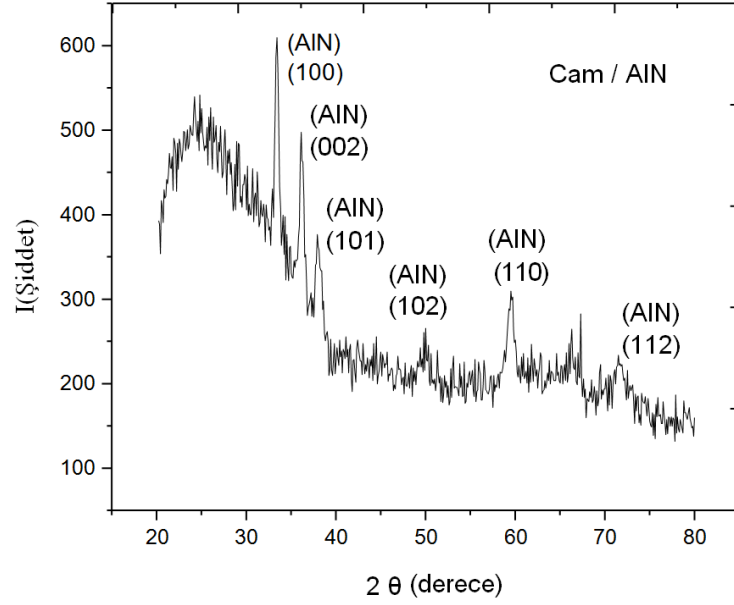
XRD ölçümleri ;

- Altaş sıcaklı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 100 sccm,
- Azot miktarı 15 sccm,
- Azot kısmi basıncı %4

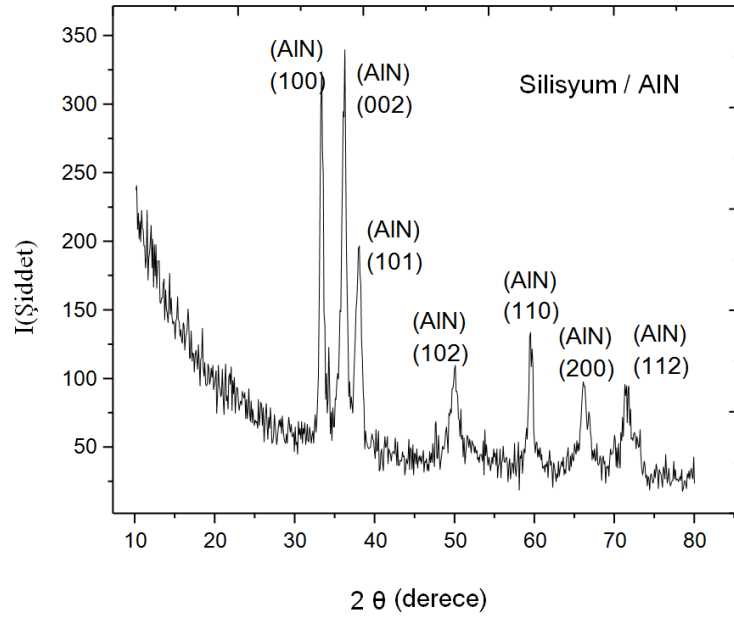
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B7, B8, B9 filmlerinden B7 filmi safir altaş üzerine, B8 filmi cam altaş üzerine, B9 silisyum altaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.18. Safir altaş üzerinde büyütülen B7 ince filminin XRD sonuçları



Şekil 4.19. Cam alttaş üzerinde büyütülen B8 ince filminin XRD sonuçları

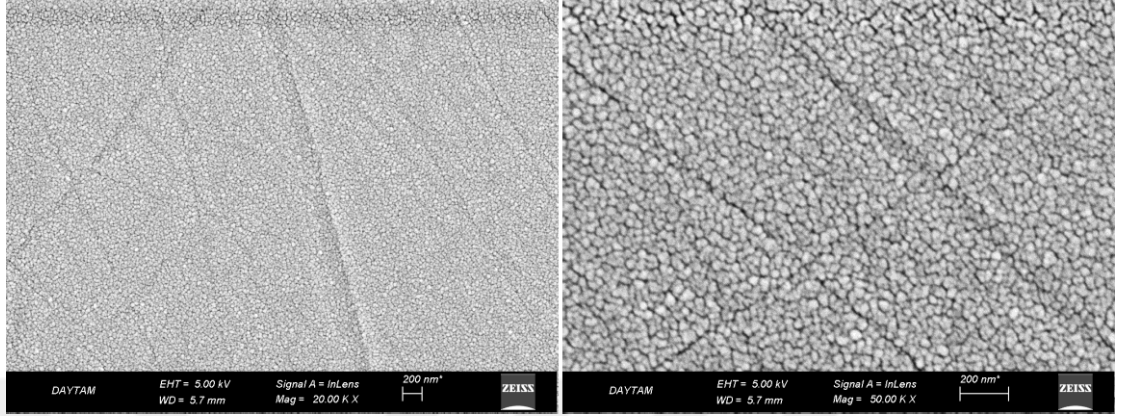


Şekil 4.20. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B9 ince filminin XRD sonuçları

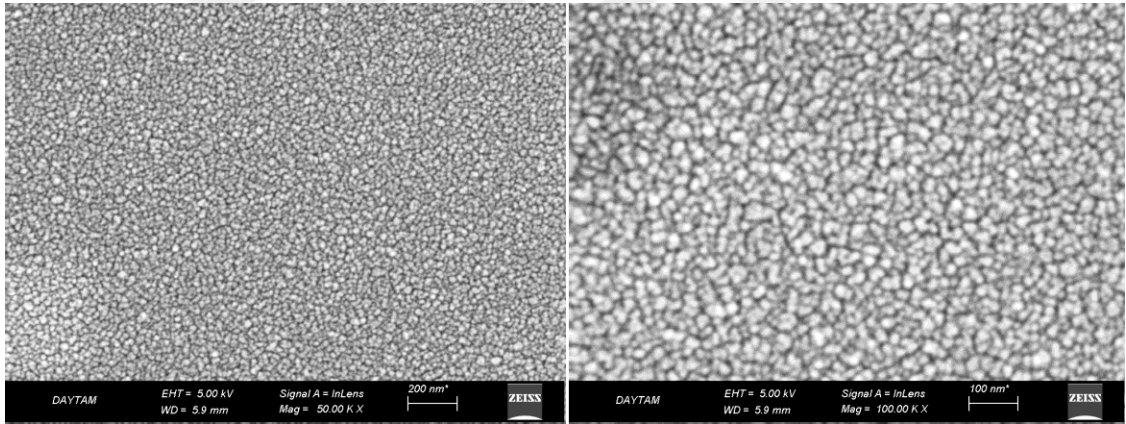
SEM Görüntüleri;

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B7, B8, B9 filmlerinden B7 filmi safır alttaş üzerine, B8 filmi cam alttaş üzerine, B9 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber

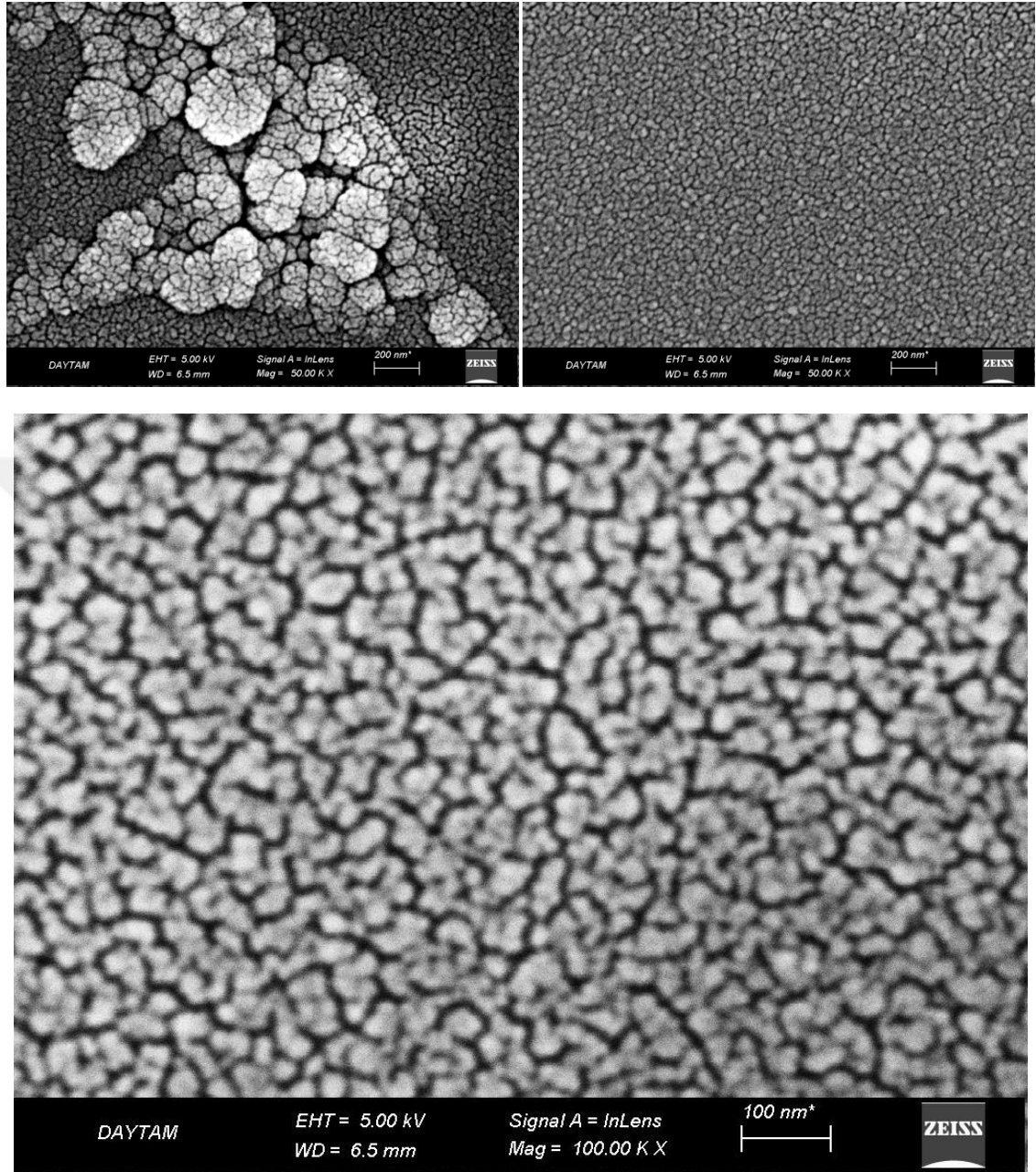
içerisinde büyütülmüştür. SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.21. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B7 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



Şekil 4.22. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B8 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



Şekil 4.23. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B9 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

AFM Görüntüleri;

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B7, B8, B9 filmlerinden B7 filmi safır alttaş üzerine, B8 filmi cam alttaş üzerine, B9 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. AFM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.24. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B7 filminin AFM ile alınmış görüntüsü



Şekil 4.25. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B8 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

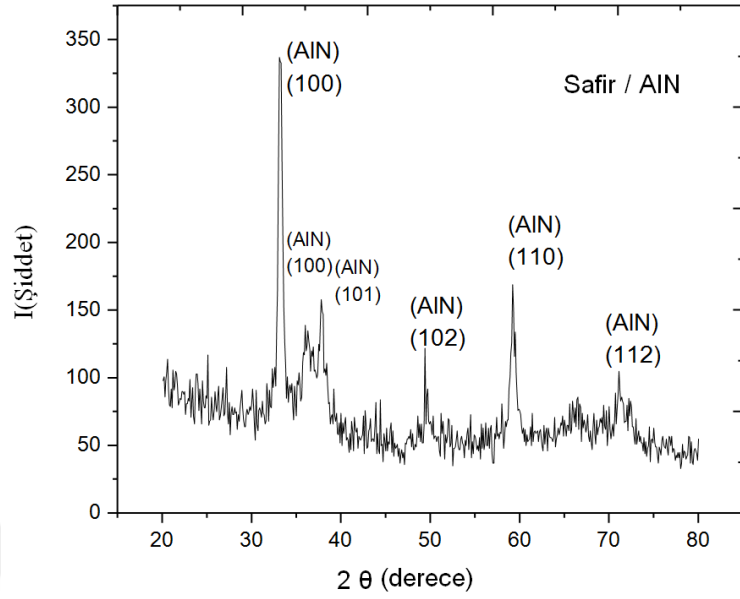


Şekil 4.26. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B9 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

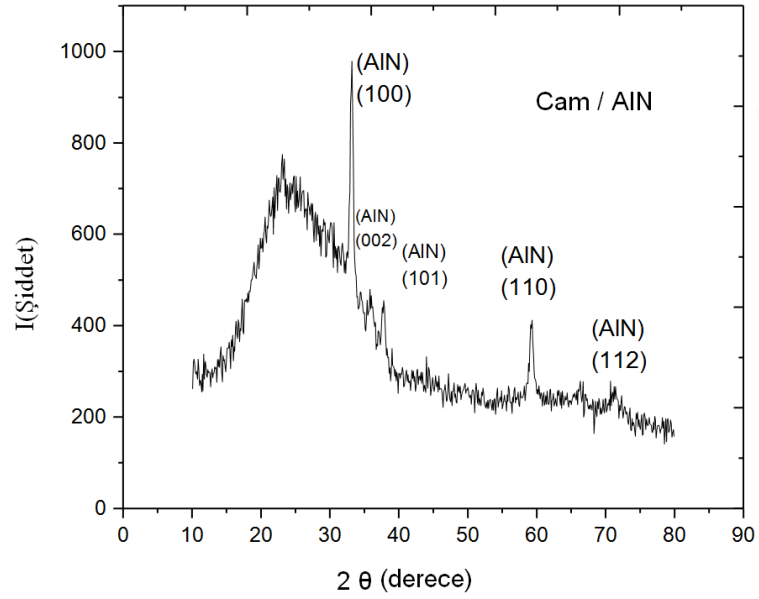
XRD Ölçümleri ;

- Alttaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 200 sccm,
- Azot miktarı 15 sccm,
- Azot kısmi basıncı %2,63

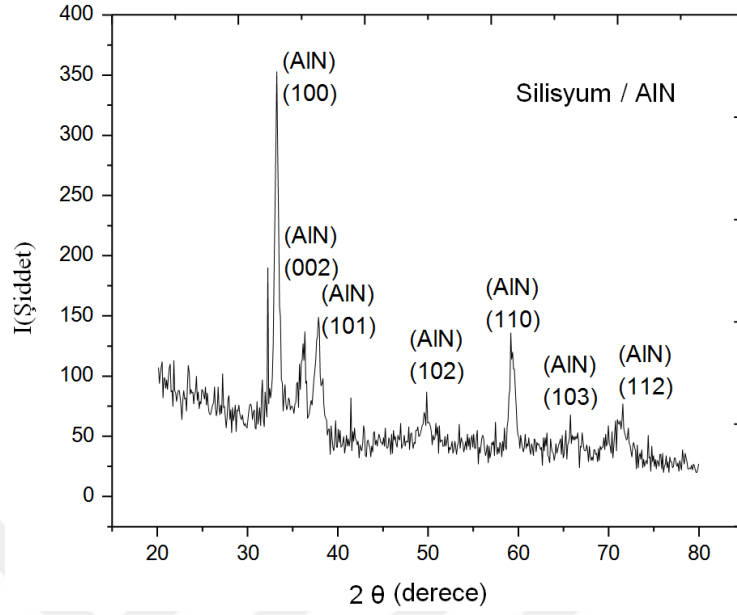
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B10, B11, B12 filmlerinden B10 filmi safir alttaş üzerine, B11 filmi cam alttaş üzerine, B12 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.27. Safir alttaş üzerinde büyütülen B10 ince filminin XRD sonuçları



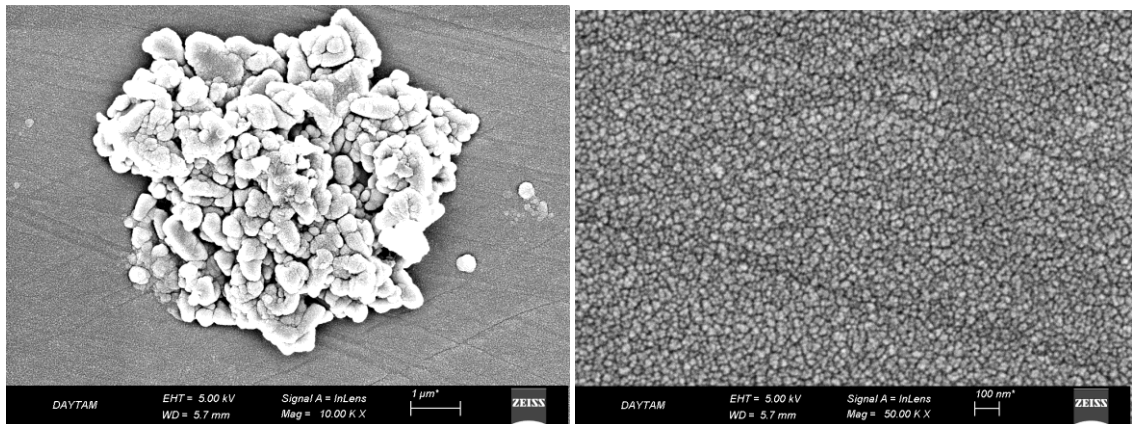
Şekil 4.28. Cam alttaş üzerinde büyütülen B11 ince filminin XRD sonuçları



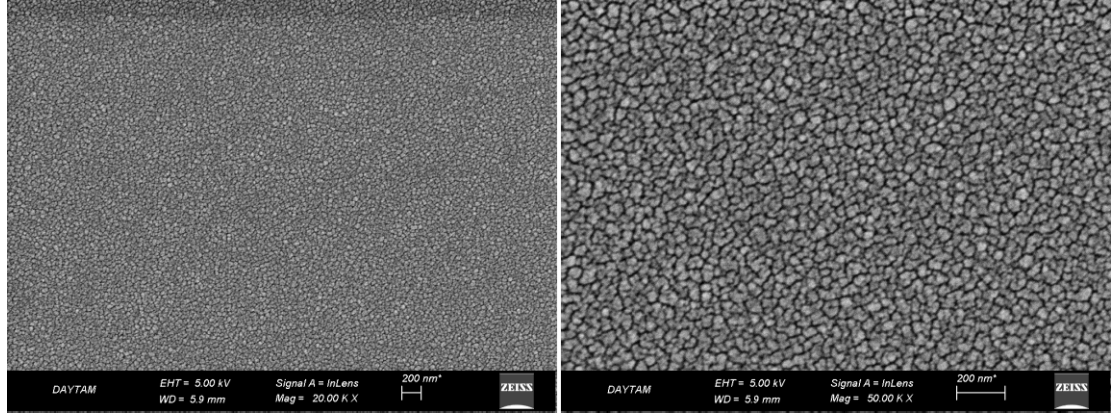
Şekil 4.29. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B12 ince filminin XRD sonuçları

SEM Görüntüleri;

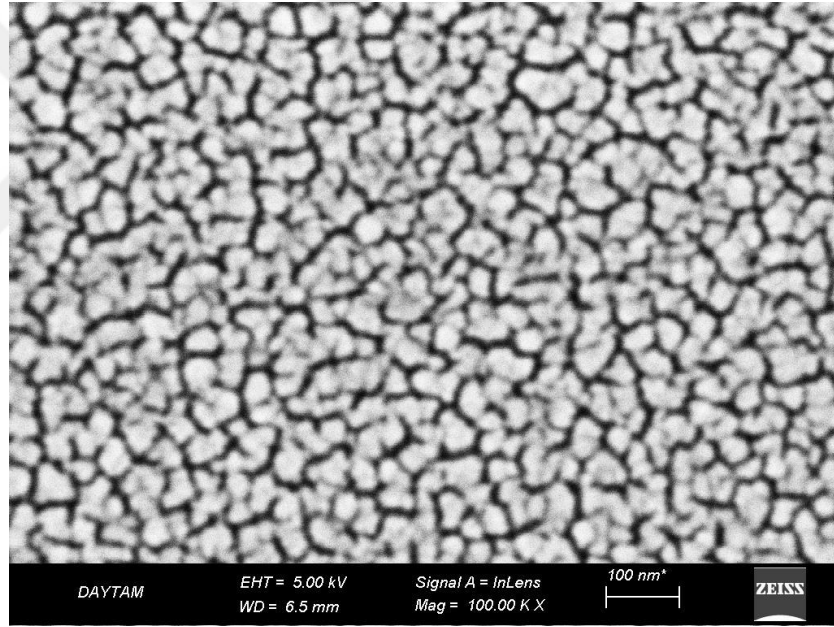
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B10, B11, B12 filmlerinden B10 filmi safir alttaş üzerine, B11 filmi cam alttaş üzerine, B12 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.30. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B10 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



Şekil 4.31. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B11 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



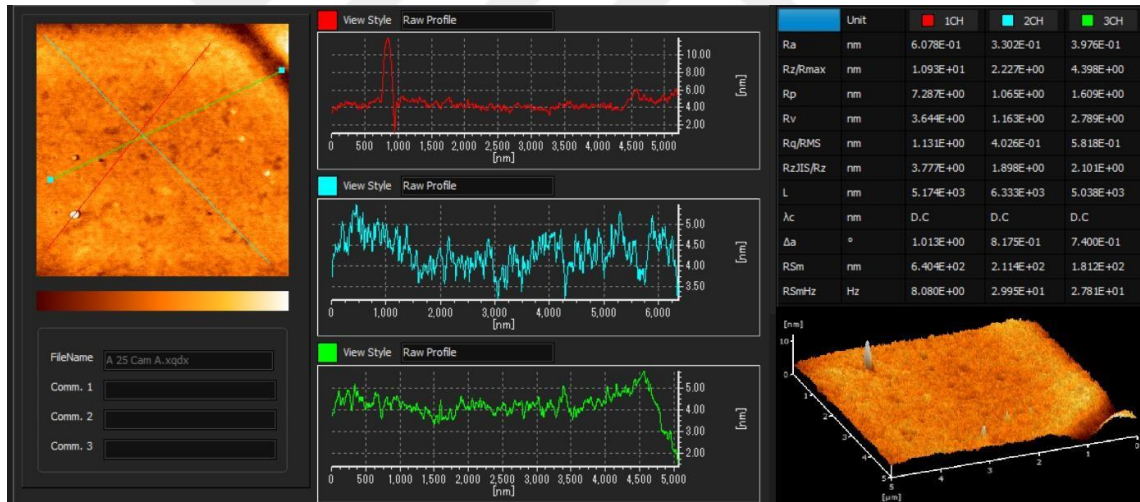
Şekil 4.32. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B12 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

AFM Görüntüleri;

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B10, B11, B12 filmlerinden B10 filmi safir alttaş üzerine, B11 filmi cam alttaş üzerine, B12 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. AFM görüntüsü aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.33. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B10 filminin AFM ile alınmış görüntüsü



Şekil 4.34. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B11 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

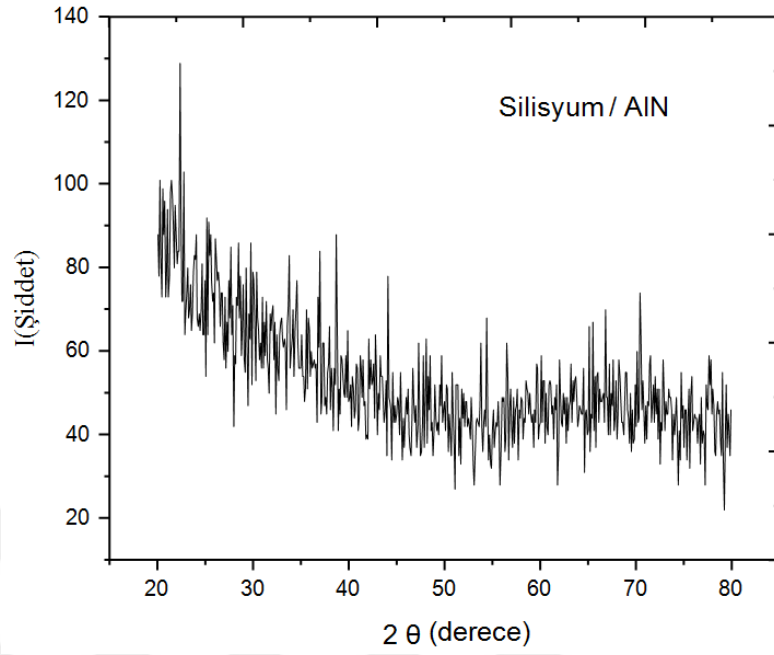


Şekil 4.35. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B12 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

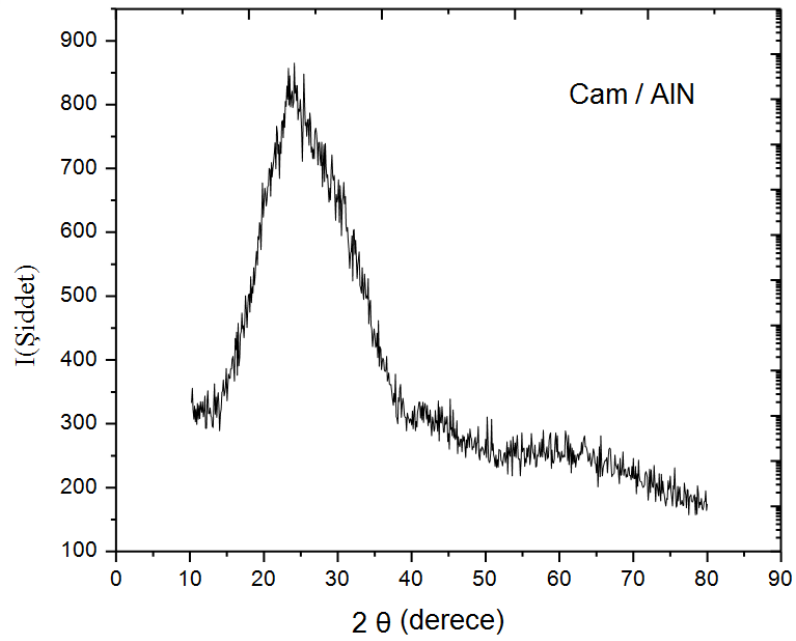
XRD Ölçümleri;

- Altaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 300 sccm,
- Azot miktarı 15 sccm,
- Azot kısmi basıncı %2,1

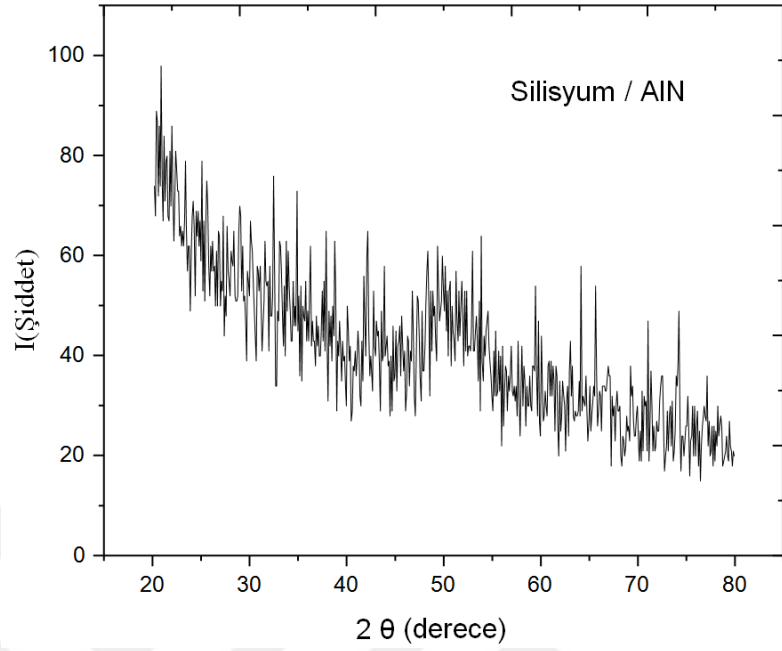
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B13, B14, B15 filmlerinden B13 filmi safir altaş üzerine, B14 filmi cam altaş üzerine, B15 silisyum altaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir



Şekil 4.36. Safır alttaş üzerinde büyütülen B13 ince filminin XRD sonuçları



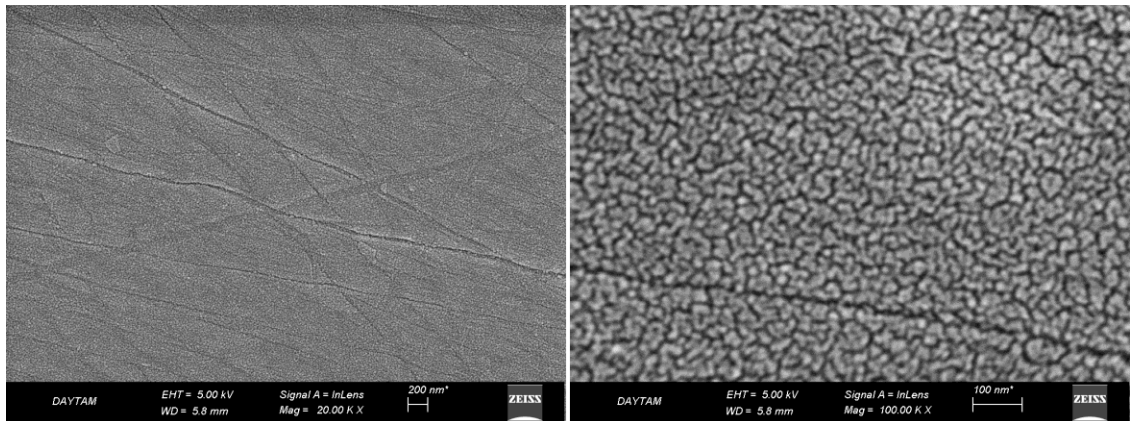
Şekil 4.37. Cam alttaş üzerinde büyütülen B14 ince filminin XRD sonuçları



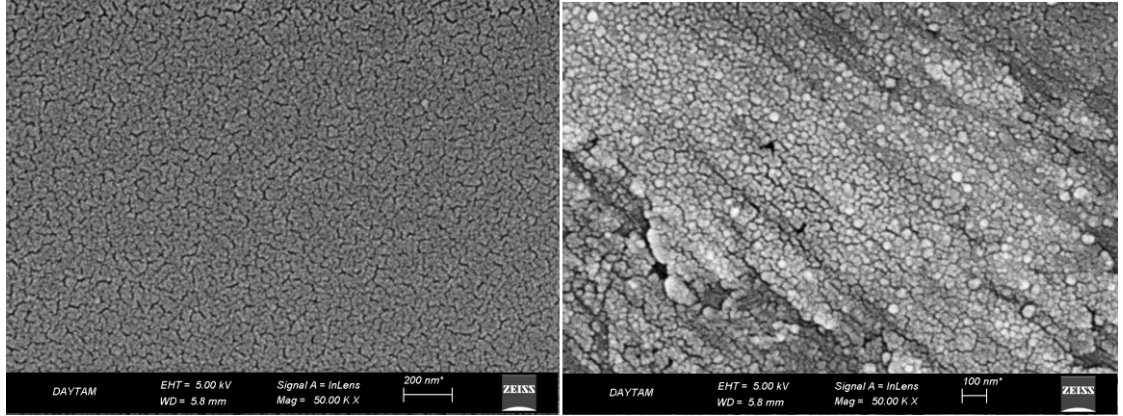
Şekil 4.38. Silisyum alttaş üzerinde büyütülen B15 ince filminin XRD sonuçları

SEM Görüntüleri;

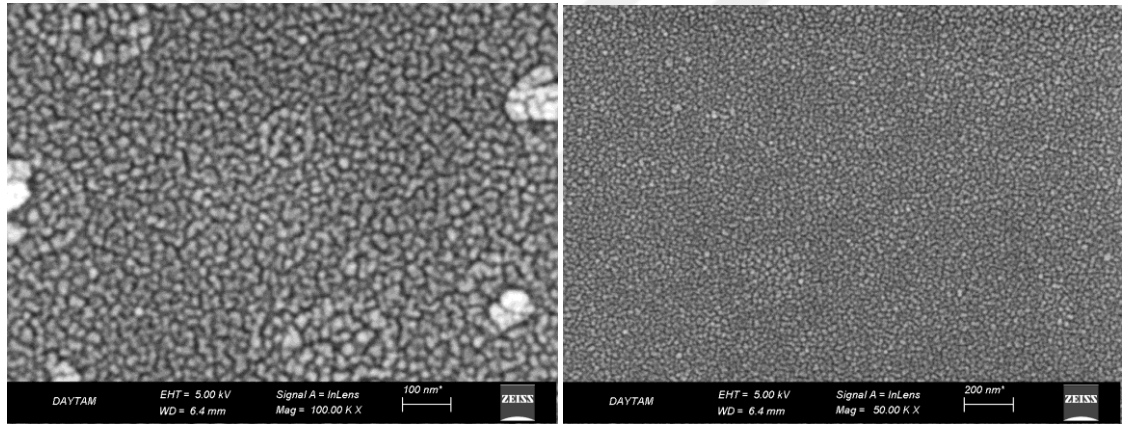
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B13, B14, B15 filmlerinden B13 filmi safir alttaş üzerine, B14 filmi cam alttaş üzerine, B15 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.39. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B13 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



Şekil 4.40. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B14 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü



Şekil 4.41. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B15 filminin farklı ölçüm aralıkları ile alınmış SEM görüntüsü

AFM Görüntüleri;

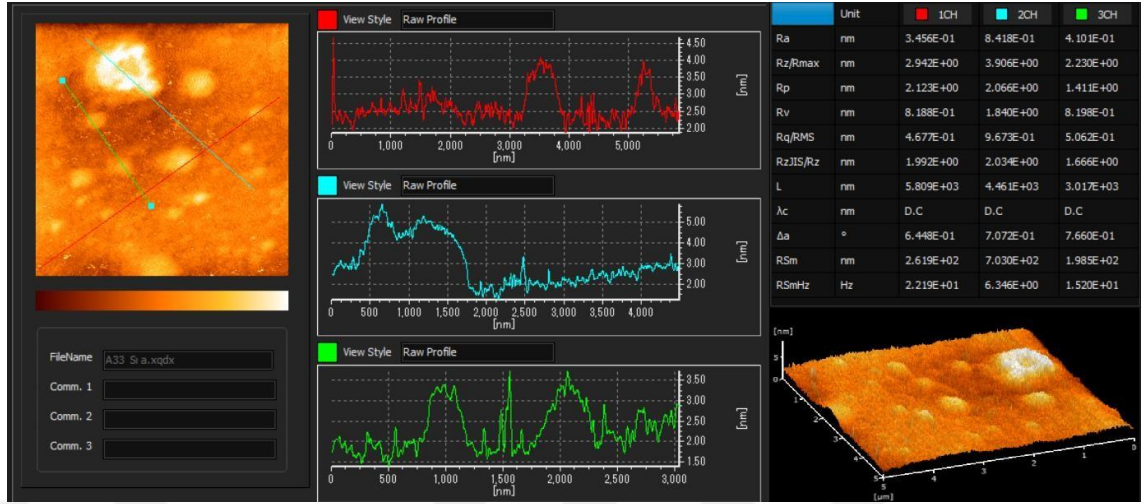
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen B13, B14, B15 filmlerinden B13 filmi safir alttaş üzerine, B14 filmi cam alttaş üzerine, B15 silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. AFM sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.42. Safir üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B13 filminin AFM ile alınmış görüntüsü



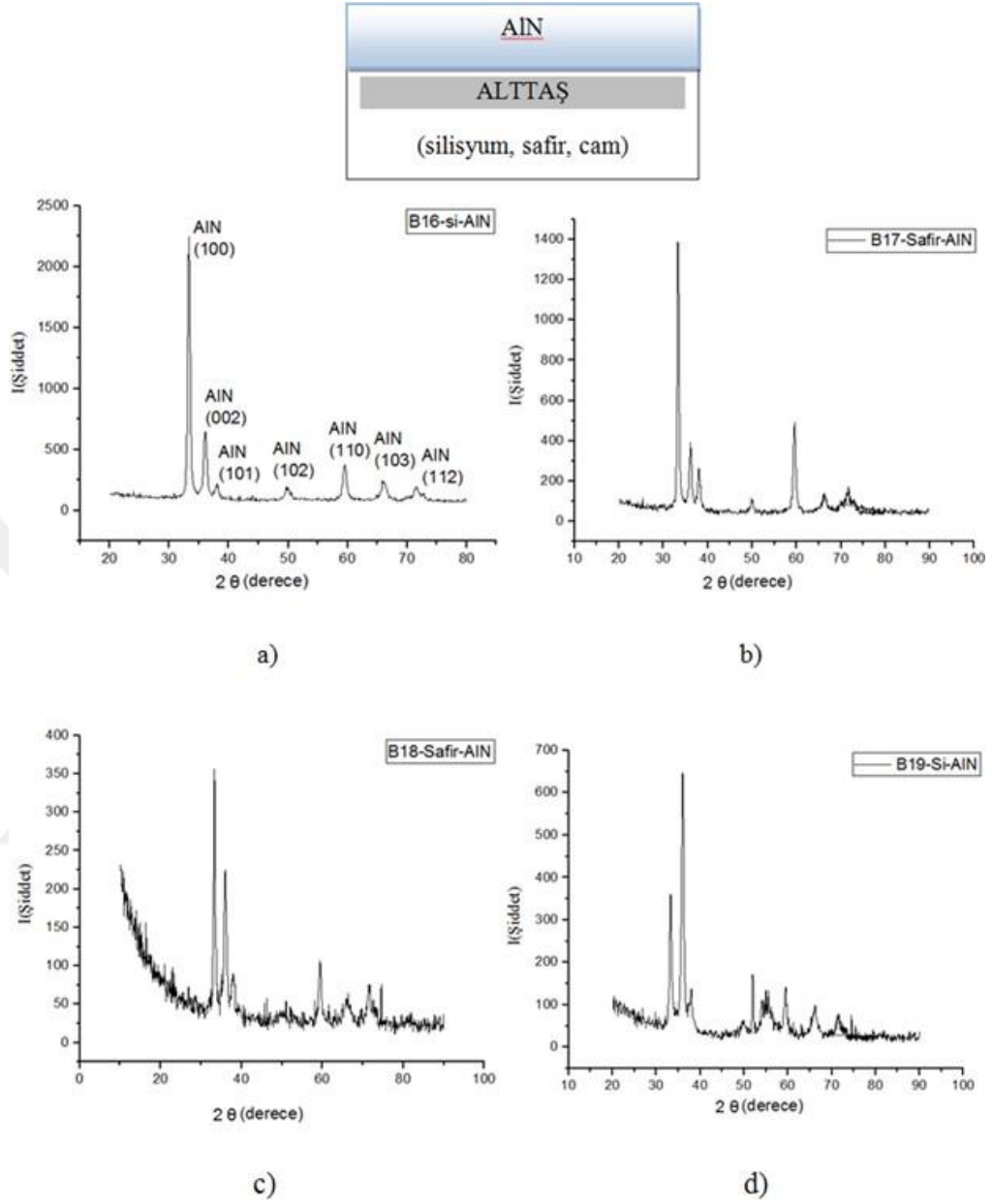
Şekil 4.43. Cam üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B14 filminin AFM ile alınmış görüntüsü



Şekil 4.44. Silisyum üzerine büyütülmüş AlN filmlerinden B15 filminin AFM ile alınmış görüntüsü

XRD Ölçümleri;

İlk aşamada optimum olarak belirlenen şartlara göre dört AlN filmi büyütüldü bunlar Şekil 4.45'deki gibidir.



Şekil 4.45. optimum şartlarda AlN tampon tabaka (a)B16, b)B17, c)B18 d)B19) AlN XRD grafikleri

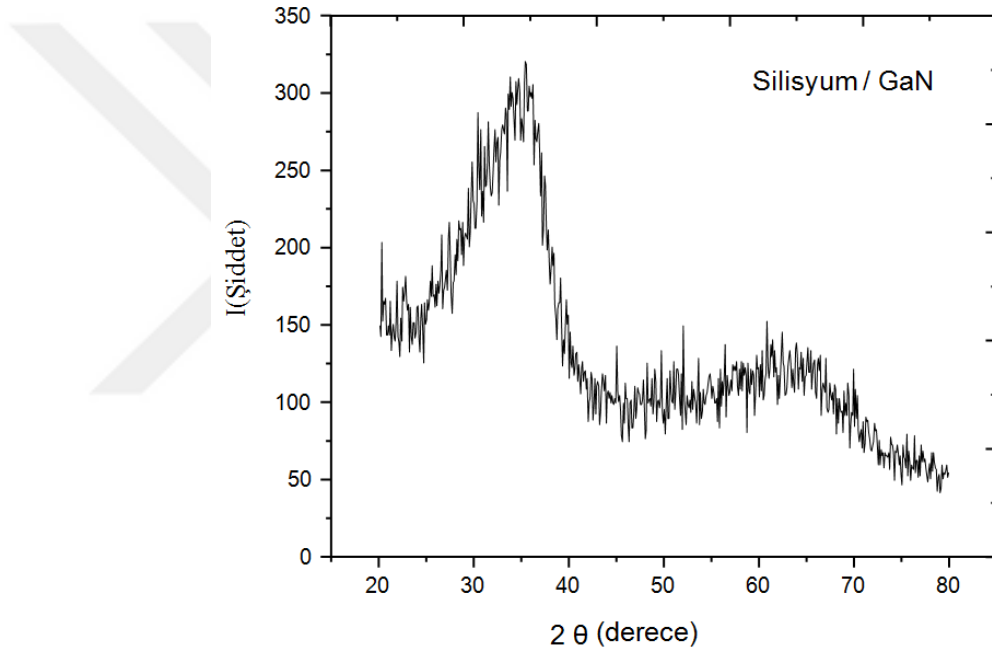
4.2. GaN Filmlerinin XRD, SEM ve AFM sonuçları

- Altaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 110W,
- Argon miktarı 200 sccm,
- Azot miktarı 20 sccm,

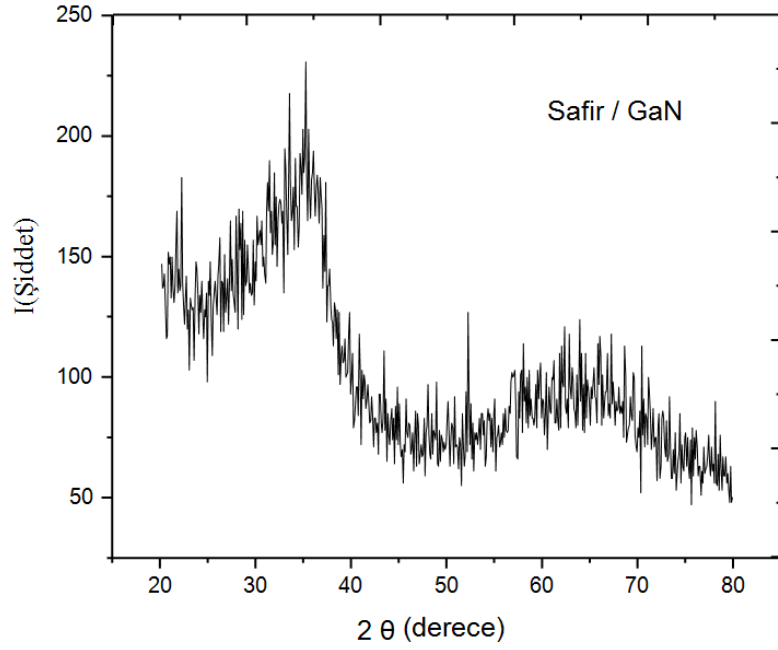
- Azot kısmi basıncı %2,5

XRD Ölçümleri;

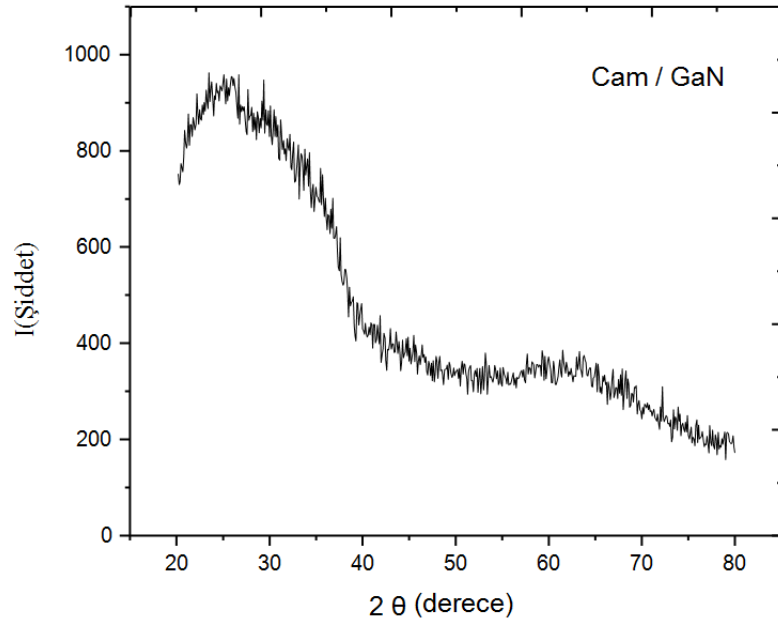
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen C1, C2, C3 filmlerinden C1 filmi Silisyum alttaşı üzerine, C2 filmi Safir alttaşı üzerine, C3 filmi Cam alttaşı üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.46. Silisyum alttaşı üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C1 numunesinin XRD sonuçları



Şekil 4.47. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C2 numunesinin XRD sonuçları

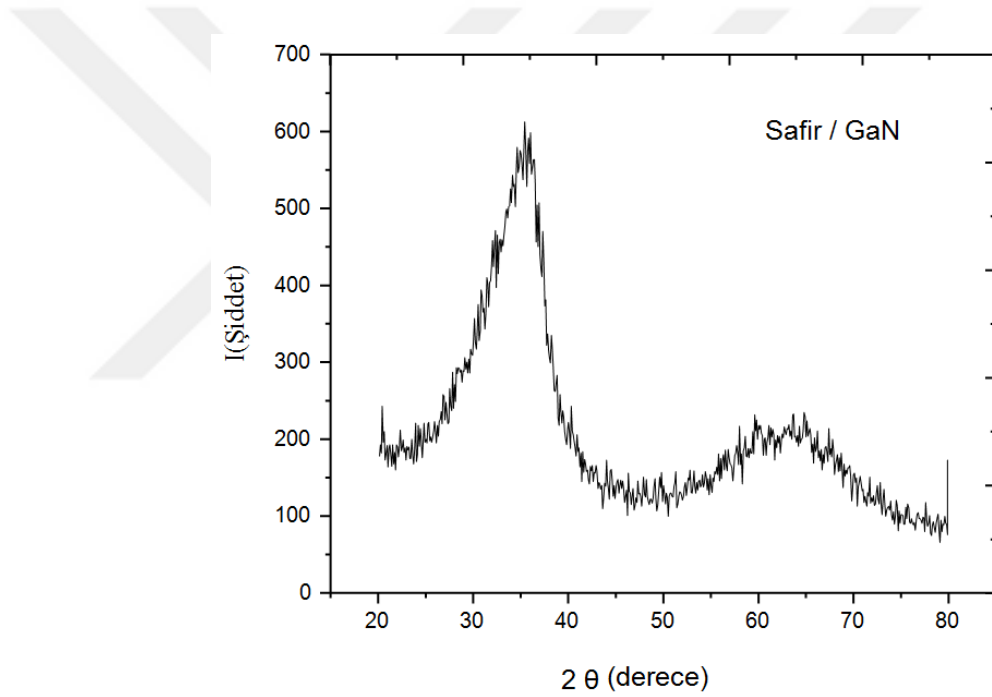


Şekil 4.48. Cam alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C3 numunesinin XRD sonuçları

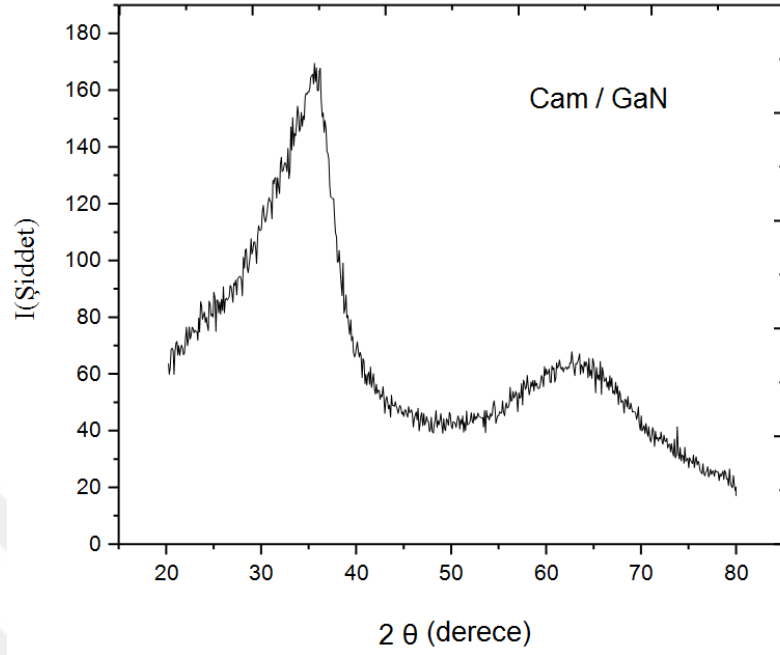
- Alttaş sıcaklığı 350°C,

- RF güç kaynağı değeri 110W,
- Argon miktarı 100 sccm,
- Azot miktarı 15 sccm,
- Azot kısmi basıncı %4,43

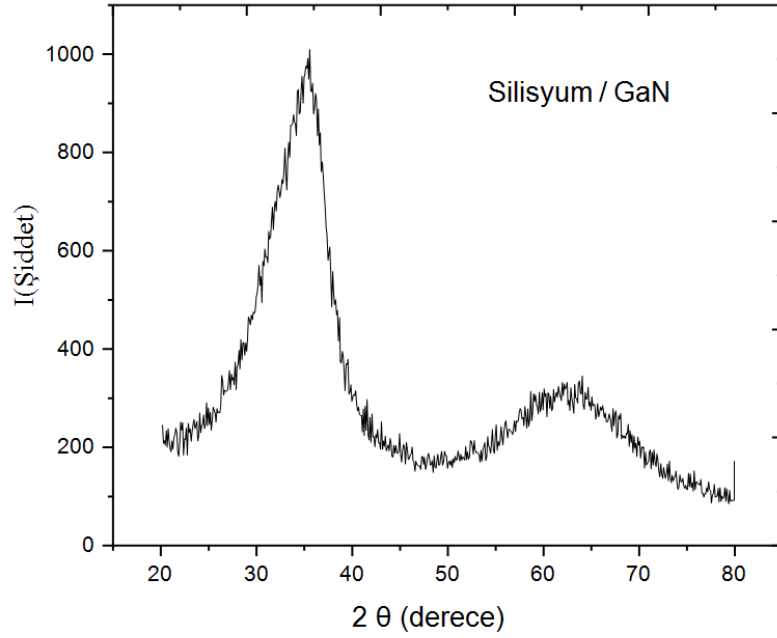
Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen C4, C5, C6 filmlerinden C4 filmi safir alttaş üzerine, C5 filmi cam alttaş üzerine, C6 filmi Silisyum alttaş üzerine ve aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.49. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C4 numunesinin XRD sonuçları



Şekil 4.50. Cam alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C5 numunesinin XRD sonuçları

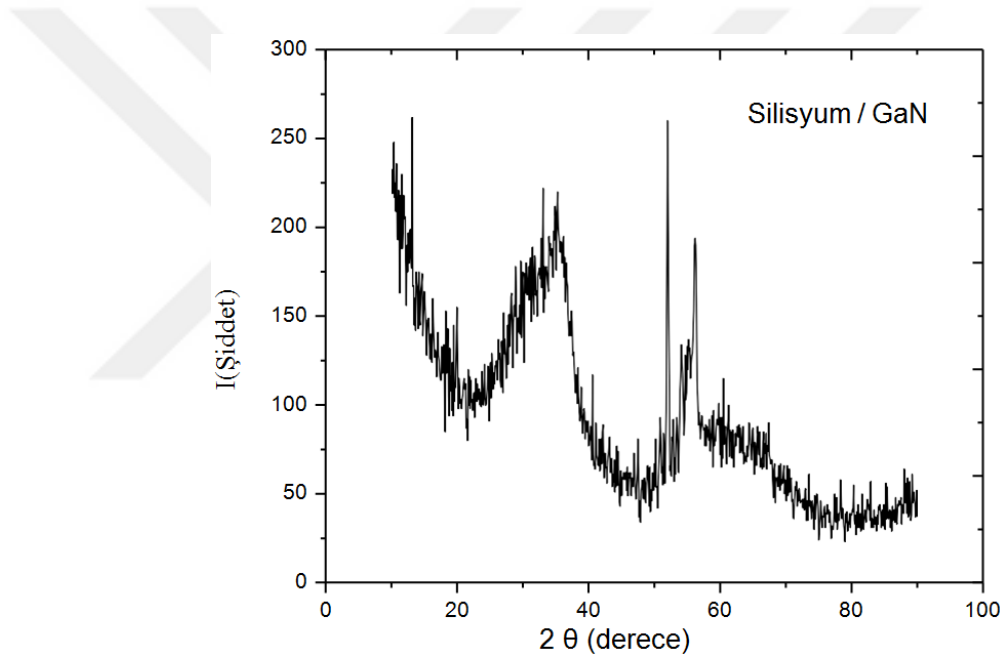


Şekil 4.51. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C6 numunesinin XRD sonuçları

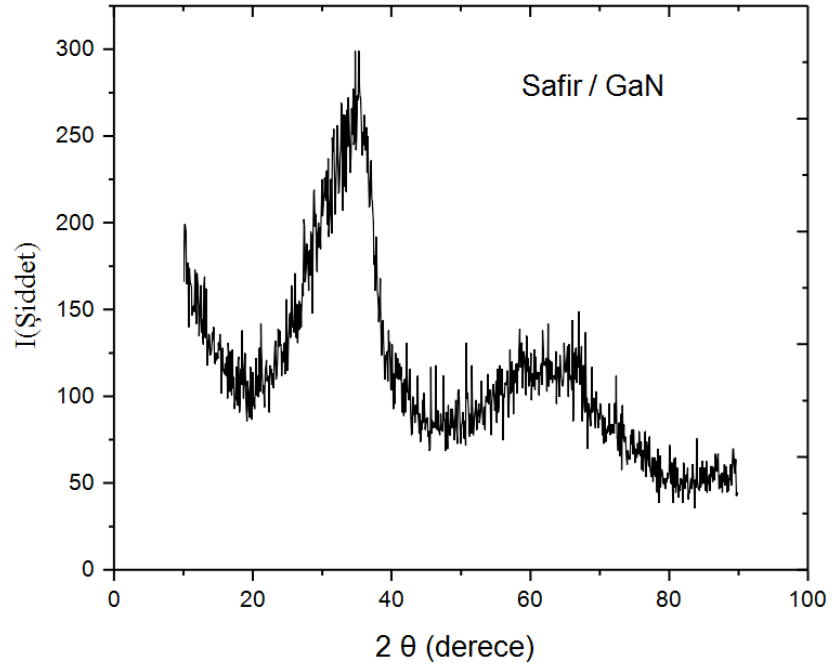
- Alttaş sıcaklığı 350°C,

- RF güç kaynağı değeri 50W,
- Argon miktarı 100 sccm,
- Azot miktarı 15 sccm,
- Azot kısmi basıncı %3,6

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen C7 ve C8 filmlerinden C7 filmi silisyum alttaş üzerine, C8 filmi safir alttaş üzerine aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.52. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C7 numunesinin XRD sonuçları

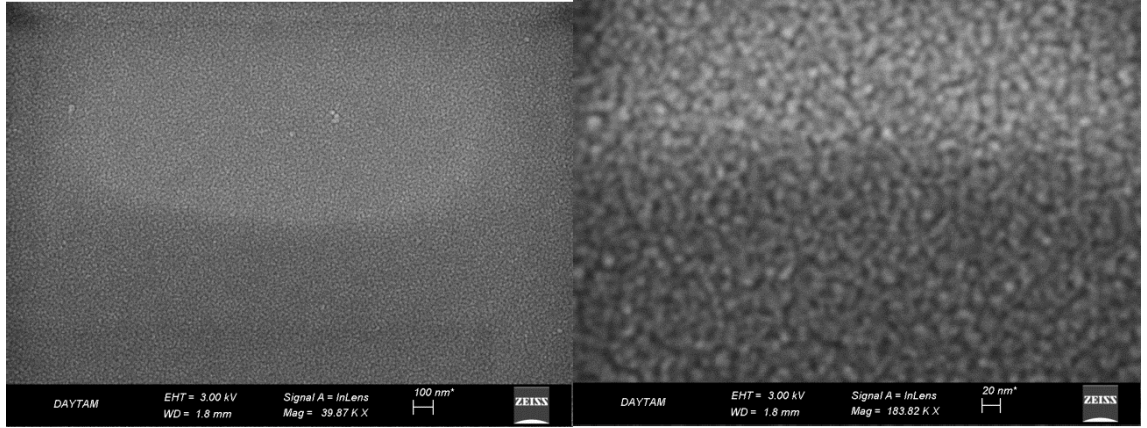


Şekil 4.53. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C8 numunesinin XRD sonuçları

SEM Görüntüleri;

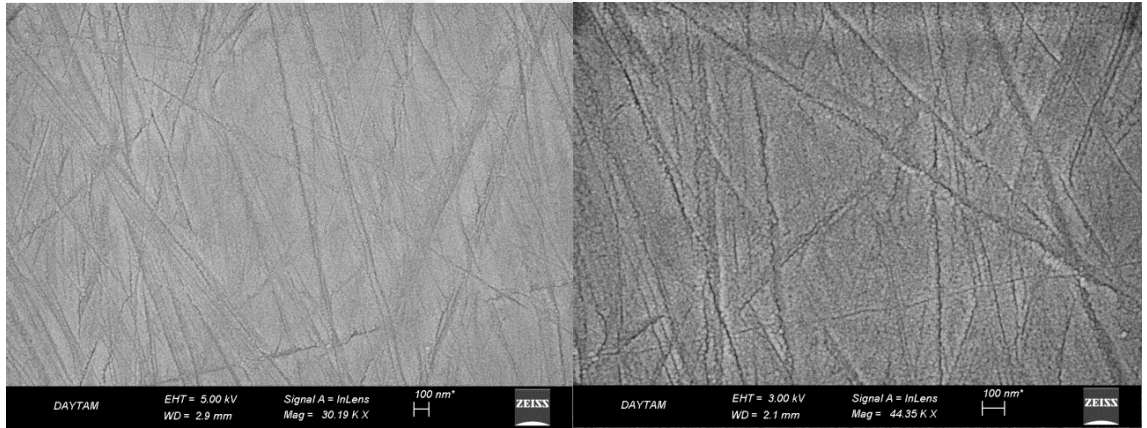
Büyütülen GaN ince filmlerinin XRD sonuçlarına bakılıp amorf yapı olduğu görülen numunelerin SEM görüntüleri çok fazla alınmamıştır. SEM görüntüleri alınan numunelerin görüntüleri aşağıda verilmiştir.

Yukarıdaki şartlara göre büyütülen GaN filmlerinin SEM görüntüleri aşağıdadır.



Şekil 4.54. C7 numunesi SEM görüntüsü

C7 numunesi silisyum alttaş üzerine GaN filminin büyütülmesi ile oluşmuştur.



Şekil 4.55. C8 numunesi SEM görüntüsü

AFM Görüntüleri;

Tampon kullanılmadan büyütülebilen GaN filmlerinden bazılarının AFM görüntüleri aşağıda verilmiştir.

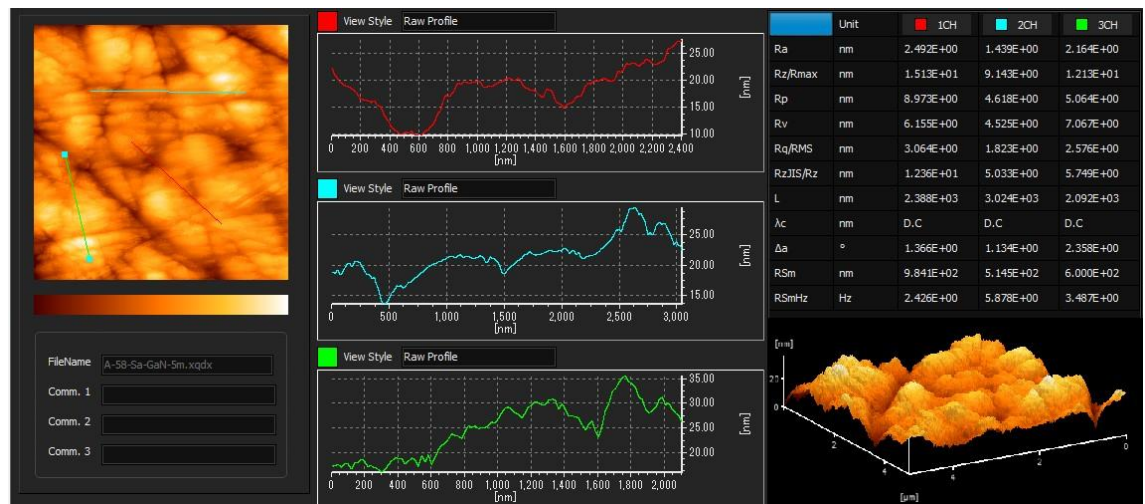
- Alttaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 50W,
- Argon miktarı 100 sccm,

- Azot miktarı 15 sccm,
- Azot kısmi basıncı %3,6

Yukarıdaki şartlara göre büyütülen GaN filmlerinde C7 silisyum, C8 safir alttaş üzerine büyütülmüştür.



Şekil 4.56. C7 numunesi AFM görüntüsü

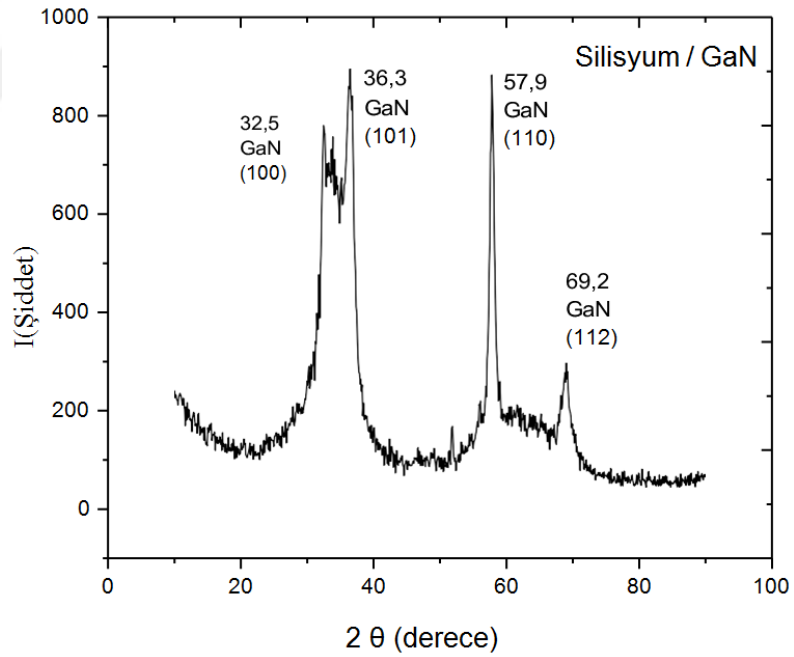


Şekil 4.57. C8 numunesi AFM görüntüsü

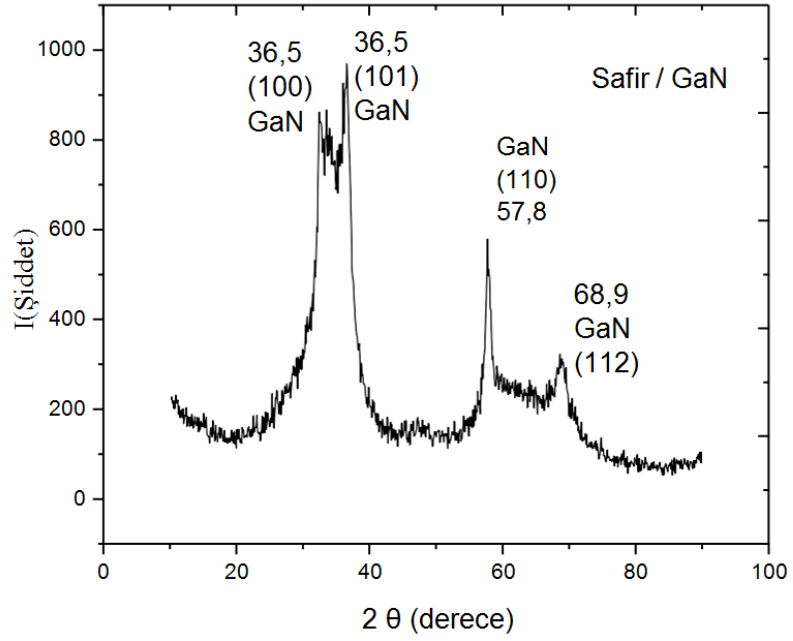
XRD Ölçümleri;

- Altaş sıcaklı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 50 sccm,
- Azot miktarı 40 sccm,
- Azot kısmi basıncı %12

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen C9 ve C10 filmlerinden C9 filmi silisyum altaş üzerine, C10 filmi safir altaş üzerine aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



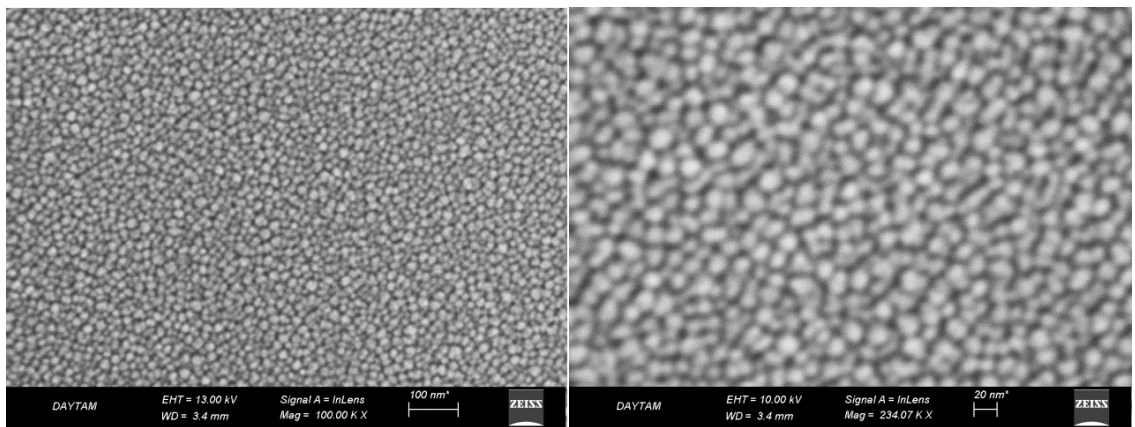
Şekil 4.58. Silisyum altaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C9 numunesinin XRD sonuçları



Şekil 4.59. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C10 numunesinin XRD sonuçları

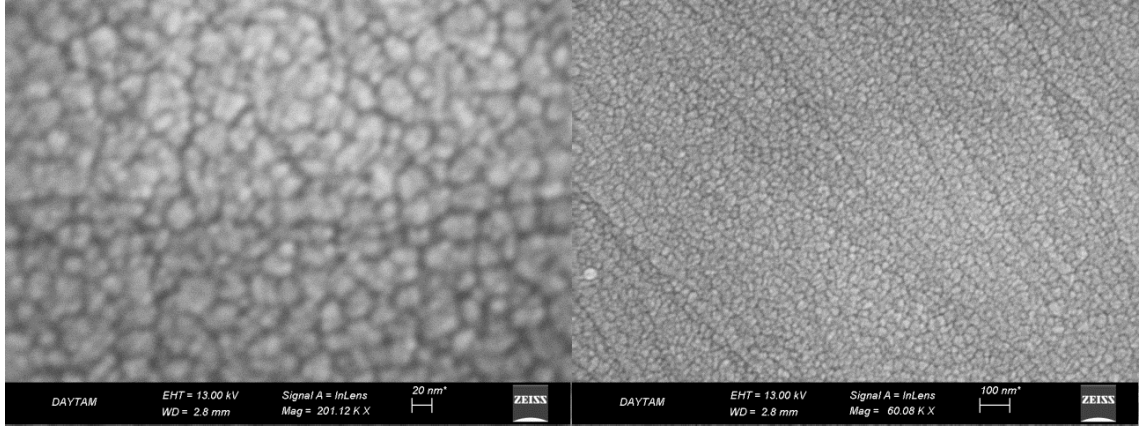
SEM Görüntüleri;

Yukarıdaki şartlara göre büyütülen GaN filmlerinin görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.60. C9 numunesi SEM görüntüsü

C9 numunesi silisyum alttaş üzerine GaN filmi büyütülmesi ile oluşturulmuştur.



Şekil 4.61. C10 numunesi SEM görüntüsü

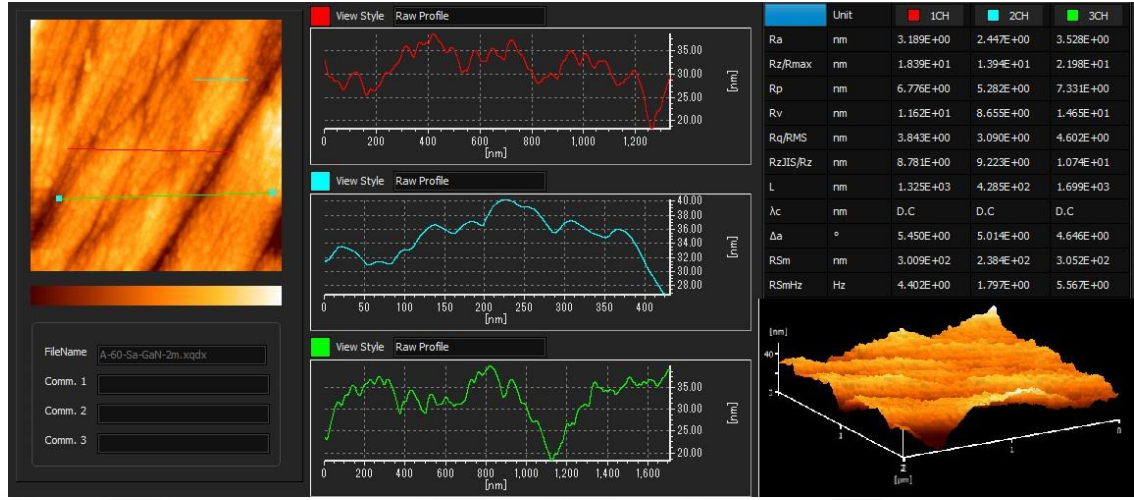
C10 numunesi safir altaş üzerine GaN filmi büyütülmesi ile oluşmuştur.

AFM Görüntüleri;

Yukarıdaki şartlara göre büyütülen GaN filmlerinde C9 silisyum, C10 safir altaş üzerine büyütülmüştür.



Şekil 4.62. C9 numunesi AFM görüntüsü

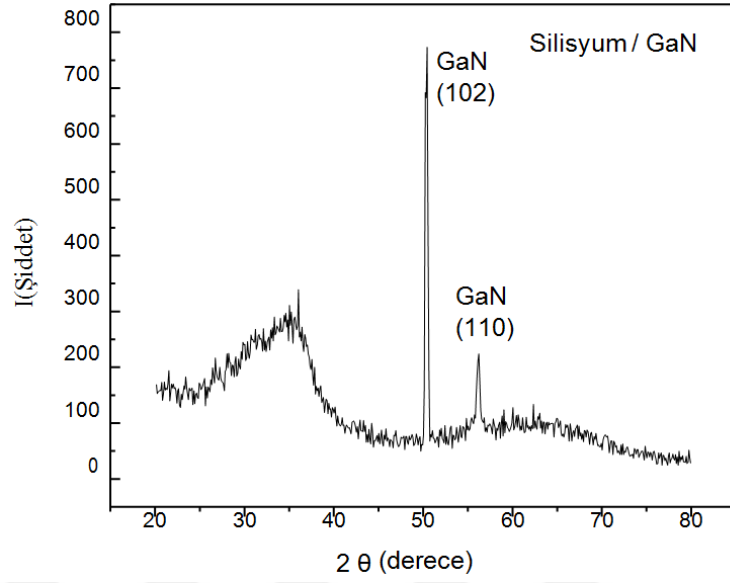


Şekil 4.63. C10 numunesi AFM görüntüsü

XRD Ölçümleri;

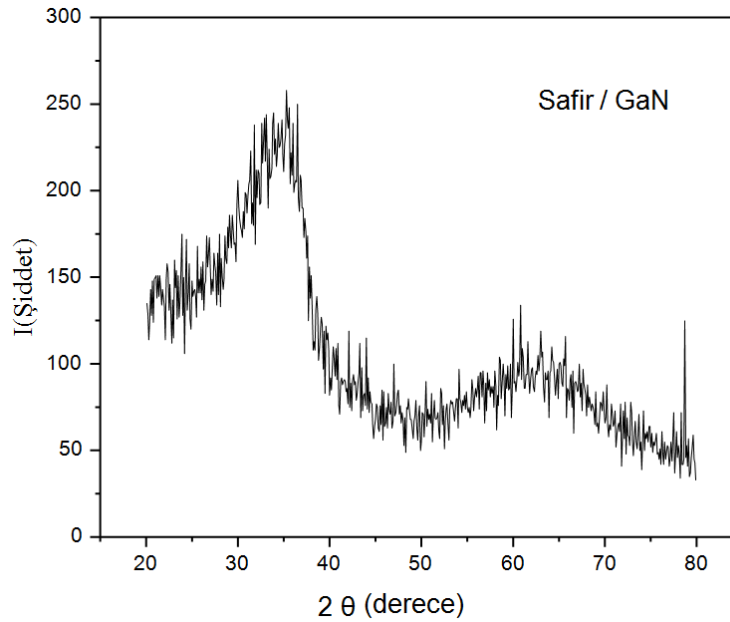
- Altaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 50W,
- Argon miktarı 50 sccm,
- Azot miktarı 40 sccm,
- Azot kısmi basıncı %13,35

Yukarıda belirtilen ve aynı şartlarda büyütülen C11 ve C12 filmlerinden C11 filmi silisyum altaş üzerine, C12 filmi safir altaş üzerine aynı chamber içerisinde büyütülmüştür. XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.64. Silisyum alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C11 numunesinin XRD sonuçları

C11 numunesinin XRD sonucuna bakıldığı zaman GaN'ın silisyum alttaş üzerinde piki olabildiği görülmüştür. Fakat aynı chamber içerisinde safir alttaş kullanılarak yapılan büyütmedeki C12 numunesinde GaN'a ait piklere rastlanmamıştır.



Şekil 4.65. Safir alttaş üzerine GaN ince filmi büyütülmeye çalışılan C12 numunesinin XRD sonuçları

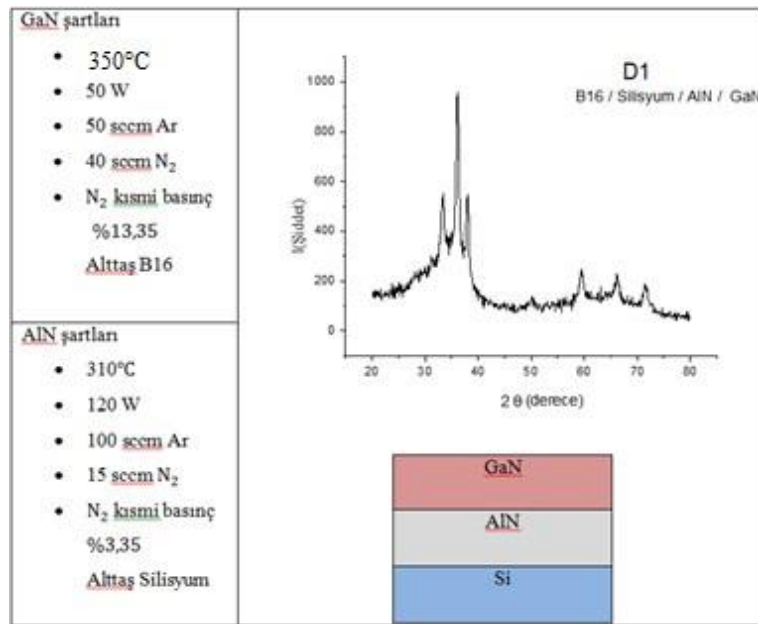
XRD ölçümleri bulunan tüm numunelerin SEM ve AFM görüntüleri net alınamamıştır o yüzden tezde bulunmamaktadır.

4.3. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin XRD, SEM, AFM ve XPS Sonuçları

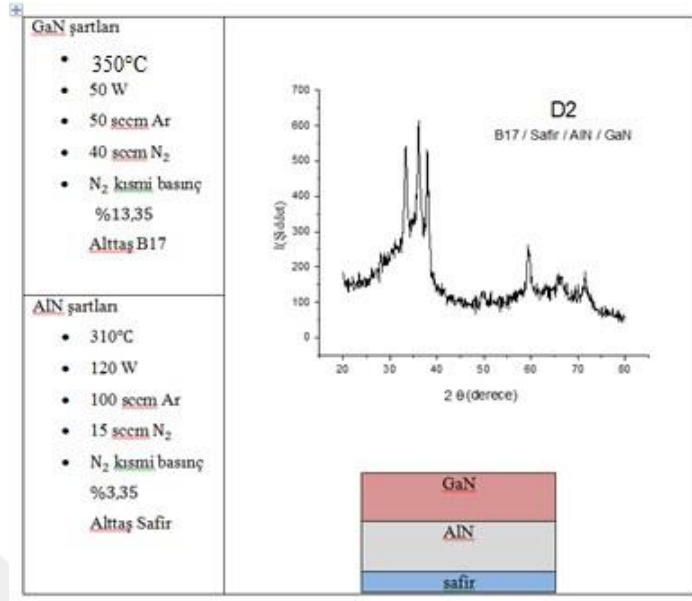
Şekil 4.45’de bulunan AlN numunelerinin üzerine GaN filmi büyütüldü. Büyütülen numunenin isimleri sırasıyla D1,D2,D3,D4 olarak isimlendirilmiştir ve parametreleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Verilen argon ve azot gaz miktarları aynı olsa bile chamberın vakuma geliş değeri her zaman aynı olmadığı için azot kısmi basıncı yaklaşık değerler olarak alınmalıdır.

4.4. AlN Tampon Üzerine GaN Filmi XRD Grafikleri

AlN filmi safir ve Silisyum alttaşları üzerine büyütülmüştür ve elde edilen numuneler B16, B17 olmuştur. tampon kat olan AlN ile GaN ın üst üste şartları ve elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.

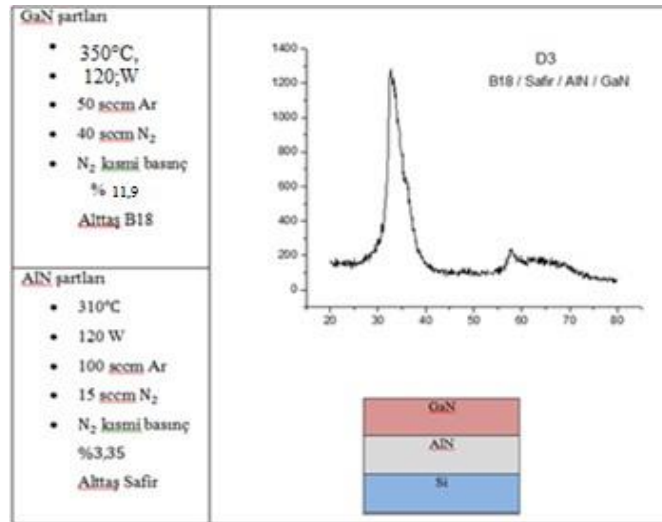


Şekil 4.66. D1 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları

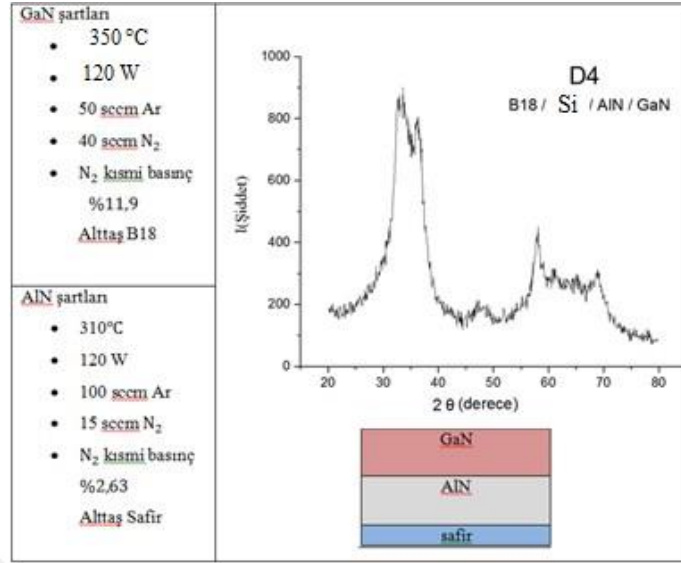


Şekil 4.67. D2 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları

AlN tampon tabakası bulunan GaN filmlerinden D1 ve D2 numuneleri farklı alttaşlar üzerinde olmalarına rağmen aynı yönelimli GaN'a sahiptirler. D3, D4 numunelerinde ise GaN vardır fakat piklerin AlN ile yakın oluşundan XRD ile ayırt edilemeyen pikler mevcuttur.



Şekil 4.68. D3 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları



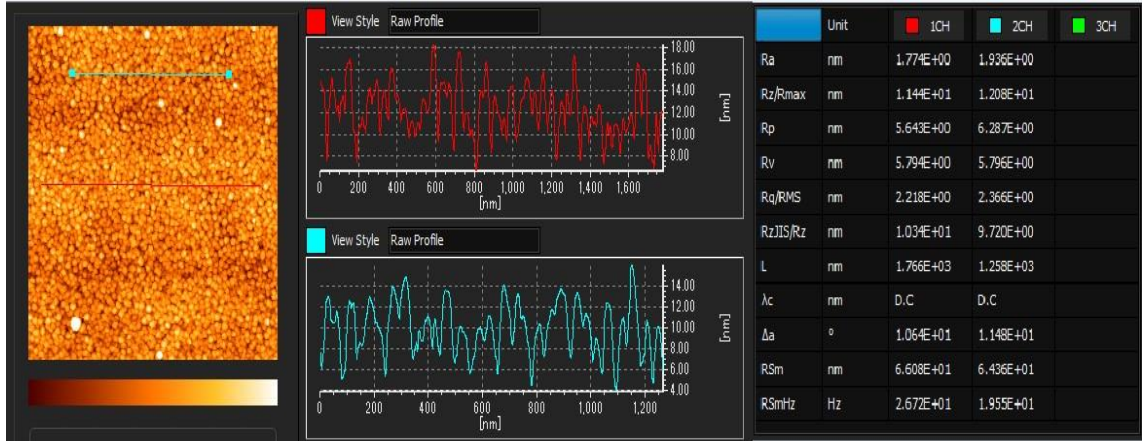
Şekil 4.69. D4 numunesi şartları ve XRD ölçüm sonuçları

4.5. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin AFM Sonuçları

D3 ve D4 numuneleri AlN tamponu kullanılarak büyütülen GaN filmlerini göstermektedir. Büyütme şartları aynıdır ve araştırma bulguları kısmında yer almaktadır. Bu numunelerin AFM görüntüleri aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 4.70. D3 numunesinin AFM görüntüsü



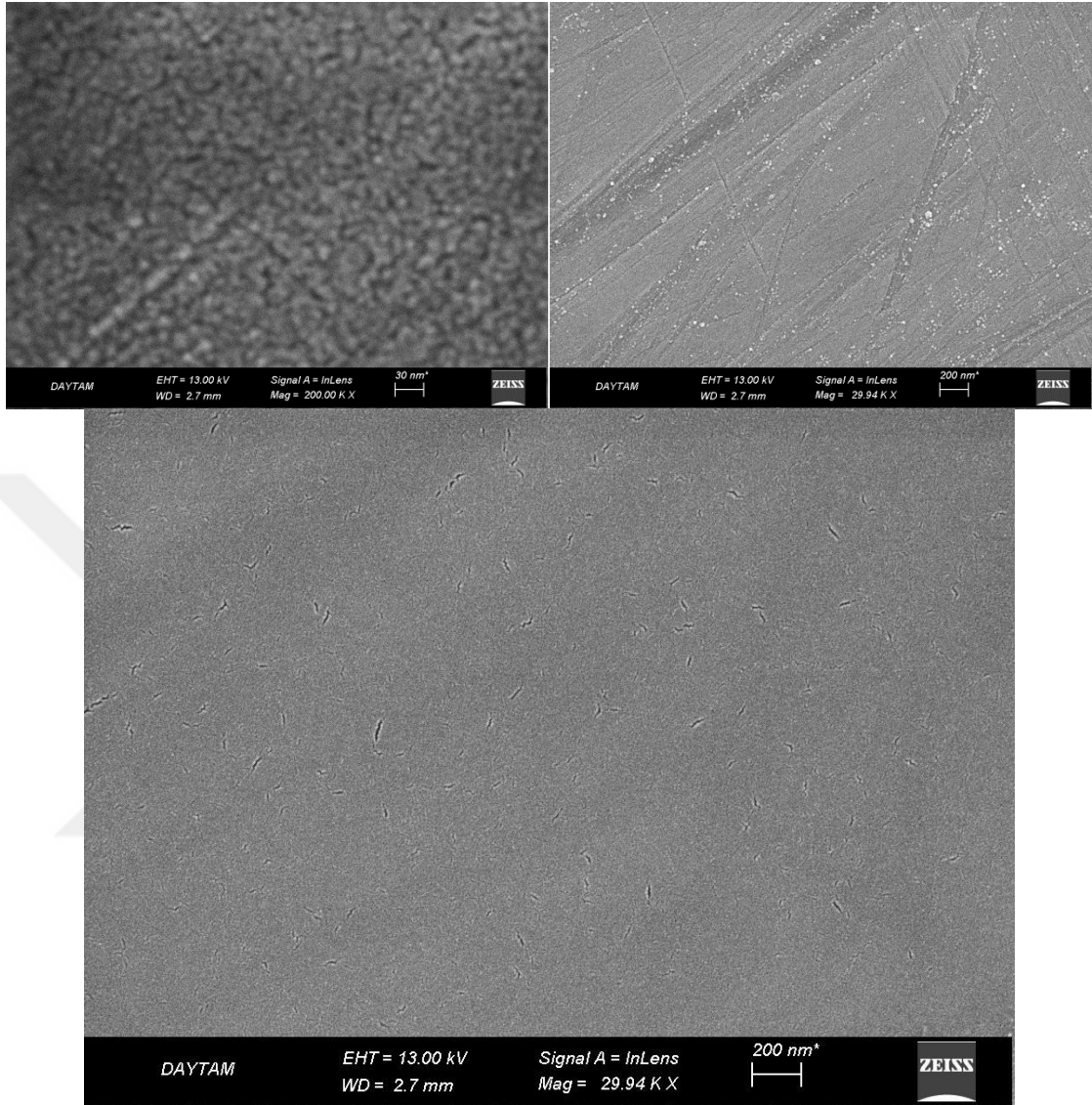
Şekil 4.71. D4 numunesi AFM görüntüsü

4.6. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin SEM Sonuçları

Optimum şartı belirlenen AlN filmleri kullanılarak farklı şartlarda büyütülen GaN filmlerinin SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.

- Altaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 50 sccm,
- Azot miktarı 40 sccm,
- Azot kısmi basıncı %11,9

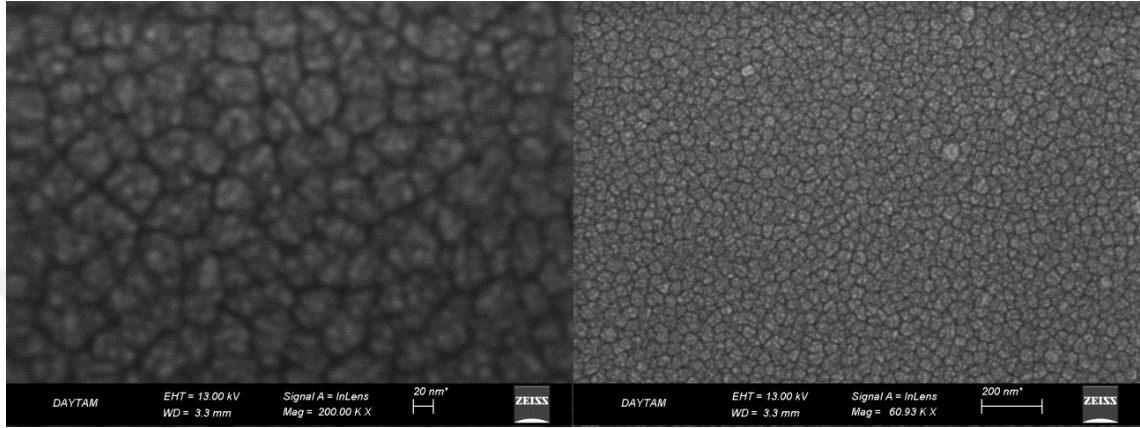
AlN filmi olan B18 numunesi tampon olarak kullanılmıştır ve üzerine yukarıdaki şarta göre GaN filmi büyütülmüştür. Altaş olarak safir kullanılan D3 numunesinin SEM görüntüsü aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.72. D3 numunesinin SEM görüntüsü

- Alttaş sıcaklığı 350°C,
- RF güç kaynağı değeri 120W,
- Argon miktarı 50 sccm,
- Azot miktarı 40 sccm,
- Azot kısmi basıncı %11,9

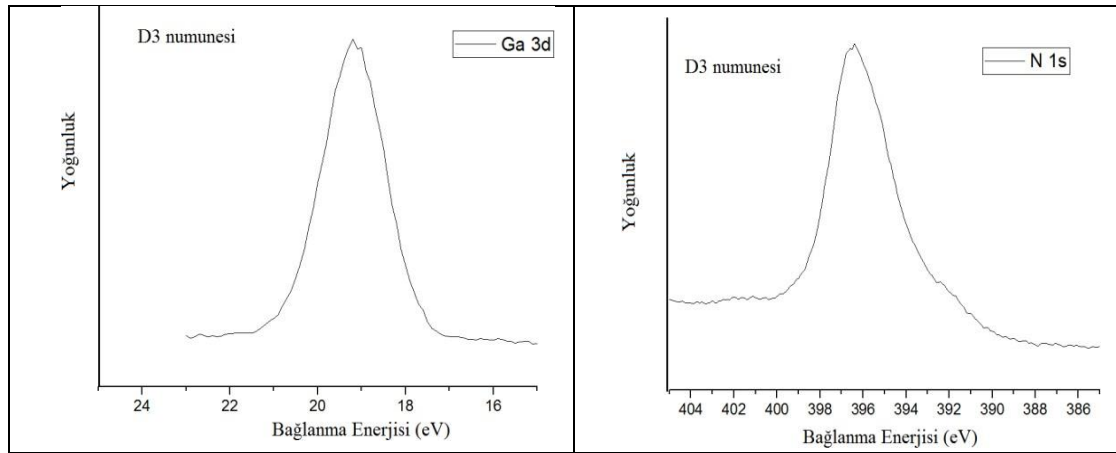
AlN filmi olan B19 numunesi tampon olarak kullanılmıştır ve üzerine yukarıdaki şarta göre GaN filmi büyütülmüştür. Alttaşı olarak silisyum kullanılan D4 numunesinin SEM görüntüsü aşağıdaki gibidir.



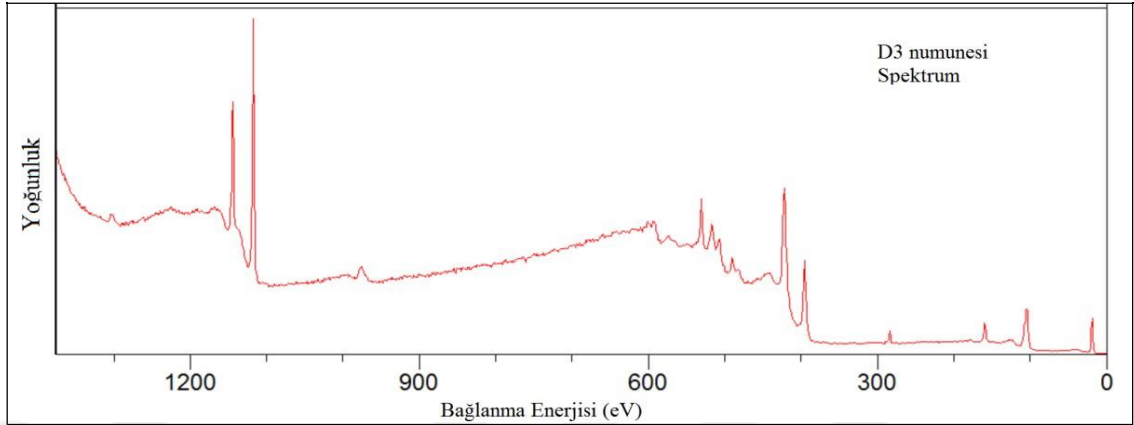
Şekil 4.73. D4 numunesi SEM görüntüsü

4.7. AlN Üzerine Büyütülmüş GaN Filmlerinin XPS Sonuçları

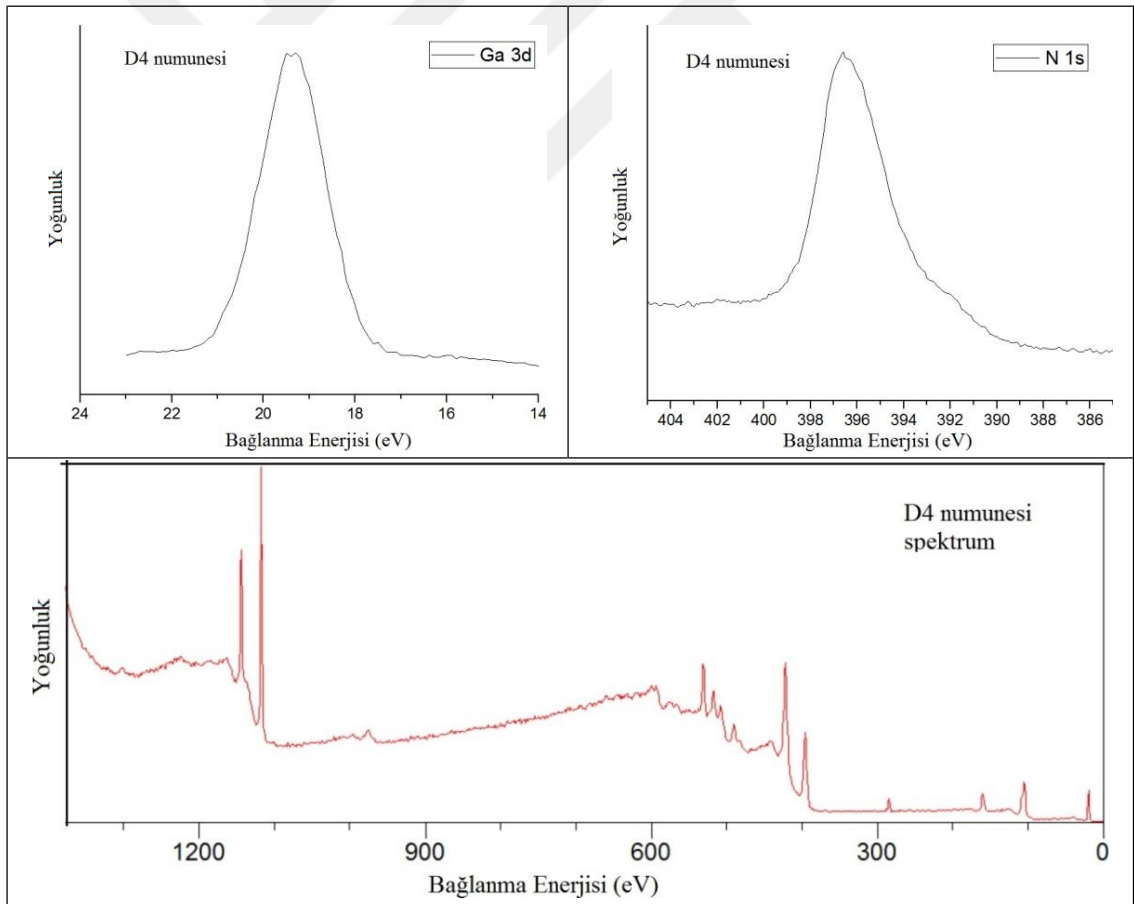
D3 ve D4 malzemelerinin kimyasal olarak analizine yardımcı olan XPS spektroskopisinde elde edilen görüntüleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.74. (devam)



Şekil 4.74. D3 numunesi XPS ölçüm sonuçları



Şekil 4.75. D4 numunesi XPS ölçüm sonuçları

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Numunelerin büyütülmesinde önemli olan parametrelerden birisi azot kısmi basınç değeridir. Bu değer belirlenirken argon eklendiği zamanki basınca P_{Ar} denir. Chamber içerisine argon gazından ayrı azot gazı eklendiği zaman oluşan basınç bizim büyütme basıncımızdır. Büyütme basıncınada P_B denir.. Eklenen azot gazının kısmi olarak basınç değerinin hesaplanması aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$P_B - P_{Ar} = P_{N_2}$$

Oluşan azotun kısmi basıncı hesaplandıktan sonra yüzde olarak gösterilebilmesi için aşağıdaki formül uygulanır.

$$\frac{P_B - P_{Ar}}{P_B} \times 100 = \% P_{N_2}$$

Büyütme yapıldıktan sonra elde edilebilecek tüm pikler aşağıda çizelge halinde belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. AlN malzemesi miller indisi ve dereceleri (Panda 2014)

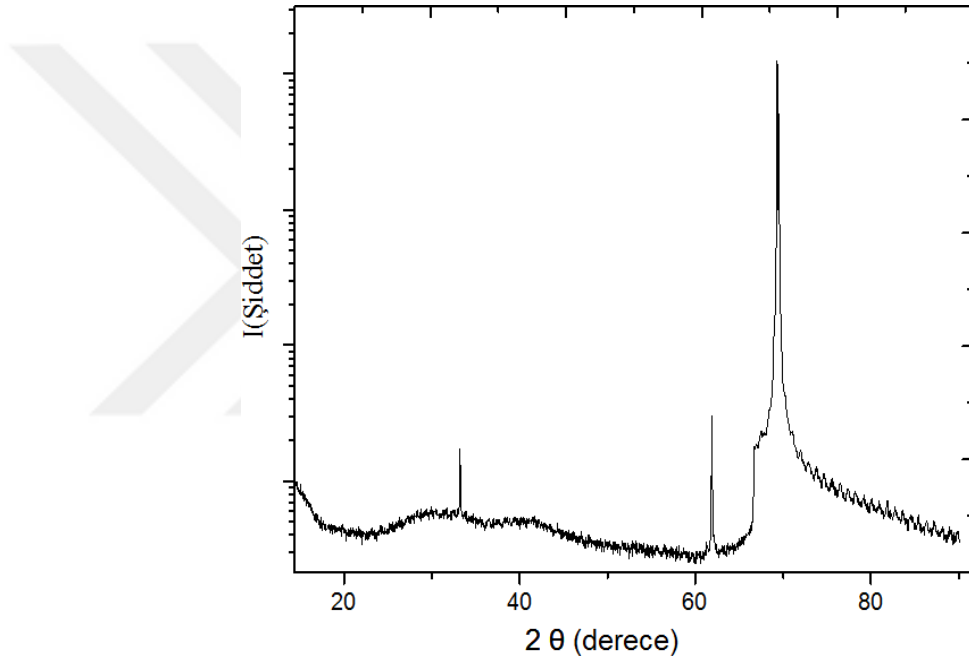
Malzeme adı	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN	AlN
Derecesi 2θ	33,3	36	38	49	59	66	69	72	73
Yönelimi	(100)	(002)	(101)	(102)	(110)	(103)	(200)	(112)	(201)

5.1. AlN İnce Filmi XRD Sonuçları ve Tartışma

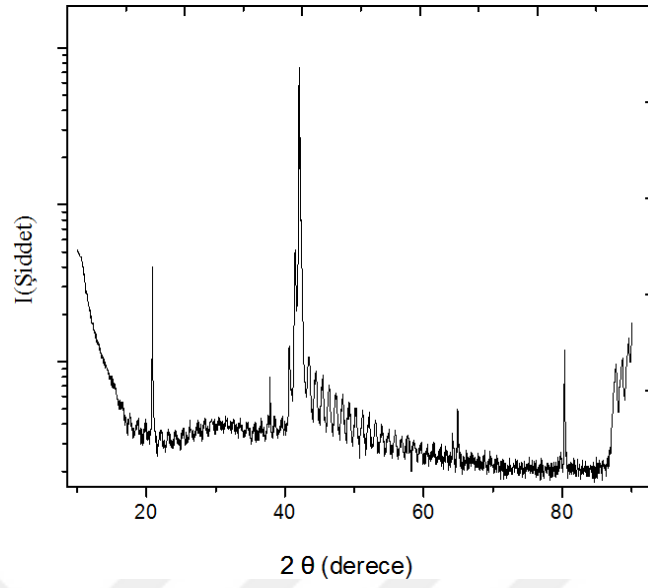
Bu kısımda AlN ince filmlerinin sonuçlarına bakılırsa 15 farklı şart ve alttaş üzerine

büyütülen örnek mevcuttur. Bu numunelerden safir ve silisyum alttaşların analizleri incelenerek iyi olduğunu düşündüğümüz optimum şart seçilmiştir. Seçim yapılırken referans olarak üzeri film kaplı olmayan ve temizlenmiş alttaşların XRD ölçümleri ve AFM görüntüleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu silisyum ve safir alttaşların XRD ölçüm sonuçları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 resimlerinde gösterilmiştir.

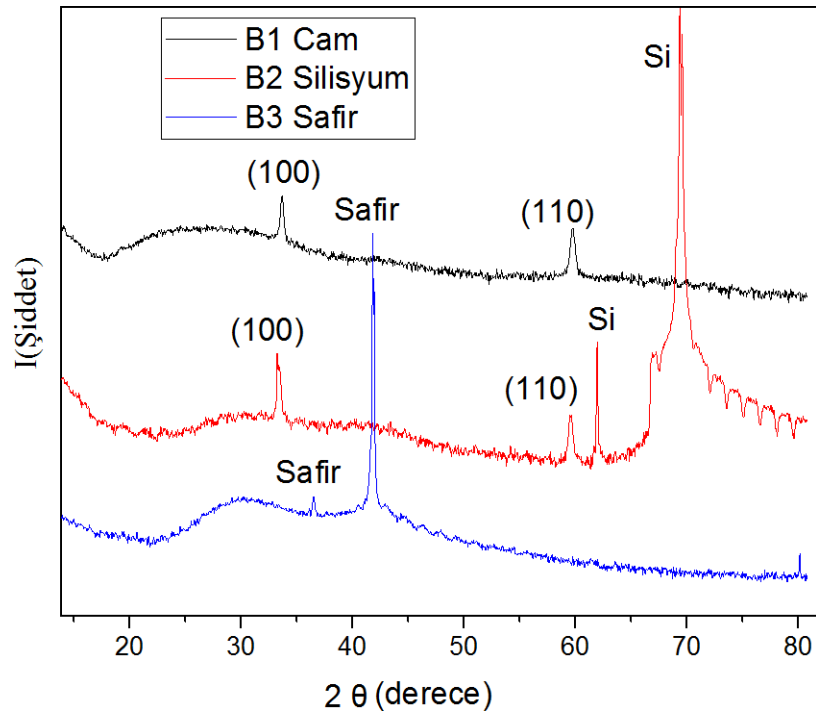


Şekil 5.1. silisyum alttaş XRD ölçüm sonuçları



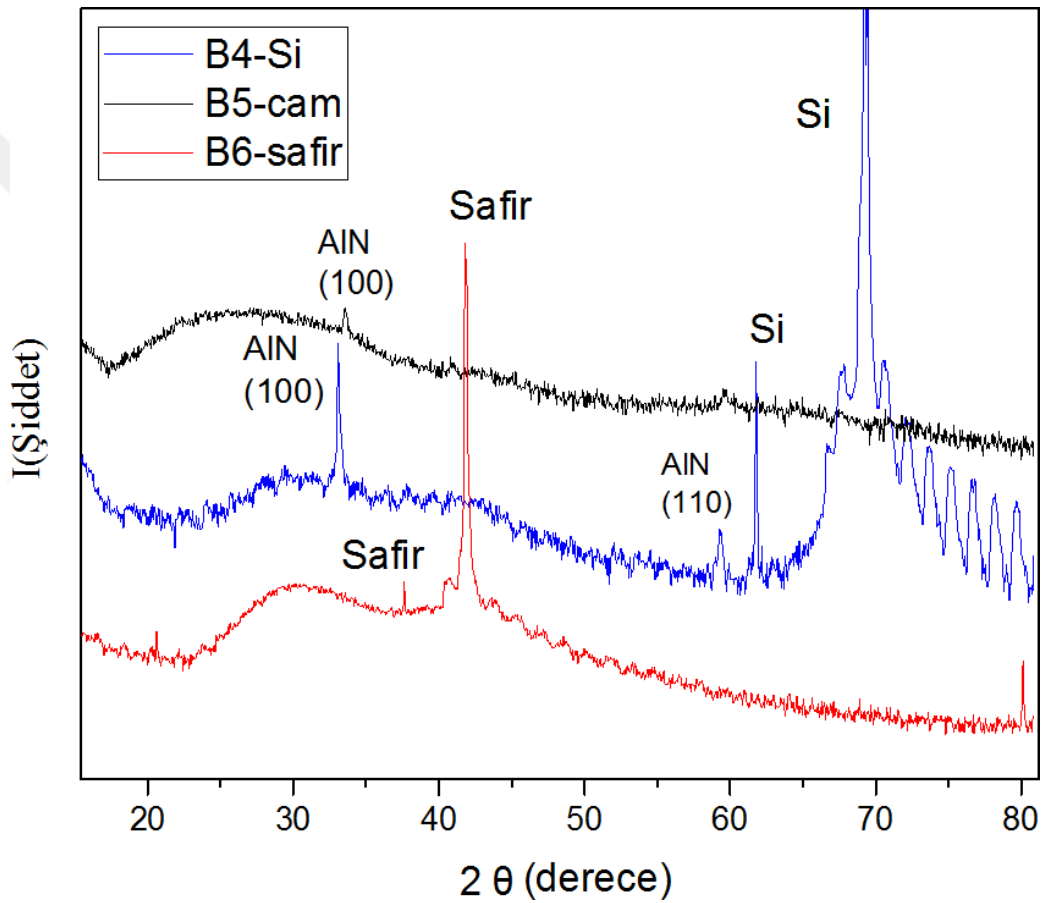
Şekil 5.2. Safir alttaş XRD ölçüm sonuçları

RF saçtırma metodu ile büyütölmeye çalışılan AlN numunelerin aynı şartlar, farklı alttaşlarda karşılaştırılması aşağıda yapılmıştır.



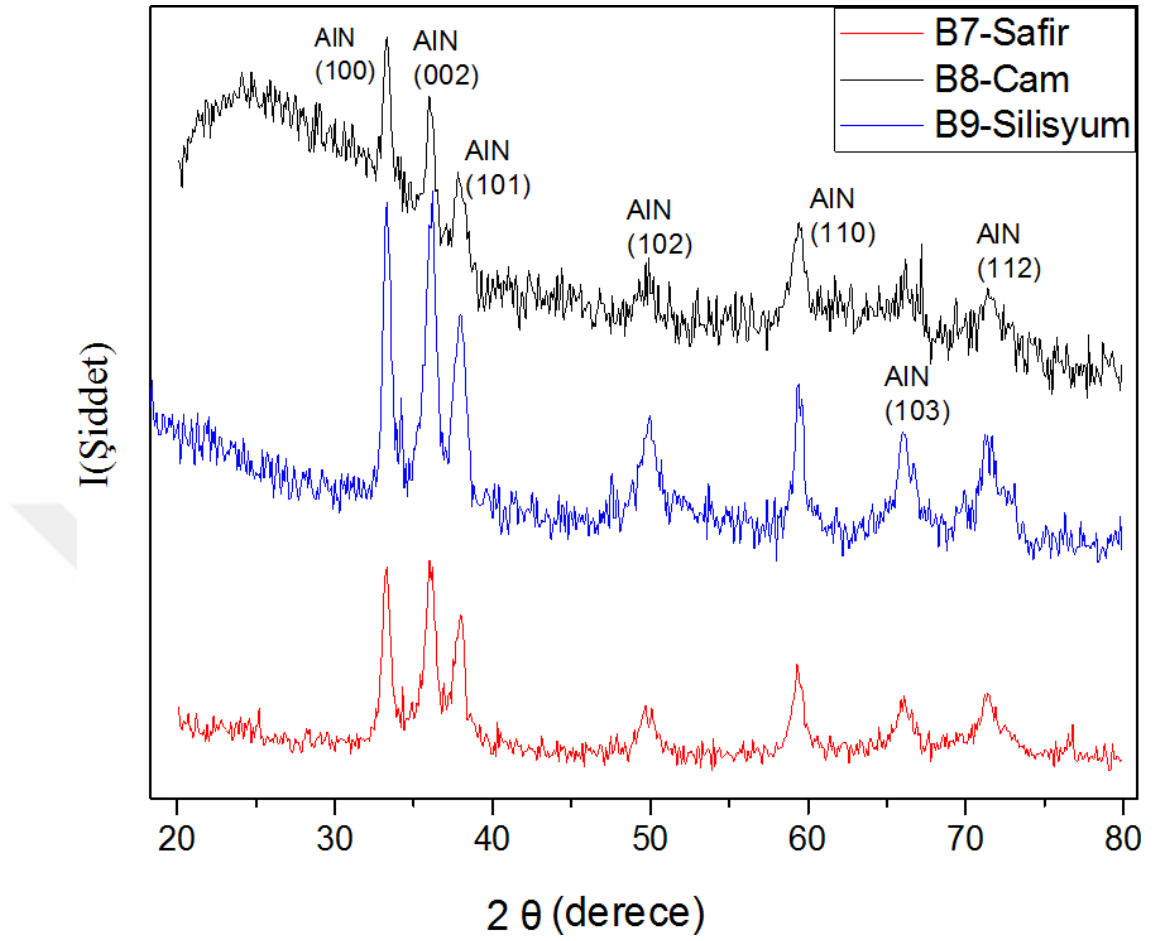
Şekil 5.3. AlN kaplı B1, B2, B3 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları

Alttaş sıcaklık değeri 350°C, RF güç kaynağı değeri 120W, Argon miktarı 100 sccm, azot miktarı 25 sccm, azot kısmi basıncı %9,64 olan aynı şartlarda büyütülen B1, B2, B3 numunelerinin XRD grafikleri bir arada çizildi. Şekil 5.3’de görüldüğü gibi AlN filmi büyütülürken alttaş oldukça önemlidir. Silisyum ve cam alttaş üzerine yapılan büyütmede (100) ve (110) yönelimleri gözlenmişken, safir üzerine yapılan büyütmede kristal yapıya ait bir pik gözlenmemiştir.



Şekil 5.4. AlN kaplı B4, B5, B6 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları

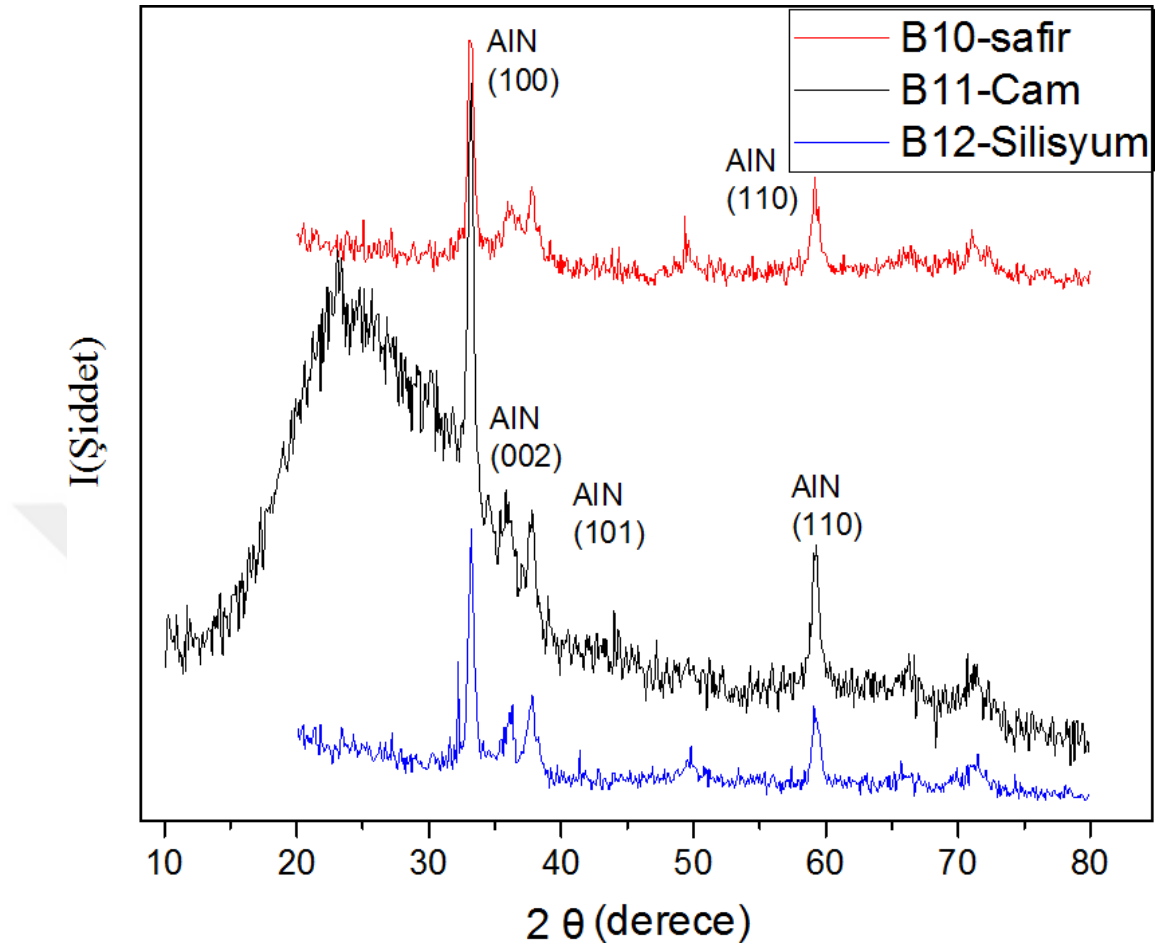
Alttaş sıcaklık değeri 350°C, RF güç kaynağı değeri 120W, Argon miktarı 100 sccm, azot miktarı 100 sccm, azot kısmi basıncı %34 olan aynı şartlarda büyütülen B4, B5, B6 numunelerinin XRD grafikleri bir arada çizildi. Şekil 5.4’deki cam ve silisyumda ortak (100) yönelimi gözükmiştir. Ayrıca silisyumda 59°’de (110) AlN gözlenmiştir. Fakat yine safirde pik oluşmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. AlN kaplı B7, B8, B9 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları

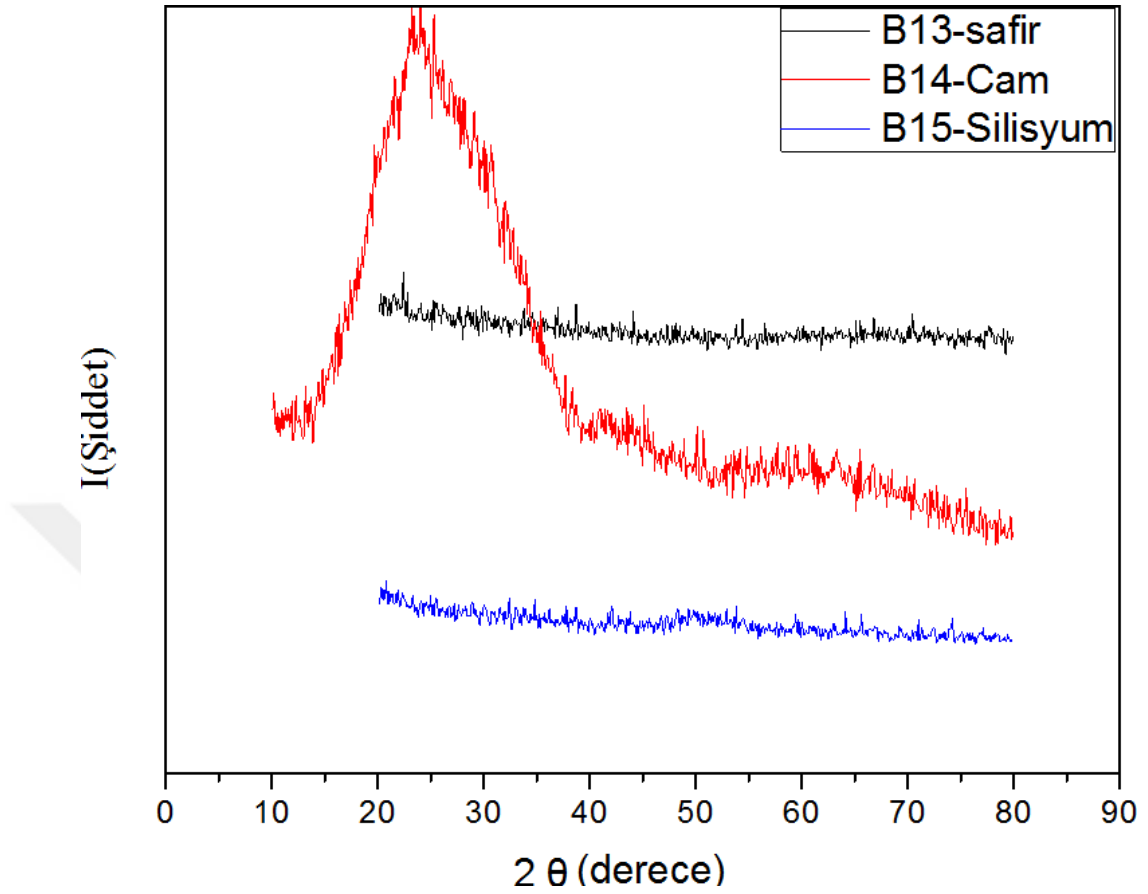
Alttaş sıcaklık değeri 350°C , RF güç kaynağı değeri 120W, Argon miktarı 100 sccm, azot miktarı 15 sccm, Azot kısmi basıncı %4 olan aynı şartlarda büyütülen B7, B8, B9 numunelerinin XRD grafikleri bir arada çizildi. Şekil 5.5’deki şekilde cam, silisyum ve safirde ortak (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) yönelimi gözükmiştir. Şekil

5.3 ile Şekil 5.5 şekilleri karşılaştırıldığında zaman tek değişiklik olan azot miktarlarının yani azot kısmi basıncının düşmesidir ve safir alttaş üzerinde büyüyen AlN ince filminin XRD sonuçlarında pik görülmesini sağlamıştır.



Şekil 5.6. AlN kaplı B10, B11, B12 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları

Altaş sıcaklık değeri 350°C, RF güç kaynağı değeri 120W, argon miktarı 200 sccm, azot miktarı 15 sccm, azot kısmi basıncı %2.63 olan aynı şartlarda büyütülen B10, B11, B12 numunelerinin XRD grafikleri bir arada çizildi. Şekil 5.6'daki şekilde cam ve silisyum ve safirde ortak (100), (002), (101), (110) yönelimi gözükmiştir. Şekil 5.5 ile Şekil 5.6 karşılaştırılırsa; azot kısmi basıncı %4'ün altına inip %2.60 civarına geldiği zaman bir önceki şartta oluşan (002) ve (110) piklerinin şiddetlerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.7. AlN kaplı B13, B14, B15 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları

Alttaş sıcaklık değeri 350°C, RF güç kaynağı değeri 120W, argon miktarı 300 sccm, azot miktarı 15 sccm, Azot kısmi basıncı %2.1 olan aynı şartlarda büyütülen B13, B14, B15 numunelerinin XRD grafikleri bir arada çizildi. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi herhangi bir pik oluşumu gözlemlenememiştir.

Farklı alttaşlarda, birçok şartta AlN pikleri gözükmiştir fakat üç alttaş için de en uygun büyütme parametreleri B7, B8, B9 numunelerine ait 100 sccm argon ve 15 sccm azot eklenerek yapılan büyütmedir. Önemli olan azot kısmi basıncın %4 civarı olduğu şarttır ve farklı alttaşlar için uygunluğu da test edilmiştir.

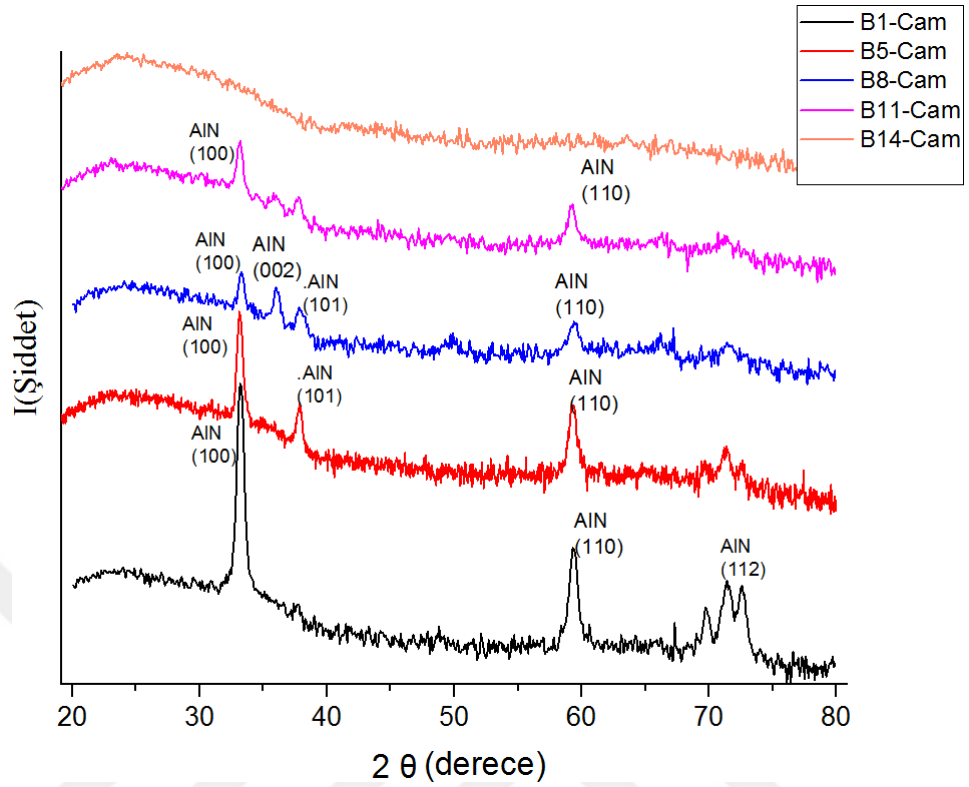
RF saçtırma metodu ile büyütülmeye çalışılan AlN numunelerin aynı alttaş, farklı şartlarda karşılaştırılması yapılırken;

Aynı cins cam alttaş üzerine RF magnetron yöntemi ile büyütülen B1, B5, B8, B11, B14 filmlerine XRD sonuçları Şekil 5.8’de verilmiştir. Sıcaklık değeri 350°C’de RF güç kaynağı 120 W da sabit tutularak azot ve argon değerleri değiştirilmiş elde edilen değerler tablo halinde Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Aynı şartlar altında cam alttaş numunelerinin değişken parametreleri

CAM	B1	B5	B8	B11	B14
Argon miktarı (sccm)	100	100	100	200	300
Azot miktarı (sccm)	25	100	15	15	15
Azot kısmi basıncı (%)	9,64	34	4	2,63	2,1
Büyütme basıncı (mtorr)	14,42	20,65	13,96	20,47	28,38

Cam alttaşı için B1 numunesinden B5 numunesine kadar azot değeri artırılmıştır. İnce filmlerinde bir iyileşme gözlenememiştir ve genel olarak amorf kristal yapıda filmler oluşmuştur. Azot değerinin B1 numunesine göre azaltılması denendiği zaman kristal yapının daha iyi olduğu görüldü. Azot azalmasının getirdiği avantaj azot kısmi basıncına bağlanmıştır ve basınç değeri azalmıştır. Azot kısmi basıncını azaltmak için Azot akış oranı sabit tutulup Argon akış oranı arttırılmıştır. Giderek artan argon sebebiyle B11 ve B14 numunelerinde olduğu gibi daha fazla amorfleşme gözlemlendi. XRD sonuçlarına bakılarak azot kısmi basıncı %4 civarında ve büyütme basıncı en düşük şartta gözlenen XRD sonuçları optimum değer seçilmiştir.



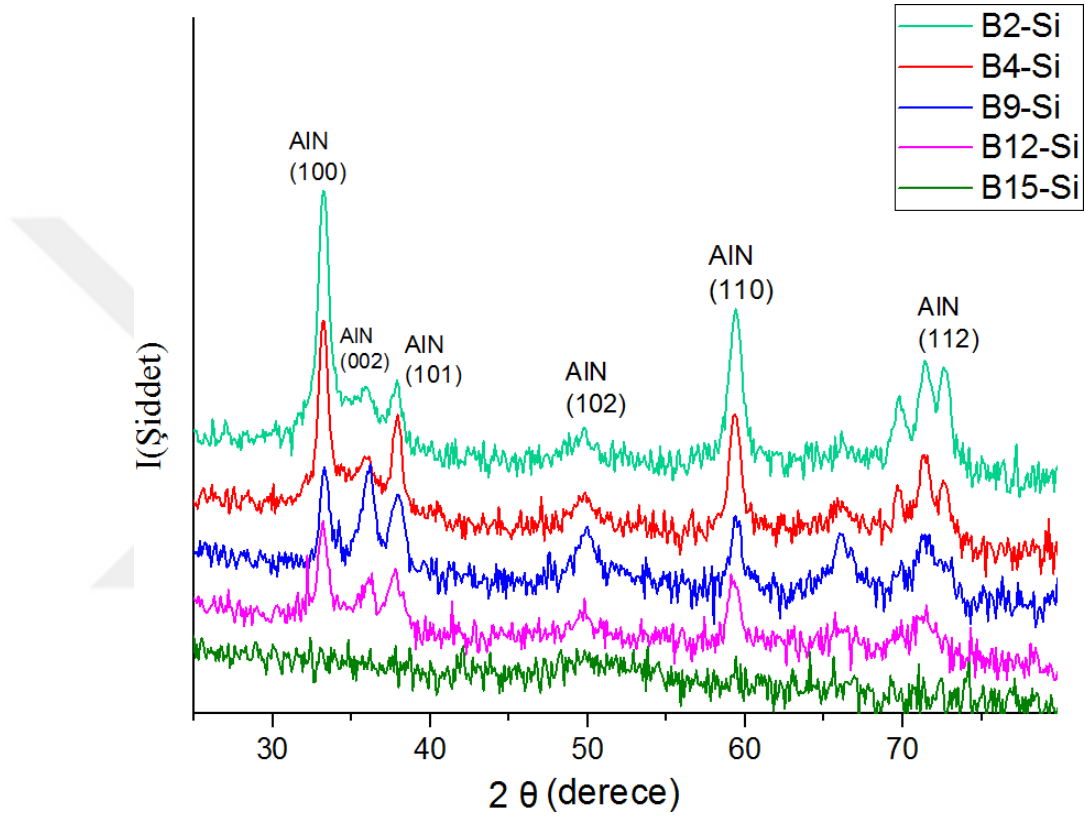
Şekil 5.8. Farklı şartlarda ve aynı cins cam alttaş numunelerinin XRD sonuçları

Aynı tür silisyum alttaş üzerine RF magnetron yöntemi ile büyütülen B2, B4, B9, B12, B15 filmlerine XRD ölçüm sonuçları Şekil 5.9’da verilmiştir. Sıcaklık değeri 350°C’de RF güç kaynağı 120 W da sabit tutularak azot ve argon değerleri değiştirilmiş elde edilen değerler tablo halinde Çizelge 5.3’de sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Aynı şartlar altında silisyum alttaş numunelerinin değişken parametreleri

SİLİSYUM	B2	B4	B9	B12	B15
Argon miktarı (sccm)	100	100	100	200	300
Azot miktarı (sccm)	25	100	15	15	15
Azot kısmi basıncı (%)	9,64	34	4	2,63	2,1
Büyütme basıncı (mtorr)	14,42	20,65	13,96	20,47	28,38

Şekil 5.9’da görüldüğü üzere bu şartlarda, altaş olarak denen en üç malzemeden en uygun olanı Silisyum altaşı olmuştur. Argon miktarı çok fazla olan B15 numunesi haricinde diğer numunelerde AlN piklerine rastlanmıştır. Pikler üst üste çizildiği için yönelimleri sadece en üstte olan B2 numunesine yazılmıştır.



Şekil 5.9. Farklı şartlarda ve aynı cins silisyum altaş numunelerinin XRD sonuçları

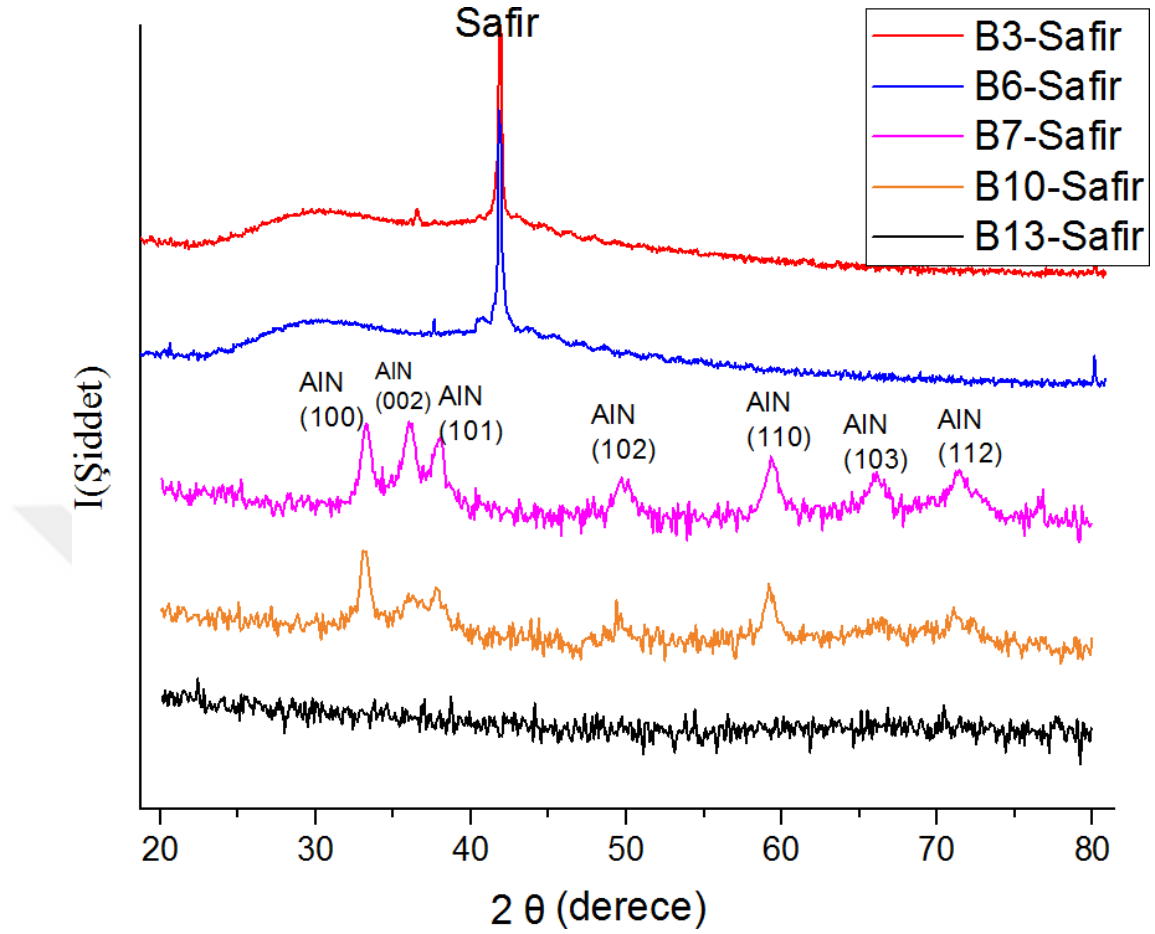
Aynı tür safir altaş üzerine RF magnetron yöntemi ile büyütülen B3, B6, B7, B10, B13 filmlerine XRD ölçümleri Şekil 5.10’da verilmiştir. Sıcaklık değeri 350°C’de RF güç kaynağı 120 W da sabit tutularak azot ve argon değerleri değiştirilmiş elde edilen değerler tablo halinde Çizelge 5.4’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Aynı şartlar altında safir alttaş numunelerinin değişken parametreleri

SAFİR	B3	B6	B7	B10	B13
Argon miktarı (sccm)	100	100	100	200	300
Azot miktarı (sccm)	25	100	15	15	15
Azot kısmi basıncı (%)	9,64	34	4	2,63	2,1
Büyütme basıncı (mtorr)	14,42	20,65	13,96	20,47	28,38

Şekil 5.10'a bakıldığında kısmi basınçların %4'den %34'e artırıldığında yapıda daha fazla amorflaşma gözlemlenmiştir. Kristal oluşabilmesi için azot kısmi basıncının

%4'den %2,1 seviyelerine indirilmesi yine oluşan kristal yapının bozulmasına sebep olmuştur. Safir içinde en iyi parametre B7 numunesinin parametresi olmuştur.



Şekil 5.10. Farklı şartlarda ve aynı cins silisyum alttaş numunelerinin XRD ölçüm sonuçları

Sonuç olarak bakıldığı zaman Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 resimlerine bakıldığı zaman AlN ince filmi büyütülürken üç alttaş içinde optimum şart; sıcaklığın 350°C, RF güç kaynağı 120W, 100 sccm argon miktarı, 15 sccm azot miktarı, büyütme basıncı

13.96 mtorr, azot kısmi basıncı ise yaklaşık %4 olan şart seçilmiştir ve elde edilen numunenin şartı ile ilk adım yapılmış olmaktadır.

5.2. GaN İnce Filmi XRD Sonuçları ve Tartışma

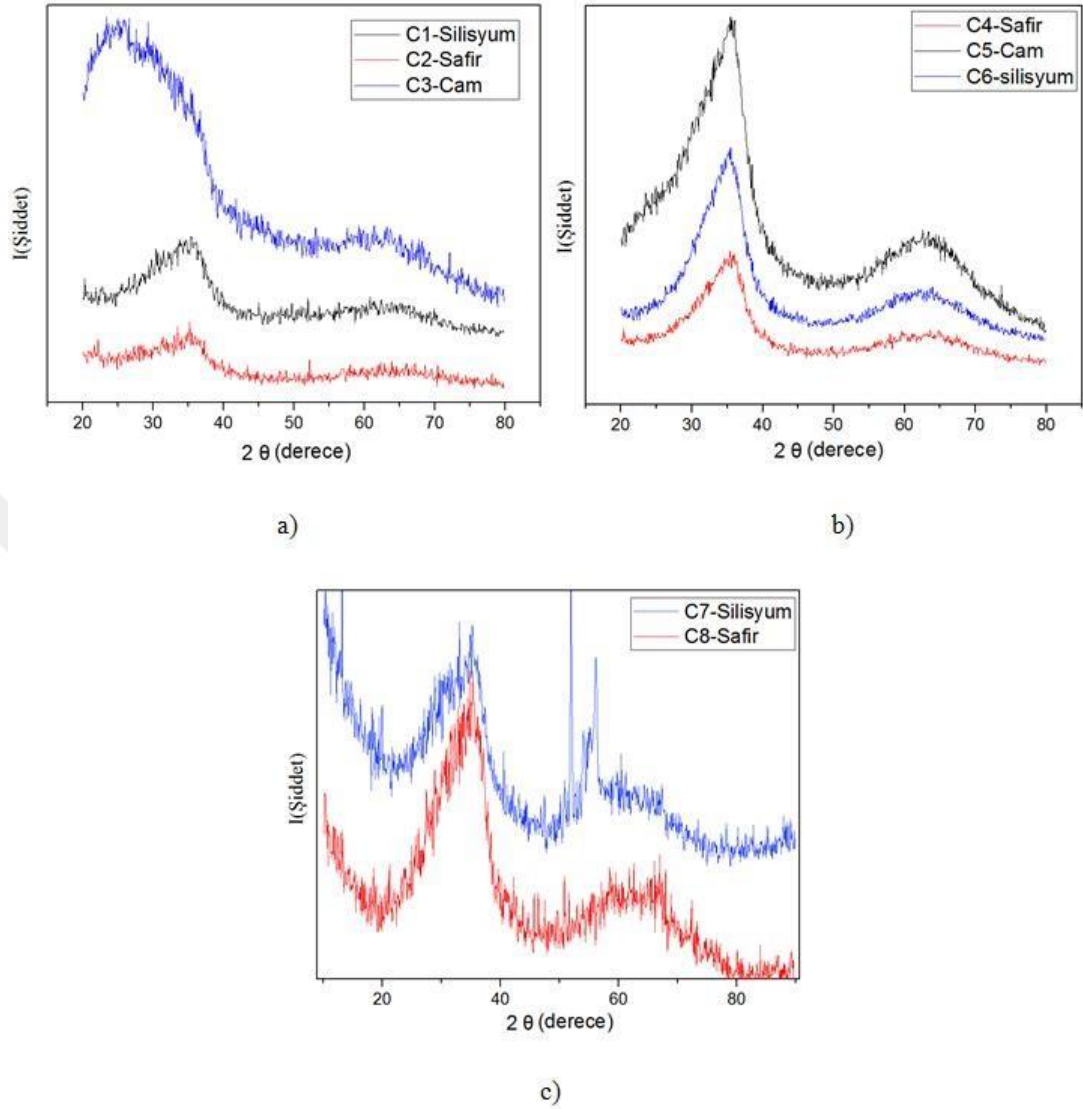
İkinci basamak olan GaN ince film büyütme aşamasında belirlenen on tane numune bulunmaktadır. GaN elde edilebilecek şarta ulaşana kadar birçok başarısız deneme

olmuştur. Bütün şartlar teze konulamamış olup aralarından belli aralıkta bulunan numuneler seçilmiştir. Elde edilen numunelerin alttaşa ve büyütme şartlarına bağlı XRD grafikleri aşağıda verilmiştir

Çizelge 5.5. GaN malzemesi miller indisi ve dereceleri (Zajac 2001 ; Chaaben 2006)

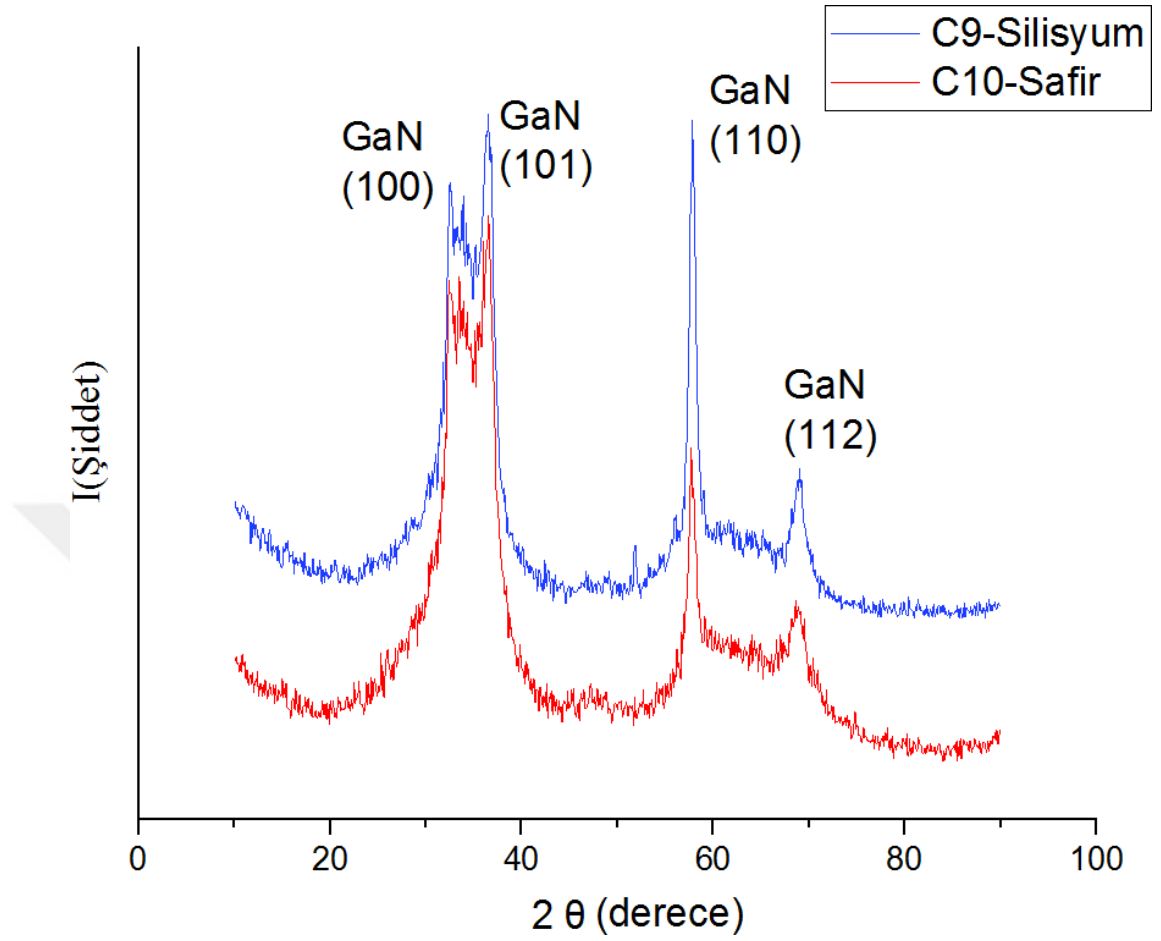
Malzeme adı	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN	GaN
Derecesi 2 θ	32,5	34,5	36	48	58	63,5	65	69	70	73
Yönelimi	(100)	(002)	(101)	(102)	(110)	(103)	(200)	(112)	(201)	(004)

Alttaş sıcaklık değeri 330°C, RF güç kaynağı değeri 110W sabit tutarak, argon miktarı 200 sccm, azot miktarı 20 sccm, azot kısmi basıncı %2.5 ile ayarlanan şartlarda C1, C2, C3 numuneleri; argon miktarı 100 sccm, azot miktarı 15 sccm, azot kısmi basıncı %4,43 ile ayarlanan şartlarda C4, C5, C6 numunleri ve alttaş sıcaklığı 325°C, RF güç kaynağı 50 W argon miktarı 100 sccm, azot miktarı 15 sccm, azot kısmi basıncı %3,6 ile ayarlanan şartlarda C7, C8 numunelerin XRD ölçümleri Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. GaN kaplı a) C1, C2, C3 filmlerinin b) C4, C5, C6 c) C7, C8 filmlerinin XRD ölçüm sonuçları

Şekil 5.11’de AlN’ın şartlarına göre denenmiş GaN numunelerinde amorf yapılar gözlenmiştir. Sıcaklık 350°C’de RF güç kaynağı 120 W’da azotca zengin GaN ince filmi büyütülmesi denendi. Bundan önceki şartlarda pik görülmemişken argon seviyesi düşürülen bu numunede GaN’a ait pikler gözlemlendi. Şekil 5.12’deki verilere bakıldığında kısmiazot miktarı yüksek olduğu zaman büyütme basıncını düşük tutulabilinmesi halinde GaN’a ait pikler görmekteyiz. Biz bu şartı argon miktarını oldukça düşürüp azot miktarını yükseltmeye çalışarak elde edebildik.



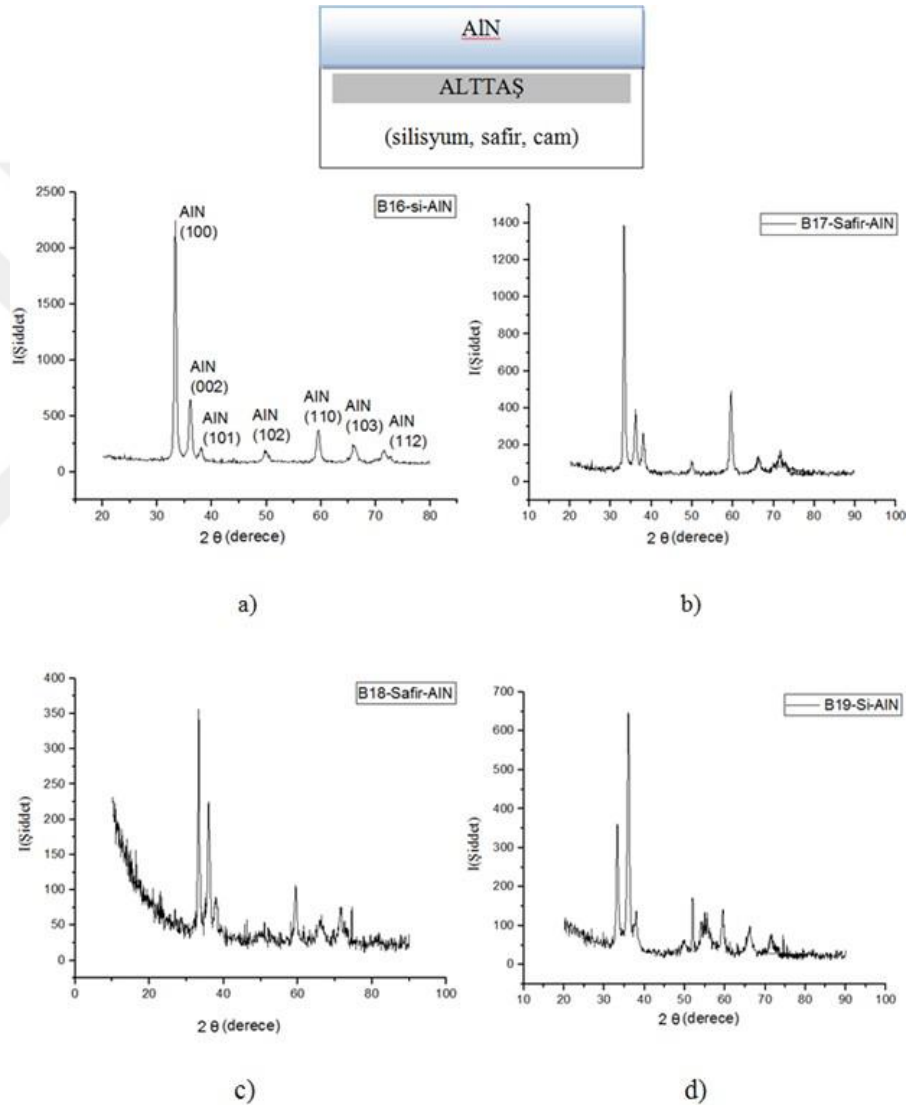
Şekil 5.12. GaN kaplı C9 ve C10 numunelerinin XRD ölçüm sonuçları

Şimdiye kadar bulunan AlN'in şartları ile GaN'ın şartları elde edilen en iyi numunelerin şartı olarak kabul edilmiştir. Bu kısımda sunulan sonuçlar ikinci basamağı oluşturmaktadır.

5.3. AlN Tampon Üzerine GaN filmi XRD Sonuçları ve Tartışma

İlk aşamada AlN ince filminin kristal oluşması için farklı şart ve alttaş arasından tampon olabilecek en ideal şart seçilmişti. İkinci aşamada ise GaN ince filmleri için aynı yol izlendi ve GaN filmi için en ideal şart seçildi. Üçüncü yani şimdiki aşamada ise AlN tampon varlığının GaN filmi büyütürken kristal yönden fayda sağladığını göstermekteyiz.

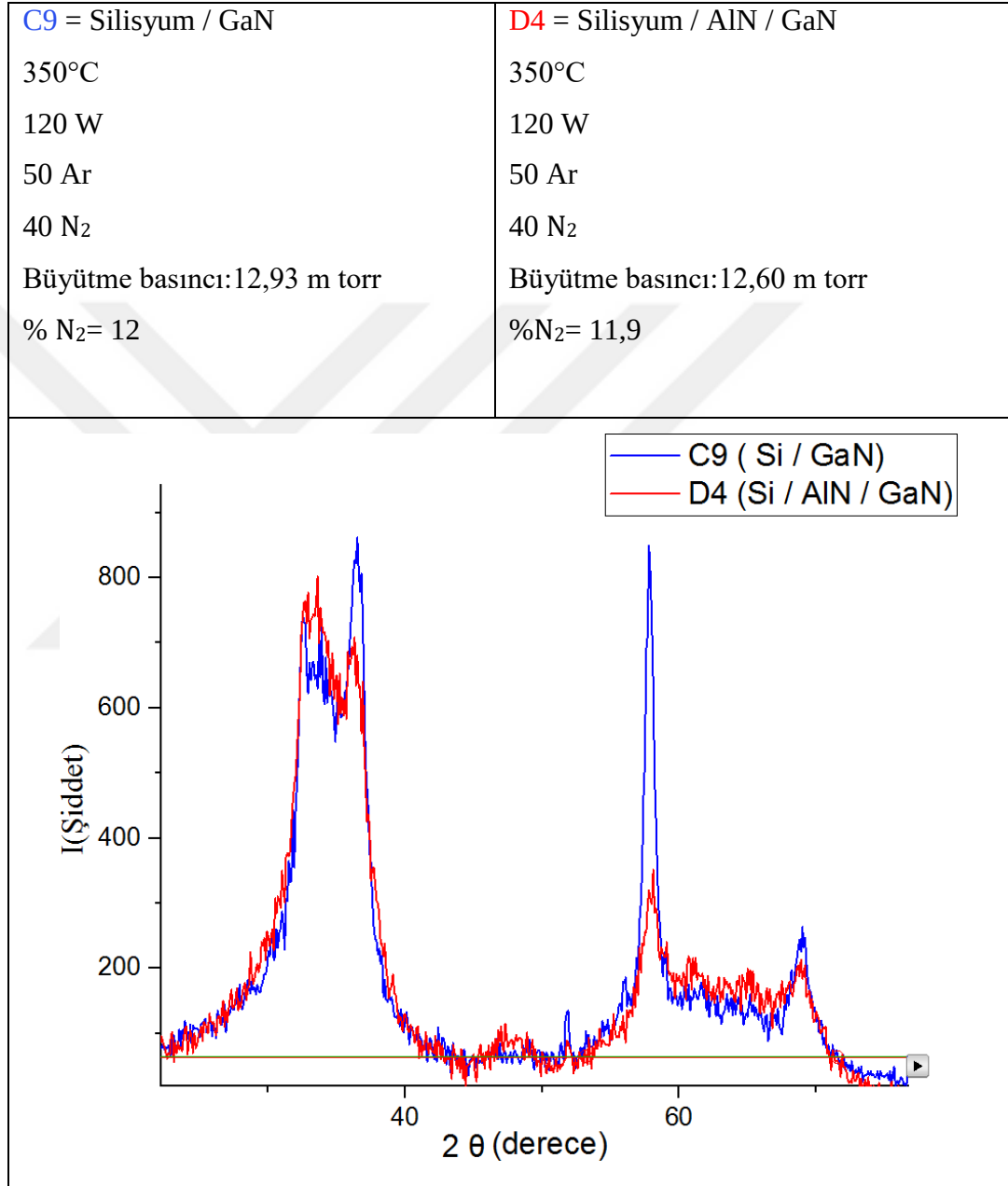
Optimum olarak belirlenen şartlara göre öncekilerden ayrı dört AlN filmi daha büyütüldü ve bunların XRD ölçüm sonuçları Şekil 5.13 verilmiştir. Tavlamanın piklerin yönelimlerini yada yarı maximum genişliklerini değişip değişmediğini görmek için B16 ve B17 numuneleri 400 C'de bir saat tavlannmıştır. Görüldüğü üzere numunelerin aynı altaşlar olanların da neredeyse aynı yönelimler gözükmüştür.



şekil 5.13. B16, B17, B18 B19 isimli, optimum aşartlarda büyütülmüş AlN tampon tabakaların XRD grafikleri

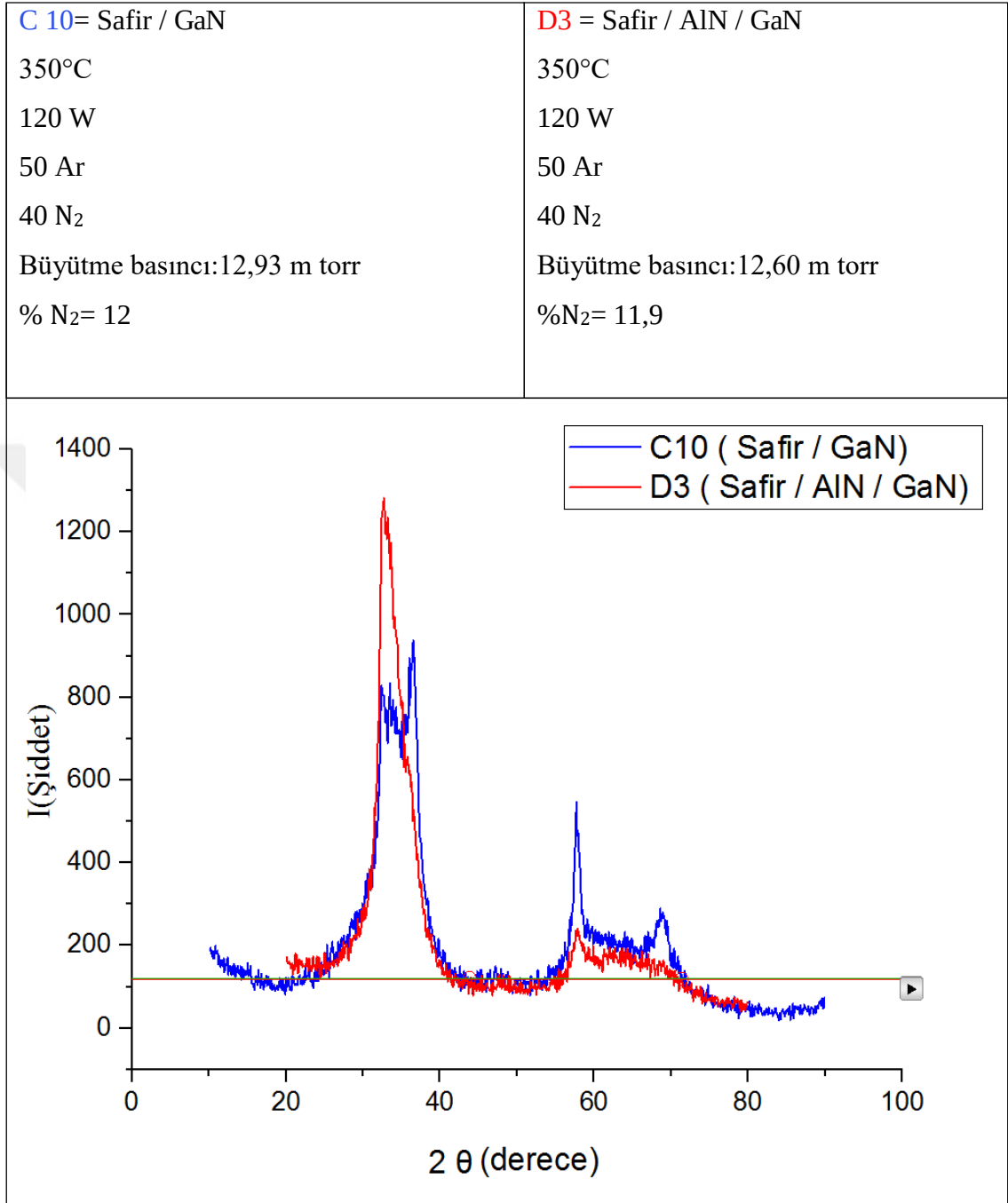
Araştırma bulgularında şartları ve XRD grafikleri verilen D1, D2, D3, D4 numunelerindeki AlN tampon varlığının karşılaştırılmasını yaparsak aynı şartlarda veya

aynı alttaşlarda AlN tampon üzerine büyütölen GaN filmleri ile tamponsuz büyütölen GaN filmlerine incelemeliyiz.



Şekil 5.14. C9 ve D4 filmleri XRD ölçüm sonuçları

Yukarıdaki şekilde göröldüğü üzere AlN tampon varlığı ile iki numune arasında çok az da olsa kayma meydana gelmiştir. Bu kayma bize AlN üzerine GaN büyütebildiğimizi göstermektedir.



Şekil 5.15. C10 ve D3 filmleri XRD ölçüm sonuçları

C10 ile D3 XRD ölçüm sonuçlarına bakılırsa pikler arası kayma oldukça gözükmektedir. Bu kayma GaN büyütülebildiği anlamına gelmektedir. AlN tamponu ile büyütülen D3 filminin 60 ve 65 derecelerdeki AlN piklerinde kötüleşme gözükmektedir.

5.4. AlN Numunelerinin AFM Görüntü Sonuçları ve Tartışma

Farklı şartlar altında büyütülen AlN ince filmlerinin AFM görüntüleri araştırma bulgularında verildi. AFM görüntülerinde karşılaştırma yapmak için gerekli parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler şu şekildedir;

- S_a = Yüzeysel pürüzlülük
- R_a = çizgi boyunca pürüzlülük
- R_q / RMS = ortalama çizgisel pürüzlülük
- S_q / RMS = Ortalama yüzey pürüzlülüğü
- S_z / S_{max} = Yüzey pürüzlülüğü yüksekliği

Çizelge 5.6. AlN filmlerinin AFM görüntülerinden elde edilen bazı parametreler

Adı	Azot kısmi basıncı (%)	Büyütme basıncı (m torr)	S_a	R_a	R_q / RMS	S_q / RMS	S_z / S_{max}
B1 Cam	9,64	14,42	3,15	3,81	5,43	4,37	32,1
B2 Si	9,94	14,42	1,85	1,93	2,96	2,69	21,8
B3 Safir	9,94	14,42	4,07	5,15	5,82	7,88	95
B4 Si	34	20,65	2,07	4,46	8,41	3,25	52,86
B5 Cam	34	20,65	3,31	4,28	5,88	4,86	60,6
B6 Safir	34	20,65	13,26	6,51	8,09	27,34	314,7
B7 Safir	4	13,40	3,78	4,19	4,97	4,75	33,38
B8 Cam	4	13,40	1,31	1,15	1,41	1,65	13,17

Çizelge 5.6. (devam)

B9 Si	4	13,40	1,17	0,83	1,05	1,5	11
B10	2,63	19,96	4,42	3,4	4,32	5,86	63,22

Safir							
B11 Cam	2,63	19,96	44,7	0,61	1,13	0,64	12
B12 Si	2,63	19,96	4,42	1,96	2,42	0,58	11,5
B13 Safir	2,1	27,79	3,75	2,6	3,54	4,82	41,4
B14 Cam	2,1	27,79	2,44	1,79	2,46	3,4	27,17
B15 Si	2,1	27,79	47,8	0,35	0,47	0,67	8,7

Aynı şartlarda farklı alttaşlarda büyütülen numunelerin AFM sonuçlarından elde edilen verilere göre Sq / RMS karşılaştırması

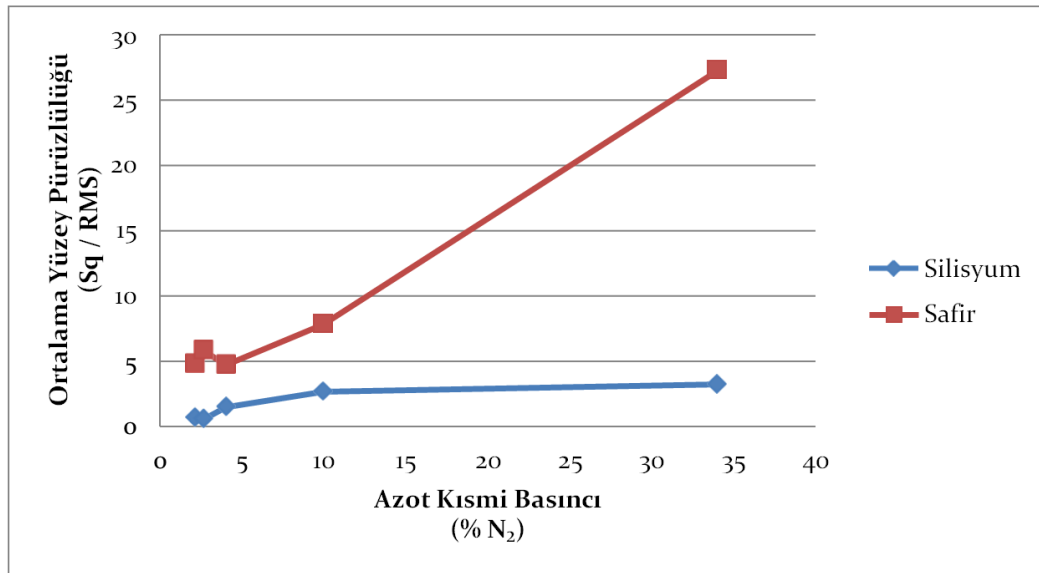
- B1, B2, B3 numunelerinin AFM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre sırası ile ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sq / RMS) 4,37 nm, 2,69 nm ve 7,88 nm olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü Silisyum alttaşında büyüyen numunede olduğu görülmektedir.
- B4, B5, B6 numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü sırası ile 3,25 nm, 4,86 nm, 27,34 olarak ölçülmüştür. Bu şart için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü Silisyum alttaşında büyüyen numunede olduğu görülmüştür.
- B7, B8, B9 numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü 4,75 nm, 1,65 nm, 1,5 nm olarak ölçülmüştür. Bu şart için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü silisyum alttaşında büyüyen numunede olduğu görülmüştür.
- B10, B11, B12 numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 5,86 nm, 0,64 nm, 0,58 nm olarak ölçülmüştür. Bu şart için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü silisyum alttaşında büyüyen numunede olduğu görülmüştür.
- B13, B14, B15 numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 4,82 nm, 3,4 nm, 0,67 nm olarak ölçülmüştür. Bu şart için en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü silisyum alttaşında büyüyen numunede olduğu görülmüştür.

Yukarıdaki tüm numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüklerine bakılınca her şartta en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü silisyum alttaşında büyütülen numunelerde

gözenmiştir. Bu da silisyum numunesi üzerinde daha az pürüzlü yapılar oluşturmak diğer altaşlara göre daha kolay olduğunu göstermektedir. Aynı şartlara bakıldığı zaman safir altaş için tam tersi durum mevcuttur. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip olan numuneler safir altaşta büyütülmüştür.

Silisyum altaşlarda büyütülen AlN filmlerinden en düşük Sq / RMS'i olan numune B12 (0,58nm) numunesine aittir ve azot kısmi basıncı %2.63, en yüksek Sq / RMS olan numune ise B4 (3.25 nm) numunesine aittir ve azot kısmi basıncı %34'dür. Şekil 5.16'da görüldüğü üzere % N₂ oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.

Safir altaşlarda büyütülen AlN filmlerinden en düşük Sq / RMS'i olan numune B7 (4,75nm) numunesine aittir ve azot kısmi basıncı %4, en yüksek Sq / RMS olan numune ise B6 (27,34nm) numunesine aittir ve azot kısmi basıncı %34'dür. Bu değerlerden görülmektedir ki % N₂ oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.



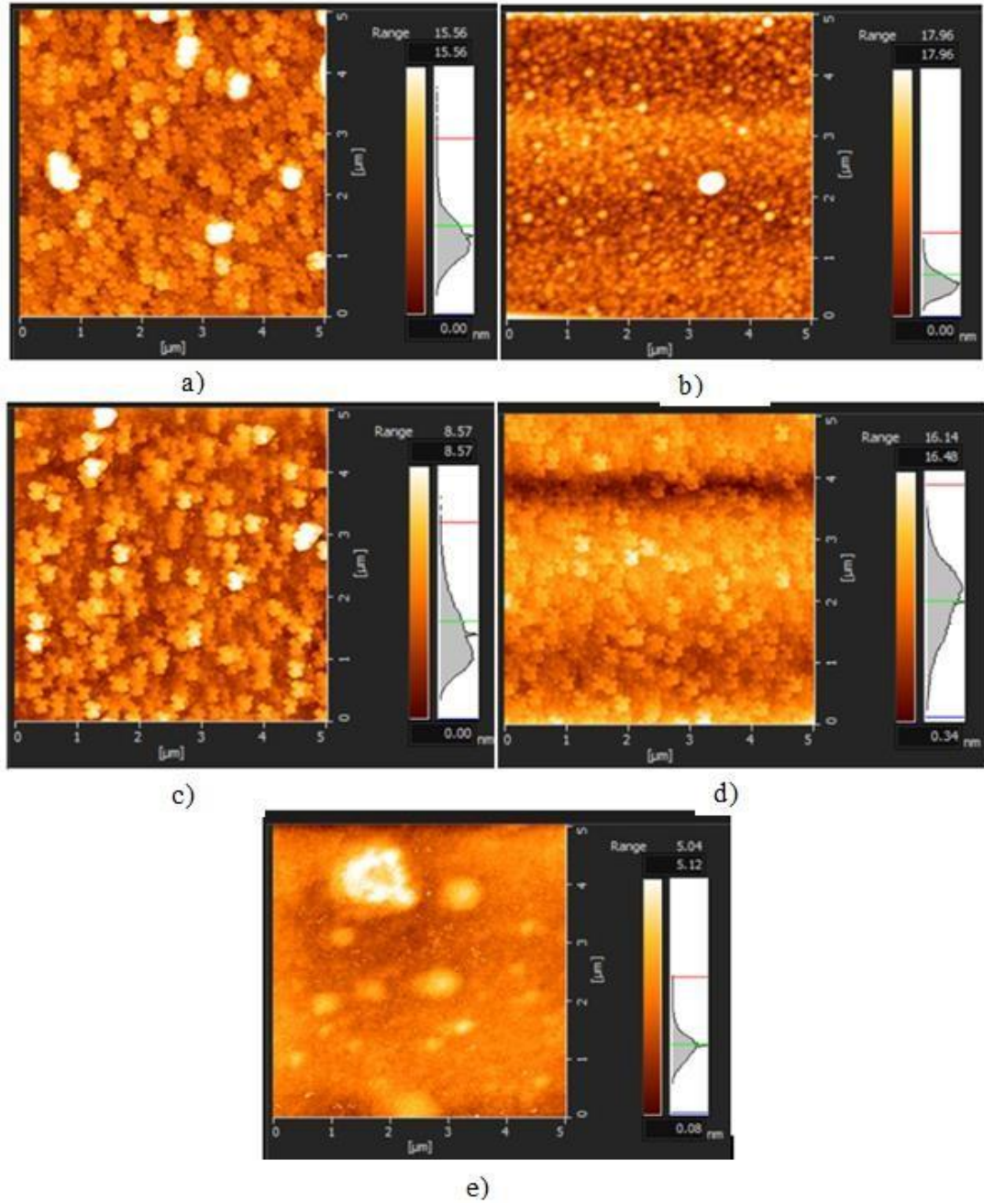
Şekil 5.16. Kısmi basınç ile ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği

Cam altaşlarda büyütülen AlN filmlerinden en düşük Sq / RMS'i olan numune B11 (0,64) numunesine aittir ve azot kısmi basıncı %2,63, en yüksek SQ / RMS olan

numune ise B5 (4,86) numunesine aittir ve azot kısmi basıncı %34'dür. Bu değerlerden görülmektedir ki %N₂ oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.

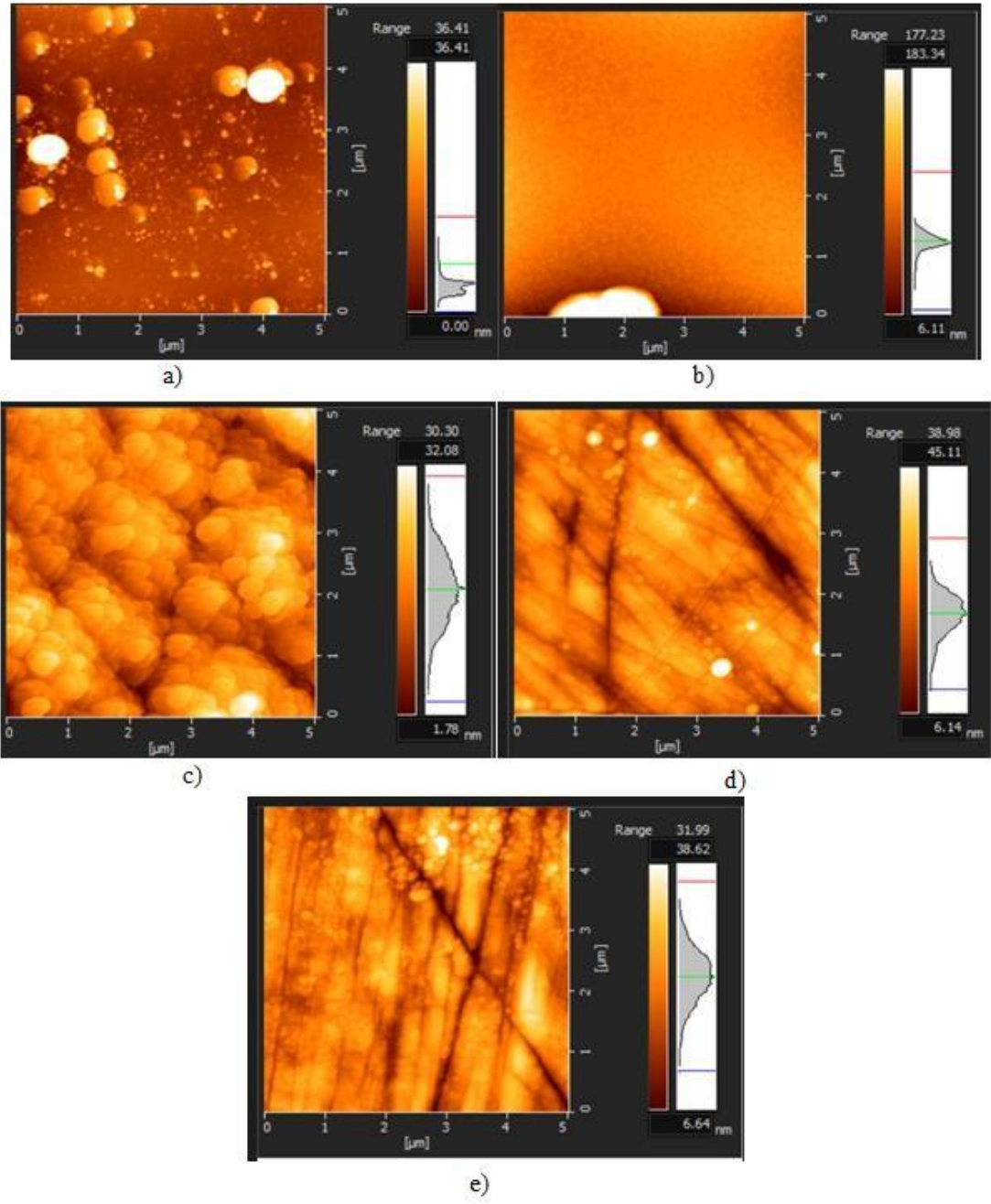
Genel olarak kısmi azot basıncı oranı en yüksek olan %34 değeri tüm şartlar için en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sebep olmuştur.





Şekil 5.17. AlN filmlerinden silisyum alttaşıda büyütülen a) B2 numunesinin, b) B4 numunesinin, c) B9 numunesinin, d) B12 numunesinin, e) B15 numunesinin AFM görüntüleri

Şekil 5.17'deki AFM görüntüleri 5x5 ölçüm aralığı kullanılarak alınmıştır. Resimlerin yanlarında bulunan renk skalasında en yüksek alanlar en açık, en düşük alanlar en koyu olarak gösterilmektedir. Yani Şekil 5.17'da a) numunesinde en yüksek nokta ile en düşük nokta arası 15,56 nm'yi göstermektedir.



Şekil 5.18. AlN filmlerinden safır alttaşıda büyütülen a) B3 numunesinin, b) B6 numunesinin, c) B7 numunesinin, d) B10 numunesinin, e) B13 numunesinin AFM görüntüleri

Şekil 5.18’de görüldüğü üzere B3 ve B6 numunesinde kristal sayılan büyümeler gözlenmemektedir. B7 numunesinde yuvarlak sayılabilecek tanecikler oluşmuştur. Bu tanecikler adacık halinde birikirken dislokasyon sayılabilecek çatlakları oluşturmuştur.

Bu çatlaklar muhtemelen malzeme gerilmesi sonucu kırılıp kendini göstermiştir. Bu numunede çatlaklı yapıların derinliği yaklaşık olarak 25-30 nm arasındadır.

B 10 ve B13 numunelerinde ise yine çatlaklar oluşmuştur ama daha keskin şekilde gözükmemektedir. Dalgalı yapıda büyüyen bu numunelerde oluşan derin çatlakların boyutları yaklaşık olarak 30nm civarındadır ve oluşan yapı diğer numunelere dik piklerin azaldığı dalgalı yapı olarak gözükmemektedir.

5.5. GaN Numunelerinin AFM Görüntü Sonuçları ve Tartışma

Farklı şartlar altında büyütülen GaN ince filmlerinin AFM görüntüleri araştırma bulgularında verildi. AFM görüntülerinde karşılaştırma yapmak için gerekli parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler şu şekildedir;

- S_a = Yüzeysel pürüzlülük
- R_a = çizgi boyunca pürüzlülük
- R_q / RMS = ortalama çizgisel pürüzlülük
- S_q / RMS = Ortalama yüzey pürüzlülüğü
- S_z / S_{max} = Yüzey pürüzlülüğü yüksekliği

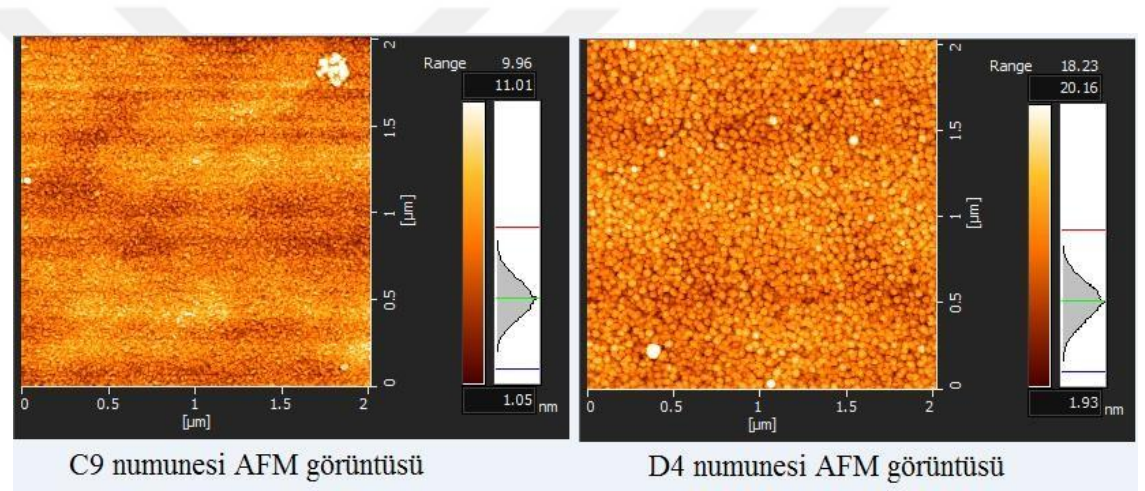
Çizelge 5.7. Bazı GaN filmlerinin AFM görüntülerinden elde edilen parametreler

Adı	Azot kısmi basıncı (%)	Büyütme basıncı (m torr)	S_a	R_a	R_q / RMS	S_q / RMS	S_z / S_{max}
C7 Silisyum	3,6	14,23	0,24	0,185	0,23	0,31	2,95
C8 Safir	3,6	14,23	3,86	2,49	3,1	4,9	23,9
C9 Silisyum	12	12,93	1,1	0,82	0,99	1,43	19,7
C10 Safir	12	12,93	3,20	3,18	3,84	5,1	27,3

Farklı alttaş kullanılan numuneler azot kısmi basınçları ve ortalama yüzey pürüzlülüğü bakımından karşılaştırıldığı zaman silisyum alttaşında ve safir alttaşında azot kısmi basıncı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir.

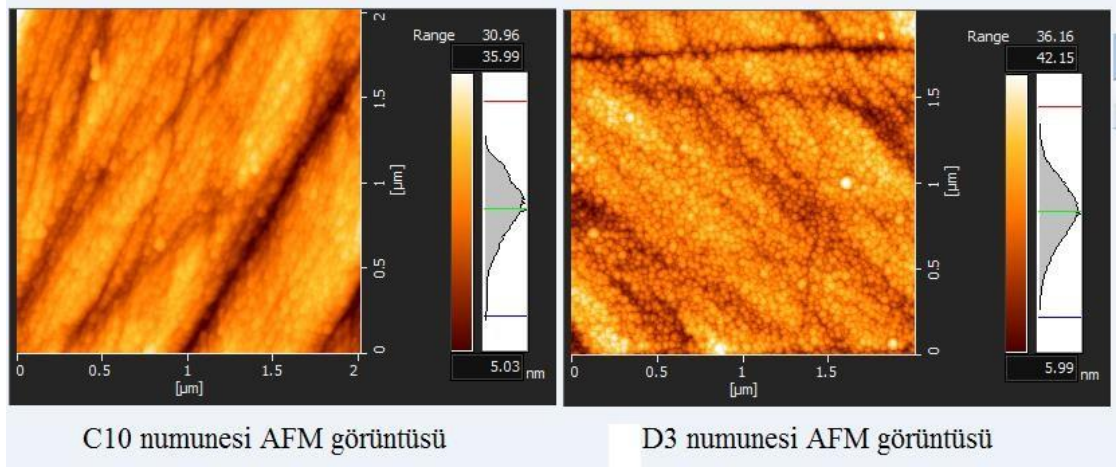
Yüzeylerdeki pürüzlülüğe bakılacak olunursa safir alttaş üzerine büyütülen GaN filmlerinin oranı silisyum alttaşlardan daha yüksek çıkmaktadır

5.6. AlN Tampon Üzerine GaN Filmlerinin AFM Götüntü Sonuçları ve Tartışma



Şekil 5.19. Tampon tabaka kullanılmayan (a) ve kullanılan (b) silisyum alttaşlarında büyütülen GaN filmleri görüntüsü

Yukarıdaki şekilden görülen AFM görüntüleri numuneler aynı şartlar altında aynı chamber içerisinde AlN tampon tabakası olan ve olmayan alttaşlar üzerine büyütülen GaN örneklerini göstermektedir. Şekil 5.19’da görüldüğü üzere AlN tampon malzemesi kullanılarak büyütülen GaN filmlerinin tanecik yapıları, tampon kullanılmayan GaN filmlerine oranla iyileşmiştir. Tanecik yapıların uzunlukları verilen görüntülerin yanlarında bulunan skalaya bakılarak tampon kullanılan malzemede yaklaşık beş kat arttığı gözükmemektedir.



Şekil 5.20. Tampon tabaka kullanılmayan (a) ve kullanılan (b) safir alttaşlarında büyütülen GaN filmleri görüntüsü

Yukarıdaki şekilden görülen numuneler aynı şartlar altında aynı chamber içerisinde büyütülen numuneleri göstermektedir. Şekil %.20’de görüldüğü üzere AlN tampon malzemesi kullanılarak büyütülen GaN filmlerinin tanecik yapıları, tampon kullanılmayan GaN filmlerine oranla iyileşmiştir. Tanecik yapıların uzunlukları verilen görüntülerin yanlarında bulunan skalaya bakılarak tampon kullanılan malzemeye göre az oranda büyüdüğü görülmektedir.

Genel olarak tüm safir numunelerinde çatlaklar meydana gelmiştir. AlN tamponu kullanılan GaN numunelerinin çatlak boyları yaklaşık 30 nm’yi gösterirken tampon kullanılmayan GaN filmlerinde ise yaklaşık olarak 15 nm’yi göstermektedir.

5.7. AlN İnce Filmi SEM Sonuçları ve Tartışma

Aşağıdaki çizelgede çubuk şeklinde gözükabilen yapıların ortalama boyutlarını azot ve argon miktarları ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.8. AlN numunelerinden bazılarının parametreleri

Numuneler	Argon (sccm)	Azot (sccm)	Azot kısmi Basınç (%)	Ortalama tanecik büyüklüğü
Şekil 4.17 Cam	100	25	9,94	130 nm
Şekil .4.18 Silisyum	100	25	9,94	100 nm
Şekil .4.19 Safir	100	25	9,94	Amorf
Şekil .4.20 Silisyum	100	100	34	120 nm
Şekil .4.21 Cam	100	100	34	95 nm
Şekil .4.22 Safir	100	100	34	Adacık

Yukarıdaki çizelgeye göre kısmi basınç değerleri arttığı zaman silisyum alttaşılar üzerine büyüyen filmlerde taneciklerin ortalama boyutları azalırken, cam alttaşılar da büyüyen numunelerde tanecik boyutları artmıştır. Safir alttaşılarında ise çubuk şeklinde yapılar görülmemiştir. Daha sonraki numunelerin SEM görüntülerinde ise genel olarak adacık halinde büyüyeabilen AlN filmleri görülmektedir. Fakat cam ve silisyum alttaşıları kullanılarak büyütülen AlN filmlerinde yüzeyde bazı çizikler gözükmemektedir ve bu görüntülerin çizik olduğu aynı numunelerin AFM görüntüleri ile desteklenmektedir. Numunelerde çizik olma sebebi elimize gelen safir alttaşıların çizik gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

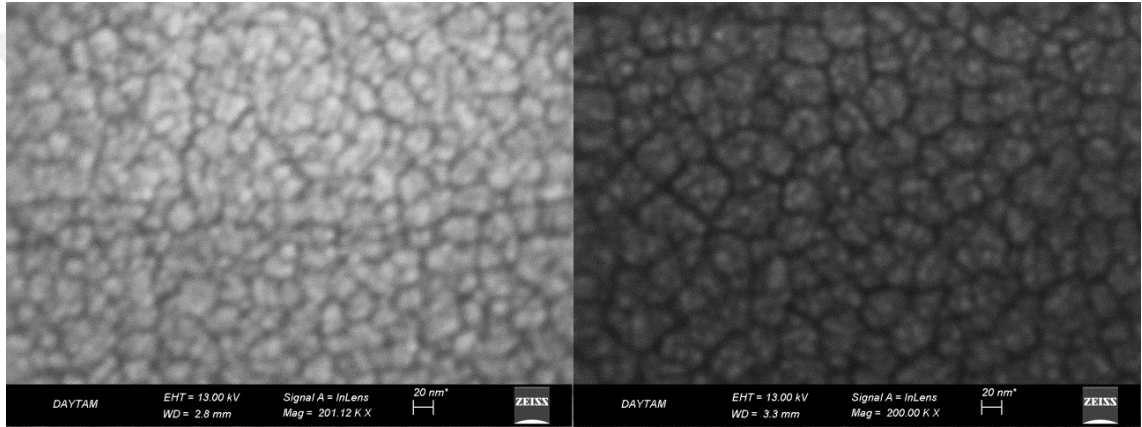
5.8. GaN İnce Filmi SEM Sonuçları ve Tartışma

Tampon kullanılmadan büyütülen GaN filmlerinin görüntüleri araştırma bulguları kısmında verilmiştir. ŞekilX.'e bakılırsa yapılar genel olarak adacık yapılar şeklinde görülmektedir. Tanecik boyutları çok küçük olduğu için büyütme ölçeği oldukça fazla seçilmiştir. Görüntülere göre safir alttaşı üzerine büyütülen GaN malzemelerinde yine çizikler görülmektedir bu çiziklerin muhtemel sebebi alttaşılar da bulunan çizikler olabilir.

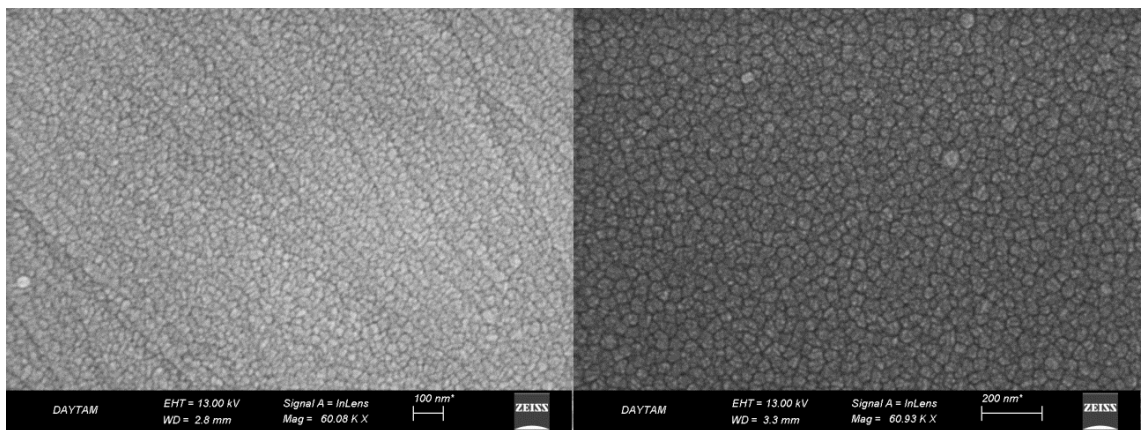
Silisyum alttaşı üzerinde büyütülen GaN filmlerinde daha düzgün ve homojen yayılabilen tanecikler gözlenmiştir.

5.9. AlN Tampon Üzerine GaN Filmi SEM Sonuçları ve Tartışma

Aynı şartlar altında büyütülen GaN filmlerinden tampon kullanılan ve kullanılmayan numunelerin karşılaştırılması aşağıdaki SEM görüntülerine bakılarak yapılmaktadır.



Şekil 5.21. a) C10 (tampon tabkası olmadan) numunesi b) D3 numunesi SEM görüntüleri



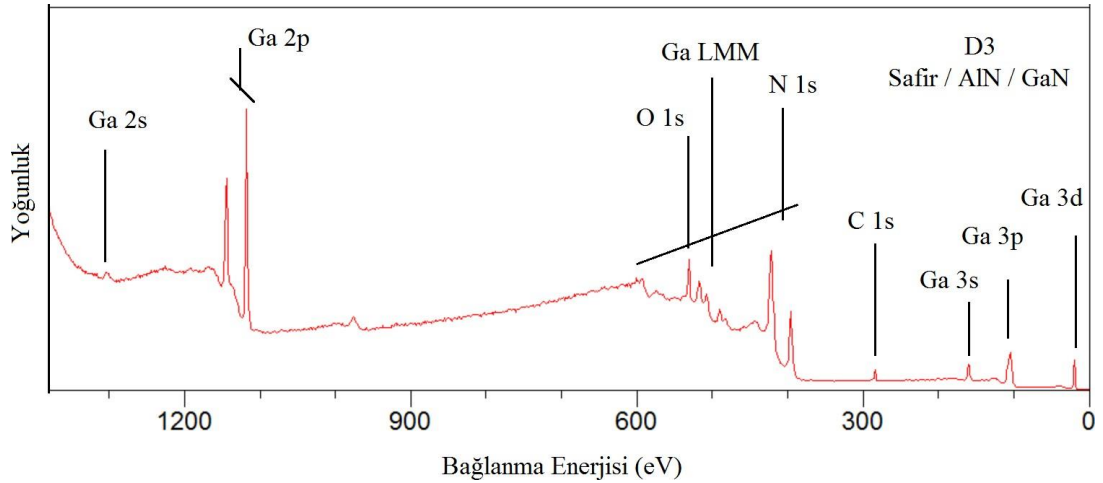
Şekil 5.22. C9 numunesi b) D4 numunesi SEM görüntüsü

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü üzere, AlN tampon üzerine büyütülen GaN ince filmlerinde tanecik boyutlarının büyüdüğü görülmektedir. Daha büyük tanecik yapıları filmlerin daha yüksek kalitede büyüdüklerini göstermektedir.

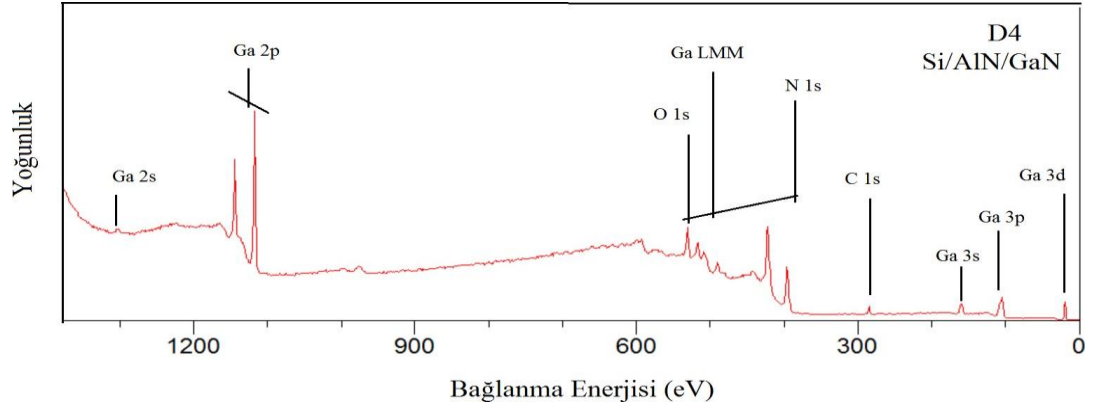
5.10. AlN Tampon Üzerine GaN filmi XPS Sonuçları ve Tartışma

Safir alttaş üzerine büyütülen AlN tamponu kullanılarak GaN filmi büyütülmüştür. Bu numunenin şartları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

D3 ve D4 numunelerinin XRD sonuçlarına bakıldığı zaman AlN pikleri ile GaN piklerinin birbirine yakınlığı sebebi ile görünen piklerin hangi malzemeye ait olduğu kesin anlaşılamamıştır. Bu sebepten yüzeysel ölçüm alabilen XPS’den yararlanılmıştır. Aşağıdaki XPS grafikleri malzemelerin yüzeylerinde bulunan tüm elementler hakkında bilgi vermektedir. Ga ve N elementlerinin varlığı bize XRD’de gözükken piklerin düşük açılı XRD ölçümleri yapılmış olmasından dolayı GaN’a ait olduğunu göstermektedir.



Sekil 5.23. D3 numunesinin XPS (spektrum) görüntüsü



Şekil 5.24. D4 numunesinin XPS (spektrum) görüntüsü

Yukarıdaki görüntülerde oksijen (O), azot(N), Galyum (Ga) ve carbon (C) atomlarının XPS pikleri gözükmemektedir. S orbitalleri birbirlerine yakın oldukları için tek pik gibi gözükürken p ve d orbitalleri detaylı olarak gözlemlenmiştir.

5.11. Sonuçlar

RF saçtırma yöntemi ile büyütülmesi oldukça zor olan GaN filmleri için farklı yöntemler denenmiştir. İlk olarak belirli alttaşlar üzerine GaN filmi büyütülmeye çalışılmıştır ve denenilen birçok şart ile büyütülemediği gözlemlenmiştir. Şartların ve alttaşların değişikliği ile GaN büyütülmesinde ciddi olumlu sonuç alınamadığı görüldüğü için başka bir yöntem arayışına gidilmiştir. GaN malzemesinin RF saçtırma yöntemi ile büyütülmesi için aranan şartları istenilen alttaşlarda sağlayamadığımız için alttaş ile GaN filmi arasına tampon malzeme koyulması düşünülmüştür ve denenmiştir. Tampon malzeme olarak yarıiletken bileşiklerden birisi olan AlN malzemesi seçilmiştir. Çeşitli karakterizasyon yöntemlerinde numunelerin gerek kristal yönelimi gerekse üç boyutlu ölçümleri alınmıştır. AlN tampon varlığının GaN filmi büyütülmesinde olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin GaN ile AlN filmi arasındaki kristal uyumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak bu tezde Tampon kullanılan GaN filmleri ile tampon kullanılmayan GaN filmleri karşılaştırıldığı zaman AlN tampon kullanılan GaN filmlerinin özelliklerinin iyiye gittiğini ve daha homojen yapılarda büyüme sağladığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, A. a. a. M., 2017. RF-sputtering of doped zinc oxides thin films, the effect of low substrate heating deposition. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri, Bilkent Üniversitesi.
- Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I. ve Toyoda, Y., 1986. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. Applied Physics Letters, 48 (5), 353-355.
- Andersson, T., Liu, X., Aggerstam, T., Holmström, P., Lourdudoss, S., Thylen, L., Chen, Y., Hsieh, C. ve Lo, I., 2009. Macroscopic defects in GaN/AlN multiple quantum well structures grown by MBE on GaN templates. Microelectronics Journal, 40 (2), 360-362.
- Arabshahi, H., 2006. Monte Carlo simulations of electron transport in Wurtzite phase GaN MESFET including trapping effect. Modern Physics Letters B, 20 (13), 787-794.
- Arriaga, J., Hernández-Cocolezzi, H. ve Contreras-Solorio, D. A., 2003. Electronic structure of cubic GaN/AlGaIn quantum wells. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 17 238-239.
- Baş, Y., 2014. In_xGa_{1-x}N (x= 0,075; 0,090; 0,100) Mavi Led'lerin Mikroyapısal Kusurlarının Ters Örgü Uzay Haritası ile İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri, Gazi Üniversitesi.
- Boylestad, R., Nashelsky, L., 2000. Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi. PrenticeHall, Inc, 909, New York.
- Chaaben, N., Boufaden, T., Fouzri, A., Bergaoui, M. S. ve El Jani, B. 2006. High resolution X-ray diffraction of GaN grown on Si (1 1 1) by MOVPE. Applied surface science, 253(1), 241-245.
- Chang, P., Lee, K., Chang, S., Su, Y., Lin, T. ve Wu, S., 2010. III-Nitride Schottky Rectifiers with an AlGaIn/GaN/AlGaIn/GaN quadruple layer and their applications to UV detection. IEEE Sensors Journal, 10 (4), 799-804.
- Chin, V., Tansley, T. ve Osotchan, T., 1994. Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides. Journal of Applied Physics, 75 (11), 7365-7372.
- Christensen, N. ve Gorczyca, I., 1994. Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure. Physical Review B, 50 (7), 4397.
- Çalışkan, M. D., 2014. Yeni Nesil İnce Filmler İle Optoelektronik Uygulamaların Araştırılması.
- Çörekçi, S., 2008. Grup III-V bileşik yarıiletkenlerde afm yüzey karakterizasyonu, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dingle, R., Shaklee, K., Leheny, R. ve Zetterstrom, R., 1971. Stimulated emission and laser action in gallium nitride. Applied Physics Letters, 19 (1), 5-7.
- Edwards, J., Kawabe, K., Stevens, G. ve Tredgold, R., 1965. Space charge conduction and electrical behaviour of aluminium nitride single crystals. Solid State Communications, 3 (5), 99-100.
- Erkoç, Ş., 2007. Nanobilim ve Nanoteknoloji. ODTÜ Yayıncılık, 115, Ankara.
- Fieger, M., Eickelkamp, M., Koshroo, L. R., Dikme, Y., Noculak, A., Kalisch, H., Heuken, M., Jansen, R. ve Vescan, A., 2007. MOVPE, processing and

- characterization of AlGaIn/GaN HEMTs with different Al concentrations on silicon substrates. *Journal of crystal growth*, 298 843-847.
- Gorczyca, I. ve Christensen, N., 1991. Band structure and high-pressure phase transition in GaN. *Solid State Communications*, 80 (5), 335-338.
- Gölcür, D., 2012. CdInTe ince filmlerinin optik ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi.
- Grove, W. R., 1852. On the electro-chemical polarity of gases. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 4 (28), 498-514.
- Johnson, R. L. 2005. Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri, Iowa State Üniversitesi.
- Johnson, W. C., Parson, J. ve Crew, M., 1932. Nitrogen compounds of gallium. iii. *The Journal of Physical Chemistry*, 36 (10), 2651-2654.
- Kamaç, Y., 2013. CuGaTe₂ ince filmlerinin yapısal elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri, Pamukkale Üniversitesi.
- Kaya, A. G., 2010. Enhancing light extraction efficiency of InGaIn/GaN multi quantum well light emitting diodes with embedded two dimensional photonic crystal structures. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri, Bilkent Üniversitesi.
- Kim, B., Lee, K., Jang, S., Jhin, J., Lee, S., Baek, J., Yu, Y., Lee, J. ve Byun, D., 2010. Epitaxial Lateral Overgrowth of GaN on Si (111) Substrates Using High-Dose, N⁺-Ion Implantation. *Chemical Vapor Deposition*, 16 (1-3), 80-84.
- Koçan, M., 2003. AlGaIn/GaN MBE 2DEG Heterostructures: Interplay Between Surface-, Interface-and Device Properties. Doktora Tezi, Fen Bilimleri, Rheinisch-Westfälische Technik Üniversitesi.
- Leng, Y., 2008. *Materials Characterization*. JohnWiley & Sons (Asia), 343, Singapore.
- Levinshtein, M. E., Rumyantsev, S. L. ve Shur, M. S., 2001. *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*. John Wiley & Sons, 216, Kanada.
- Lin, L.-H., Chen, K.-M., Han, S.-S., Liang, C.-T., Hsueh, W.-C., Chen, K. Y., Sun, Z.H., Chang, P., Chen, N. ve Chang, C.-A., 2007. Electron heating in Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN heterostructures grown on p-type Si. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 40 (2), 343-346.
- Medjani, F., Sanjines, R., Allidi, G. ve Karimi, A., 2006. Effect of substrate temperature and bias voltage on the crystallite orientation in RF magnetron sputtered AlN thin films. *Thin Solid Films*, 515 (1), 260-265.
- Meriç, Z., 2011. Antistatic applications: Metal coated fibers by magnetron sputtering. Yüksek Lisans, İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Mohammad, S. N., Salvador, A. A. ve Morkoc, H., 1995. Emerging gallium nitride based devices. *Proceedings of the IEEE*, 83 (10), 1306-1355.
- Monemar, B., 1974. Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra. *Physical Review B*, 10 (2), 676-681.
- Morkoc, H., 2013. *Nitride semiconductors and devices*. Springer Science & Business Media, 460, Almanya.
- Nebi, M., 2013. Reaktif RF saçırma yöntemi ile TiN ince filmlerin üretilmesi bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, ESOGÜ.
- Oh, J.-T., Moon, Y.-T., Jang, J.-H., Eum, J.-H., Sung, Y.-J., Lee, S. Y., Song, J.-O. ve

- Seong, T.-Y., 2018. High-performance GaN-based light emitting diodes grown on 8-inch Si substrate by using a combined low-temperature and high-temperature-grown AlN buffer layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 732 630-636.
- Oliveira, I., Grigorov, K., Maciel, H., Massi, M. ve Otani, C., 2004. High textured AlN thin films grown by RF magnetron sputtering; composition, structure, morphology and hardness. *Vacuum*, 75 (4), 331-338.
- Özdoğan, E., Demir, A. ve Seventekin, N., 2006. Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 16 (3), 159-168.
- Panda, P., Mantry, S., Mohapatra, S., Singh, S. K. ve Satapathy, A., 2014. A study on erosive wear analysis of glass fiber-epoxy-AlN hybrid composites. *Journal of Composite Materials*, 48(1), 107-118.
- Paszkowicz, W., Podsiadło, S. ve Minikayev, R., 2004. Rietveld-refinement study of aluminium and gallium nitrides. *Journal of Alloys and Compounds*, 382 (1-2), 100-106.
- Perry, P. ve Rutz, R., 1978. The optical absorption edge of single crystal AlN prepared by a close- spaced vapor process. *Applied Physics Letters*, 33 (4), 319-321.
- Polater, M., 2016. Radyo Frekansı Saçırma Yöntemi İle Titanyum Nitrür (TiN) İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Akşit, D., 2014. Fotokatalitik Su Ayırışması İçin Pt-Metal Sülfür/Cds Katalizörlerinin Sentezi Ve Karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Reiher, A., Bläsing, J., Dadgar, A., Diez, A. ve Krost, A., 2003. Efficient stress relief in GaN heteroepitaxy on Si (1 1 1) using low-temperature AlN interlayers. *Journal of crystal growth*, 248 563-567.
- Singh, P., Corbett, J. M., Webb, J. B., Charbonneau, S., Yang, F. ve Robertson, M. D., 1998. Growth and characterization of GaN thin films by magnetron sputter epitaxy. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 16 (2), 786-789.
- Sönmezoğlu, S., Mehmed, K. ve Seçkin, A., 2012. İnce film üretim teknikleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 28 (5), 389-404.
- Strausser, Y., 1993. CHARACTERIZATION IN SILICON PROCESSING.
- Strite, S. ve Morkoç, H., 1992. GaN, AlN, and InN: a review. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 10 (4), 1237-1266.
- Suzuki, M., Uenoyama, T. ve Yanase, A., 1995. First-principles calculations of effective-mass parameters of AlN and GaN. *Physical Review B*, 52 (11), 8132-8139.
- Tang, X., Hossain, F., Wongchotigul, K. ve Spencer, M. G., 1998. Near band-edge transition in aluminum nitride thin films grown by metal organic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 72 (12), 1501-1503.
- Thornton, J. A., 1983. Plasma-assisted deposition processes: theory, mechanisms and applications. *Thin Solid Films*, 107 (1), 3-19.
- Toprak, M. A., 2013. GaAs/ InxGa1-xAs Kuantum Kuyularinin Elektronik Enerji Spektrumu. Yüksek Lisans, Cumhuriyet Üniversitesi.
- Tülek, R., 2010. Yüksek performanslı Al (In) GaN/AlN (In) GaN heteroeklem yapıların iletim özellikleri.

- Vurgaftman, I., Meyer, J. Á. ve Ram-Mohan, L. Á., 2001. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 89 (11), 5815-5875.
- Yim, W., Stofko, E., Zanzucchi, P., Pankove, J., Ettenberg, M. ve Gilbert, S., 1973. Epitaxially grown AlN and its optical band gap. *Journal of Applied Physics*, 44 (1), 292-296.
- Zajac, M., Doradziński, R., Gosk, J., Szczytko, J., Lefeld-Sosnowska, M., Kamińska, M. ve Gębicki, W., 2001. Magnetic and optical properties of GaMnN magnetic semiconductor. *Applied Physics Letters*, 78(9), 1276-1278.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad Ayça COŞKUN

Doğum Tarihi ve Yeri: 1992 Erzurum

E-Posta: aycabkr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans: Atatürk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği

Yüksek Lisans: 2015 yılı, Atatürk Üniversitesi Nanomalze Bilim Dalı tezli yüksek lisans