

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM NİTRÜR İNCE FİLMLERİN BÜYÜTÜLMESİ VE
MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Düzgün KAL

(091114103)

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Genel Fizik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yusuf ATICI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27.12.2011

ARALIK-2011

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM NİTRÜR İNCE FİLMLERİN BÜYÜTÜLMESİ VE
MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Düzgün KAL

(091114103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.12.2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 11.01.2012

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yusuf ATICI (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cengiz TATAR (F.Ü.)

Doç. Dr. Sefa KAZANÇ (F.Ü.)

ARALIK-2011

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans Tezi'nin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Y. ATICI' ya şükranlarımı sunarım.

Çalışmam süresince benden yardımlarını esirgemeyen Fırat Üniversitesi Fizik Bölümü'nden Araştırma Görevlisi Ünal AKGÜL ve Araştırma Görevlisi Dr. Köksal YILDIZ'a teşekkür ederim.

Ayrıca tüm bu süreç boyunca bana verdikleri maddi ve manevi desteklerden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Düzgün KAL

ELAZIĞ-2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ.....	1
2. SIÇRATMA YÖNTEMİ İLE ÇEKİRDEKLENME VE BÜYÜME	4
2.1. Çekirdeklenme.....	6
2.1.1. Çekirdek Büyüme Modelleri.....	6
2.1.2. Çekirdeklenme Yoğunluğu	8
2.2. Film Büyümesi.....	9
2.2.1. Yapısal Bölge Modelleri	9
2.2.2. Film Büyütmesinde Etkili Faktörler.....	12
2.2.2.1. Alt Tabaka Yüzey Yapısı	12
2.2.2.2. Geliş Açısı	12
2.2.2.3. Örgü Hataları	12
2.2.2.4. Film Yoğunluğu	13
2.2.2.5. Mikroyapı Üzerinde Alt Tabakanın Etkisi.....	13
3. SIÇRATMA TEKNİĞİ İLE İNCE FİLM BÜYÜTÜLMESİ	14
3.1. Sıçratma Tekniği	14
3.1.1. RF Sıçratma Tekniği	17
4. ELEKTRON MİKROSKOPİSİ.....	20
4.1. Elektron Mikroskopi Çeşitleri	20
4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskopisi	20
.1.1. Geçirmeli Elektron Mikroskopisi	22

5.	MATERYAL VE METOT.....	23
5.1.	Alt Tabakaların Temizlenmesi İşlemi.....	23
5.2.	Filmlerin Büyütülmesi İşlemi.....	23
5.3.	Elektron Mikroskop Numunelerinin Hazırlanması	24
5.3.1.	SEM için Numune Hazırlanması	24
5.4	Numunelerin Mikroyapı Analizleri	25
6.	MİKROYAPI ANALİZ SONUÇLARI.....	26
6.1.	SEM Gözlemleri ve EDX Sonuçları.....	26
6.1.1.	AlN1 Numunesinin SEM Gözlemleri.....	26
6.1.2.	AlN2 Numunesinin SEM Gözlemleri.....	37
6.1.3.	AlN3 Numunesinin SEM Gözlemleri.....	49
7.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	61
	KAYNAKLAR.....	66
	ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÖZET

Bu tezde, Reaktif RF magnetron sıçratma tekniği kullanılarak farklı alt tabaka sıcaklıklarında (50°C, 150°C ve 250°C) borosilikat cam üzerine büyütülen alüminyum nitrür ince filmlerinin mikroyapıları incelenmiştir. Filmlerin mikroyapılarının gelişi güzel yönelimli kurtçuk tipi tanelerden, boşluklardan ve topaklanmalardan oluştuğu görüldü. Alt tabaka sıcaklığı artırıldıkça film yapısında görülen kurtçuk tipi tanelerin boyutunun arttığı, taneler arasındaki boşlukların azaldığı belirlendi. Her bir alt tabaka sıcaklığı için büyütülen film morfolojisinde gözlemlenen topakların boyutları ölçüldü. Özellikle, 50°C ve 250°C'lik alt tabaka sıcaklıklarında, film morfolojisindeki yapı kusurunu işaret eden topak sayısı ve boyutunun arttığı tespit edildi. Bu nedenle alüminyum nitrür ince filmlerinin büyütülmesi için uygun alt tabaka sıcaklığının 150°C olduğu tespit edildi. Yüksek büyütmelerde elde edilen SEM görüntülerinden kurtçuk tipi tanelerin çekirdeklenme mekanizması hakkında bilgiler edinildi ve tane boyutları ölçülerek sıcaklığın tane boyutları üzerine etkisi araştırıldı. EDX analizi ile filmin kompozisyonunu oluşturan elementlerin analizi yapıldı. Sonuçta, AlN ince filmlerinin başarılı bir şekilde büyütüldüğü belirlenirken, film morfolojisinde alüminyum oksit olan ikincil bir fazın oluşmuş olabileceği belirlendi.

Anahtar Kelimeler: AlN İnce Filmleri, Reaktif RF Sıçratma, SEM.

SUMMARY

In this thesis, the microstructures of aluminium nitride thin films which were grown on borosilicate glass at different substrate temperatures (50°C, 150°C and 250°C) have been examined by using reactive RF magnetron sputtering. It was observed that the microstructure of films consisted of arbitrary oriented worm-like grains, micro holes and heaps. It was seen that as substrate temperature increased, the size of worm-like grains increased and the spaces between grains decreased. For each substrate temperature the size of heaps observed in grown film morphology was measured. Especially in the case of 50°C and 250°C substrate temperatures, an increase in the number and size of heaps was observed which was an indication on structure defect in the film morphology. Information on the nucleation mechanism of worm-like grains was obtained from SEM images gathered during and the effect of temperature on grains was examined by measuring the size of grains. Elements that create thin film composition were investigated using EDX analysis. In conclusion AIN thin films growth was carried out successfully and it was determined that there might had occurred a secondary phase in the film morphology as aluminium oxide.

Key words: AIN Thin Films, Reactive RF Sputtering, SEM.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Çekirdek büyüme modelleri	7
Şekil 2.2. Yatay birleşme mekanizması.....	8
Şekil 2.3. Sinterleme yoluyla iki katı adanın birleşmesinin şematik gösterimi	8
Şekil 2.4. Movchan ve Demchishin'in yapısal bölge modeli.....	10
Şekil 2.5. İyon bombardımanının ve sıcaklığın bölge yapılanma etkisi.....	11
Şekil 2.6. Sütun şeklindeki filmlerin iki farklı büyümesi . (a) Aşağı doğru sivrileşen, (b) Paralel sütun şeklinde.....	12
Şekil 3.1. Sıçratma işleminin şematik gösterimi	15
Şekil 3.2. Sıçratma mekanizması.....	16
Şekil 3.3. RF sıçratma sistemiyle film oluşumunun şematik görünümü	18
Şekil 3.4. Sistematik RF sıçratma sistemi.....	19
Şekil 4.1. SEM ile gönderilen elektron demetinin numune üzerindeki dağılımı ve ortaya çıkan farklı etkileşmeler.....	21
Şekil 5.1. İnce film büyütme sitemi.....	24
Şekil 5.2. Elde edilen AlN Plazması.....	24
Şekil 5.3. JEOL JSM-7001F Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	25
Şekil 6.1. AlN1 numunesinin genel yüzey yapısını gösteren SEM görüntüsü	26
Şekil 6.2. Şekil 6.1'de gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu	27
Şekil 6.3. AlN1 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.....	28
Şekil 6.4. Şekil 6.3'te gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları	29
Şekil 6.5. Şekil 6.3'te gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.....	31
Şekil 6.6. AlN1 numunesinin farklı bir yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü.....	32
Şekil 6.7. Şekil 6.6'da gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu	32
Şekil 6.8. AlN1 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.....	34
Şekil 6.9. Şekil 6.8'de gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları	35

Şekil 6.10. Şekil 6.8’de gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.....	37
Şekil 6.11. AlN2 numunesinin genel yüzey yapısını gösteren SEM görüntüsü	38
Şekil 6.12. Şekil 6.11’de gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu	38
Şekil 6.13. AlN2 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.....	40
Şekil 6.14. Şekil 6.13’te gösterilen film yüzeyinin (a) 1 (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları	41
Şekil 6.15. Şekil 6.13’te gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.....	43
Şekil 6.16. AlN2 numunesinin farklı bir yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü	44
Şekil 6.17. Şekil 6.16’da gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu	44
Şekil 6.18. AlN2 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.....	46
Şekil 6.19. Şekil 6.18’de gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları	47
Şekil 6.20. Şekil 6.18’de gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.....	49
Şekil 6.21. AlN3 numunesinin genel yüzey yapısını gösteren SEM görüntüsü	50
Şekil 6.22. Şekil 6.21’de gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu	50
Şekil 6.23. AlN3 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.....	52
Şekil 6.24. Şekil 6.23’te gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları	53
Şekil 6.25. Şekil 6.23’te gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.....	55
Şekil 6.26. AlN3 numunesinin farklı bir yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü	56
Şekil 6.27. Şekil 6.26’da gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu	56
Şekil 6.28. AlN3 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.....	57
Şekil 6.29. Şekil 6.28’de gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları	58
Şekil 6.30. Şekil 6.28’de gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.....	60

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 6.1. Şekil 6.2'deki EDX spektrumunun sonuçları.....	27
Tablo 6.2. Şekil 6.4'te gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.....	30
Tablo 6.3. Şekil 6.7'deki EDX spektrumunun sonuçları.....	33
Tablo 6.4. Şekil 6.9'da gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.....	36
Tablo 6.5. Şekil 6.12'deki EDX spektrumlarının sonuçları	49
Tablo 6.6. Şekil 6.14'te gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.....	42
Tablo 6.7. Şekil 6.17'deki EDX spektrumunun sonuçları.....	45
Tablo 6.8. Şekil 6.19'da gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları	48
Tablo 6.9. Şekil 6.22'deki EDX spektrumlarının sonuçları	51
Tablo 6.10. Şekil 6.24'te gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.....	54
Tablo 6.11. Şekil 6.27'deki EDX spektrumlarının sonuçları	57
Tablo 6.12. Şekil 6.29'da gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları	59

SEMBOLLER LİSTESİ

eV	: Elektron-Volt (Potansiyel enerji)
h	: Planck Sabiti
P	: Buhar Basıncı
k	: Boltzman Sabiti
T _o	: Kaynak Sıcaklığı
r	: Saniyede Santimetre Başına Yüzeye Çarpan Atom Sayısı

KISALTMALAR LİSTESİ

TEM	:Geçirmeli Elektron Mikroskopisi / Mikroskobu (<i>Transmission Electron Microscopy / Microscope</i>)
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskopisi / Mikroskobu (<i>Scanning Electron Microscopy / Microscope</i>)
EDX	:Enerji-Ayrım X-Işını Spektrometresi (<i>Energy Dispersive X-Ray Analysis</i>)
SEI	:İkincil Elektron Görüntüsü (<i>Secondary Electron Image</i>)
CRT	:Katot Işınları Tüpü (<i>Cathode Ray Tube</i>)
DC	:Doğru akım (<i>Direct Current</i>)
MBE	:Moleküler Demetli Epitaksi (<i>Molecular Beam Epitaxy</i>)
CVD	:Kimyasal Buhar Kaplama (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
PVD	:Fiziksel Buhar Kaplama (<i>Physical Vapor Deposition</i>)
AlN	: Alüminyum Nitrit
AlN1	: 50 Santigrat Derece’de Büyütülen Alüminyum Nitrit
AlN2	: 150 Santigrat Derece’de Büyütülen Alüminyum Nitrit
AlN3	: 250 Santigrat Derece’de Büyütülen Alüminyum Nitrit
GaAs	: Galyum Arsenik
GaN	: Galyum Nitrit
AlGaN	: Alüminyum Galyum Nitrit

1. GİRİŞ

Kalınlıkları 1 μm 'den düşük olan kaplamalara ince film denir [1]. İnce film teknolojisi yeni enerji kaynakları sağlanması açısından giderek artan bir öneme sahiptir [2-4]. İnce filmlerin çeşitli özellikleri dikkate alınarak farklı teknolojik uygulamalarda kullanılabilirler. Örnek verilecek olursa, elektriksel özellikleri sayesinde yarıiletken cihazlarda, yalıtım ve iletim kaplamalarında, optiksel özelliklerinden dolayı yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, girişim filtrelerinde, manyetik özelliklerinden dolayı hafıza disklerinde ve bunlar gibi daha birçok uygulamada ince filmler kullanılmaktadır. Ayrıca ince filmlerin boyutlarının diğer malzemelere oranla çok daha küçük olmasından dolayı elektronik devre tasarımlarında büyük kolaylık sağlarlar.

Alüminyum nitrür (AlN) ince filmler geniş yasak enerji aralığı (6.2eV), düşük ısısal genleşmesi, yüksek kimyasal ısısal kararlılığı ve yüksek yüzey akustik dalga hızı nedenleriyle teknolojide oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [5-7]. Alüminyum nitrür ince filmlerin erime noktası 2200 K ve yüksek termal iletkenliği 285 W/mK dir [8,9]. Ayrıca AlN ince filmler akustik dalga rezonatörlerinde kısa dalga boyu yayınlayıcıları, elektronik sıkıştırıcılar ve piezoelektrik tabaka olarak mikroelettronik ve optoelettronik alanlarında, ultraviyole spektral aletlerde yaygın bir şekilde kullanılan malzemelerdir [10,11].

Yarıiletken büyütme tekniklerindeki gelişmelerle birlikte özellikle yüksek performans isteyen devre uygulamalarında silisyuma alternatif olarak, bileşik yarıiletkenler diye adlandırılan ve çoğu periyodik cetvelin üçüncü ve beşinci periyodunda elementlerin birleştirilmesiyle oluşturulan yeni yarıiletkenler kullanılmaya başlanılmıştır [12]. Bu yarıiletkenlerden en çok adı duyulmuş olan GaAs yarıiletkenidir. III-V grubu yarıiletkenler diye adlandırılan bu malzemeler elektronik aygıt tasarımcısına geniş bir spektrumda değişik fiziksel özellikler sunmakta ve önemli avantajları olan hetero-yapı ve kuantum aygıtlarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Bu yarıiletkenlerin uygulamalarına örnek olarak son yıllarda çok büyük ilgi çeken AlN, GaN ve AlGaIn yarıiletkenleri gösterilebilir. Yarıiletkenlerin enerji bant aralıkları silisyumdan çok daha yüksektir ve atomlar arasındaki bağ çok daha kuvvetlidir. Dolayısıyla yüksek güç altında ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen dayanıklı elektronik aygıtların yapımı mümkün olabilmektedir. III-V grubu yarıiletkenlerin diğer bir önemi de özellikle optoelettronik alanında yeni bir

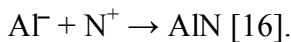
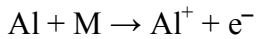
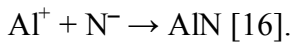
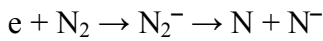
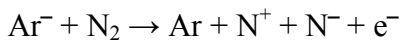
çıgır açmaları olmuştur. Bu yeni yarı iletkenler sayesinde lazer, detektör gibi aygıtlarda yarıiletkenler kullanılarak geniş bir dalga boyu spektrumunda çalışabilmesi ve optoelektronik cihazlarda devrelerin üretimini sağlamaktadırlar [12,13].

Literatür araştırmalarında AlN ince film üretimi için çeşitli yöntem ve teknikler kullanılmaktadır. Özellikle lazer bombardımanı ile kaplama ve moleküler demet epitaksiyel (MBE) yöntemi kullanılarak yüksek kalitede AlN ince filmler üretilmektedir. Ayrıca AlN ince filmlerin üretiminde kimyasal buhar kaplama (CVD), RF (Radyo Frekansı), Magnetron Sıçratma ve DC Magnetron Sıçratma gibi yöntemler de kullanılmaktadır [14,15]. Bu yöntemlerden sıçratma yöntemi sanayide en yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

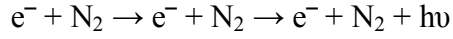
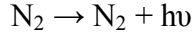
Bu çalışmada AlN ince filmler RF Magnetron Sıçratma Tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Bu yöntemde hedef malzeme olarak %99,99 saflıkta alüminyum kullanılmıştır. Filmler 400nm kalınlıklarındaki AlN1, AlN2 ve AlN3 sırası ile 50°C, 150°C ve 250°C'lik alt tabaka sıcaklıklarında, toplam 10mTorr'luk gaz basıncı (%70 N₂, %30 Ar) ortamında, 120W'lık güç değeri ile Reaktif RF Magnetron Sıçratma Tekniği kullanılarak borosilikat alt tabaka üzerine AlN ince filmler büyütüldü. Alt tabaka sıcaklığı argon-azot karışım plazma ortamında Al hedef malzemeden sökülen Al atomlarının N atomları ile reaksiyona girerek alt tabaka üzerine ince film olarak büyütmesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında reaksiyondaki Al ve N karışımına bağlı olarak AlN ince filmlerin yapılarında bir takım değişiklikler meydana gelir.

$Al + 1/2N_2 = AlN$ Alüminyum nitrür oluşur.

Al, Ar ve N₂ gaz karışımında plazma ortamında meydana gelen reaksiyonların ise aşağıdaki şekilde olabileceği düşünülmüştür [16]. İyon oluşturan reaksiyonlar:



Foton oluşturan reaksiyonlar:



Sonuç olarak elde edilen filmler incelendiğinde kullanılan gaz karışımı plazması içerisinde alt tabaka sıcaklığına bağlı olarak AlN yapılarının değiştiği gözlenmiştir. AlN ince filmleri üretirken alt tabaka sıcaklığı değiştirilerek filmin yapısındaki değişim, büyütme atmosferindeki reaktif gazın (azot) kısmi basıncı, büyütme hızı gibi parametrelerin etkileri dikkate alınmıştır.

2. SICRATMA YÖNTEMİ İLE ÇEKİRDEKLENME VE BÜYÜME

Düşük boyutlu bir malzeme olarak tanımlanan ince filmler sıçratma yöntemi ile alt tabaka üzerine atomların kaplanmasıyla oluşturulur [17]. Film oluşumunun ilk aşamalarında, buhar fazdan gelen atom veya moleküller katı bir alt tabaka üzerinde yoğunlaşırlar ve daha sonra bu atom veya moleküllerin alt tabaka yüzeyi üzerine yerleştikleri durumda çekirdeklenme aşaması ortaya çıkar. Bu durum filmlerin ilk oluşum aşaması olarak kabul edilir. Buhar fazdan yeni bir malzemenin yoğunlaşması çarpma hızı tarafından tanımlanır [18]. Hedefe çarpan atom sayısı aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$r = P(2\pi MkT_o)^{1/2} \quad (2.1)$$

Bu bağıntıda r ; saniyede cm^2 başına yüzeye çarpan atom sayısı, P ; buhar basıncı, M ; moleküler ağırlık, k ; Boltzman sabiti ve T_o ; kaynak sıcaklığıdır.

İnce film oluşumu çekirdeklenme ve büyüme mekanizmaları olarak ikiye ayrılır. Atomik film büyümesi, bir yüzey üzerinde hareketli atomların yüzeye yapışmasının bir sonucudur. Yüzey üzerindeki hareketli atomlar ‘adatom’ olarak isimlendirilir [19]. İnce filmlerin büyütülmesi altı adımda oluşur.

1. Birinci adımda, buharlaşarak yüzeye ulaşan atom ve moleküller yüzeye bağlanır (adsorpsiyon). Yüzeye bağlanmayıp buharlaşabilir (desorpsiyon).
2. İkinci adımda, bu atom ve moleküller film yapısına girmeden önce yüzey üzerinde belli bir mesafe yayılırlar.
3. Üçüncü adımda, yüzeye adsorbe olan atomlar birbirleriyle ve yüzeyle reaksiyona girerek bir bağ oluştururlar.
4. Dördüncü adımda, film mekanizması yüzeyle kaynaşır. Bu ilk kaynaşmaya çekirdeklenme adı verilir[20].
5. Beşinci adımda, film büyümesi meydana gelir.
6. Altıncı adımda, film ile alt tabaka arasında difüzyona bağlı bir etkileşim meydana gelir. Böylelikle film tabakası ile alt tabaka arasında kuvvetli yapışma (adhezyon) elde edilir.

İnce film oluşumu için gerekli olan adımların tümünde enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Büyütme işlemine enerji verilmesi çekirdeklenme reaksiyonlarını

kolaylaştırmakta ve daha iyi bir film yapısının oluşmasını sağlamaktadır [20]. Vakum ortamında yüzeye çarpan atomlar belli bir kalma süresi sonunda geri buharlaşır, ya da yüzeye yoğunlaşırlar. Yüzeye yoğunlaşan atomların, toplam çarpan atom sayısına oranına ‘bağlanma katsayısı’ denir. Eğer atomlar yüzeye hemen reaksiyona girmezlerse, yoğunlaşma öncesi yüzey üzerinde belirli bir derecede yüzey hareketliliğine sahip olurlar. Geri buharlaşma olayı, adatom ile yüzey arasındaki bağ enerjisinin, yüzey sıcaklığının ve hareketli atomların hareket enerjisinin bir fonksiyonudur [20-22].

Atom, iyon veya moleküllerin katı bir yüzey üzerinde tutunmasına adsorpsiyon, tutunan taneciklerin yüzeyden ayrılmasına desorpsiyon, katıya adsorplayıcı, katı yüzeyinde tutunan maddeye ise adsorplanan adı verilir [23]. Büyütme işlemi sırasında alt tabaka buhara maruz kalınca yüzeyde oluşan ilk şey adsorpsiyondur. Fiziksel ve kimyasal olarak adlandırılan adsorpsiyon işlemleri atomik etkileşimlerin şiddetine bağlı olarak ayırt edilebilmektedir. Fiziksel adsorpsiyonda, adsorpsiyon enerjisi 0,25eV civarında olan etkileşimler sonunda tutunma gerçekleşirken, kimyasal adsorpsiyonda ise enerjisi 1–10eV civarında olan etkileşimler sonunda tutunma gerçekleşir. Fiziksel adsorpsiyon sırasında adsorplanan atomlar ile katı yüzeyi arasında uzun mesafeli, fakat zayıf bağlı olan Van Der Waals çekim kuvvetleri etkindir. Kimyasal adsorpsiyon sırasında ise, adsorplanan atomlar ile katı yüzeyi arasında bir kimyasal bağ ve genellikle de kovalent bağ oluşur [23]. Kimyasal adsorpsiyonun tamamlanmasından sonra çekirdeklenme oluşur. Çekirdeklenme, çekirdeklenme merkezi olarak bilinen aktif taban malzeme yüzey merkezleri üzerindeki film büyüme hızının sıfırdan büyük olmasıdır [24].

Yüzey difüzyonu, yüzeye adsorbe olan atomların birbirilerini ve en aktif yüzey merkezlerini bulmalarını sağladığından film yapısı için son derece önemli bir etkidir [20]. Atomların difüzyon hızlarının artması, atom hareketliliğini arttıracak çok sayıda çekirdek oluşumuna neden olacaktır. Çekirdek yoğunluğundaki artış bu çekirdeklerden büyüyen kolonların kalınlığını etkilemektedir. Difüzyon hızının azalması ile yüzeye adsorplanan atomların hareketliliği azalacağından yoğunlaştığı bölgelerde çekirdeklenmeye çalışacak ve oldukça düzensiz bir film yapısı meydana gelecektir [25].

2.1. Çekirdeklenme

Sıçratma yöntemleriyle elde edilen bütün filmlerin yapıları, temel olarak çekirdeklenme yöntemleri ile kontrol edilir [26]. Film oluşumunun ilk aşamalarında, yeterli sayıda buhar atomu veya molekülü yüzeye yoğunlaşır ve alt tabaka üzerinde kalıcı olarak bulunabileceği bölgeler oluştururlar. Buna çekirdeklenme adı verilir. Bir sonraki aşamada, oluşan çekirdekler yayılarak birbirleriyle kaynaşırlar. Bu kaynaşma devam ettikçe, adacıklar birbirlerine bağlanır ve aralardaki boşluklar film malzemesi tarafından doldurulur. Sonuçta boşluk içermeyen sürekli bir film yapısı oluşur [27]. Çekirdeklenme yöntemi, yani filmin ilk aşamalarındaki büyümesi alt tabaka ve büyütülen film arasındaki bağlanma ile yakından ilgilidir [26-28].

Adsorbe olan atomlar yüzey ile atom atoma kimyasal bağ oluşturmak için reaksiyona girerler. Eğer atom atoma etkileşim kuvvetli ise yüzey hareketliliği düşüktür ve her yüzey atomu bir çekirdeklenme merkezi olarak davranır. Eğer adatomlar ve yüzey arasında oluşan kimyasal bağlar kuvvetli ise bu olaya kimyasal adsorpsiyon adı verilir. Eğer adatom-yüzey etkileşimi zayıfsa, adatomlar yüksek yüzey hareketliliğine sahip olacak ve çekirdeklenme merkezlerine yoğunlaşacaklardır. Bu bölgelerde daha kuvvetli bağlar oluşmaktadır. Çekirdeklenme merkezleri yüzey pürüzleri ve yüzey çizikleri gibi hatalı bölgeler, nokta hataları ve tane sınırları gibi yüzey örgü hataları, yüzeydeki yabancı atomlar veya yüzey üzerindeki farklı kimyaya ve kristalografiye sahip bölgeler olabilir. Örgü hataları çekirdeklenme merkezleri olarak davranabilirler. Hareketli adatomlar, diğer yüzey atomlarıyla çarpışarak çekirdeklenebilir. Bu yüzden çekirdeklenme yoğunluğu, büyütme hızına bağlıdır. Örneğin kurşun (Pb) üzerine gümüş (Ag) çöktürüldüğünde 0,1 nm/dak büyütme hızında gümüşün tamamı geri buharlaşırken, 10 nm/dak büyütme hızında gümüşün tamamı yüzeye adsorpsiyonlanır [21].

2.1.1. Çekirdek Büyüme Modelleri

Çekirdek büyümesi, adatomların doğrudan çekirdeğe çarpması veya yüzey üzerinden çekirdeğe difüzyonu sonucu adatomların çekirdek tarafından toplanmasıyla gerçekleşir. Büyütülen atomlar ile alt tabaka arasındaki etkileşime bağlı olarak üç farklı tipte çekirdeklenme mekanizması mevcuttur [21,27,29]. Bu modeller Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

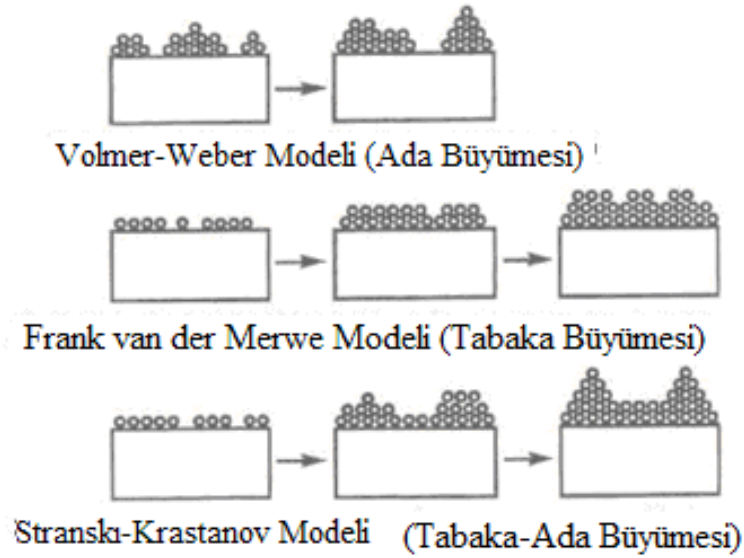
1. Ada büyümesi (Volmer-Weber Modeli),

2. Tabaka büyümesi (Frank van der Merwe Modeli)

3. Tabaka-Ada büyümesi (Stranski-Karastanov Modeli) olarak isimlendirilir.

Ada büyümesi, alt tabaka yüzeyinde çekirdeklenmenin meydana gelmesi ve oluşan çekirdeklerin üç boyutlu adacıklar halinde büyümesiyle gerçekleşir. Bu büyüme modeli büyütülen atom ya da moleküllerin birbirleriyle yaptığı bağların, alt tabaka ile yaptıkları bağlardan daha kuvvetli olması durumunda meydana gelir. Özellikle oksit alt tabakalar üzerine biriktirilen metal ve yarı iletken filmlerde bu büyüme modeli gözlenir.

Tabaka büyümesi modelinde ise, en küçük kararlı çekirdeğin büyümesi alt tabaka boyunca iki boyutlu olarak gerçekleşir. Sonuçta film tüm alt tabaka yüzeyini düzlemsel olarak sarar. Bu büyüme modelinde atomların alt tabaka ile yaptığı bağlar, birbirleriyle yaptıkları bağlardan daha kuvvetlidir.



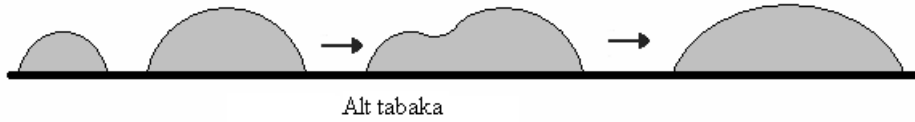
Şekil 2.1. Çekirdek büyüme modelleri [27].

Oldukça kuvvetli bağlanmış ilk katmanın üzerini daha zayıf bağlı ikinci katman kapatır. Yarı iletken filmlerin tek kristal eş eksenli büyümesi bu büyüme modelinin en önemli örneğidir [20,21,26,27,29].

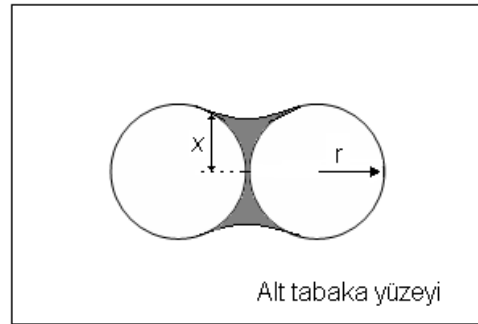
Tabaka-Ada veya Stranski-Krastanov büyüme mekanizması, önceki iki modelin birleşimidir. Bu modelde bir veya birkaç tabakanın oluşumundan sonra, ada büyümesi meydana gelir. Bu büyüme modeli metal-metal ve metal-yarı iletken sistemlerinde oldukça yaygındır [26,31]. Bu büyüme tipleri için koşullar genel olarak termodinamik ve yüzey enerjisi bulgularına göre açıklanır [21,26,29].

Çekirdekler yanal kaynaşarak veya dikey olarak kaynaşarak sürekli bir film oluşturulabilirler. Bu olaya birleşme mekanizması denir. Yanal kaynaşma olarak birleşme gerçekleştiğinde daha az miktarda malzeme ile sürekli film oluşturulur. Çekirdek ile alt tabaka arasında etkileşim yok ise dikey birleşme oluşur.

Çekirdeklenen atomlar ile alt tabaka arasında düşük seviyede kimyasal etkileşim olduğu zaman çekirdekler yatay olarak birleşerek sürekli film oluşturur. Çekirdeklerin kaynaşması, çekirdek sıcaklığı atomik difüzyonun ve yeniden düzenlemelerin oluşmasına yetecek kadar yüksek olduğunda gerçekleşir. Kaynaşma iki yöntemle olur. Bunlar adaların alt tabaka üzerinde yer değiştirilmesi veya sinterleme ile oluşur. Şekil 2.2’de yer değiştirme Şekil 2.3’de ise sinterleme mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yatay birleşme mekanizması [27].



Şekil 2.3. Sinterleme yoluyla iki katı adanın birleşmesinin şematik gösterimi [27].

2.1.2. Çekirdeklenme Yoğunluğu

Genel olarak birim alandaki çekirdek sayısının veya çekirdeklenme yoğunluğunun, düşük kalınlıkta tüm yüzeyi tamamen kapatacak ve yüzeyle iyi temas sağlayacak yoğun bir film oluşumu için yüksek olması gereklidir. Çekirdeklenme yoğunluğu ve büyüme davranışı, alt tabaka yüzeyinin faz dağılımı ve kristalografik yönlenmesine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Çekirdeklenme yoğunluğunun ve film büyüme davranışının değişimi

film özelliklerinde değişimlere yol açmaktadır. Alt tabaka yüzeyine çöktürülen atomların çekirdeklenme yoğunluğu farklı yollarla değiştirilebilir.

- Büyütme sıcaklığının değiştirilmesi, sıcaklık arttırıldığında yüzeyle reaksiyon ve yüzey hareketliliği artar. Sıcaklığın azalması ise yüzey hareketliliğini azaltır.
- Büyütme hızını (plazma enerjisini) arttırma, adatomların çarpışma olasılığını arttırır.
- Yüzey kimyası değiştirilerek (örneğin yüzeyin temizlenmesi) yüzey daha reaktif hale getirilebilir.
- Yüzey üzerinde örgü hataları gibi elverişli çekirdeklenme merkezleri oluşturmaktır. Yani yüksek enerjili iyon bombardımanı ile yüzeyi pürüzlendirerek örgü hataları oluşturulabilir [21].

2.2. Film Büyümesi

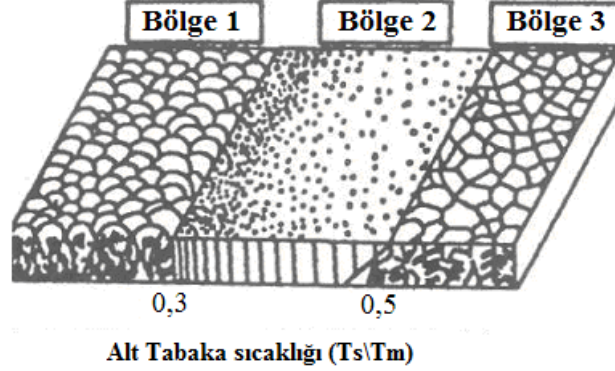
Film büyümesi, çöktürülen atomların sürekli çekirdeklenmesi ve bu çekirdeklerin birleşmesi ile gerçekleşir. Film büyümesi ve çekirdeklenme tipi, film yoğunluğu, yüzey alanı, yüzey yapısı ve tane boyutu gibi birçok film özelliğini belirler. Film büyümesini etkileyen önemli faktörler [21]:

- Alt tabaka yüzey pürüzlülüğü
- Yüzey sıcaklığı
- Adatomların yüzey hareketliliği
- Geometrik gölgeleme etkisi (geliş açısı etkisi)
- Büyütme işlemi sırasında kütle transferi ve boşluk oluşumudur.

2.2.1. Yapısal Bölge Modelleri

Buhar fazındaki atomların yoğunlaşması işleminde, yüzeye gelen ve adsorbe olan adatomlar, film yüzeyinde geri buharlaşana veya düşük enerjili örgü merkezleri tarafından yakalanana kadar difüzyon gerçekleştirirler. Son olarak, bağlanan atomlar kütle difüzyon hareketleriyle, örgü parametrelerinde denge konumuna ulaşırlar [21]. Film yapısı yapısal bölge modelleriyle açıklanabilir. Yapısal bölge modelleri ilk olarak vakumda yapılan kaplamalar için 1969 yılında Movchan-Demchishin tarafından modellenmiştir. Daha sonra Thornton tarafından geliştirilmiş ve daha sonra Meissier tarafından nokta hatalarının ve boşlukların kaynaşmasını da içerecek şekilde değişiklikler yapılmıştır [21,22].

Şekil 2.4’de, farklı T_s/T_m oranlarında (T_s : °K cinsinden büyütme işlemi sırasındaki alt tabaka sıcaklığı, T_m : °K cinsinden filmin ergime sıcaklığıdır) oluşan 3 farklı yapısal bölge modeli gösterilmiştir [30].



Şekil 2.4. Movchan ve Demchishin’in yapısal bölge modeli [31].

Bölge 1 yapısı ($T_s/T_m < 0,3$), lifli tanelerden oluşan ve çok sayıda örgü hatası ve gözenekli tane sınırı içeren ince taneli bir yapıdır. Bu yapı, düşük adatom hareketliliğine ve gölgeleme etkisine bağlı olarak, büyütme sırasında tanelerin sürekli çekirdeklenmesi sonucu oluşur. Yüzeye gelen film atomları, yüzeye çarpma noktalarına yapışırlar ve yapıştıkları noktalarda hareketsiz kalırlar [31]. Kristaller birbirleriyle temas halinde değildir. Aralarında birkaç yüz angstrom genişliğinde boşluklar vardır. Bu nedenle yapının yoğunluğu düşüktür. Ayrıca yapıda dislokasyon yoğunluğu ve gerilme miktarı da yüksektir [26].

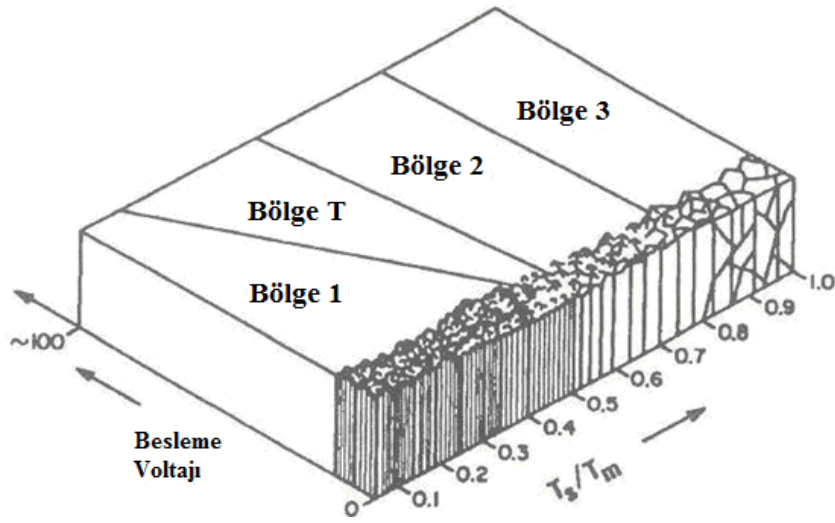
Bölge 2 yapısı ($0,3 < T_s/T_m < 0,5$), homojen kolonsal tanelerden oluşur. T_s/T_m ’nin artmasıyla, tane boyutu artar. Yapının, yüzey difüzyonu mekanizmalarıyla oluştuğu kabul edilir. Bölge 2 yapısı da, yüksek oranda traşlı üst yüzeylere sahip olması sebebiyle düzgündür ama daha mat görünümlüdür.

Bölge 3 yapısında ($T_s/T_m > 0,5$), kolonsal tanelerin genişliği kütle difüzyonu ve yeniden kristalleşme ile artar. Bu taneler bazen eş eksenli olarak adlandırılır. Thornton, bu bölge yapısı sınıflandırmasını genişletmiştir. Bu modelde bölge 1 ve bölge 2 arasına bir bölge T yapısı eklenmiştir. Bölge T yapısı, yoğun düzende lifli tanelerden oluşur ve boşluk miktarı azdır. Bölge T yapısına sahip filmler, daha yoğun ve bölge 1 ve bölge 2’ye göre daha düzgün yüzey yapısına sahiptirler. Filmin tane boyutundaki azalma ve film yoğunluğundaki artış, iyon bombardımanı ile kolaylaştırılır [26]. Movchan ve Demchishin’in modeli, saf metallerin büyütülmesi üzerine yapılan çalışmalar sonucu elde edilmiştir ve Thornton’un modelindeki geçiş bölgesini (bölge T) kapsamamaktadır. Bölge

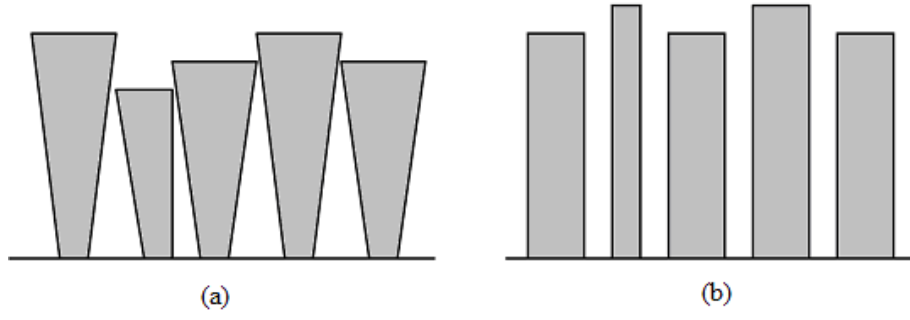
T, saf metallerin çöktürülmesi sırasında belirgin olarak oluşmaz; kompleks alaşımların ve refrakter bileşiklerin büyütülmesi sırasında net bir şekilde gözlenebilir [25].

Messier, bölge 1 ile bölge T sınırının lineer olmadığını ve uygulanan taban malzeme besleme voltajına bağlı olarak değiştiğini bulmuştur. Bombardıman enerjisi arttığında, bölge T'nin genişliği artmaktadır; bölge 1'in ise genişliği azalmaktadır. Bu model Şekil 2.5'da gösterilmiştir [21,26,27,31]. Şekilden görüldüğü gibi, büyütme sırasında yüksek besleme voltajı uygulanması ve atomların iyonize edilmesi durumunda bölge 1 yapısının oluşma aralığı önemli oranda daralmaktadır. Bu olay şu şekilde açıklanabilir; besleme voltajı uygulanması durumunda buharlaşan atomların kinetik enerjilerinde önemli bir artış meydana gelmektedir. Ayrıca oluşan iyon bombardımanı yüzeye büyüyen atomların hareketliliğini ve çekirdeklenme hızını arttırmaktadır [26].

Şekil 2.6'de görüldüğü gibi film büyümesinde sütunların oluşması iki farklı şekilde büyüme davranışı meydana geliyor. İlki filmin yukardan aşağıya incelerek büyümesi diğeri sütunların paralel büyümesi bu büyüme şekilleri yapısal bölgelerinden yararlanılarak filmin nasıl büyüdüğü söylenebilir [32].



Şekil 2.5. İyon bombardımanının ve sıcaklığın bölge yapılarına etkisi [31].



Şekil 2.6. Sütun şeklindeki filmlerin iki farklı büyümesi . (a) Aşağı doğru sivrileşen, (b) Paralel sütun şeklinde [32].

2.2.2 Film Büyütmesinde Etkili Faktörler

2.2.2.1. Alt Tabaka Yüzey Yapısı

Alt tabakanın yüzey pürüzlülüğü film özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Eğer alt tabaka yüzey yapısı kontrol edilmezse, film büyümesi ve filmde beklenen özellikler farklılıklar gösterebilir. Genel olarak, parlatılmış düz yüzeylere büyütülen filmler, pürüzlü yüzeylere büyütülen filmlere kıyasla kütleli özelliklerine daha yakındır.

2.2.2.2. Geliş Açısı

İyon akısının geliş açısı sistem geometrisine, buharlaştırma kaynağına, taşıyıcı tasarımına ve taşıyıcı hareketine bağlıdır. Genel olarak, iyonların geliş açısı yüzeye dik olduğunda film yoğunluğu artar ve kütleli değerlere yaklaşır [17].

2.2.2.3. Örgü Hataları

Örgü hataları, atom boşlukları, atom kümeleri ve dislokasyonlar gibi örgü düzensizlikleridir. Boşluklar, yoğunluk gibi film özelliklerini etkilerler. Örgü hataları, film büyümesi sırasında tüm örgü konumlarını doldurmayan atomlar tarafından oluşturulur. Filmdeki örgü hataları elektriksel iletkenliği de etkiler. Genel olarak, yüksek hata yoğunlukları, zayıf elektriksel iletkenliğe yol açar. Büyütme işlemi sırasında hata yoğunluğu, bombardıman enerjisine bağlıdır. Örgü hatalarının sayısı başlangıçta bombardıman enerjisiyle azalır, 200eV'un üzerindeki değerlerde artar [17].

2.2.2.4. Film Yoğunluğu

Film yoğunluğu, elektrik direnci, mekanik deformasyon gibi bazı film özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Düşük sıcaklıklarda ve iyon bombardımanı yapılmayan koşullar altında büyütülen filmin yapısı geometrik etkilerle belirlenir, parçacıkların geliş açısı film yoğunluğu üzerinde önemli etkiye sahip olur.

Bombardıman koşullarında geri sıçrama, sıçratma ve yeniden kaplama, artan çekirdek yoğunluğu ve adatomların artan yüzey hareketliliği filmin yoğunluğunu arttırıcı ve film özelliklerini düzenleyici etkiye sahiptir. Yüksek enerjili parçacıklar bombardımanı, filmin yüzeyi tamamen kapatması özelliğini de geliştirir ve büyütülen filmdeki gözenekleri azaltır. Bu artan yoğunluk ve gelişmiş yüzey kapatma etkisi, artan sertlik, azalan elektrik direnci gibi istenilen film özelliklerine ulaşılmasına yardımcı olur [21].

2.2.2.5. Mikroyapı Üzerinde Alt Tabakanın Etkisi

Yapısal bölge modelleri film mikroyapısının sınıflandırılmasında yeterli bilgi vermesine rağmen, film büyümesi üzerinde alt tabakanın etkilerini içermemektedir. Sert kaplamaların gözlemlenen mikroyapılarının sadece sıcaklık, iyon bombardımanı gibi işlem parametrelerine değil, taban malzeme kristal yapısı, morfoloji, bileşim gibi çekirdeklenmeyi etkileyen kritik etkenlere de bağımlı olduğu belirlenmiştir. Örneğin kaplamalardaki tercihli tane yönelmesi, yüzey enerjisini azaltma, yoğunlaşma katsayılarındaki değişim gibi etkilere sahiptir. Bu nedenle, taban malzemenin seçimi ve ön işlemleri de kritik önem taşır. Örneğin taban malzeme yüzey pürüzlülüğü ve yüzey düzensizlikleri fazla olduğunda, büyümenin sonucu olarak yüksek boşluk yoğunlaşması ve pürüzlülüğe sahip bölge 1 yapısı, yüksek taban malzeme büyütme sıcaklıklarında oluşması beklenen bölge 2 ve bölge 3 bölgelerinde bile oluşabilmektedir [17].

3. SİÇRATMA TEKNİĞİ İLE İNCE FİLM BÜYÜTÜLMESİ

İnce film büyütme teknikleri 1800’lü yıllardan beri bilinmekte olup, ancak son yıllarda kendisine endüstride bir yer bulabilmiştir. Teknolojide ve bilimsel çalışmalarda elektrokimyasal kaplama ve sprey püskürtme gibi pek çok film büyütme tekniği mevcuttur. Fakat bu filmlerin büyütme parametrelerinin kontrol edilebilmesi, kontrollü olarak büyütülmesi açısından son zamanlarda vakum’da ince film büyütme yöntemi teknolojiye ve bilimsel araştırmalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [12].

Modern teknolojilerle yapılan yüzey işlemlerinde, buhar fazından yapılan kaplamalar çok hızlı, teknolojik ve bilimsel gelişmelerin sağlandığı kaplama tekniklerinin başında gelmektedir. Bunun temel nedenlerinden biri, seramik kaplamaların bu teknikler kullanılarak oldukça kolay yapılabilmesidir. Buhar fazından yapılan kaplamalar içinde fiziksel buhar büyütme teknikleri, bu tekniklerin seramik kaplamaların yapılmasında çok iyi sonuçlar alınması nedeniyle son zamanlarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Fiziksel buhar büyütme tekniklerinin (PVD), buharlaştırmaya ve sıçratmaya dayanan iki temel grubu vardır. Bu gruplar buharlaştırma ve sıçratma işlemlerinin yapılma şekillerine göre kendi içlerinde gruplara ayrılırlar.

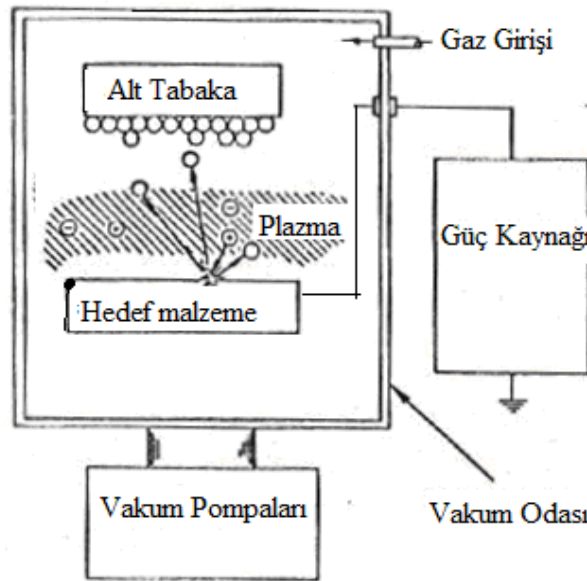
3.1. Sıçratma Tekniği

Sıçratma tekniği İngilizcesi ‘sputtering’ olan ve kelime anlamı katı bir yüzeyden atomları koparma işlemine verilen isimdir [15]. Katı bir malzemenin atomları, yüzeyini yeterli enerjilere sahip atomlar veya iyonlarla (yaklaşık 30eV’un üstünde) bombardıman etmek suretiyle fırlatılabilirler. Başka bir deyişle, hedef malzeme rolünü oynayan katı formdaki malzeme, bir iyon demeti ya da iyonize olmuş gazların, hedefe yönlendirilmesiyle sıçratılabilir [33]. Bu yöntemle vakum içinde, katı bir kaynak, yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek kaynaktan kopartılan atom veya moleküller alt tabaka üzerinde büyütülerek ince film meydana getirirler [34].

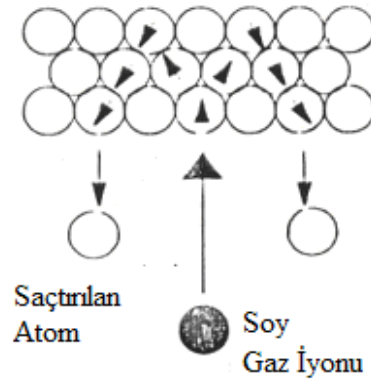
Sıçratma tekniği, buharlaştırmaya göre daha hızlı ve pratik olduğu için endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yöntemin sıkça kullanıldığı yerler; bina camların kaplanması ve ışımayı yansıtan camların, yansımalarla karşı duyarlı gözlük camlarının, görünür bölge

yansıtıcı aynaların vb. kaplanması olarak örneklendirilebilir. Bu teknik ile kaplama işlemi asal gaz ortamında yapıldığı için işlem basıncı diğer benzer düzeneklere göre daha yüksektir [12].

Şekil 3.1’de sıçratma işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Sıçratma işlemi için öncelikle vakum odası içinde bulunan iki elektrota hedef ve alt tabaka yerleştirilir. Daha sonra vakum odası istenilen basınç düzeyine geldiğinde vakum odasına soy gaz pompalanır. Vakum odası içindeki serbest elektronlar elektrik alan tarafından hızlandırılırlar. Bu enerjik serbest elektronlar Ar atomlarıyla çarpışırlar ve Ar atomlarını uyarırlar. Argon kullanılmasının nedeni soygazlar diğer atomlarla reaksiyona girmezler bunlar içinde Ar gazının kütlesinin oldukça yüksek olması, daha rahat hedeften atom koparmasıdır. Bu uyarılan Ar atomları hedefe doğru yönlenererek hedeften nötral atomları ve ikincil elektronları koparırlar. Kopan bu nötral atomlar saçılarak alt tabakaya doğru yoğunlaşıp ince film oluştururlar. İkinci elektronlar ise Ar atomları ile çarpışarak Ar atomlarını iyonize eder ve bu şekilde işlem devam eder [34,35]. Şekil 3.2’de sıçratma sisteminin mekanizması verilmektedir.



Şekil 3.1. Sıçratma işleminin şematik gösterimi [26].



Şekil 3.2. Sıçratma mekanizması [26].

Sıçratma teknikleri dört kısma ayrılır. Bunlar, radyo frekansı (RF), doğru akım (DC) ve magnetron sıçratma ve reaktif sıçratma teknikleridir. Sıçratma işlemi burada kullanılan güç kaynağının cinsine göre, hedef malzemeye ve istenen film büyüme oranına göre değişik isimlerle tanımlanır [15,35]. Örneğin elektrotlar arasına uygulanan voltaj bir Radyo Frekans aralığında frekansa sahip voltaj titreşimlerini üreten kaynak ise elde edilen işlem RF Sıçratma olarak adlandırılırken, elektrotlar arasına uygulanan voltaj bir doğru akım üreten güç kaynağı olduğunda DC Sıçratma adını almaktadır. Hedef üzerine yerleştirilen mıknatıslar ile hedef malzemeye elektriksel alan vasıtasıyla yönelmiş olan iyonlara dik doğrultuda bir manyetik alanla hızlanması sağlanır. Manyetik alan sayesinde elektronlar dairesel yörünge boyunca hareket ederler. Elektronların yolları uzadığı için hareketleri boyunca daha çok çarpışma yaparak hedef üzerinde iyon yoğunluklarını artırırlar. Bu sayede hedeften atom koparma işlemi daha hızlı bir şekilde gerçekleşir ve aynı zamanda daha düşük basınçlarda plazma oluşturabilirler. Bu şekilde yapılan sıçratma işlemi, magnetron sıçratma olarak adlandırılır. Vakum odasına soygaz ile beraber, hedef malzeme ile kimyasal olarak etkileşebilecek bir reaktif gaz (O_2 , N_2) da gönderilirse, bu sıçratma işlemi reaktif sıçratma olarak isimlendirilir. Bu reaktif gaz ile hedef malzeme etkileşerek hedef malzemenin kimyasal yapısında farklı bir kimyasal yapıya sahip kompozit yapı oluşur. Bu kompozit yapıdaki malzeme alt tabaka üzerine giderek bir ince film halinde kaplanır. Bu sıçratma tekniklerine birlikte yani mıknatıslar RF sıçratma yapan sisteme takılırsa RF magnetron sıçratma, DC sıçratma yapan sisteme takılırsa DC magnetron sıçratma olarak isimlendirilir. Reaktif gazlar RF sistemde kullanılırsa RF reaktif sıçratma olarak isimlendirilir, reaktif gazlar DC sisteme gönderilse DC reaktif sıçratma denir [34,36].

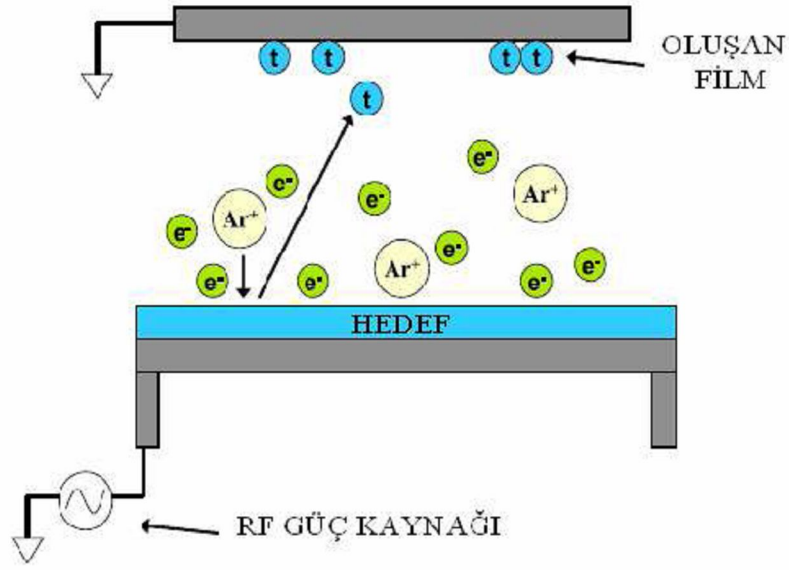
Sıçratma tekniğinin verimi, hedeften kopan parçacık sayısı ile hedefe çarpan parçacık sayısının oranı olarak tanımlanır. Sıçratma verimi, hedef materyale bombardıman iyonlarının kütlelerine, bombardıman iyonlarının enerjisine, gönderilen iyonların yönelimine, açısına ve basınca bağlıdır. Sıçratma tekniğinin uygulama alanları ince film kaplamada, mikroelektronik aygıtlar, dekoratif kaplamalarda ve koruyucu kaplamalarda genellikle kullanılmaktadırlar [12]. Son yıllarda sıçratma teknolojisindeki gelişmelerin çoğu, manyetik alanda yapılmıştır. Bunun nedeni, manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamaların, mikro elektronik, optik, türbin bıçakları, manyetik ve optik diskler, kesici takımlar ve solar kontrol endüstrisi gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmasıdır.

3.1.1. RF Sıçratma Tekniği

RF Sıçratma yöntemi günümüz koşullarında bilimsel ve ticari olarak büyük önem taşımaktadır [1,16]. Sistemin özelliği RF güç kaynağının kullanılmasıdır. Sistemle katı bir hedef, yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek hedeften koparılan atom veya moleküller alt tabaka üzerine büyütülerek bir film oluştururlar. Bu sıçratma sistemi; RF güç kaynağı, deneyin yapılabileceği ortam ve vakum uygulanabilecek bir sistem, vakum pompası, eşleştirme ünitesi olarak dört kısımdan oluşmaktadır. RF sıçratma sisteminin frekansı 13.56 MHz dir. RF saçırma tekniği ile yalıtkan malzemenin ince filmlerini oluşturmak mümkündür [16,34].

Vakum pompası, vakum odasındaki vakumu düşük basınç değerlerine indirmek amacıyla kullanılmaktadır. Basıncın düşürülmesinin nedeni, vakum odasını ortamdaki diğer gazlardan temizlemek ve iyonize olmuş parçacıkların ortalama serbest yolunu arttırarak yüksek enerjili çarpışmalar elde etmektir. Böylece plazma oluşturmak istenen malzemenin saflığını ve kalitesi arttırılabilir [16].

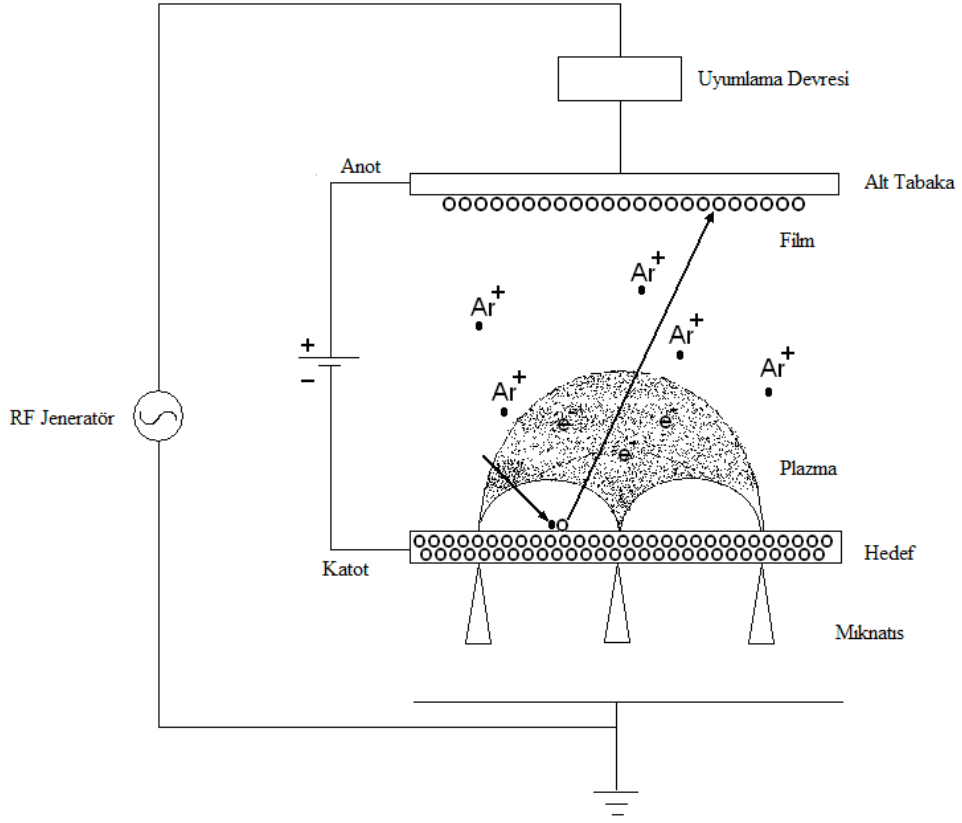
Radyo frekansı güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Elektromanyetik dalga, elektrotların her yarım devirde katodun anot, anodun katot görevi yapmasıyla oluşur. Sistemde hedef malzeme katoda alt tabaka anoda yerleştirilir. Bu dalgalar eşleştirme ünitesi sayesinde vakum odası içinde titreşim frekansı oluşturarak hedef materyalin iyonize olmasını sağlar. Frekansın yüksek olması plazma deşarjını sürekli hale getirir [16,34]. RF sıçratma sistemi ile film oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. RF sıçratma sistemiyle film oluşumunun şematik görünümü [34].

RF Magnetron Sıçratma Tekniği, iyonlaşmış soy gaz (argon) atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektriksel alana ek olarak bu alana dik doğrultuda bir de manyetik alan uygulanır. Manyetik alan sayesinde elektronlar yörünge boyunca hareket ederler. Elektronların yolları uzadığı için hareketleri boyunca daha çok sayıda çarpışma yaparak hedef üzerinde iyon yoğunluğunu arttıırırlar. Bu sayede hedeften atom koparma işlemi daha hızlı gerçekleşir ve aynı anda daha düşük basınçlarda plazma oluşturulabilir [12].

Sistemde hedeften kopan elektronların alt tabakaya varması manyetik alan aracılığıyla engellendiğinden alt tabaka üzerindeki filmin ısınması da bir kademeye kadar önlenmiş olur. Isıya duyarlı numuneler için bu yöntem özellikle tercih edilmektedir [15,16]. RF magnetron sıçratma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Sistemik RF sıçratma sistemi [34].

DC ve RF yöntemi arasındaki en önemli fark DC ince film kaplama yalıtkan malzemelerin kaplanması için uygun değildir. Çünkü hedef yüzeyinde oluşan pozitif iyon yükü akışını geri çevirir ve sıçratma sürecini durdurur. RF sıçtırma yönteminde ise iletken elektrotlar kullanmak zorunlu değildir. RF frekansı, plazma deşarjını sürdürmek için yeteri kadar yüksektir.

4. ELEKTRON MİKROSKOPİSİ

Mikroskop, gözle görülemeyecek kadar küçük olan yapıların görüntülerini büyütür ve o yapılar hakkında ayrıntılı bilgiler sunan optik alettir. Mikroskopi ise, mikroskoba takılan (detektör, analizör, sıcaklık uygulama sistemleri vb.) çeşitli aletlerle yapılan uygulamaları ve numune hazırlanmasını da içine alan bir kavramdır. Uzun yıllardır kullanılan ışık mikroskoplarında numuneler 400–700 nm dalga boylu fotonlar ile elektron mikroskoplarında ise numuneler 0,001–0,01 nm dalga boylu elektronlar ile incelenmektedir. Elektronlar ile fotonların dalga boyu arasındaki bu belirgin fark ayırma gücü, büyütme oranı ve alan derinliği gibi numunelerin mikroyapılarının incelenmesinde ayrıntılı bilgilerin elde edilmesini etkileyen faktörler açısından elektron mikroskoplarını ışık mikroskoplarından daha avantajlı yapmaktadır [37-39].

Günümüzde elektron mikroskopları ile malzemelerin mikroyapıları ve kimyasal bileşimleri hakkında ayrıntılı bilgiler elde etmek mümkündür. Bunun için yapılması gereken işlem, problem için uygun mikroskobu seçerek gerekli inceleme yöntemlerini uygulamaktır [37].

Maddelerin özelliklerinin anlaşılması için atomlar arası mesafeden daha küçük dalga boylarına ihtiyaç vardır. Bu amaçla TEM (Geçirmeli Elektron Mikroskobu) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) geliştirilmiştir. TEM ince numunelerin içyapıları hakkında bilgi elde etmekte kullanılırken, SEM ise numunelerin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinin incelenmesinde kullanılmaktadır [37,40,41].

4.1. Elektron Mikroskopi Çeşitleri

4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskopisi

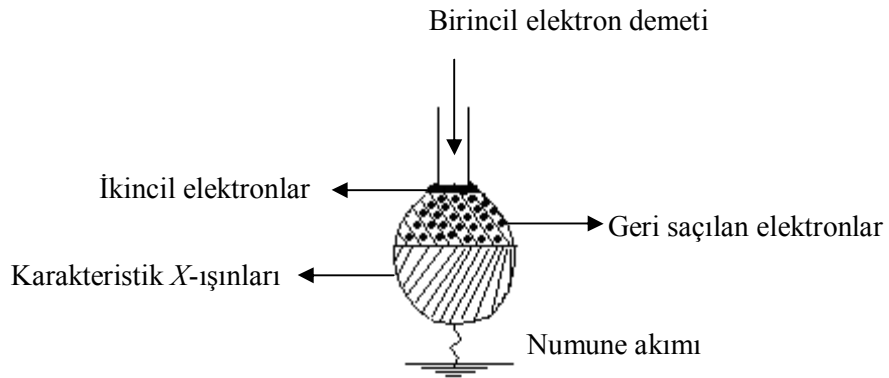
Taramalı elektron mikroskobunun çalışması, TEM ile benzerdir. Bu, her iki mikroskoptaki elektron tabancası, yoğunlaştırma mercekleri ve vakum sistemi gibi özelliklerin benzerlik göstereceğini göstermektedir. Fakat görüntülerin meydana getirilmesi ve büyütülmesi tamamen farklı yollarla olmaktadır. TEM ince numunelerin içyapıları hakkında bilgi sağlarken, SEM büyük numunelerin yüzeye yakın kısımları veya

yüzey yapıları hakkında bilgi edinmek amacı ile kullanılır. SEM ile elde edilen görüntüleri yorumlamak TEM ile elde edilen görüntüleri yorumlamaktan çok daha kolaydır.

SEM’de kullanılan elektron tabancası genellikle termoiyonik emisyon tipi tungsten flamandır ve bu tip elektron tabancaları TEM’de kullanılan elektron tabancalarından genellikle daha düşük enerjili elektronlar (2–40 keV) üretir.

Elektronlar, objektif merceğin altında yer alan tarama bobinleri tarafından numuneyi karşıdan karşıya tarar. Numuneden saçılan elektronlar detektör ile toplanarak sinyal oluşturulur ve elektronik devreler yardımıyla görüntü elde edilir.

SEM’de numune üzerine gelen elektron demeti ile numune arasında meydana gelen etkileşimler Şekil 4.1’de gösterilmektedir. SEM’de gerilim altında ivmelendirilen elektron demeti numune üzerinde bir noktaya odaklanır. Numune yüzeyine odaklanan demete birincil elektron demeti denir. Elektronların numune içerisine girdiği bölgeye ise ‘etkileşim hacmi’ denir. Bu bölgede esnek ve esnek olmayan saçılmalar olur. Esnek saçılmalar, elektron numuneden çıkıncaya kadar; esnek olmayan saçılmalar ise elektronların enerjileri bitinceye kadar veya numuneden çıkıncaya kadar gerçekleşir [37,42-46].



Şekil 4.1. SEM ile gönderilen elektron demetinin numune üzerindeki dağılımı ve ortaya çıkan farklı etkileşimler [46].

Numune yüzeyine çarpan elektronların bir kısmı enerji kaybına uğramadan geri saçılır. Elektronların numuneye çarpması sonucu numune yüzeyinde 10 nm derinlikte de ikincil elektronlar oluşur. İkincil elektronlar (SEI), numune üzerine gelen elektron demetinin yüzey atomlarını uyarıp elektron koparması sonucu ortaya çıkarlar. Bu elektronların enerjileri numune üzerine gelen elektronların enerjilerinden çok daha küçük olup yaklaşık 50 eV civarındadır. Gelen demetin diğer elektronları ise numune tarafından emilerek toprağa verilir. Bu şekilde oluşan akıma ‘numune akımı’ denir [37].

SEM’de numune üzerine gelen elektron demeti ile numunenin etkileşimi sırasında, numune içersinde oluşan *X*-ışınları dışarı yayılır.

Numuneden gelen elektronların detektör ile algılanması sonucu oluşan sinyal bir çoğaltıcı tarafından yükseltilerek katot ışınları tüpüne (CRT: *Cathode Ray Tube*) gönderilir. CRT ekranında numunenin fazla elektron yayınlayan bölgeleri aydınlık, diğer bölgeleri ise karanlık görünür.

Numuneden saçılan ikincil elektronlar sintilasyon sayıcıları ile toplanır. Bu elektronların sayısı, malzeme yüzeyinin atom numarasına ve yüzey yapısına bağlıdır. Geri saçılan elektronlar ise katı hal detektörü ile toplanır. Geri saçılan elektron görüntüsünün aydınlığı incelenen numunenin atom numarasına bağlıdır [37].

Numuneden saçılan *X*-ışınları da yine katı hal *X*-ışınları detektörü (silisyum-lityum kristali) ile algılanırlar. Algılanan sürekli ve karakteristik *X*-ışınları yardımı ile numune içersinde bulunan farklı fazların analizi yapılabilir [37,42-44].

4.1.2. Geçirmeli Elektron Mikroskopisi

Geçirmeli elektron mikroskobu, elektronların geçebileceği kadar ince olan numunelerden bilgi elde edebilmek için kullanılan mikroskobun adıdır. Geçirmeli elektron mikroskopisi ise geçirmeli elektron mikroskobu ile yapılan inceleme, araştırma ve çalışmaların tümüne denir. TEM ile elektron geçişi için yeterince ince olan numunelerden geçen elektronlar ile numunenin görüntüsü veya difraksiyon deseni oluşturularak mikroyapısı incelenebilir.

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Alt Tabakaların Temizlenmesi İşlemi

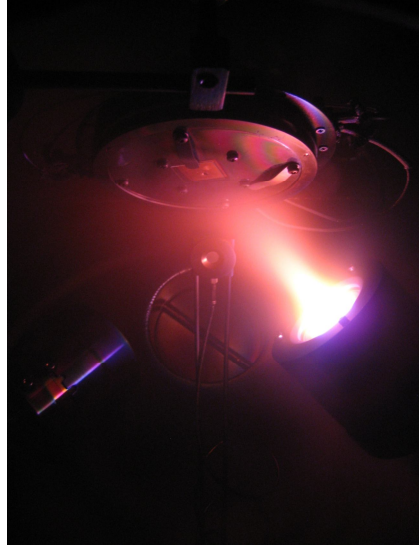
Bu çalışmada mikroyapıları araştırılan AlN1, AlN2 ve AlN3 ince filmlerinin üzerine büyütüldüğü 22x22 mm² ebatlarındaki borosilikat cam alt tabakalar ultrasonik temizleyicide 10 dakika süresince asetonda ve metanolde temizlendikten sonra, içerisine filtre kağıdı yerleştirilmiş kapaklı bir petri kutusu içinde kurumaya bırakıldı.

5.2. Filmlerin Büyütülmesi İşlemi

Temizlenen alt tabakalar Şekil 5.1’de gösterilen sistemdeki film büyütme odasına yerleştirildikten sonra büyütme odasının kapağı kapatıldı ve sistem vakuma alındı. Taban basıncı 1.10^{-6} Torr değerinin altına düştüğünde, kelebek vana kapatılarak film büyütme ortamına argon gazı verildi. RF güç kaynağı ünitesinden güç değeri 120 W’a ayarlanarak alüminyum hedef yüzeyinin 15 dakika süresince ön sıçratma yapması sağlandı. Böylece, hedef yüzeyinde var olabilecek oksit ve bir önceki büyütme işleminden kalabilecek olan azot tabakası ile kirliliklerin yüzeyden uzaklaştırılması sağlandı. Bu ön sıçratma işleminden sonra, Reaktif RF Magnetron Sıçratma Tekniği kullanılarak 400 nm kalınlıklarındaki AlN1, AlN2 ve AlN3 ince filmleri sırası ile 50°C, 150°C ve 250°C’lik alt tabaka sıcaklıklarında, alt tabaka ile hedef arasındaki uzaklık 11 cm olacak şekilde, 10mTorr’luk toplam gaz basıncı (%70 N₂, %30 Ar) ortamında, 120 W’lık güç değeri ile büyütüldü. Çalışmalar esnasında elde edilen AlN plazması Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. İnce film büyütme sistemi.



Şekil 5.2. Film büyütme işlemi esnasında elde edilen AlN plazması.

5.3. Elektron Mikroskop Numunelerinin Hazırlanması

5.3.1. SEM için Numune Hazırlanması

Yüzey morfolojileri incelenecek AlN1, AlN2 ve AlN3 ince filmleri kesildikten sonra üzerine çift taraflı yapışkan ve iletken karbon band bulunan metal silindirler üzerine yerleştirildi. İncelenen filmler seramik özellik sergilediğinden dolayı, numune yüzeyinde şarjlanmanın önlenmesi ve numune yüzeyinden ikincil elektron yayınının artırılması amacıyla numune yüzeyleri altın ile kaplandı.

5.4. Numunelerin Mikroyapı Analizleri

Reaktif RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile büyütölen alüminyum nitrür ince filmlerinin mikroyapı analizleri Şekil 5.3’de gösterilen JEOL JSM-7001F Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapıldı. Farklı büyütme (25000X, 75000X ve 100000X) oranlarında elde edilen filmlerin SEM görüntülerinden, numunelerin yüzey morfolojileri ve çekirdeklenme mekanizmaları hakkında detaylı bilgiler edinildi. Filmlerin kimyasal kompozisyonunu belirlemek amacı ile, Şekil 5.3’de gösterilen SEM cihazına bağlı olan OXFORD INCA Enerji-Ayrırım X-Işını Analizi (EDX) detektörü kullanıldı. Numunelerin her biri için EDX analizi, 25000X büyütme oranında film yüzeyinin tamamından yapılırken, 75000X büyütme oranında ise numune yüzeyindeki belirli noktalar üzerinden spektrum alınarak gerçekleştirildi. Elde edilen spektrum sonuçları ile AlN1, AlN2 ve AlN3 ince filmlerinin yapısında bulunan fazlar belirlendi.



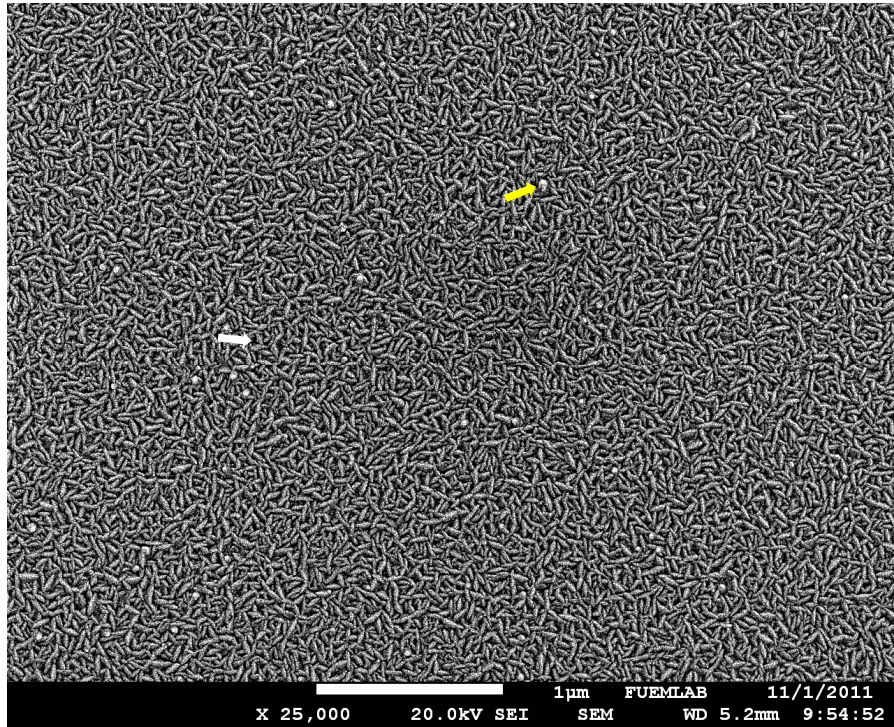
Şekil.5.3. JEOL JSM-7001F Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).

6. MİKROYAPI ANALİZ SONUÇLARI

6.1. SEM Gözlemleri ve EDX Sonuçları

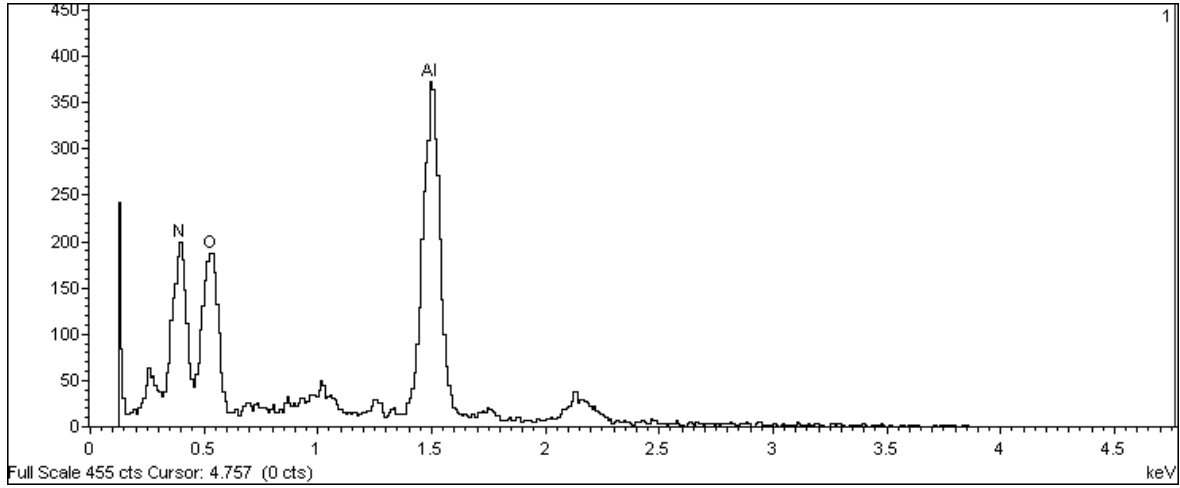
6.1.1. AlN1 Numunesinin SEM Gözlemleri

Şekil 6.1’de AlN1 numunesinin SEM görüntüsü gösterilmektedir. Görüntüden görülebildiği gibi, AlN1 numunesinin yüzey yapısı farklı boyutlardaki kurtçuk tipi tanelerden oluşmaktadır. Yüzey yapısını oluşturan tanelerin ~42 nm ile ~129 nm aralığında farklı büyüklüklere sahip oldukları belirlenmiştir. Resimde gösterilen bölgede dikkat çekici olan diğer bir nokta ise, film yüzeyinde topaklanmaların ve boşlukların meydana gelmesidir. Oluşan topakların ortalama boyutunun ~40 nm değerinde olduğu tespit edilmiştir. Gözlemlenen topakların AlN1 numunesinin yapısal bir kusuru olduğu ve alt tabaka sıcaklığının düşük (50°C) olması nedeni ile oluştuğu düşünülmektedir. AlN1 numunesinin farklı bölgelerinde de benzer topaklanma ve boşluklara rastlanmıştır.



Şekil 6.1. AlN1 numunesinin genel yüzey yapısını gösteren SEM görüntüsü. (Sarı ok film yüzeyinde oluşan topaklanmalardan bir tanesini gösterirken, beyaz ok yüzey yapısındaki boşluklardan birini işaret etmektedir)

Şekil 6.2’de, Şekil 6.1’deki film yüzeyinin tamamından alınan EDX spektrumu görülmektedir. Spektrum sonuçları Tablo 6.1’de verilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, AlN1 numunesinde yüzeyi oluşturan yapıların atomik olarak % 37,56 Al, % 37,21 N ve % 25,23 O içerdiği görülür. Bu sonuçlar, oksitten dolayı AlN1 numunesinin yüzeyinde ikincil fazın olabileceğini göstermektedir.



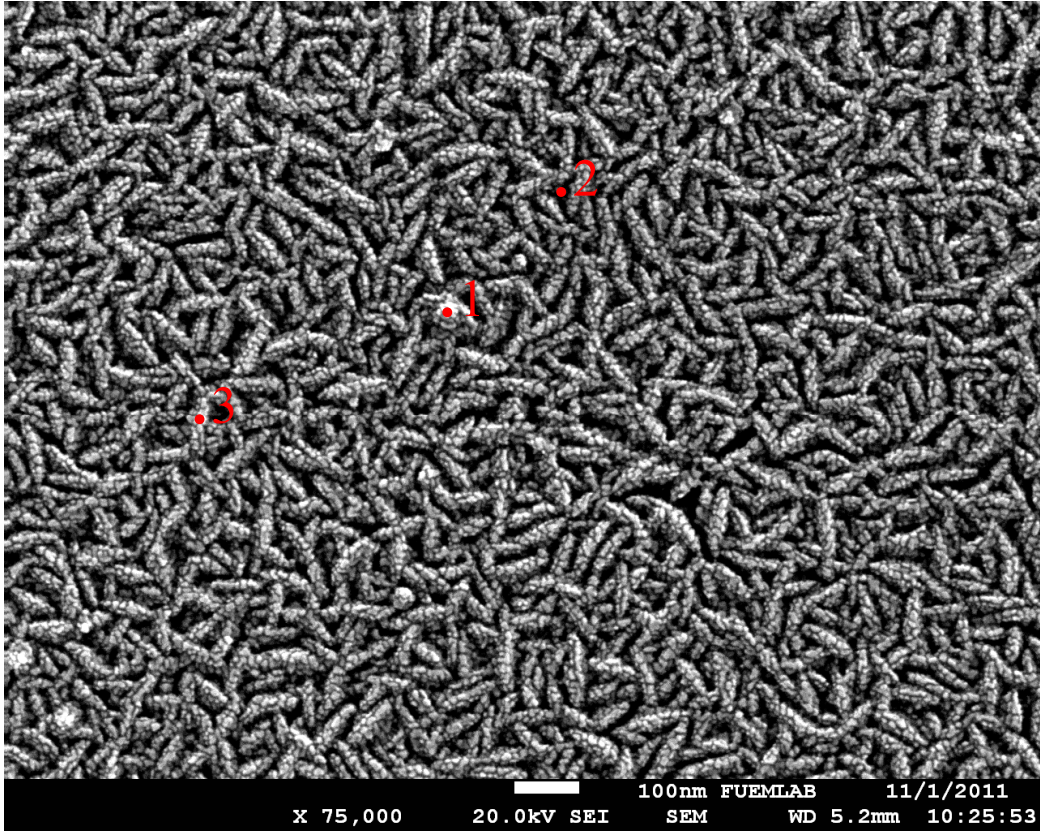
Şekil 6.2. Şekil 6.1’de gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu.

Tablo 6.1. Şekil 6.2’deki EDX spektrumunun sonuçları.

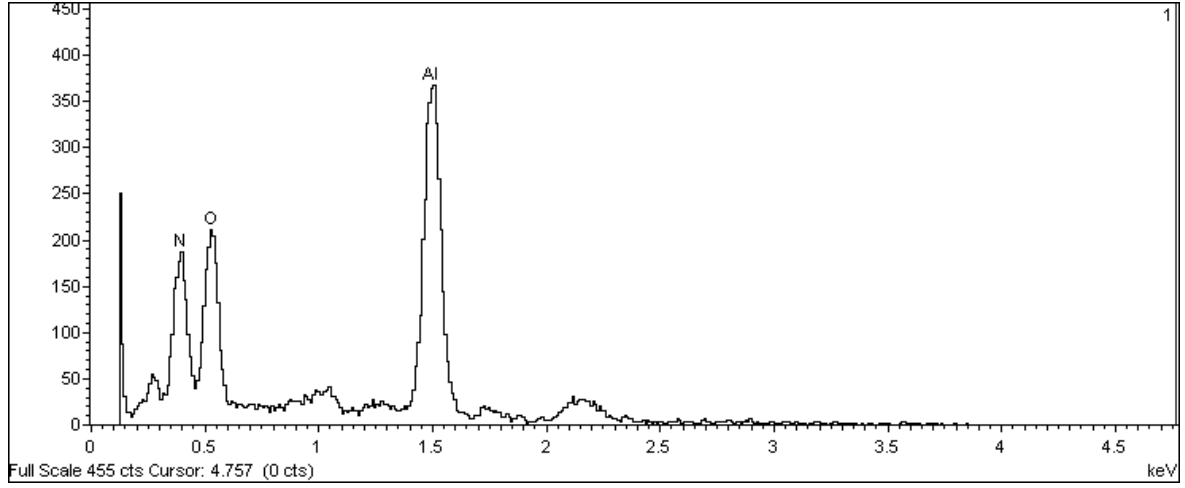
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	52,29	37,56
N	26,89	37,21
O	20,82	25,23
Toplam	100,00	100,00

AlN1 numunesinin film yüzeyinin yapısı hakkında daha detaylı bilgiler edinebilmek için daha yüksek büyütme görüntüleri alınmıştır. Şekil 6.3, AlN1 numunesinin 75000X büyütmede çekilen detaylı SEM görüntüsüdür. Görüntü incelendiğinde, Şekil 6.1’deki büyütme oranında dikkat çeken kurtçuk tipi yapıların ve oluşan topakların çekirdeklenme mekanizması net bir şekilde gözlemlenirken, bu yapıların aslında daha küçük boyutlara sahip tanelerin bir araya gelerek oluşturdukları istiflenmeler oldukları açıkça görülmektedir. Büyük taneler arasındaki boşluk genişliklerinin ~13 nm ile ~36 nm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu yapıların kimyasal bileşimleri hakkında bilgi sahibi

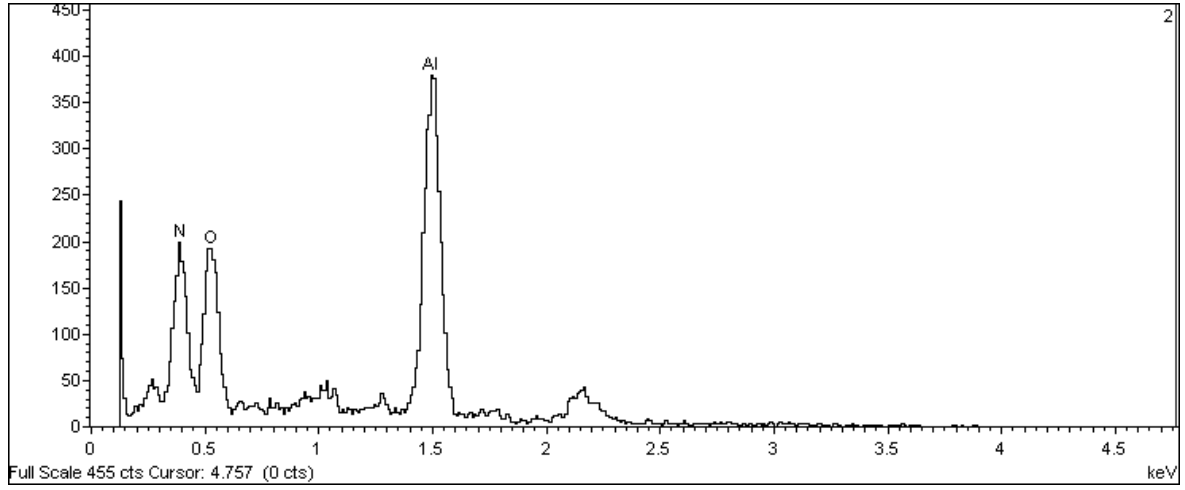
olabilmek için yüzey üzerinde farklı noktalardan EDX spektrumları alınmıştır. Şekil 6.4.a'da gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.3'teki 1 nolu noktadan (Spektrum 1), Şekil 6.4.b'de gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.3'teki 2 nolu noktadan (Spektrum 2) ve Şekil 6.4.c'de gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.3'te 3 olarak işaretlenen noktadan (Spektrum 3) alınmıştır. Spektrumların elementsel sonuçları Tablo 6.2'de verilmektedir. Yüzey üzerinde farklı noktalardan alınan EDX spektrumlarından, incelenen film yüzeyinin her bölgesinin birbirine yakın atomik yüzdelere sahip Al, N ve O elementlerinden oluştuğu görülür. Ayrıca, EDX analizi sonuçlarından boşluk olarak görünen 2 nolu yapının iç kısmında AlN yapının var olduğu anlaşılmaktadır.



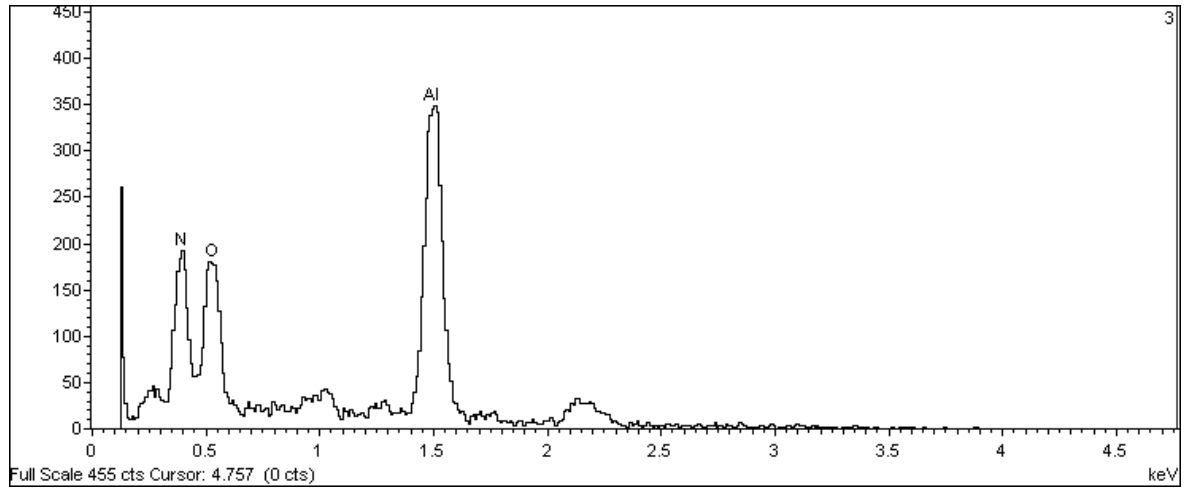
Şekil 6.3. AlN1 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.



(a)



(b)



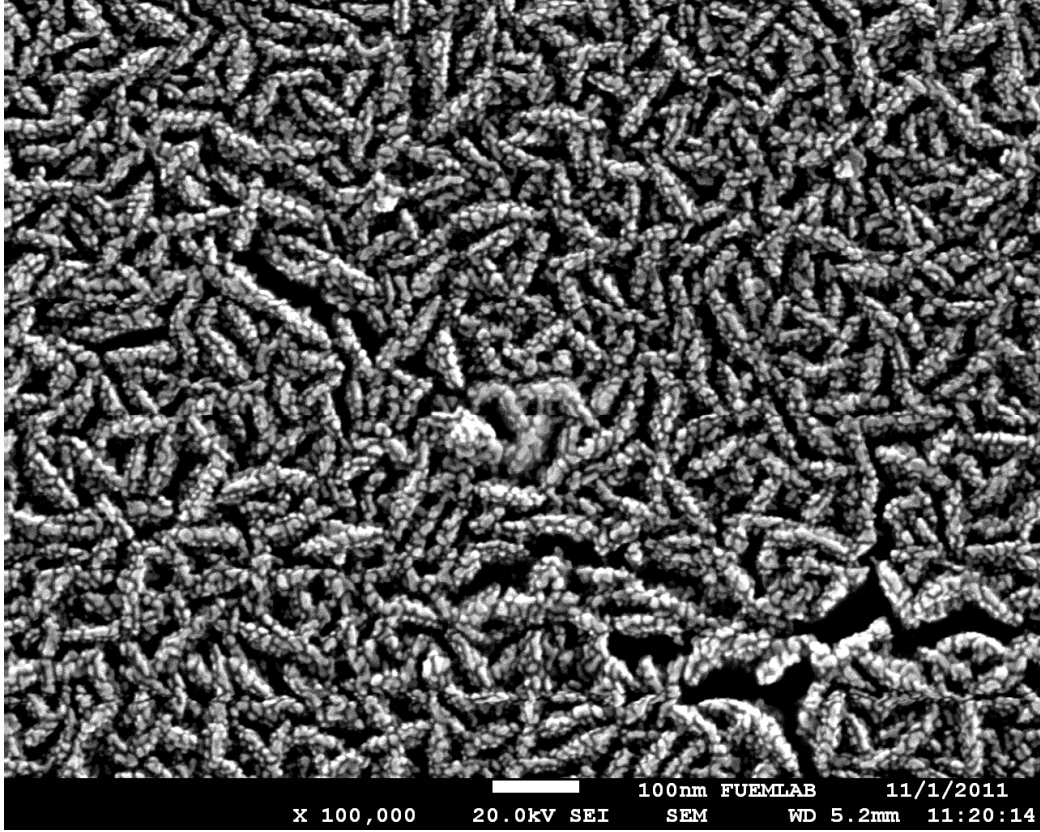
(c)

Şekil 6.4. Şekil 6.3'te gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları.

Tablo 6.2. Şekil 6.4’te gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.

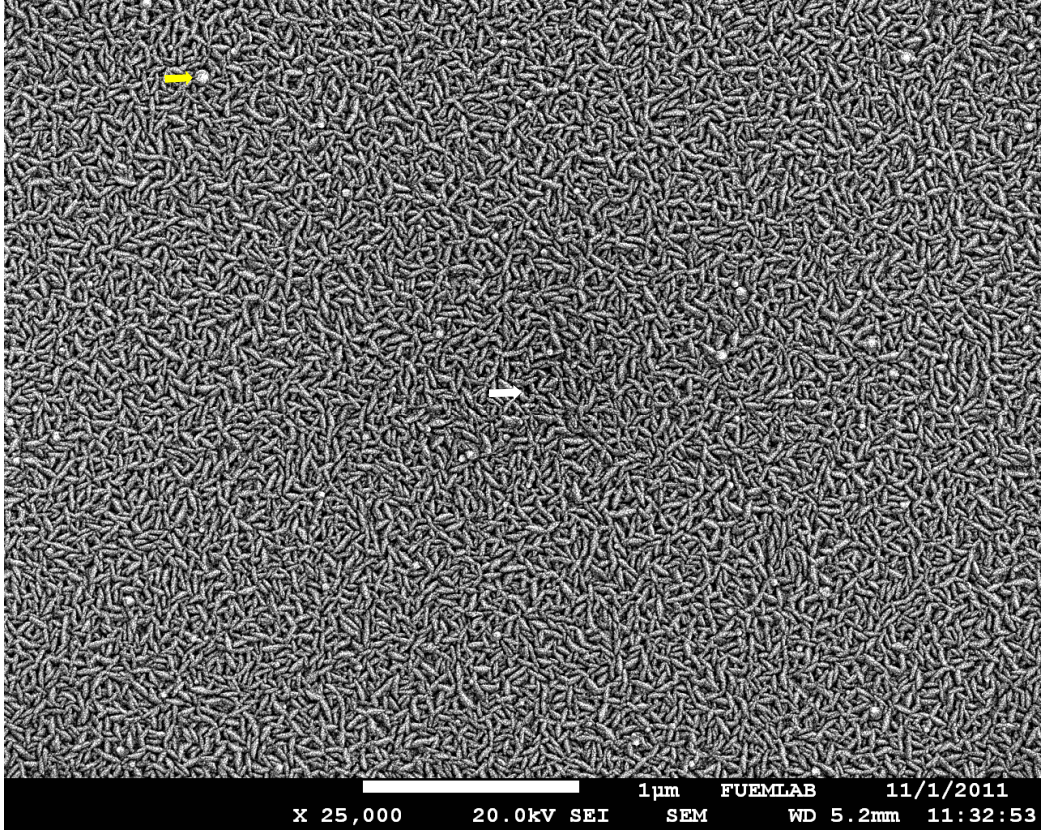
Spektrum 1		
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	52,51	37,81
N	26,12	36,24
O	21,37	25,95
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 2		
Al	52,70	37,93
N	27,02	37,46
O	20,28	24,61
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 3		
Al	53,37	38,51
N	27,54	38,27
O	19,09	23,22
Toplam	100,00	100,00

Şekil 6.3’teki incelenen film yüzeyinin 100000X büyütmede alınan çok daha detaylı SEM görüntüsü Şekil 6.5’te gösterilmektedir. Görüntüye bakıldığında, kurtçuk tipi yapıların herhangi bir yönelim ilişkisine bağlı kalmaksızın kendi aralarında rastgele yönelimli oldukları net olarak görülmektedir. Ayrıca, bu yapıların kristallenmesi açık bir şekilde görülmektedir. Ortalama tane boyutlarının ~5 nm ile ~27 nm değerleri aralığında değiştiği belirlenmiştir.

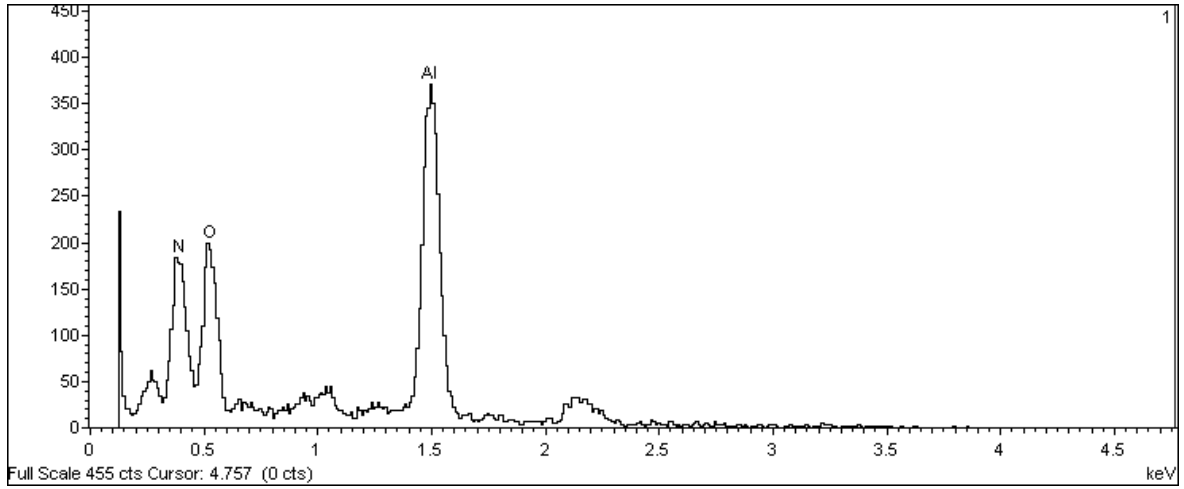


Şekil 6.5. Şekil 6.3'te gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.

AlN1 numunesinin film yüzeyinin 25000X büyütme oranında diğer bir bölgesinden alınan SEM görüntüsü Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Film yüzeyinin farklı bölgelerinden aynı büyütme oranlarında alınan bu gibi yeni görüntüler ile filmin yüzey yapısı hakkında daha kesin bilgilerin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Görüntüden anlaşılabileceği gibi, AlN1 numunesinin yüzey morfolojisinin Şekil 6.1'de incelenen bölge ile benzer özellikler sergilediği görülmektedir. Bu büyütmede gözlenen kurtçuk tipi tanelerin ölçülen boyutlarının ~40 nm ile ~129 nm değer aralığında değiştiği belirlenirken, oluşan topakların ortalama boyutunun ~41 nm değerinde olduğu tespit edilmiştir. Film morfolojisinde görülen topaklanmaların, film yüzeyinin pürüzlülüğünü artırdığı düşünülmektedir. Şekil 6.7'de, görüntülenen film yüzeyinin tamamından alınan EDX spektrumu gösterilmektedir. Tablo 6.3'te verilen spektrum sonuçlarının, Şekil 6.1'de verilen bölgenin kompozisyonu ile uyum içerisinde oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. AlN1 numunesinin farklı bir yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü. (Sarı ok film yüzeyinde oluşan topaklanmalardan bir tanesini gösterirken, beyaz ok yüzey yapısındaki boşluklardan birini işaret etmektedir)

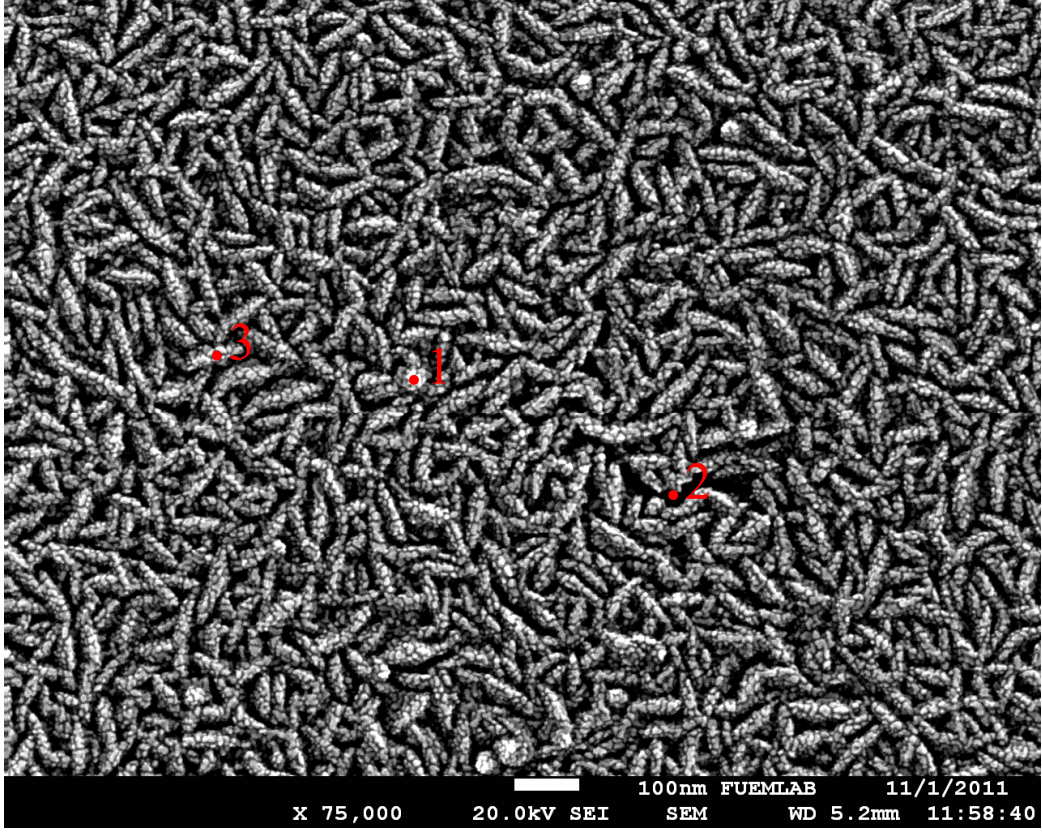


Şekil 6.7. Şekil 6.6’da gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu.

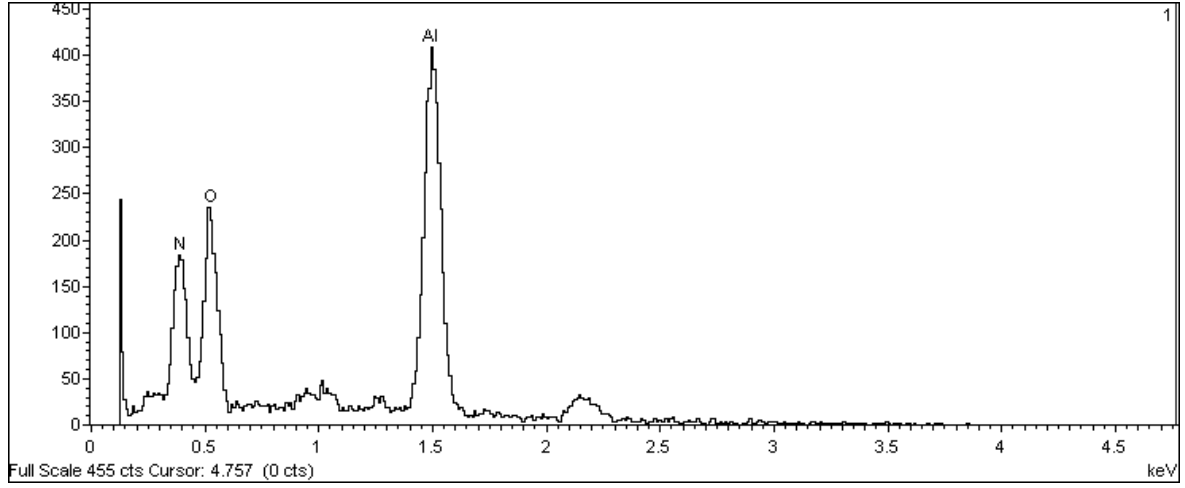
Tablo 6.3. Şekil 6.7’deki EDX spektrumunun sonuçları.

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	53,64	38,85
N	26,08	36,38
O	20,28	24,77
Toplam	100,00	100,00

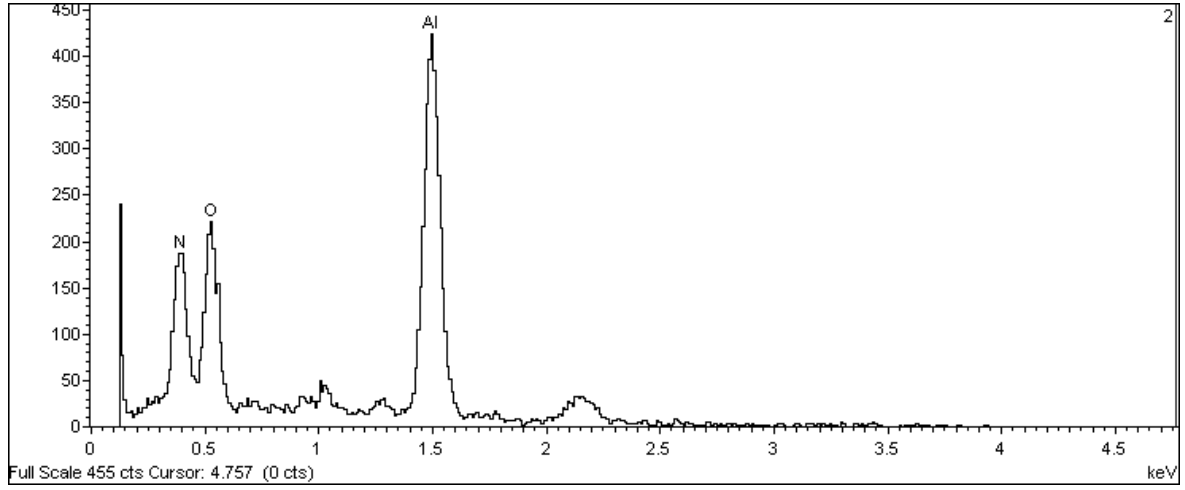
AlN1 numunesinin yüzey yapısını oluşturan tanelerin morfolojilerini daha detaylı görebilmek için 75000X büyütme oranında alınan SEM görüntüsü Şekil 6.8’de gösterilmektedir. Aralarında boşluklar bulunacak bir şekilde yüzeyde rastgele dağılan düzensiz kurtçuk tipi taneler filmin yüzey yapısını tamamlamaktadır. Taneler arasındaki boşluk genişliklerinin ~12 nm ile ~42 nm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 6.9’da, incelenen film yüzeyinin farklı noktalarından alınan EDX spektrumları gösterilmektedir. Şekil 6.9.a’daki EDX spektrumu Şekil 6.8’de gösterilen 1 nolu noktadan (Spektrum 1), Şekil 6.9.b’deki EDX spektrumu Şekil 6.8’de 2 nolu noktadan (Spektrum 2) ve Şekil 6.9.c’deki EDX spektrumu Şekil 6.8’de 3 nolu olarak işaretlenen noktadan (Spektrum 3) alınmıştır. Tablo 6.4’te verilen spektrum sonuçlarına bakıldığında, elementsel analizleri yapılan noktaların birbirine yakın atomik yüzdelerde Al, N ve O elementlerini ihtiva ettiği görülür. Elde edilen bu sonuçlar ile birlikte diğer noktalardan alınan bütün EDX spektrumlarının sonuçları değerlendirildiğinde, filmin bileşim olarak uygun oranlarda Al ve N içerdiği sonucuna varılmıştır.



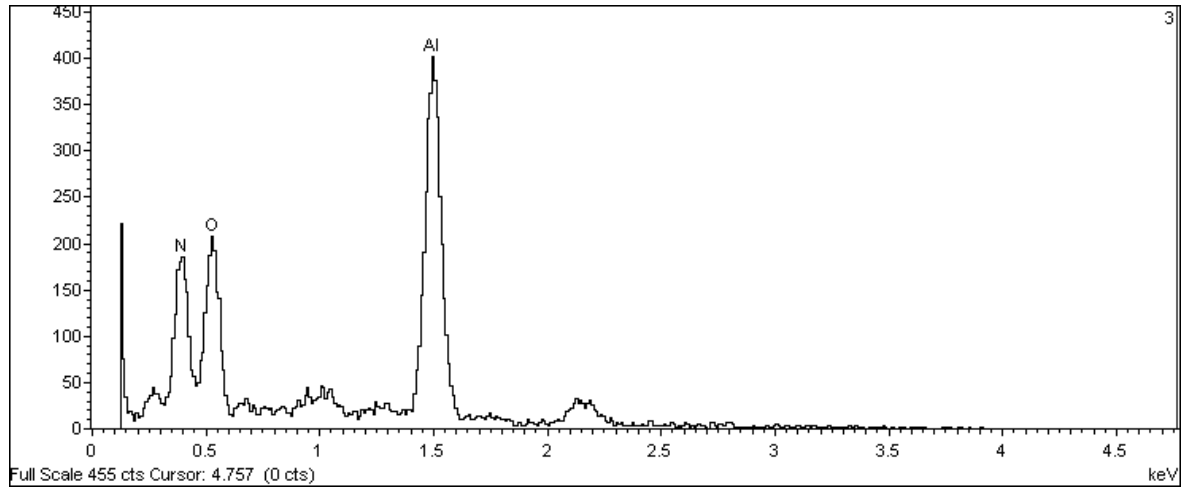
Şekil 6.8. AlN1 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.



(a)



(b)



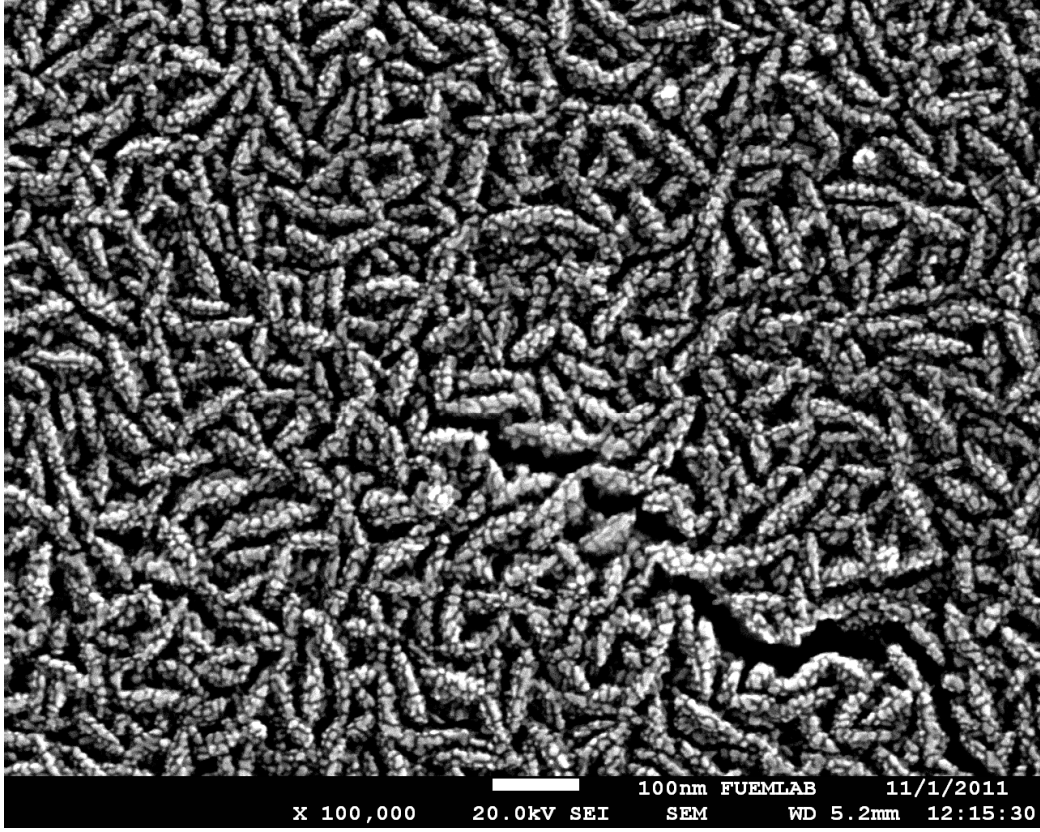
(c)

Şekil 6.9. Şekil 6.8’de gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları.

Tablo 6.4. Şekil 6.9’da gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.

Spektrum 1		
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	53,75	39,03
N	24,83	34,73
O	21,42	26,24
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 2		
Al	55,00	40,19
N	24,86	35,00
O	20,14	24,81
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 3		
Al	54,17	39,34
N	26,02	36,40
O	19,81	24,26
Toplam	100,00	100,00

Şekil 6.10’da AlN1 numunesinin 100000X büyütmede alınan SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 6.8’de gözlenen yapıların detaylı görüntüleri bu büyütme oranında daha yakından izlenebilmektedir. Benzer morfolojik özelliklerin film yüzeyinin bu bölgesinde de sürdürüldüğü görülür. Film yüzeyinde, büyüklükleri ~5 nm ile ~27 nm aralığında değişen tanelerin birleşmeleri sonucu oluşan büyük boyutlu yapıların çekirdeklenme mekanizması net bir şekilde görülmektedir.



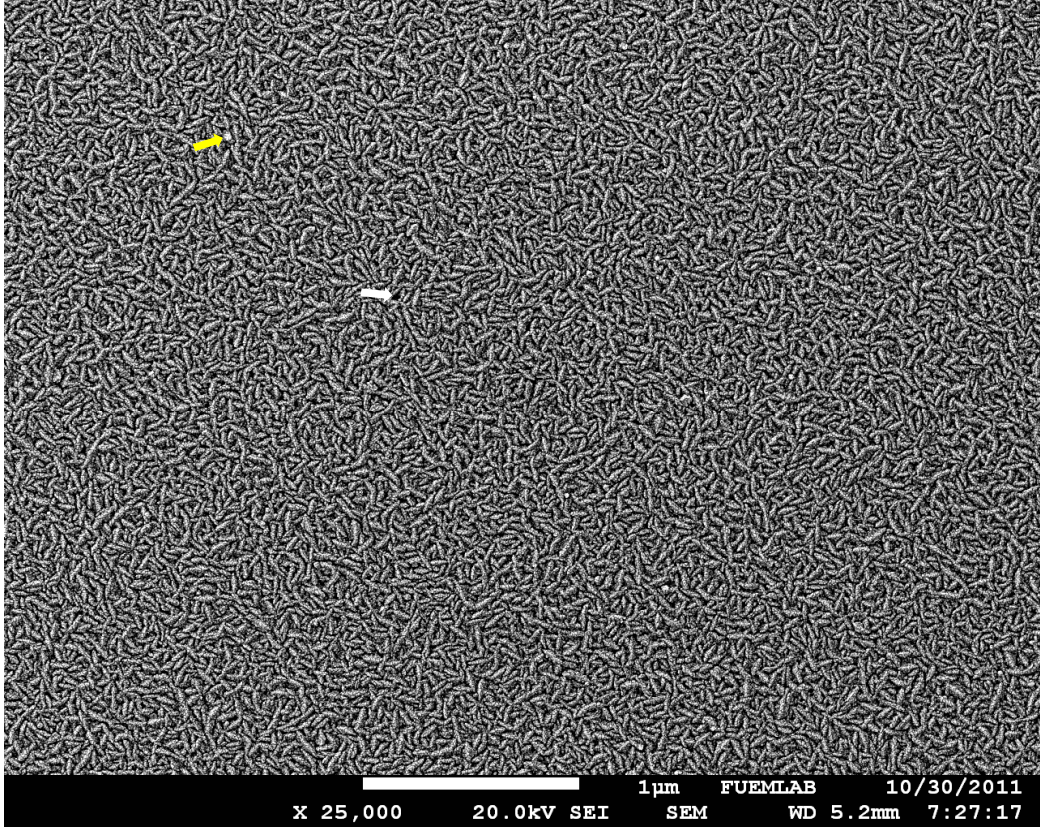
Şekil 6.10. Şekil 6.8’de gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.

6.1.2. AlN2 Numunesinin SEM Gözlemleri

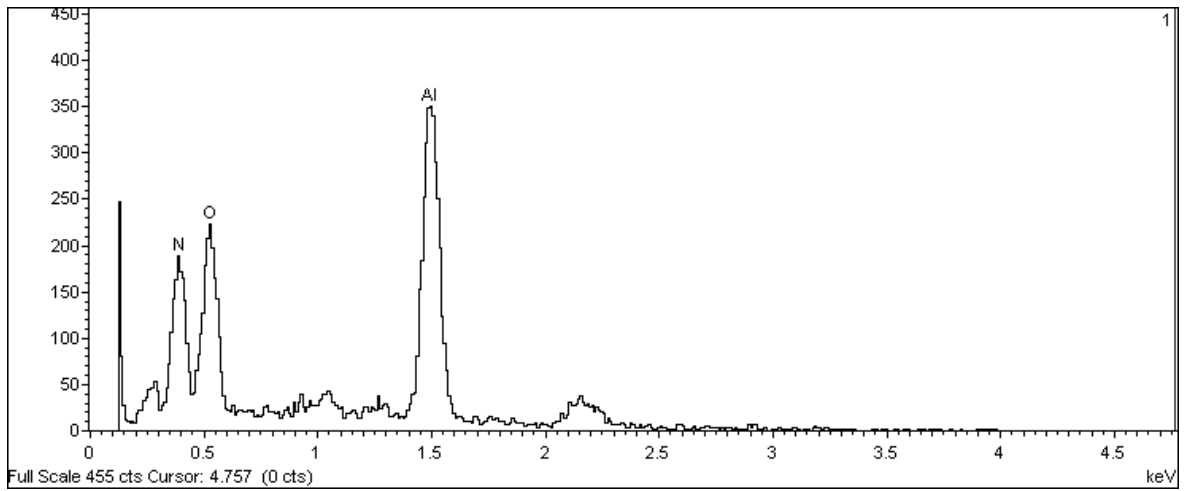
Şekil 6.11, AlN2 numunesinin 25000X büyütmede çekilen SEM görüntüsüdür. Görüntüden görülebildiği gibi, AlN2 numunesinin yüzey yapısı da farklı boyutlardaki kurtçuk tipi tanelerden oluşmaktadır. Film yüzeyinde yer alan tanelerin düzensiz ve gelişmiş yönelimli oldukları net bir biçimde görülmektedir. Tanelerin ~46 nm ile ~145 nm aralığında farklı büyüklüklere sahip oldukları belirlenmiştir. AlN1 filminin yüzey morfolojisine benzer olarak AlN2 filmi yapısında da boşlukların olduğu, ancak farklı olarak topaklanmaların küçük boyutlarda ve az sayıda olduğu görülmektedir. Ortalama topak boyutu ~31 nm olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, AlN2 filminin uygun alt tabaka sıcaklığında büyütüldüğüne işaret etmektedir. Böyle bir morfolojiden dolayı, AlN2 filmindeki pürüzlülüğün AlN1 filmine kıyasla daha az olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.12’de, Şekil 6.11’deki film yüzeyinin tamamından alınan EDX spektrumu görülmektedir. Spektrum sonuçları Tablo 6.5’de verilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, AlN2 numunesinde yüzeyi oluşturan yapıların atomik olarak % 36,97 Al, % 35,95 N ve

% 27,08 O içerdiği görülür. Spektrum sonuçlarından belirlenen oksit yüzdesinden dolayı, film yapısında alüminyum oksit olan bir ikincil fazın oluşabileceği ihtimali söz konusudur.



Şekil 6.11. AlN2 numunesinin genel yüzey yapısını gösteren SEM görüntüsü. (Sarı ok film yüzeyinde oluşan topaklanmalardan bir tanesini gösterirken, beyaz ok yüzey yapısındaki boşluklardan birini işaret etmektedir)

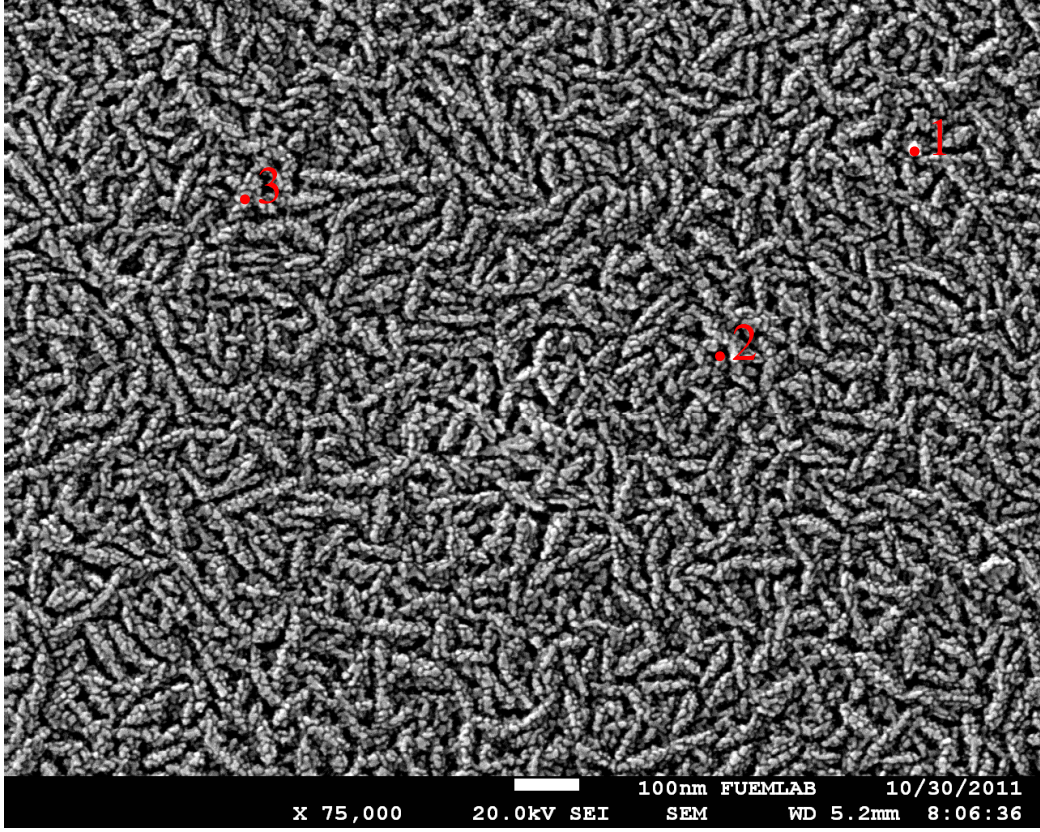


Şekil 6.12. Şekil 6.11’de gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu.

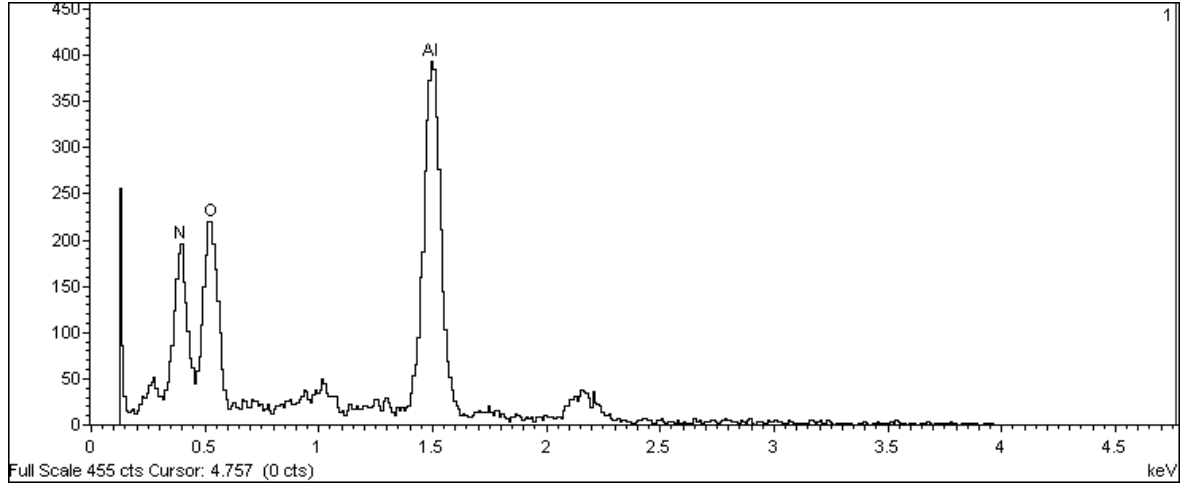
Tablo 6.5. Şekil 6.12’deki EDX spektrumunun sonuçları.

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	51,58	36,97
N	26,03	35,95
O	22,39	27,08
Toplam	100,00	100,00

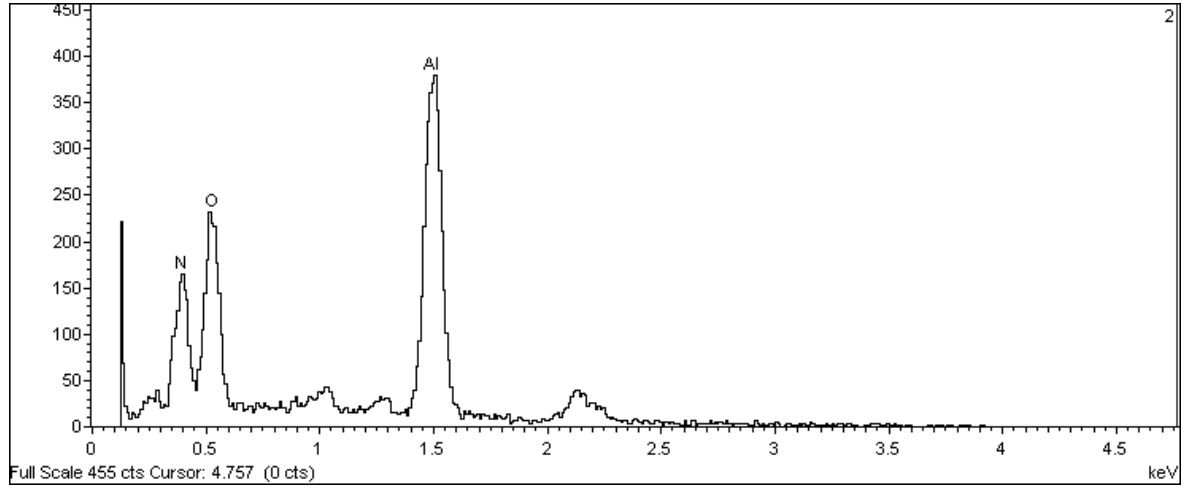
AlN2 numunesinde film yüzeyini oluşturan kurtçuk tipi yapıların morfolojilerini daha yakından gösteren 75000X büyütme SEM görüntüsü Şekil 6.13’de verilmektedir. Görüntü incelendiğinde, AlN2 filmi yapısındaki boşluk genişlikleri ve yoğunluğunun, AlN1 filmindeki boşluk genişlikleri ve yoğunluğuna kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Şekil 6.11’deki büyütme oranında kurtçuk tipi yapılar arasındaki boşluk genişliklerinin ~12 nm ile ~35 nm aralığında değiştiği belirlenirken, yapıların çekirdeklenme mekanizması net bir şekilde görülmektedir. Bu yapıların kimyasal bileşimleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için yüzey üzerinde farklı noktalardan EDX spektrumları alınmıştır. Şekil 6.14.a’da gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.13’teki 1 nolu noktadan (Spektrum 1), Şekil 6.14.b’de gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.13’teki 2 nolu noktadan (Spektrum 2) ve Şekil 6.14.c’de gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.13’te 3 olarak işaretlenen noktadan (Spektrum 3) alınmıştır. Spektrumların elementsel sonuçları Tablo 6.6’da verilmektedir. İncelenen film yüzeyinin farklı noktalarından alınan her bir EDX spektrumundan elde edilen sonuçlar birbirine yakın olarak bulunmuştur. Ayrıca, EDX sonuçlarından boşluk olarak görünen 2 nolu yapının iç kısmında AlN yapının var olduğu anlaşılmaktadır.



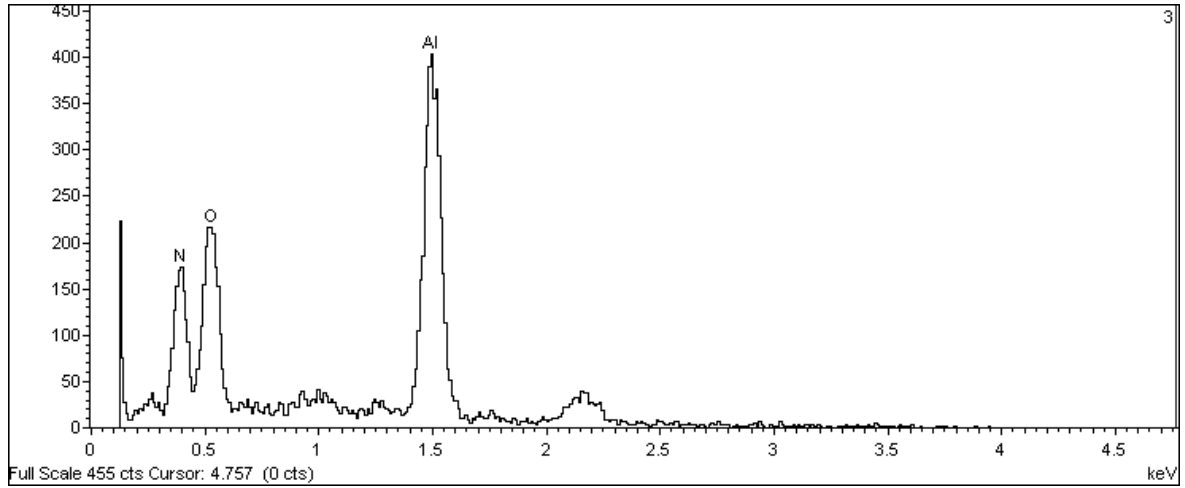
Şekil 6.13. AlN₂ numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.



(a)



(b)



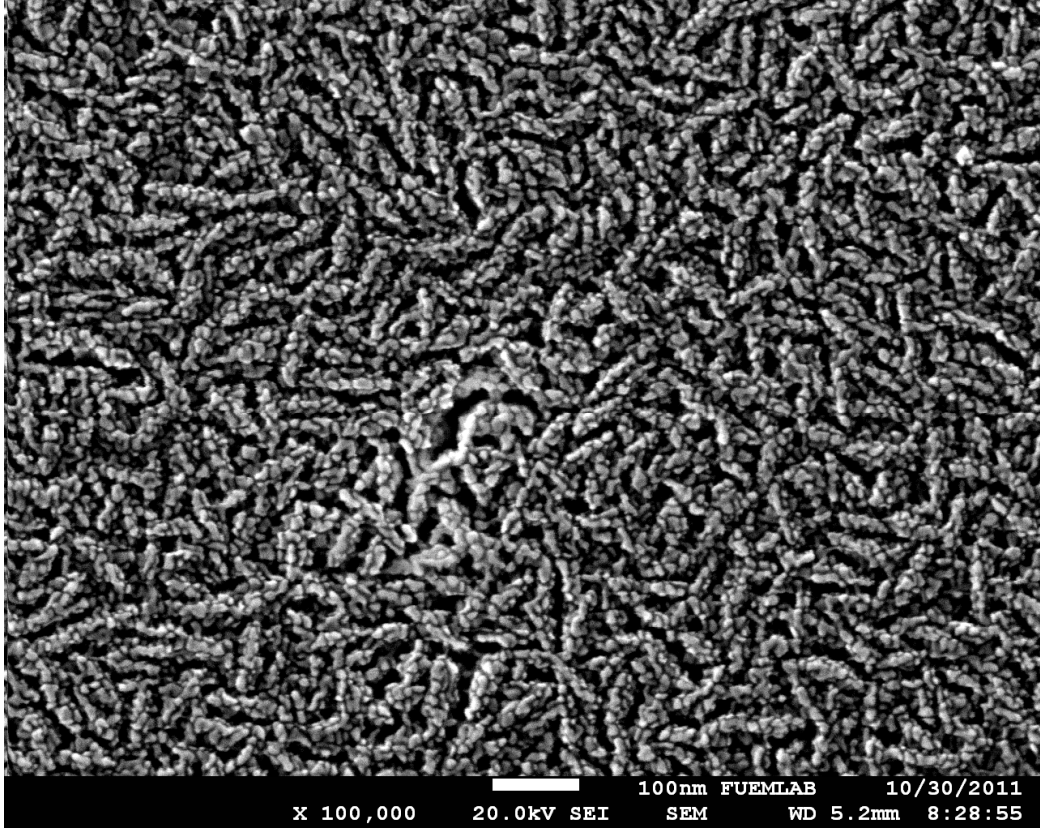
(c)

Şekil 6.14. Şekil 6.13'te gösterilen film yüzeyinin (a) 1 (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları.

Tablo 6.6. Şekil 6.14’te gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.

Spektrum 1		
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	53,58	38,88
N	24,73	34,57
O	21,69	26,55
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 2		
Al	54,97	40,34
N	22,32	31,56
O	22,71	28,10
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 3		
Al	54,16	39,49
N	23,67	33,25
O	22,17	27,26
Toplam	100,00	100,00

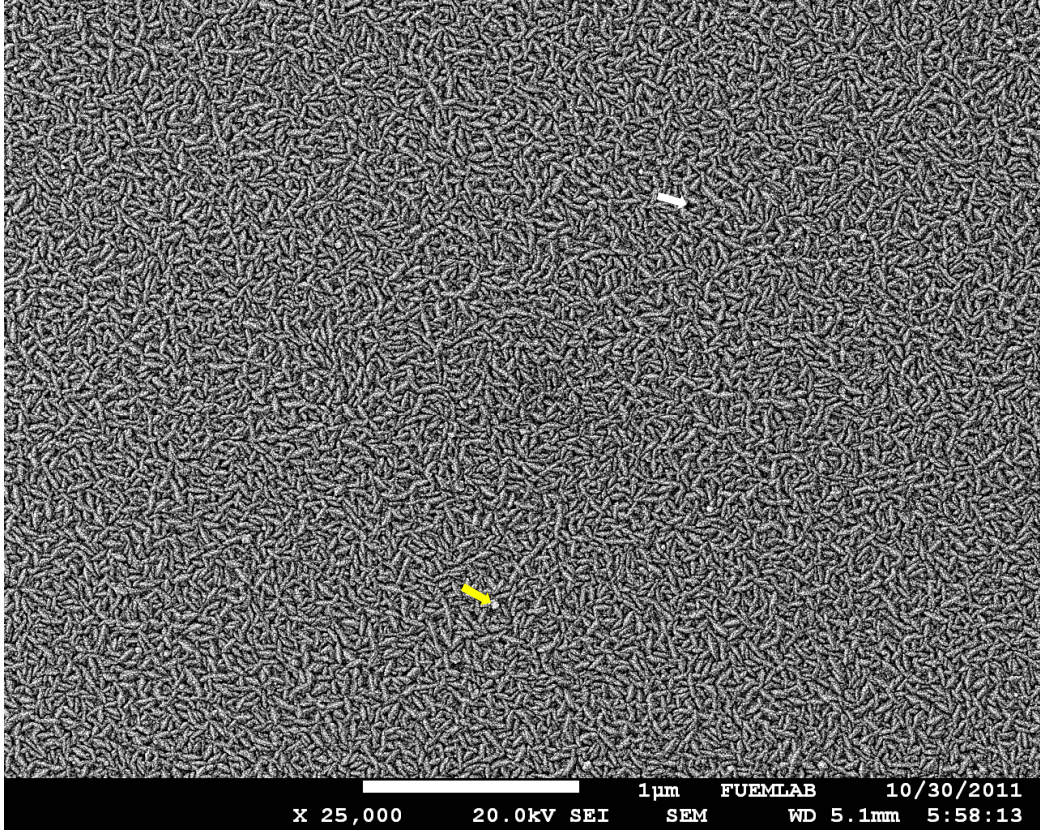
Şekil 6.15 AlN₂ numunesinin aynı bölgeden 100000X büyütmede alınan SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 6.13’de gözlemlenen ve kurtçuk tipi yapıları oluşturan istiflenmiş farklı büyüklüklerdeki taneler daha belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. Bu tanelerin büyüklükleri ~7 nm ile ~29 nm aralığında değişip, AlN₁ filmi için aynı büyütmede gözlemlenen tane boyutlarından büyük oldukları tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak AlN₂ filminin büyütüldüğü alt tabaka sıcaklığının daha yüksek (150°C) olması gösterilebilir. AlN₁ filminde olduğu gibi AlN₂ filminde de kurtçuk tipi yapıların düzensiz ve rastgele bir yönelime sahip oldukları görülmektedir.



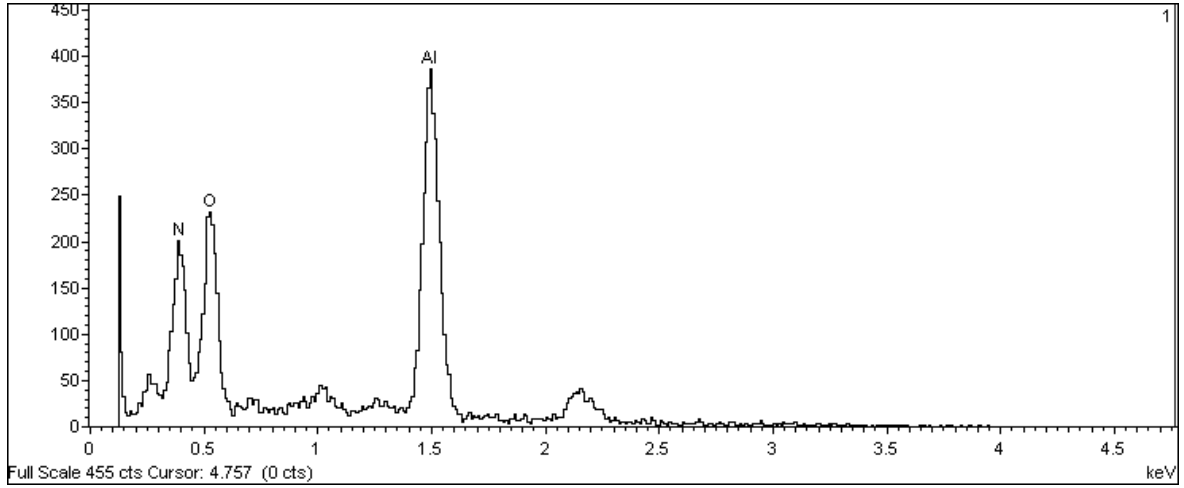
Şekil 6.15. Şekil 6.13'te gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.

AlN2 numunesinin film yüzeyinin 25000X büyütme oranında başka bir bölgesinden alınan SEM görüntüsü Şekil 6.16'da verilmektedir. Böylece, yüzey morfolojisinin filmin her bölgesinde homojen olup olmadığı hakkında detaylı bilgilerin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Görüntüden anlaşılabileceği gibi, AlN2 numunesinin morfolojik yapısının Şekil 6.11'de incelenen bölgenin özellikleri ile benzer olduğu görülmektedir. Bu büyütmede gözlenen kurtçuk tipi tanelerin ölçülen boyutlarının ~45 nm ile ~149 nm değer aralığında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, AlN2 filminin bu bölgedeki film yapısında da ortalama ~33 nm boyutunda küçük ve az sayıda topaklanmaların olduğu tespit edilmiştir. AlN2 filminin yüzey morfolojisinde belirlenen topak boyutlarının AlN1 filmindeki topak boyutlarına oranla daha küçük oldukları sonucu elde edilmiştir. Böylece, AlN1 filmine kıyasla, AlN2 filminde yapısal kusurların daha az olduğu söylenebilir. Yine kurtçuk tipi taneler arasındaki boşluklar dikkat çekmektedir.

Şekil 6.17'de, genel kimyasal element analizinin yapılması amacıyla yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu görülmektedir. Tablo 6.7'de verilen spektrum sonuçları ile Tablo 6.5'deki spektrum sonuçlarının ile uyum içerisinde oldukları belirlenmiştir.



Şekil 6.16. AlN₂ numunesinin farklı bir yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü. (Sarı ok film yüzeyinde oluşan topaklanmalardan bir tanesini gösterirken, beyaz ok yüzey yapısındaki boşluklardan birini işaret etmektedir)

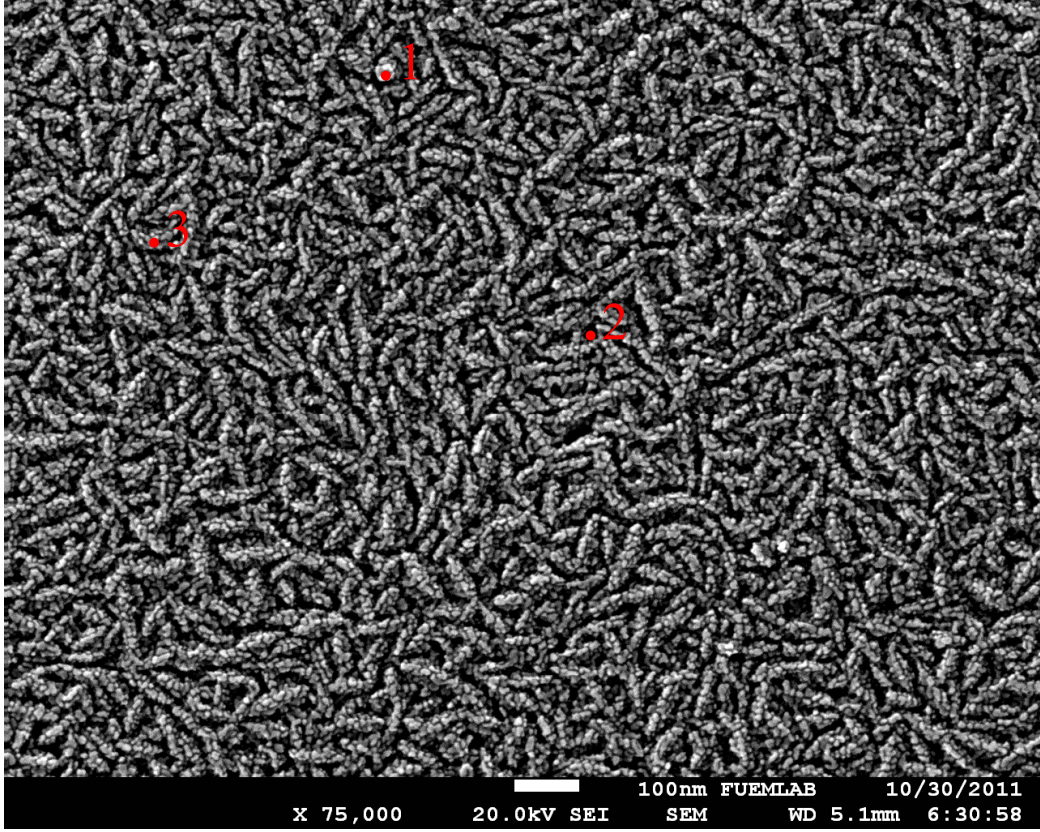


Şekil 6.17. Şekil 6.16’da gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu.

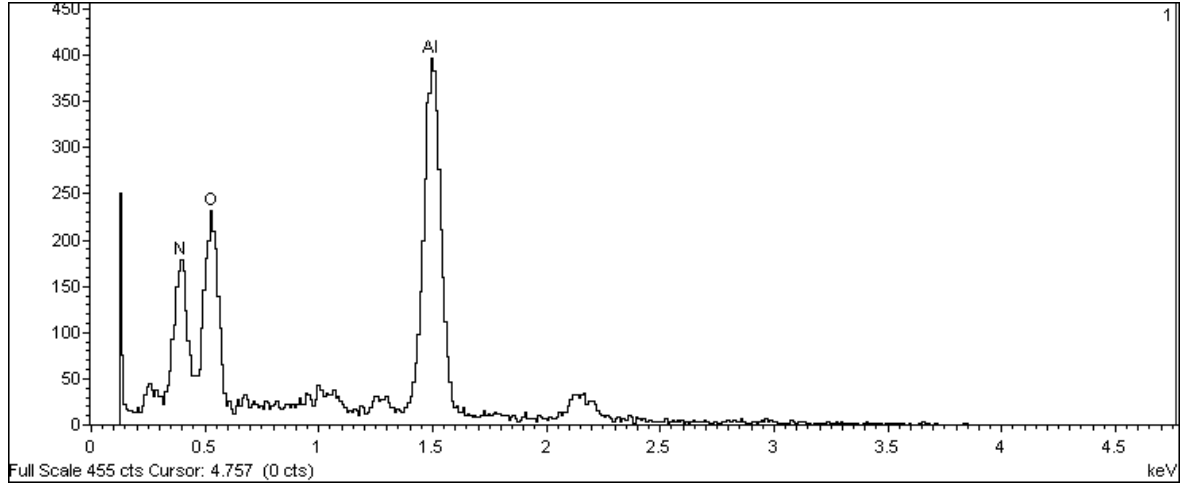
Tablo 6.7. Şekil 6.17'deki EDX spektrumunun sonuçları.

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	51,15	36,57
N	26,31	36,24
O	22,54	27,19
Toplam	100,00	100,00

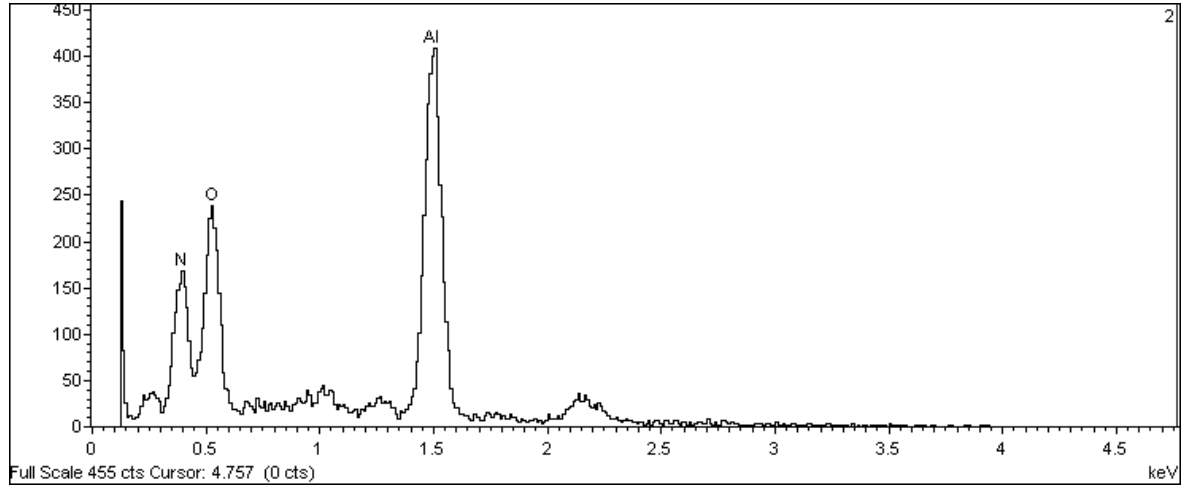
Şekil 6.18 aynı bölgenin 75000X büyütme oranında alınan detaylı SEM görüntüsüdür. AlN2 numunesinin bu bölgesinde de kurtçuk tipi yapılar arasındaki boşluk genişlikleri ve yoğunluğunun AlN1 film yüzeyi yapısına kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Yapılar arasındaki boşluk genişliğinin ~12 nm ile ~32 nm değerleri aralığında olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.19'da, Şekil 6.18'de gösterilen bölgeden alınan EDX spektrumları ve Tablo 6.8'de bu EDX spektrumlarının sonuçları gösterilmektedir. Şekil 6.19.a'daki EDX spektrumu 1 nolu noktadan (Spektrum 1), Şekil 6.19.b'deki EDX spektrumu 2 nolu noktadan (Spektrum 2) ve Şekil 6.19.c'deki EDX spektrumu 3 olarak işaretlenen noktadan (Spektrum 3) alınmıştır. Tablo 6.8'deki spektrum sonuçları incelendiğinde, elde edilen sonuçların Tablo 6.6'daki sonuçlar ile uyumluluk gösterdiği görülmektedir. Özellikle 2 nolu spektrum sonucundan, boşluğun iç kısmında da AlN yapıların yer aldığı neticesi elde edilmiştir.



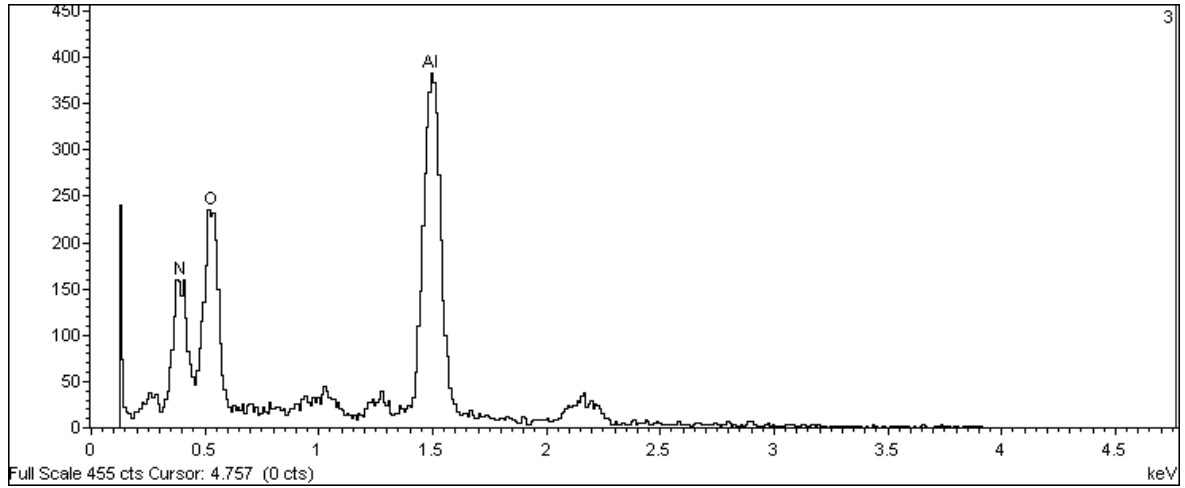
Şekil 6.18. AlN₂ numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.



(a)



(b)



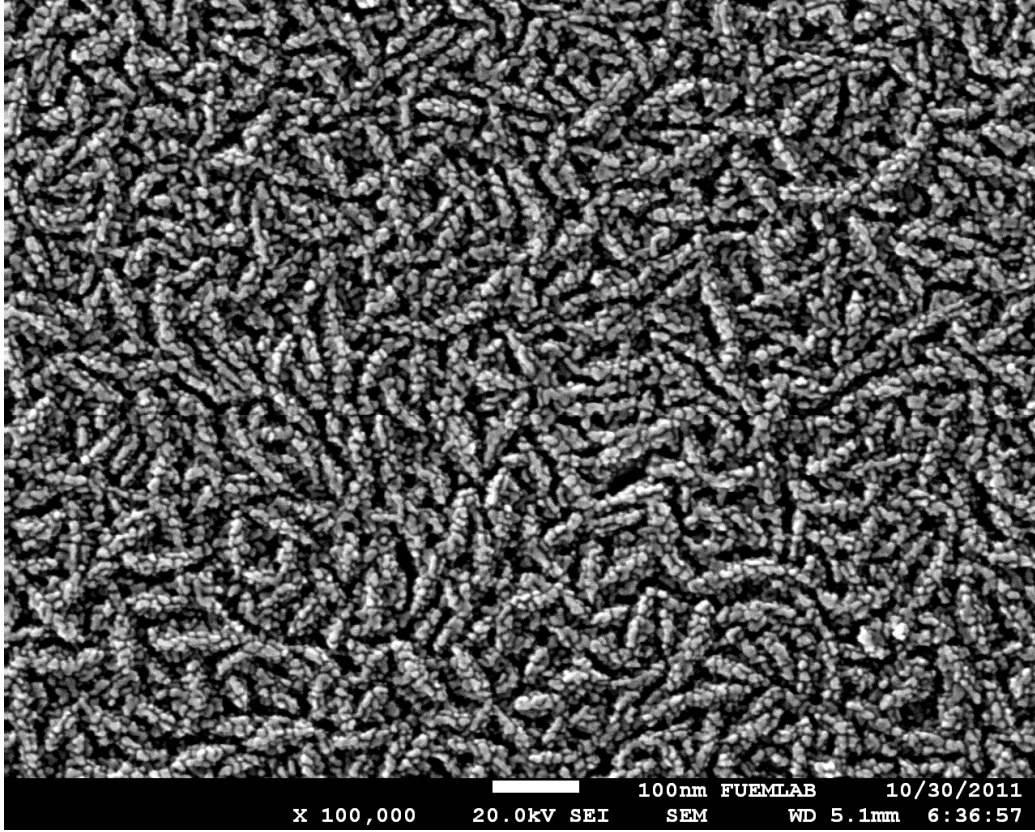
(c)

Şekil 6.19. Şekil 6.18’de gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları.

Tablo 6.8. Şekil 6.19’da gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.

Spektrum 1		
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	54,04	39,38
N	23,62	33,16
O	22,34	27,46
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 2		
Al	55,59	40,93
N	22,24	31,55
O	22,17	27,52
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 3		
Al	54,06	39,48
N	22,39	31,51
O	23,55	29,01
Toplam	100,00	100,00

Şekil 6.20’de film yüzeyinin 100000X büyütmede alınan SEM görüntüsü sunulmaktadır. Şekil 6.18’de gözlenen yapıların detaylı görüntüleri bu büyütme oranında daha yakından izlenebilmektedir. Film yüzeyinde ortalama büyüklükleri ~5 nm ile ~29 nm olan küçük boyutlu yapıların birleşmeleri sonucu ortaya çıkan büyük boyutlu tane yığınlarının gelişi güzel yönelimleri bu bölgede de net olarak görülmektedir.

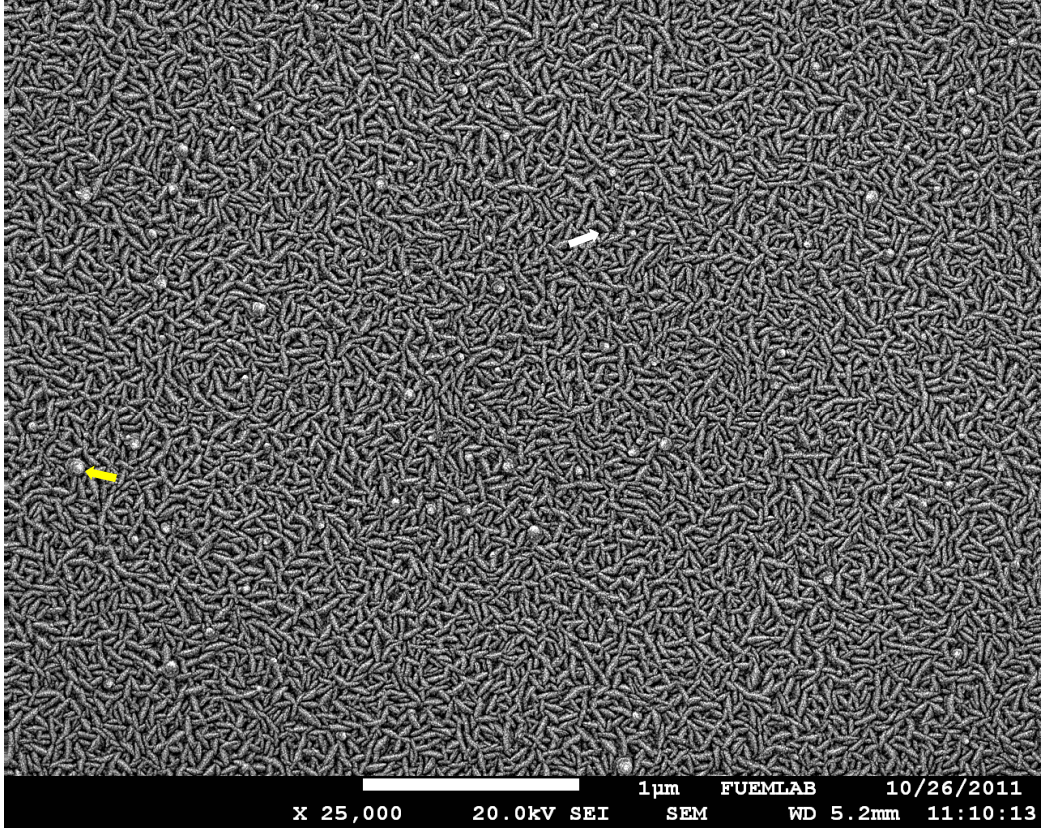


Şekil 6.20. Şekil 6.18’de gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.

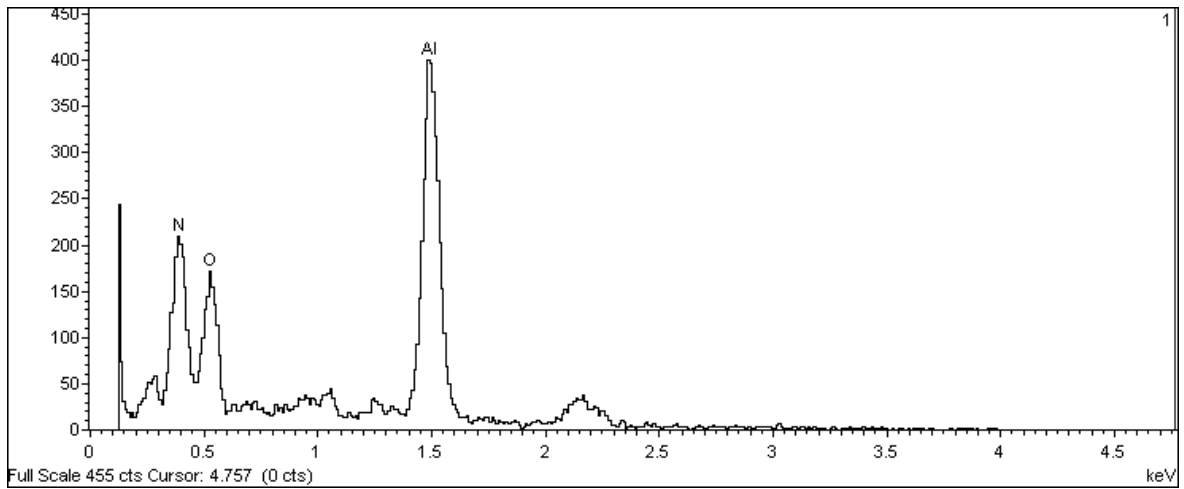
6.1.3. AlN3 Numunesinin SEM Gözlemleri

Şekil 6.21’de AlN3 numunesinin 25000X büyütmede çekilen SEM görüntüsüdür. AlN1 ve AlN2 numunelerinin morfolojik yapılarında gözlemlendiği gibi, AlN3 numunesinin yüzey yapısı da farklı boyutlardaki kurtçuk tipi tanelerden oluşmaktadır. Film yüzeyinde yer alan bu tanelerin düzensiz ve gelişmiş güzel yönelimli oldukları görülmektedir. Tanelerin ~49 nm ile ~164 nm aralığında farklı büyüklüklere sahip oldukları tespit edilmiştir. AlN1 ve AlN2 numunelerinin morfolojilerine benzer olarak, AlN3 filmi yapısında da boşlukların ve topaklanmaların olduğu görülmektedir. Ancak topak büyüklüğü ve yoğunluğunun, AlN2 ve özellikle AlN1 numunelerinin yapısındakilere kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. AlN3 film yüzeyindeki ortalama topak büyüklüğünün ~50 nm değerinde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçtan dolayı, AlN3 filmindeki pürüzlülüğün AlN1 ve özellikle AlN2 filmlerindeki pürüzlülüğe kıyasla fazla olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.22’de, Şekil 6.21’deki film yüzeyinin tamamından alınan EDX spektrumu gösterilmektedir. Spektrum sonuçları Tablo 6.9’da verilmektedir. Elde edilen sonuçlardan, AlN3 numunesinde yüzeyi oluşturan yapıların atomik olarak % 40,21 Al, % 39,58 N ve

% 20,21 O içerdiği görülür. Bu sonuçlar, AlN1 ve AlN2 numunelerinde olduğu gibi AlN3 numunesinin morfolojik yapısında alüminyum oksit ikincil fazının olabileceğini göstermektedir.



Şekil 6.21. AlN3 numunesinin genel yüzey yapısını gösteren SEM görüntüsü. (Sarı ok film yüzeyinde oluşan topaklanmalardan bir tanesini gösterirken, beyaz ok yüzey yapısındaki boşluklardan birini işaret etmektedir)

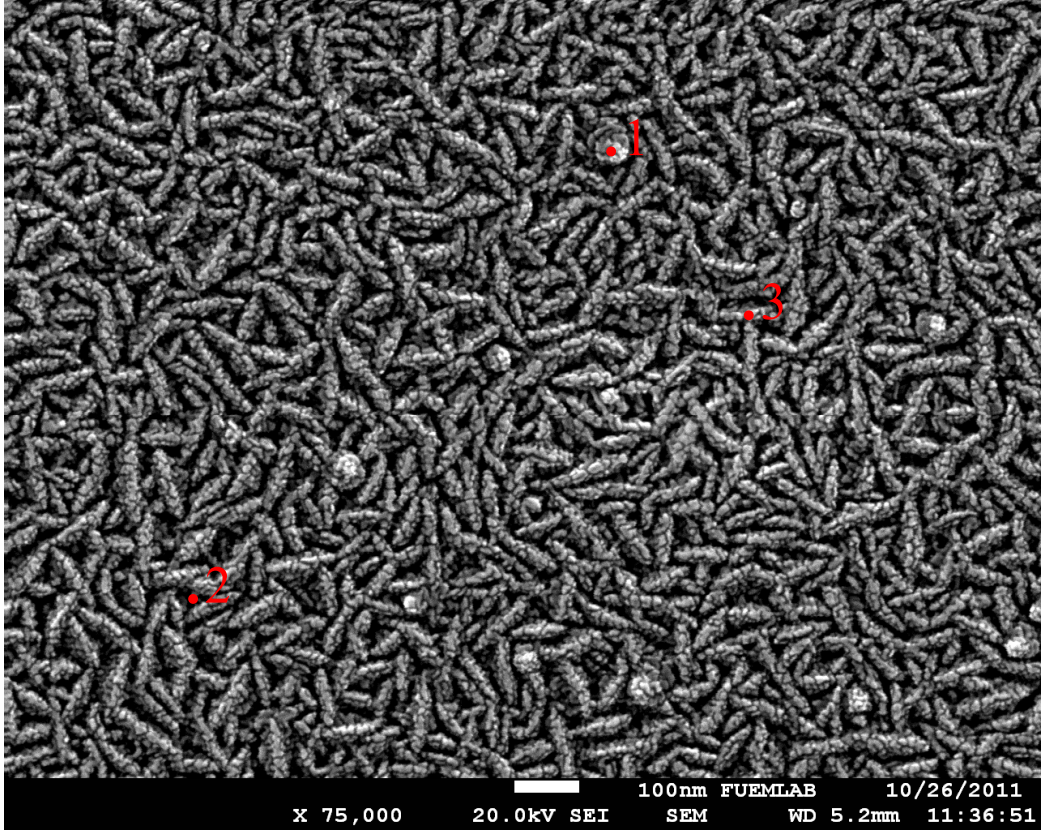


Şekil 6.22. Şekil 6.21’de gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu.

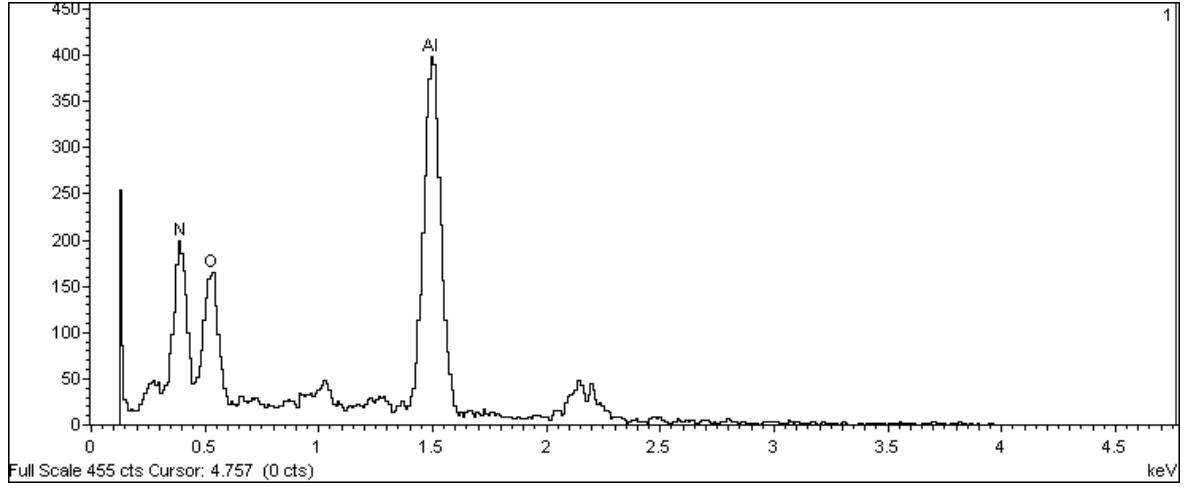
Tablo 6.9. Şekil 6.22'deki EDX spektrumunun sonuçları.

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	55,28	40,21
N	28,25	39,58
O	16,47	20,21
Toplam	100,00	100,00

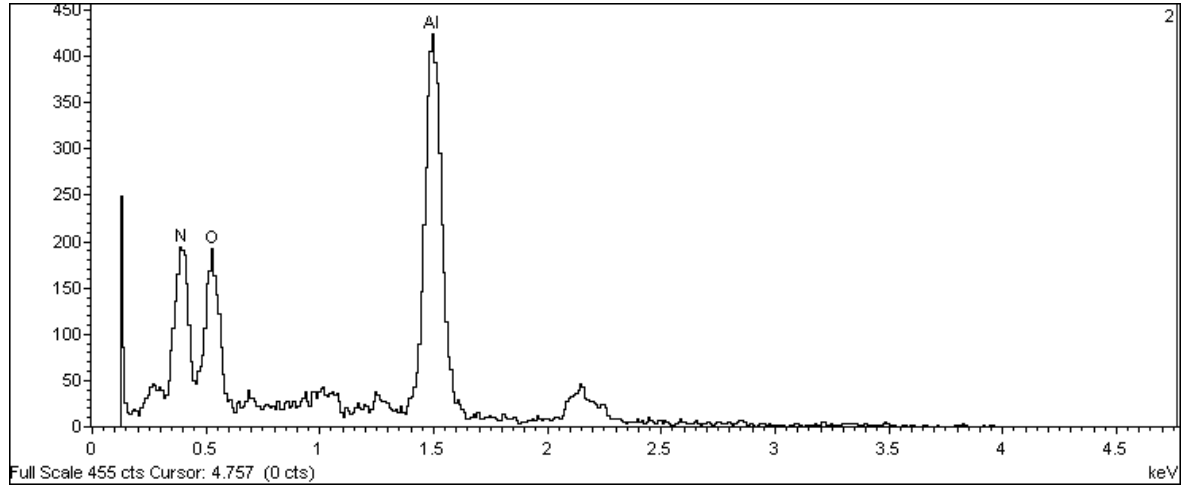
AlN3 numunesinde film yüzeyini oluşturan kurtçuk tipi büyük tanelerin ve topakların morfolojilerini daha yakından gösteren 75000X büyütme SEM görüntüsü Şekil 6.13'de verilmektedir. Görüntü incelendiğinde, film yapısını oluşturan büyük tanelerin ve topakların daha küçük tanelerin istiflenmesi ile meydana geldiği gözlemlenirken, büyük taneler arasında bulunan boşluk genişliklerinin ~11 nm ile ~30 nm aralığında değiştiği belirlenmiştir. AlN3 filmi yapısındaki boşluk genişlikleri ve yoğunluğunun, AlN1 ve AlN2 filmlerine oranla daha az olduğu görülmüştür. Film morfolojisindeki yapıların kimyasal bileşimleri hakkında bilgi sahibi olabilmek için yüzey üzerinde farklı noktalardan EDX spektrumları alınmıştır. Şekil 6.24.a'da gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.23'teki 1 nolu noktadan (Spektrum 1), Şekil 6.24.b'de gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.23'teki 2 nolu noktadan (Spektrum 2) ve Şekil 6.24.c'de gösterilen EDX spektrumu Şekil 6.23'te 3 olarak işaretlenen noktadan (Spektrum 3) alınmıştır. Spektrumların elementsel sonuçları Tablo 6.10'da verilmektedir. Yüzey üzerinde farklı noktalardan alınan EDX spektrumlarından, incelenen film yüzeyinin her bölgesinde birbiri ile uyumlu atomik yüzdelere sahip Al, N ve O elementlerinden oluştuğu görülür. Ayrıca, AlN1 ve AlN2 numunelerine benzer olarak, EDX sonuçları boşluk olarak görünen 2 nolu yapının iç kısmında da AlN yapının mevcut olduğunu ortaya koymaktadır.



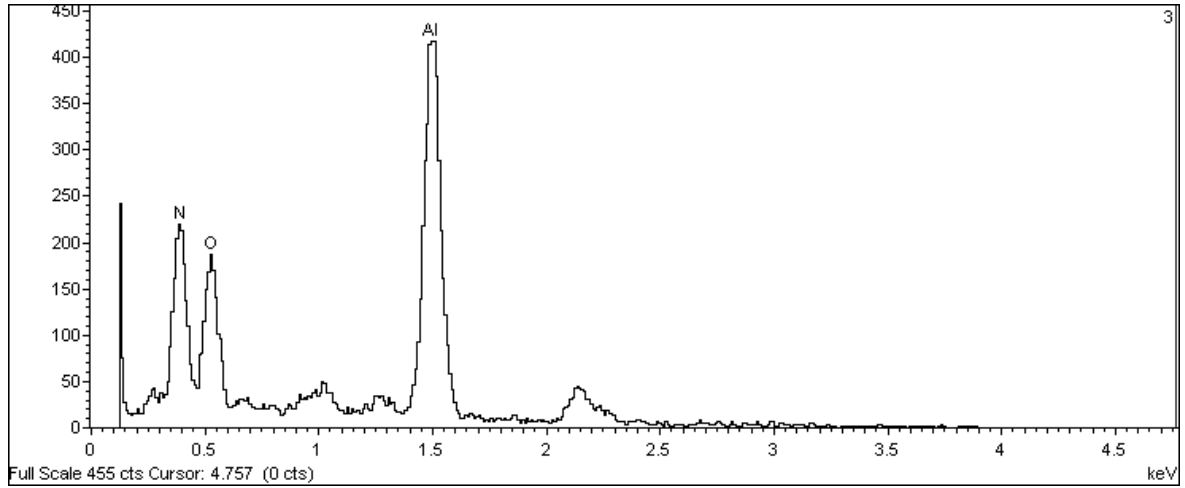
Şekil 6.23. AlN3 numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.



(a)



(b)



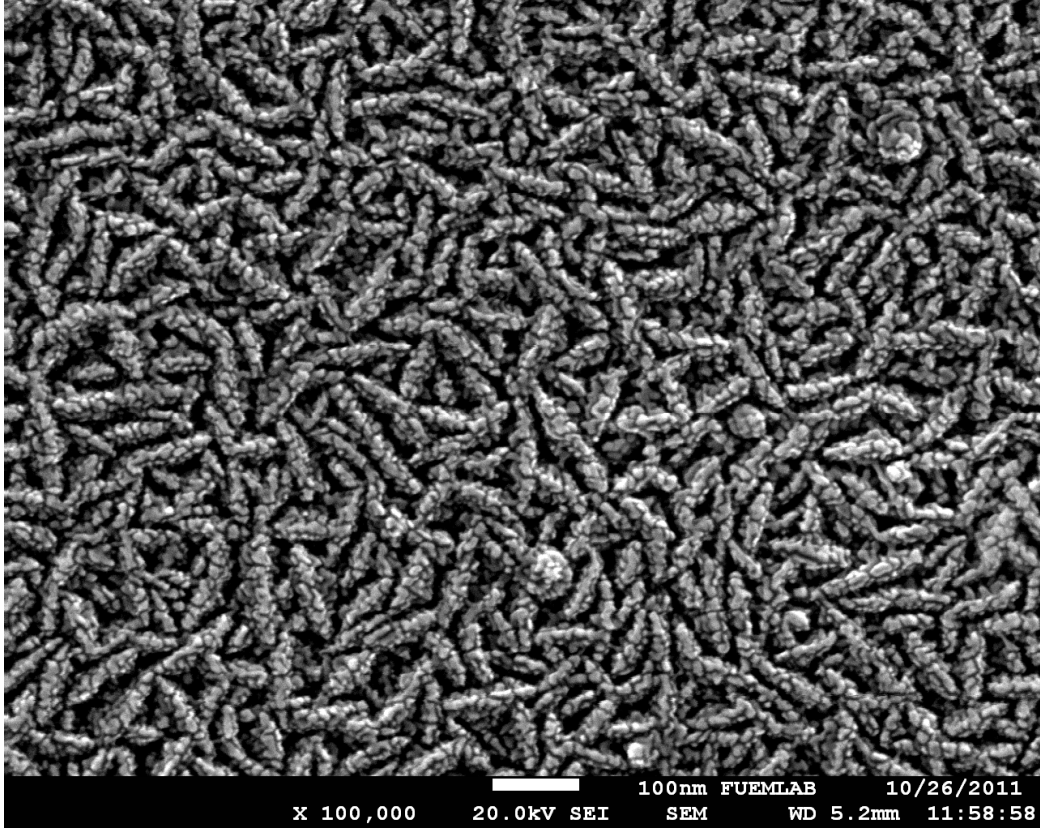
(c)

Şekil 6.24. Şekil 6.23'te gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları.

Tablo 6.10. Şekil 6.24'te gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.

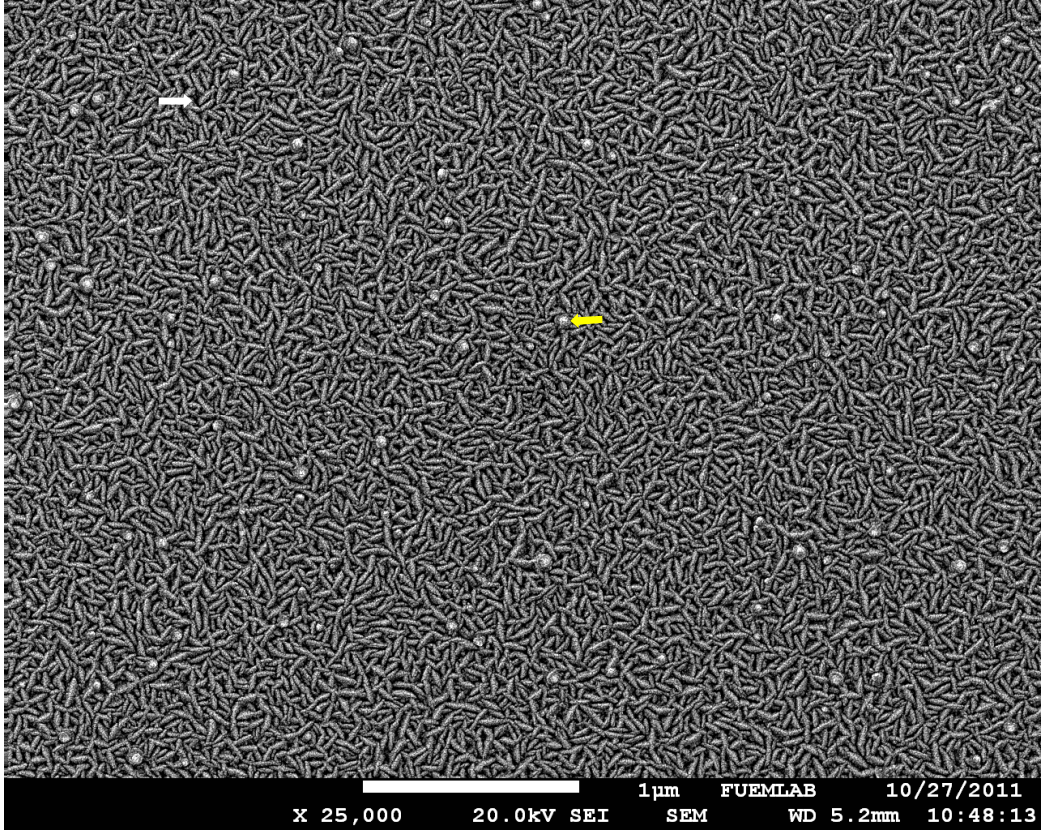
Spektrum 1		
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	56,46	41,41
N	26,98	38,11
O	16,56	20,48
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 2		
Al	56,56	41,55
N	26,34	37,27
O	17,10	21,18
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 3		
Al	54,74	39,70
N	28,47	39,77
O	16,79	20,53
Toplam	100,00	100,00

Şekil 6.25'de numunenin aynı bölgesinden 100000X büyütmede alınan SEM görüntüsüdür. Film yapısındaki kristal boyutu değerlerinin ~7 nm ile ~31 nm aralığında olduğu belirlenmiştir. AlN1 ve AlN2 numunelerinin aynı büyütme oranında elde edilen görüntülerinden farklı olarak küçük tanelerin yoğun bir şekilde çubuksu bir yapıya sahip oldukları göze çarpmaktadır. Ayrıca kurtçuk tipi tanelerin de daha yoğun bir biçimde olduğu gözlemlenmiştir.

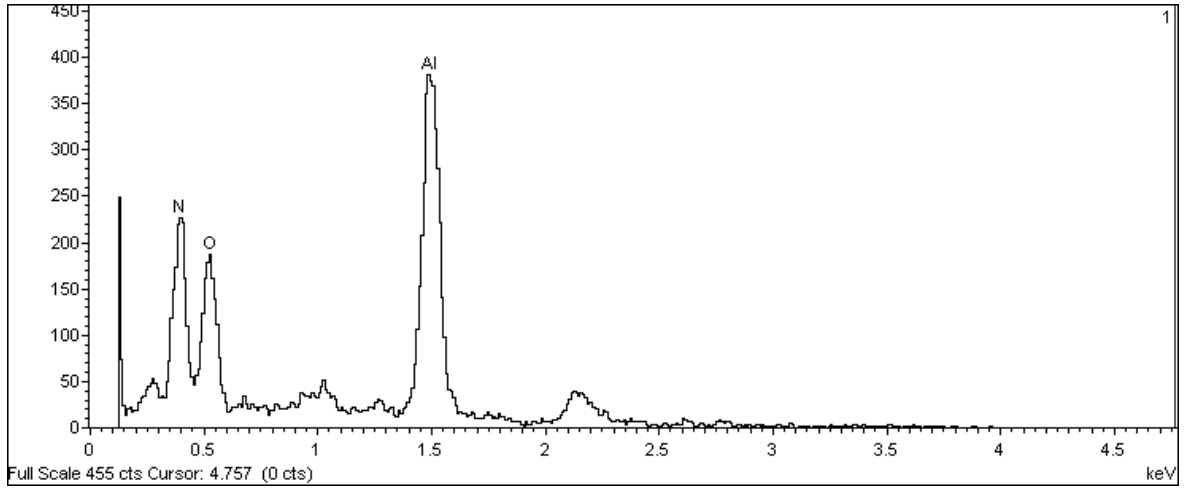


Şekil 6.25. Şekil 6.23'te gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.

AlN3 numunesinin film yüzeyinin 25000X büyütme oranında başka bir bölgesinden alınan SEM görüntüsü Şekil 6.26'da verilmektedir. Filmin bu bölgedeki yüzey morfolojisinin Şekil 6.21'de gösterilen bölgenin morfolojisi ile benzer özellikler sergilediği görülmektedir. Bu büyütmede gözlenen kurtçuk tipi tanelerin ölçülen boyutlarının ~49 nm ile ~163 nm değer aralığında değiştiği belirlenirken, ortalama topak büyüklüğü değerinin ise ~55 nm değerinde olduğu tespit edilmiştir. AlN3 numunesinin Şekil 6.21'de verilen yüzey yapısına benzer olarak bu bölgede de topak büyüklüğü ve yoğunluğunun AlN1 ve özellikle AlN2 numunelerinin yüzey yapılarına kıyasla fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, AlN3 filminde yapısal kusurların daha fazla olduğu söylenebilir. Film yüzeyinin tamamından alınan EDX spektrumu Şekil 6.27'de gösterilirken, spektrum sonuçları Tablo 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.26. AlN₃ numunesinin farklı bir yüzey bölgesinden alınan SEM görüntüsü. (Sarı ok film yüzeyinde oluşan topaklanmalardan bir tanesini gösterirken, beyaz ok yüzey yapısındaki boşluklardan birini işaret etmektedir)

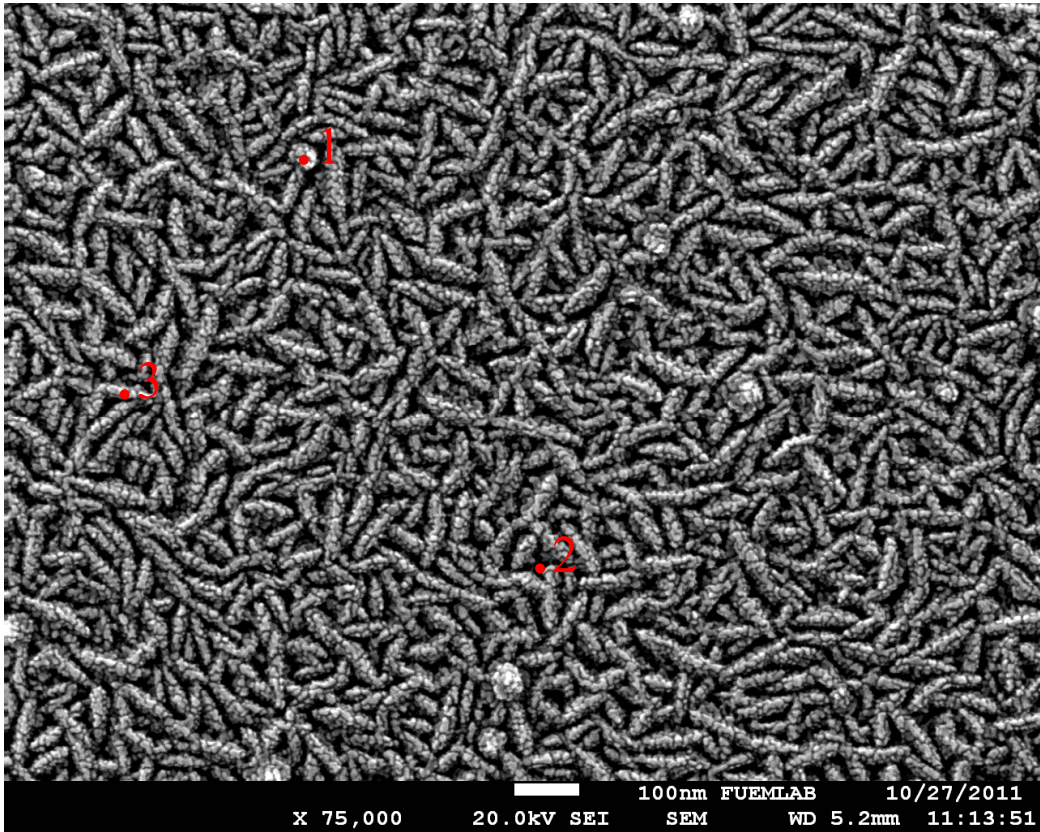


Şekil 6.27. Şekil 6.26'da gösterilen yüzeyin tamamından alınan EDX spektrumu.

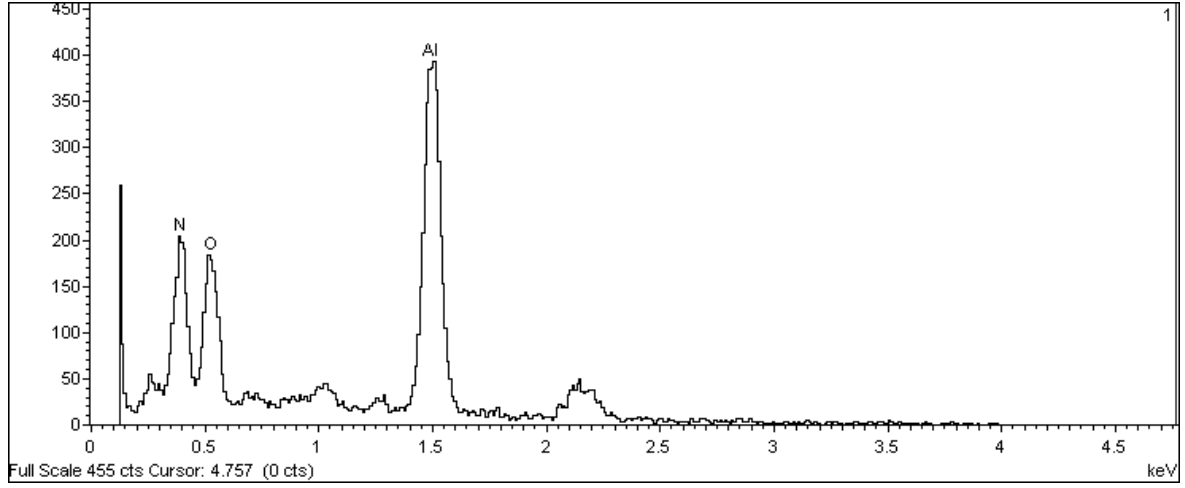
Tablo 6.11. Şekil 6.27’deki EDX spektrumunun sonuçları.

Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	52,23	37,33
N	29,65	40,82
O	18,12	21,85
Toplam	100,00	100,00

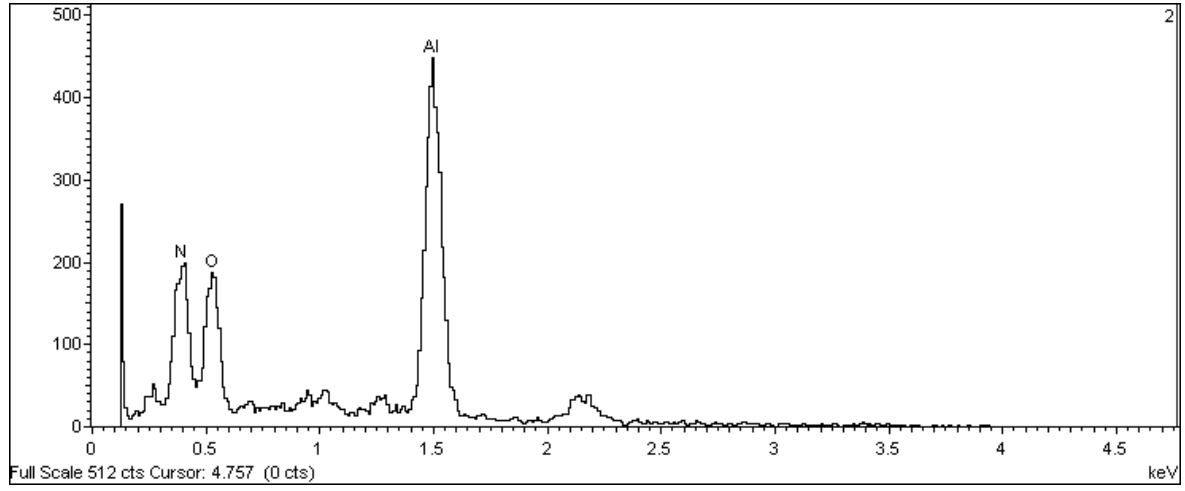
Şekil 6.28, aynı bölgenin 75000X büyütme oranında alınan detaylı SEM görüntüsüdür. Bu görüntüde, kurtçuk tipi yapılar arasındaki boşluk genişliğin ~11 nm ile ~32 nm değerleri aralığında olduğu belirlenmiştir. Yüzeydeki yapılar düzensiz morfoloji sergilemektedir. Şekil 6.29’da, Şekil 6.28’de gösterilen bölgeden alınan EDX spektrumları ve Tablo 6.12’de bu EDX spektrumlarının sonuçları gösterilmektedir. Şekil 6.29.a’daki EDX spektrumu 1 nolu noktadan (Spektrum 1), Şekil 6.29.b’deki EDX spektrumu 2 nolu noktadan (Spektrum 2) ve Şekil 6.29.c’deki EDX spektrumu 3 olarak işaretlenen noktadan (Spektrum 3) alınmıştır. Tablo 6.12’deki spektrum sonuçları incelendiğinde, elde edilen sonuçların Tablo 6.10’daki sonuçlar ile uyumluluk içinde olduğu görülmektedir.



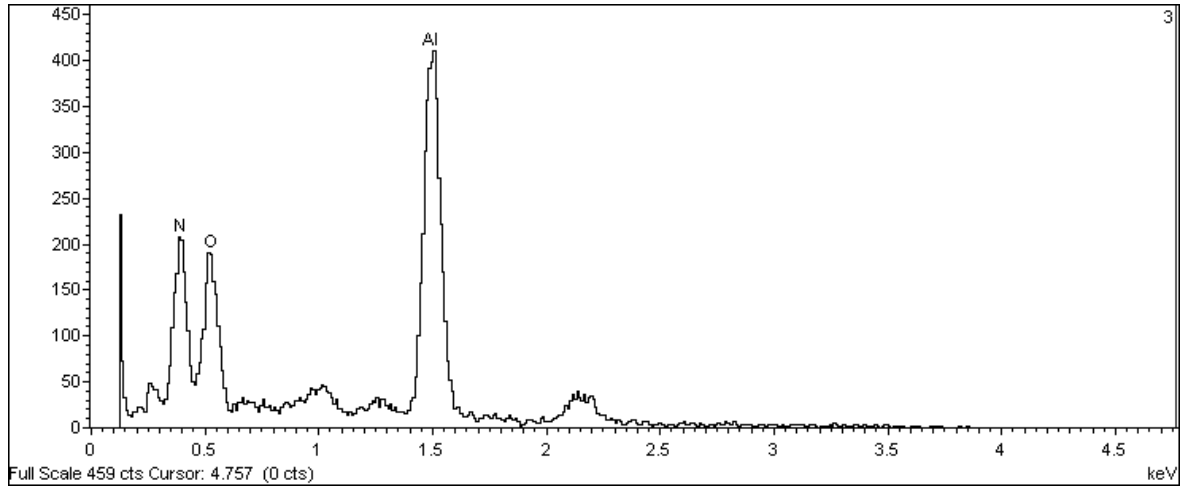
Şekil 6.28. AlN₃ numunesinden yüksek büyütmede alınan ve tane yapılarını gösteren SEM görüntüsü.



(a)



(b)



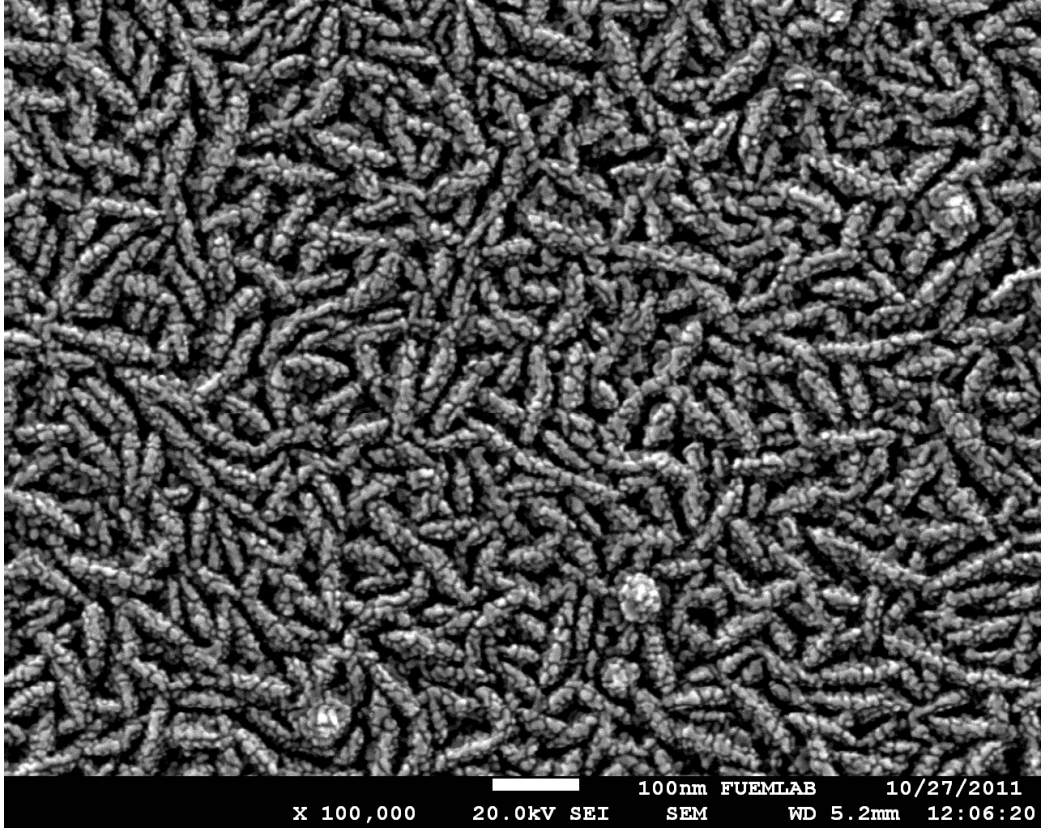
(c)

Şekil 6.29. Şekil 6.28’de gösterilen film yüzeyinin (a) 1, (b) 2, (c) 3 olarak işaretlenen noktalarından alınan EDX spektrumları.

Tablo 6.12. Şekil 6.29’da gösterilen EDX spektrumlarının sonuçları.

Spektrum 1		
Element	Ağırlıkça %	Atomik %
Al	55,29	40,32
N	26,92	37,80
O	17,79	21,88
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 2		
Al	55,69	40,71
N	26,67	37,54
O	17,64	21,75
Toplam	100,00	100,00
Spektrum 3		
Al	55,51	40,51
N	27,04	38,01
O	17,45	21,48
Toplam	100,00	100,00

Şekil 6.30 100000X büyütmede alınan SEM görüntüsünü içermektedir. Şekil 6.25’de gözlemlendiği gibi, benzer morfolojik özelliklerin film yüzeyinin bu bölgesinde de sürdürüldüğü ve küçük tanelerin çoğunlukla çubuksu bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Film yüzeyinde, istiflenerek büyük boyutlu yapıları oluşturan küçük tanelerin ~7 nm ile ~32 nm arasında değişen büyüklüklere sahip oldukları belirlenmiştir.



Şekil 6.30. Şekil 6.28’de gösterilen bölgenin detaylı SEM görüntüsü.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

AlN1 Numunesinin SEM Sonuçları:

1. Film yüzeyinin, boyutları ~5–27 nm aralığında değişen büyüklüklere sahip küçük boyutlu tanelerin istiflenmeleri sonucu oluşan ~40–129 nm boyutlarındaki kurtçuk tipindeki tane kümelerinden meydana geldiği görüldü.
2. Film yüzeyini oluşturan büyük tanelerin kendi aralarında yönelim ilişkisi sergilemedikleri ve aralarında boşluklar kalacak şekilde dizildikleri gözlemlendi. Taneler arasındaki boşluk genişliklerinin ~12 nm ile ~42 nm aralığında değiştiği belirlendi.
3. Film mikroyapısında gözlemlenen ortalama ~40,5 nm büyüklüğündeki topakların film yüzeyinin pürüzlü bir morfolojiye sahip olmasında etkin bir rol oynadığı düşünüldü. Film yüzeyinde düzensiz bir şekilde dağılan bu topakların, daha küçük boyuttaki tanelerin aşırı istiflenmeleri sonucu oluşan yığınlar oldukları tespit edildi.
4. AlN1 numunesinde film yüzeyinin homojen, kusurlu ve çatlaksız bir yapıya sahip olduğu gözlemlendi.
5. Farklı büyütme oranlarında film yüzeyinin farklı bölgelerinden alınan EDX analizleri ile filmin kimyasal bileşiminin atomik olarak ortalama % 38,2 Al, % 36,8 N ve % 25,0 O element atomlarından oluştuğu belirlendi. Elde edilen sonuçlardan film yapısında alüminyum oksitten ibaret olan ikincil fazın oluştuğu tespit edildi.

AlN2 Numunesinin SEM Sonuçları:

1. Film morfolojisini oluşturan ~45–149 nm boyutlarındaki kurtçuk tipindeki tanelerin boyutları ~7 nm ile ~29 nm boyutlarındaki küçük tanelerin birleşmeleri sonucu oluştukları belirlendi.

2. Aralarında ~12 nm ile ~35 nm genişliklerinde boşluklar bulunan kurtçuk tipi tanelerin düzensiz ve geliş güzel yönelimler gösterdikleri gözlemlendi.
3. Film mikroyapısında nadir olarak gözlemlenen topak boyutlarının ortalama olarak ~32 nm değerinde olduğu tespit edildi. Böylece film yüzeyinin daha az pürüzlü bir morfolojiye sahip olduğu düşünüldü. Film yüzeyinde çok seyrek bir şekilde dağılan topakların, daha küçük boyuttaki tanelerin istiflenmeleri sonucunda oluştukları belirlendi.
4. AlN₂ numunesinin film yüzeyinin daha düzgün, homojen, çatlaksız ve yoğun olduğu gözlemlendi.
5. Film yüzeyinin kimyasal bileşimleri, farklı bölgelerden alınan EDX spektrumları ile belirlendi. Spektrum sonuçlarından film yüzeyinin atomik olarak ortalama % 36,77 Al, % 36,10 N ve % 27,13 O element atomlarından oluştuğu tespit edildi. Elde edilen sonuçlardan film yapısında herhangi bir safsızlık atomuna rastlanmaz iken, film kompozisyonunda ikincil bir faz olarak alüminyum oksidin ihtiva edilmesi söz konusudur.

AlN₃ Numunesinin SEM Sonuçları:

1. Film yüzeyinin, boyutları ~7 nm–32 nm aralığında değişen büyüklüklere sahip küçük boyutlu tanelerin istiflenmeleri sonucu meydana gelen ~49–164 nm boyutlarındaki kurtçuk tipindeki tanelerden oluştuğu belirlendi.
2. Film yüzeyini oluşturan büyük tanelerin kendi aralarında rastgele bir yönelim sergiledikleri ve aralarında ~11 nm ile ~32 nm genişliklerinde boşluklar kalacak şekilde dizildikleri gözlemlendi.
3. Film mikroyapısında gözlemlenen ortalama ~52,5 nm büyüklüğündeki topaklardan dolayı film yüzeyinin daha pürüzlü bir morfolojiye sahip olduğu düşünüldü. Daha küçük boyuttaki tanelerin istiflenmeleri sonucu oluşan bu yapıların, film yüzeyinde düzensiz ve yoğun bir şekilde dağıldıkları gözlemlendi.

4. AlN₃ numunesinde film yüzeyinin homojen, çatlaksız ve daha kusurlu bir yapıya sahip olduğu gözlemlendi.
5. Film yüzeyinin kimyasal bileşimleri, farklı bölgelerden alınan EDX spektrumları ile belirlendi. Spektrum sonuçlarından film yüzeyinin atomik olarak ortalama % 38,77 Al, % 40,20 N ve % 21,03 O element atomlarından oluştuğu tespit edildi. Elde edilen sonuçlardan film yapısında alüminyum oksitten ibaret olan ikincil fazın olduğunu göstermektedir.

Alt tabaka sıcaklığı değişimine bağlı olarak büyütülen alüminyum nitrür ince filmlerinin mikroyapılarının araştırılması neticesinde elde edilen genel sonuçlar göz önünde tutulduğunda, özellikle 50°C ve 250°C'lik alt tabaka sıcaklıklarında büyütülen AlN₁ ve AlN₃ filmlerinin yüzey yapılarında görülen topaklanmalardan dolayı, film mikroyapılarında yoğun bir şekilde yapısal kusurların var olduğu tespit edilmiştir. Film morfolojilerinde gözlenen topaklanmaların yoğunlukları ve ölçülen boyutları dikkate alındığında, kusurların AlN₃ numunesinde daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, topaklanmaların film pürüzlülüğünü artırdığı düşünülerek, AlN₃ filminin daha pürüzlü bir yüzey yapısına sahip olduğu öngörülmüştür. AlN₁ ve AlN₃ filmlerine kıyasla, 150°C'lik alt tabaka sıcaklığında büyütülen AlN₂ numunesinin yüzey yapısında beliren topak boyutlarının küçük olması ve film yüzeyindeki dağılımlarının çok seyrek olması nedeniyle, AlN₂ numunesinin daha düzgün bir film morfolojisine sahip olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, diğer filmlerin morfolojilerine göre, AlN₂ filmlerinin yüzey pürüzlülüğünün daha az olduğu söylenebilir. Bu bulgular, çalışılan büyütme şartları altında borosilikat alt tabakaları üzerine alüminyum nitrür ince filmlerinin büyütülmesi için en uygun alt tabaka sıcaklığı değerinin 150°C olduğu belirlenmiştir.

Alt tabaka sıcaklığının tane boyutları üzerine etkisinin belirlenmesi amacı ile yapılan tane boyutu ölçümleri neticesinde, 25000X büyütmede film morfolojisinde gözlemlenen kurtçuk tipi tanelerin boyutlarının AlN₁, AlN₂ ve AlN₃ numuneleri için sırasıyla ~40–129 nm, ~45–149 nm ve ~49–164 nm değer aralıklarında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, 100000X büyütme oranında, istiflenmeleri sonucunda kurtçuk tipi yapıları oluşturan daha küçük tanelerin boyutlarının ise AlN₁, AlN₂ ve AlN₃ numuneleri için sırasıyla ~5–27 nm, ~7–29 nm ve ~7–32 nm değer aralıklarında değiştiği tespit edilmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde, alt tabaka sıcaklığı artırıldıkça tane boyutlarının arttığı

anlaşılmaktadır. Bunun sonuç, yüksek alt tabaka sıcaklıklarında adatomların yüzey hareketliliklerinin artmasından kaynaklanmaktadır [48]. Ayrıca, film kalınlığı artırıldığı takdirde, alt tabaka sıcaklığının tane boyutu üzerine etkisinin daha belirgin bir şekilde görülebileceği bilinmektedir. Bununla birlikte, alt tabaka sıcaklığı artırıldığında daha küçük boyuttaki tanelerin daha iyi bir şekilde kaynaşmaları neticesinde çubuksu tanelerin meydana geldiği, ayrıca kurtçuk tipi tanelerin de daha yoğun ve kemikleşmiş bir biçimde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle, 250°C'lik alt tabaka sıcaklığında büyütülen AlN3 ince filmine ait 100000X büyütmede çekilen SEM görüntülerinden, bu çubuksu tanelerin daha yoğun bir şekilde ortaya çıktıkları görülmüştür.

Film morfolojilerinin araştırılmasında dikkat çeken diğer nicelik ise, numunelerin yüzey yapısını oluşturan kurtçuk tipi taneler arasındaki boşluklardır. Filmlerin büyütüldüğü alt tabaka sıcaklığına bağlı olarak, gözlemlenen boşluk genişliklerinin AlN1, AlN2 ve AlN3 numuneleri için sırasıyla ~12–42 nm, ~12–35 nm ve ~11–32 nm değer aralıklarında değiştiği belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, alt tabaka sıcaklığının artması ile boşluk genişliklerinin azaldığı belirlenirken, film sürekliliğinin ise arttığı saptanmıştır. Bunun nedeni olarak, alt tabaka sıcaklığının etkisine bağlı olarak, yüksek yüzey hareketliliğine sahip atomların bu boşlukları doldurması gösterilebilir. Aslında, filmlerin yüzey yapısında görülen bu boşlukların çukurluklar şeklinde düşünülmesi daha doğru bir yaklaşımdır. Çünkü alınan EDX spektrumları, bu boşlukların iç kısımlarında da alüminyum nitrür yapıların var olduğunu açığa çıkarmıştır. EDX spektrumlarından gözlemlenen bir başka sonuç ise, film kompozisyonundaki Al, N ve O elementleri yüzdelerinin, numunelerin her nokta ve bölgesinde birbirleri ile yakın ve uyumlu değerlerde olduğunun belirlenmesidir. Ayrıca, EDX spektrumu sonuçlarından AlN1, AlN2 ve AlN3 filmlerinin kimyasal yapısı içerisinde alüminyum oksit olan ikincil bir fazın bulunabileceği öngörülmüştür.

Sıçratma tekniği ile büyütülen alüminyum nitrür ince filmlerinin mikroyapılarının araştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

Hao Cheng ve arkadaşları tarafından reaktif RF Sıçratma Tekniği ile büyütülen alüminyum nitrür ince filmlerinin morfolojisi ve yapısı üzerine alt tabaka sıcaklığının etkisinin araştırılması amacı ile yapmış oldukları çalışma sonucunda, 250°C ve 500°C'lik alt tabaka sıcaklıklarında film morfolojisinin aralarında boşluklar bulunan kurtçuk tipi tanelerden oluştuğunu ortaya koyarken, 350°C'lik alt tabaka sıcaklığında ise yüzey

yapısının çakıl taşı tipindeki tanelerden meydana geldiğini görmüşlerdir. Film morfolojisindeki bu farklılığın, adatomların yüzey hareketliliğindeki değişiminden kaynaklandığını öngörmüşlerdir [49].

Maw-Shung Lee ve arkadaşları tarafından RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile hazırlanan (103) yönelimli alüminyum nitrür filmlerin yapısı üzerine alt tabaka sıcaklığının araştırılması amacı ile yapılan çalışmada ise, alt tabaka sıcaklığı artırıldıkça film morfolojisindeki tane boyutunun arttığı, belirli bir alt tabaka sıcaklığı değerinden sonra tane büyüklüğünün azaldığı sonucu bulunmuştur. Bu çalışmada 100°C, 200°C, 300°C ve 400°C'lik alt tabaka sıcaklıklarında ölçülen tane boyutları sırasıyla, 8,535 nm, 9,868 nm, 15,8 nm ve 8,3 nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, her bir alt tabaka sıcaklığında büyütülen filmlerin pürüzlülüğünün incelenmesi sonucunda, 400°C'lik sıcaklık değerine kadar, alt tabaka sıcaklığı arttırıldıkça pürüzlülüğün azaldığı saptanırken, 400°C'lik alt tabaka sıcaklığında pürüzlülüğün arttığı tespit edilmiştir. Yapılan AFM analizi sonucunda 100°C, 200°C, 300°C ve 400°C'lik alt tabaka sıcaklıklarında belirlenen pürüzlülük değerleri sırasıyla 4,148 nm, 3,778 nm, 3,259 nm ve 4,117 nm olarak belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, 300°C'lik alt sıcaklığında büyütülen filmin daha düzgün bir morfolojiye sahip olduğu belirlenmiştir [50].

Q.X. Guo ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada, %80'lik bir azot konsantrasyonunda safir alt tabakalar üzerine büyütülen AlN filmleri için büyütme hızının alt tabaka sıcaklığına bağlılığını araştırılmıştır. Yapılan analizler neticesinde, düşük alt tabaka sıcaklığının, safir alt tabakalar üzerinde yüksek kaliteli kristal yapıya sahip AlN filmlerin elde edilmesi için uygun olduğu ve alt tabaka sıcaklığı artırıldıkça filmlerin kristal kalitesinin azaldığını öngörülmüştür. Ayrıca, alt tabaka sıcaklığı artırıldıkça, atomların alt tabakadan daha kolay bir şekilde yeniden sıçratılması ve buharlaşmasından dolayı, film büyütme hızında azalmanın olduğu belirlenmiştir [51].

Sonuç olarak tez çalışmamızın amacı doğrultusunda, üzerinde ilk kez çalıştığımız AlN ince filmler Reaktif RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile başarılı bir şekilde büyütülmüştür. AlN filmlerin yarıiletken alt tabakalar üzerine büyütülmesine yönelik çalışmalarımız devam ederken, bu tez çalışmasında film kompozisyonunda ortaya çıkan alüminyum oksit ikincil fazının bundan sonraki AlN filmler üzerine yapacağımız çalışmalarda ortaya çıkmaması için gerekli deneysel işlemler yapılacaktır.

KAYNAKLAR

1. **Chapman B.**, 1980, Glow discharge Processes, Wiley-Interscience, USA.
2. **Pulker H.K.**, 1990, Coatings on Glass, Elsevier science, Amsterdam.
3. **Granqvist C.G.**, 2003, Solar Energy Materials, 15(21), 1789.
4. **Arbab M., Shelestak L.J., and Haris C.S.**, 2005, Value-Added Flat-Glass Products for the Building, Transportation Markets, Part 2, American Ceramic Society Bulletin, 84(4),33.
5. **Yamashita, H., Fukui, K., Misawa S. and Yoshida, S.**, 1979, Optical properties of AlN epitaxial thin films in the vacuum ultraviolet region, J. Appl. Phys. 50, 896 Slack.
6. **Tanzilli R. A., Pohl R. O. and Vandersande J. W.**, 1987, Drop and recovery of thermal conductivity of AlN upon UV irradiation, Phys. Chem. Solids. 48, 641.
7. **Ohta, J., Fujioka, H., Ito, S. and M. Oshima.**, 2002, Room-temperature epitaxial growth of AlN films Appl. Phys. Lett. 81 , 2373.
8. **Yamashita H. , Fukui K., Misawa S., Yoshida S.**, 1979, J. Appl. Phys. 50 896.
9. **Slack G.A., Tanzilli R.A., Pohl R.O., Vandersande J.W.**, 1987, J. Phys. Chemical Solids 48 641.
10. **Amano H., Sawaki N., Akasaki I. and Toyoda Y.**, 1986, Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, Appl. Phys. Lett. 48, 353.
11. **Babon, Ponce F. A. and Bour, D. P.**, 1996, Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices, Nature London 386 , 351.
12. **Kokkokoğlu M**, 2010, RF Saçtırma Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Nitrit (AlN) İnce Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

13. **Cellek O., O. Gökden B.**, 2001, Mikroelektronik ve Optoelektronik Teknolojileri, ODTÜ Biltek Dergisi, Şubat, syf 14, 15.
14. **Rodi R.M., Sundaram K.B., Warren A.P., Scammon K.**, 2006, Investigation of Oxygen Annealing Effects on RF Sputter Deposited SiC Thin Films, Solid-State Electronics 50, 1189-1193.
15. **Tarımcı C.**, Sarı H., 2006, Vakum Tekniği, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 1. Baskı, 168s.
16. **Grill A.**, 1993, Cold Plasma in Materials Fabrication, IEEE Pres.
17. **Y. Müh. Mustafa Cenk T.**, 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
18. **Lüth H.**, 2001, *Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films: Forth, Revised and Extended Edition*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Printed in Germany.
19. **Kusano E., Kitagawa M., Kuroda Y., Nanto H. and Kinbara A.**, 1998. Adhesion and Hardness of Compositionally Gradient TiO₂/Ti/TiN, ZrO₂/Zr/ZrN and TiO₂/Ti/Zr/ZrN Coatings, *Thin Solid Films*, 334, 151-155.
20. **Smith, D.L.**, 1995, Thin Film Deposition-Principles & Practice, pp. 119-215, McGraw-Hill Inc., New York.
21. **Mattox D.M.**, 1998, Handbook of Physical Vapour Deposition (PVD) Processing-Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control, pp. 398-495, 588-624, Noyes Publications, New Jersey.
22. **Mahan J.E.**, 2000, Physical Vapour Deposition of Thin Films, pp. 4-17, 45-83, John Wiley & Sons Inc., USA.
23. **Sarıkaya Y.**, 2005, *Fizikokimya. Genişletilmiş Altıncı Baskı*, Gazi Kitabevi, Ankara.
24. **Tokmanoğlu K.**, 1997. Manyetik Alan Odaklamalı Katodik Ark PVD sisteminin ülkemizde imalatı ve optimizasyonu, Tin-Kap Sert Kaplamalar Ltd. Sti. TTGV-232 No'lu proje ekleri, Ankara.

25. **Atar E.**, 2004. Zirkonyum Hafniyum Nitrür Kaplamaların Mekanik ve Aşınma Özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
26. **Türküz M.C.**, 1997, Ark PVD Yöntemiyle TiN Kaplanmış Kesici Takımların Karakterizasyonu ve Performanslarının Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
27. **Ohring M.**, 2002, Materials Science of Thin Films–Deposition & Structure, pp. 357-414, 495-556, 723-750, Academic Press, San Diego.
28. **Kaya M.**, 2001, Yüksek Lisans Tezi, F. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
29. **Gündüz O.**, 2004. Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle ZrN Kaplamaların Farklı Bias Voltajlarında Üretimi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
30. **Jehn H.A.**, 1992. Nucleation and Growth of Thin Films, Advanced Techniques for Surface Engineering, pp. 5-29, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
31. **Bunshah, R.F.**, 2001. Handbook of Hard Coatings-Deposition Technologies, Properties and Applications, pp. 108-229, Noyes Publications, New Jersey.
32. **Movchan, B.A.and Demchishin, A.V.**, 1969, Investigation of the Structure and Properties of Thick Vacuum-Deposited Film of Nickel, Titanium, Tungsten, Alumina and Zirconium dioxide, Physics of Metals and Metallography, 28(23)-653.
33. **Pauleau Y.**, *Procédes Physiques de Depot*, Grenoble.
34. **Johnson R. L.**, 2005, Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers, Master Thesis, Electrical Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa, 98 p.
35. **Thornton J. A.**, 1983, Plasma assisted deposition process: Theory, mechanism and applications, Thin Solid Film, vol.107, 3-19.
36. **Akan, T.**, 2003, Termiyonik vakum ark (TVA)'nın temel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

37. **Köksal Y.**, 2011, Tabakalı Bazı İnce Filmlerin Mikroyapılarının Elektron Mikroskopisi ile İncelenmesi, Doktora Tezi, F.Ü , Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
38. **Aydın S.**, 1998, Si ve GaAs Alt Yapılı Yarıiletken Materyallerin Mikro Yapılarının ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
39. **Savaşkan T.**, 1986, Elektron Mikroskoplarının Endüstriyel Problemlere Uygulanması, KTÜ Basımevi, Trabzon.
40. **Bozzola J. J. and Russel L. D.**, 1992, Electron Microscopy, Jones and Bartlett Publishers, Inc.
41. **Ruth E. W.**, 1992, ASM Handbook, Printed in the USA.
42. **Goodhew P. J., Humphreys F. J. and Beanland R.**, 2001, Electron Microscopy and Analysis, Third Edition, Taylor & Francis, London and New York.
43. **Tekin A.**, 1981, Malzeme Yapı ve Muayenelerinde Elektron Mikroskoplarının Uygulanması, İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu.
44. **Williams B. D. and Carter C. B.**, 1996, Transmission Electron Microscopy 'Diffraction II' Plenum Press, New York.
45. **Goodhew P. J. and Humphreys F. J.**, 1988, Electron Microscopy and Analysis, 2nd Edition, Typeset by Alden Press, London.
46. **Loretto M. H.**, 1984, Electron Beam Analysis of Materials, Chapman and Hall, London.
47. **Yorucu H., Özkan O. T., Özen S., Mısırlı Z. ve Onurlu S.**, 1986, Malzeme Biliminde Tarama Elektron Mikroskobu Uygulamasına Giriş, TÜGAM Mtb., Gebze.
48. **Kiyotaka W, Shigeru H**, 1992, Handbook of Sputter Deposition Technology, Noyes Publications, New Jersey, USA.
49. **Hao C, Yong S, Peter H**, 2003, The influence of deposition conditions on structure and morphology of aluminum nitride films deposited by radio frequency reactive sputtering, Thin Solid Films 434 112–120.

50. **M-S Lee, S Wu, S-B Jhong, K-T Liu, R Ro, C-C Shih, Z-Xun Lin, K-I Chen, Shou-Chang Cheng**, 2010, Influence of substrate temperature to prepare (1 0 3) oriented AlN films, *Microelectronics Reliability* 50 1984–1987.
51. **Q.X. Guo, K. Yahata, T. Tanaka, M. Nishio, H. Ogawa**, 2003, Low-temperature growth of aluminum nitride on sapphire substrates, *Journal of Crystal Growth* 257 123–128.

ÖZGEÇMİŞ

Düzgün KAL

e-posta: duzgunkal@hotmail.com

Kişisel Bilgiler:

Doğum Tarihi : 10.04.1985
Doğum Yeri : Tunceli
Uyruğu : T.C.
Medeni Hali : Bekar

Eğitim:

İlköğretim:

1992-1997 DiyarAğa İlköğretim Okulu (Tunceli)

Lise:

1999-2003 Tunceli Atatürk Lisesi

Lisans:

2005-2009 İnönü Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Malatya

Yüksek Lisans:

2009- Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
Tez: Alüminyum Nitrür İnce Filmlerin Büyütülmesi ve Mikroyapılarının İncelenmesi
Danışman: Prof. Dr. Yusuf ATICI