



**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GALYUM OKSİT
(Ga₂O₃) İNCE FİMLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ
YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hülya AKÇAY

**Yüksek Lisans Tezi
Katıhal Fiziği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI
2020
(Her hakkı saklıdır.)**

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KATIHAL FİZİĞİ ANA BİLİM DALI

**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GALYUM OKSİT (Ga_2O_3) İNCE FİMLERİNİN
BÜYÜTÜLMESİ YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

(Growth of Gallium Oxide (Ga_2O_3) Thin Films By RF Sputter, Investigation of Structural,
Morphological and Optical Properties)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya AKÇAY

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Erzurum
Ekim, 2020

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GALYUM OKSİT (Ga₂O₃) İNCE FİLMLERİNİN
BÜYÜTÜLMESİ YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında, Hülya AKÇAY tarafından hazırlanan bu çalışma, 25/11/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM
Atatürk Üniversitesi
Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI
Atatürk Üniversitesi
Jüri Üyesi: Doç. Dr. Abdulkerim KARABULUT
Erzurum Teknik Üniversitesi

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında sunulan “RF Saçtırma Yöntemi ile Galyum Oksit (Ga_2O_3) İnce Filmlerinin Büyütülmesi Yapısal, Morfoloji ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	% 2	30
Kuramsal Temeller	% 13	30
Materyal ve Yöntem	% 1	35
Bulgular	% 0	20
Tartışma	% 0	20
Tezin Geneli	% 13	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hülya AKÇAY	Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI
25.11.2020	25.11.2020
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

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

Bana çalışmalarım sırasında teorik ve deneysel olarak yardım eden değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevda SARITAŞ'a ve Sayın Dr. Yusuf KOÇAK'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmamın deneysel aşamalarında bilgisini paylaşan Uzman Sayın Hasan Feyzi BUDAK'a ve Uzman Sayın Ahmet Emre KASAPOĞLU'na teşekkür ederim. DAYTAM personeline deneysel çalışmam boyunca gösterdikleri yardımlardan dolayı şükran olduğumu belirtmek isterim.

Son olarak, her şeyleriyle beni destekleyen, sabrını ve sevgisini esirgemeyen, bugünlere gelmemi sağlayan sevgili babam Ragıp AKÇAY'a ve annem Leyla AKÇAY'a, her zaman yanımda olan çok sevgili ablam Esra AKÇAY'a çok teşekkür ediyorum. Bu tezi kıymetli aileme ithaf ediyorum.

Hülya AKÇAY

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE GALYUM OKSİT (Ga_2O_3) İNCE FİMLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hülya AKÇAY

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Amaç: Bu tez çalışmasının amacı p-tipi Silisyum ve cam alt taşlar üzerine farklı basınç ve sıcaklık altında büyütülen Galyum Oksit (Ga_2O_3) ince filmlerinin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerinin incelenmesidir.

Yöntem: Bu çalışmada, Galyum Oksit (Ga_2O_3) ince filmleri Radyo Frekans (RF) Manyetik Saçtırma yöntemi kullanılarak farklı alt taşlar üzerine farklı basınç ve sıcaklıklarda büyütülmüştür. Büyütülen numunelerin yapısal özellikleri X-Işınlı Kırınım Difraktometresi (XRD), morfolojik özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile optik özellikleri Ultraviyole- Görünür Dalga Boyunda Optik Soğurma Yöntemi ile deneysel olarak belirlenmiştir.

Bulgular: XRD analizinden, ince filmlerin monoklinik ve kübik yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca filmlerin yönelimi, kristal tanecik boyutu ve örgü sabitleri hesaplanmıştır. AFM ölçümlerinden ince filmlerin morfolojik özellikleri ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. SEM resimleri, büyütülen ince filmlerin hemen hemen homojen olduğunu ve tanecikli periyodik yapıda büyüdüğünü göstermiştir. Soğurma ölçümleri analizinden, optoelektronik aygıtlar için çok önemli bir parametre olan optik bant aralığı ve enerji değerleri hesaplanmıştır.

Sonuç: Büyütme basınçlarının ve sıcaklıklarının değiştirilmesi ve farklı alt taş kullanılması ile malzemenin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkileri değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Galyum Oksit (Ga_2O_3) İnce Film Teknolojisi, RF Saçtırma Tekniği

Kasım 2020, 78 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

GROWTH OF GALLIUM OXIDE (Ga_2O_3) THIN FILMS BY RF SPUTTER, INVESTIGATION OF STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND OPTICAL PROPERTIES

Hülya AKÇAY

Supervisor: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Purpose: The aim of this thesis is to search the structural, morphological and optical properties of Gallium Oxide (Ga_2O_3) thin films grown under different pressure and temperature on p-type silicon and glass substrates.

Method: In this study, Gallium Oxide (Ga_2O_3) thin films were grown using by Radio Frequency (RF) Magnetic Sputtering method on different substrates at different pressures and temperatures. The structural properties of the grown samples were determined experimentally by X-Ray Diffractometer (XRD), morphological properties by Scanning Electron Microscope (SEM), Atomic Force Microscope (AFM) and optical properties by Ultraviolet-Visible Wavelength Optical Absorption Method.

Findings: From XRD analysis, it has been determined that thin films have monoclinic and cubic structures. In addition, orientation, crystal particle size and lattice constants of the films were calculated. Morphological properties and average surface roughness values of thin films were obtained from AFM measurements. SEM pictures showed that the thin films grown were almost homogeneous and grew in a granular periodic structure. Optical band gap and energy values, which is a very important parameter for optoelectronic devices, were calculated from the analysis of absorption measurements.

Results: The effects on the structural, morphological and optical properties of the sample by changing the growing pressures and temperatures and using different substrates were evaluated and analysed.

Keywords: Gallium Oxide (Ga_2O_3), Thin Film Technology, RF Sputtering Technique

November 2020, 78 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Galyum Oksit Ga_2O_3 Malzemesi	4
Yapısal özellikleri	4
Optik ve Elektronik Özellikleri.....	8
İnce Filmlerde Kalıcı Gerilime Sebep Olan Faktörler	11
İnce Film Büyütme Teknikleri	12
Radyo Frekans Magnetron Saçtırma Tekniği (RF-Sputter).....	13
Sıçratma Mekanizması	15
Sıçratma verimi	16
X Işını Kırınımı (XRD).....	20
Soğurma ve yansıma spektroskopisi	22
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	22
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	23
MATERYAL ve YÖNTEMLER	24
Materyal Özellikleri	24
Büyütmede Kullanılan RF Magnetron Saçtırma Sistemi.....	26
ARAŞTIRMA BULGULARI	30
Büyütme Parametreleri.....	30
Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyon	30
X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri	30
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri.....	41

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri.....	46
Optik Karakterizasyon	52
Soğurma (UV/Vis) ve Yansım (Reflectance) ölçümleri	52
SONUÇ ve TARTIŞMA	57
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	64



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. a) Çeşitli yarıiletken malzemeler için bant aralığı ve kırılma voltajı alanı arasındaki ilişki, b) Büyük yarıiletken için kırılma voltajının bir fonksiyonu olarak direnç	4
Şekil 2. Galyum Oksitin farklı sentez şeması	6
Şekil 3. a) β -Ga ₂ O ₃ (farklı simetriye sahip 3 oksijen bölgesi; O(1), O(2) ve O(3), Galyum atomları tetrahedral ve oktahedral boşluklarda (sırasıyla; Ga(1), Ga(2)) b) α -Ga ₂ O ₃	7
Şekil 4. 1 bar (1×10^5 Pa) basınçta Ga-O faz diyagramı	7
Şekil 5. Bant genişliklerine göre malzemelerin sınıflandırılması	8
Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda tavlınmış ince filmlerin spektral geçirgenlik özellikleri ve ince filmlerin bant aralığını belirlemek için absorpsiyon verileri	8
Şekil 7. Tavlama sıcaklığı olan ince filmlerin bant aralığı varyasyonu	9
Şekil 8. β -Ga ₂ O ₃ elektronik bant yapısı	10
Şekil 9. İnce filmlerdeki basınç gerilimi gösterimi	11
Şekil 10. Saçtırma cihazının çalışma şeması	14
Şekil 11. İyon madde etkileşimi ve sıçratma mekanizması	15
Şekil 12. İyon-atom çarpışması a) Tekli çarpışma (düşük enerjili) b) Doğrusal zincirleme çarpışma c) Dalıcı çarpışma	16
Şekil 13. Bakırın iyonlarıyla bombardımanında iyon enerjisine bağlı olarak sıçratma verimi	17
Şekil 14. Hg ⁺ iyonları ile bombardıman edilen farklı hedef malzemeleri için eşik iyon enerjileri (Keleşoğlu 2011)	18
Şekil 15. Sıçratma veriminin çarpışma açısına bağlılığı (Ni ve Au hedef malzeme için) (Keleşoğlu 2011)	19
Şekil 16. Kristal düzlemlerinin sıçratması verimine etkisi (Ag hedef için)	20
Şekil 17. Bragg kırınımının temsili gösterimi	21
Şekil 18. Radyo Frekans Magnetron Saçtırm sisteminin şematik gösterimi 1) Alt taş zemini, 2) Alt taş malzeme, 3) Target, 4) RF gücü	27
Şekil 19. 6 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	31
Şekil 20. 6 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	31

Şekil 21. 6 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	32
Şekil 22. 6 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	32
Şekil 23. 8 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği.....	33
Şekil 24. 8 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	34
Şekil 25. 8 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	34
Şekil 26. 8 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği.....	35
Şekil 27. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	36
Şekil 28. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği.....	36
Şekil 29. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	37
Şekil 30. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	37
Şekil 31. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	38
Şekil 32. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	39
Şekil 33. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	40
Şekil 34. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filminin XRD grafiği	40
Şekil 35. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin 150000X büyütmedeki a) 5 militorr basınçtaki b) 6 militorr basınçtaki c) 8 militorr basınçtaki d) 10 militorr basınçtaki SEM görüntüleri	42
Şekil 36. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin 150000X büyütmedeki a) 5 militorr basınçtaki b) 6 militorr basınçtaki c) 8 militorr basınçtaki d) 10 militorr basınçtaki SEM görüntüleri	43

Şekil 37. Cam alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki a) 150° sıcaklıktaki b) 300° sıcaklıktaki c) 450° sıcaklıktaki SEM görüntüleri	44
Şekil 38. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki a) 150° sıcaklıktaki b) 300° sıcaklıktaki c) 450° sıcaklıktaki SEM görüntüleri	45
Şekil 39. SEM analizleri sonucunda EDX ölçüm sonuçları.....	46
Şekil 40. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin a) 5 militorr b) 6 militorr c) 8 militorr d) 10 militorr basınçta iki boyuttaki AFM görüntüleri	47
Şekil 41. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin a) 5 militorr b) 6 militorr c) 8 militorr d) 10 militorr basınçta iki boyuttaki AFM görüntüleri ..	48
Şekil 42. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin a) 150° sıcaklık b) 300° sıcaklık c) 450° sıcaklıkta üç boyuttaki AFM görüntüleri	50
Şekil 43. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin a) 150° sıcaklık b) 300° sıcaklık c) 450° sıcaklıkta üç boyuttaki AFM görüntüleri	51
Şekil 44. 6 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklarda cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği	53
Şekil 45. 8 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklarda cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği	54
Şekil 46. 10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklarda cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği	55
Şekil 47. 5 militorr basınçta ve 450° sıcaklıkta cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği	55

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. β -Ga ₂ O ₃ 'in temel özelliklerinin özeti	5
Tablo 2. Ga-O sisteminin fazları ve özellikleri (* Yarı kararlı fazlar)	6
Tablo 3. İnce film büyütme teknikleri	13
Tablo 4. Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan büyütmede, tüm alttaşlar (cam ve p-Si) için uygulanan büyütme koşulları.....	30
Tablo 5. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	33
Tablo 6. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	35
Tablo 7. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	38
Tablo 8. Farklı sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	39
Tablo 9. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri.....	41
Tablo 10. Farklı basınç değerlerinde cam ve p-tipi silisyum alttaşlarının üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri	49
Tablo 11. 8 militorr basınçta ve farklı sıcaklık değerlerinde cam ve p-tipi silisyum alttaşlarının üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri.....	52
Tablo 12. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E _g) değerleri.....	53
Tablo 13. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E _g) değerleri.....	54
Tablo 14. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E _g) değerleri.....	55
Tablo 15. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E _g) değerleri.....	56
Tablo 16. Üretilen ince filmlerin bazı yapısal parametreleri	57
Tablo 17. Farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde cam alttaş üzerine büyütülen Ga ₂ O ₃ ince filmlerinin optik bant aralığı enerjileri	60

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

R_a	Ortalama pürüzlülük
m_0	Elektronun durgun kütlesi
μ	İndirgenmiş Kütle
b	Eğrilik parametresi
d	Kristal düzlemler arasındaki mesafe
e	Elektronun yükü
$h\nu$	Foton enerjisi
S	Spin açısal momentumu
Y	Sıçratma verimi
α	Optik soğurma katsayısı
λ	Dalga boyu
σ	Kalıcı gerilim

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
DAYTAM	Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
DC	Doğru Akım
DI	Deiyonize Su
FWHM	Yarı Yükseklik Genişliği
Ga_2O_3	Galyum Oksit
HCl	Hidrojen Klorür
H_2O_2	Hidrojen Peroksit
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
ITO	İndiyum Kalay Oksit
P-Si	P tipi Silisyum
RF	Radio Frekans
SCCM	Dakikada Standart Kübik Santimetreden Geçen Akış
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XPS	X – Işını Fotoelektron Mikroskobu
XRD	X-Işını Kırınımı

GİRİŞ

Son yirmi yılda çeşitli endüstrilerde pratik uygulamalar için oksit yarıiletken cihazların geliştirilmesine yönelik çok sayıda araştırma yapılmaktadır ve geniş bant aralıklı yarıiletken oksitlerin umut verici avantajları dikkat çekmektedir. Son yıllarda artan nano yapılar sentezlenmelerinin kolay olması ve yüksek elektromekanik performanslarından dolayı büyük ilgi odağı olmuşlardır. Karbon nano tüpler (CNT), geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler ve çinko oksit (ZnO), indiyum oksit (In_2O_3) ve galyum oksit (Ga_2O_3) gibi birçok metal-oksit materyal üzerinde çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu sebeple yüksek kalitede ince film üretilmesi gerekmektedir. Bu durum ince filme niçin gereksinim duyarız sorusunu aklımıza getirmektedir. 1900'li yıllarda ince filmler seramik ve cam üzerine dekorasyon olarak kaplanmaktaydı. Nanoteknolojinin gelişmesi ile birlikte, ince filmler alan etkili transistörler, lityum iyon bataryalar, güneş pilleri, UV fotodedektörler ve gaz sensörleri gibi uygulama potansiyeli nedeniyle büyük ilgi görmektedir. İnce film teknolojisi ile daha verimli aygıtlar üretilmekte ve yaygın hale gelmektedir. İnce filmler alt taş üzerine atom veya moleküllerin yerleşmesiyle ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple de hacimli yapılardan farklılık göstermektedir. Bu farklılıklardan yararlanarak aygıtlar tasarlanmaktadır. Bu tez çalışmamızda ince filmler radyo frekans (RF) magnetron saçırma tekniği ile üretilmiştir. Yapısal, morfolojik ve optik özellikleri araştırılmıştır. Uluslararası kaynaklarda konu ile ilgili birçok çalışma mevcuttur.

Galyum elementel olarak doğada bulunmaz ve düşük sıcaklıklarda kırılğan bir katıdır. 29°C sıcaklıkta sıvı hale geçmektedir. 3-6 grubu yarıiletkenlerin en önemli özelliği geniş bant yapısına sahip olmalarıdır. GaN, GaAs, InGaN, AlGaInN gibi üçlü ve dörtlü bileşiklere sahiptir. Elektronik ve optik özelliklerinden dolayı pek çok alanda kullanılmaktadır. Örnek vermek gerekirse; GaN, InGaN ışık yayan diyod uygulamalarında, GaAs mikrodalga devreler ve morötesi gibi alanlarda, iletkenlik (Zoltan 1999) ve ışıldama (Wang 2001) özelliklerinden dolayı flat paneller gibi optoelektronik uygulamalar, yüksek sıcaklıkta çalışabilen gaz sensörleri (Lau 2008) alanlarında kullanılmaktadır. Galyumun diğer önemli bir bileşiği ise Galyum Oksit' tir.

Galyum oksit ; α , β , γ , δ ve ϵ olmak üzere 5 farklı kristal yapıya sahip malzemedir. Bu kristal yapıların içinde kararlı olanları α ve β fazlarıdır. Fakat kristal yapılar içerisinde ısı ve kimyasal açıdan en kararlı olan β fazıdır. β fazı 4,7 ve 4,9 eV arasında bant genişliğine sahiptir. Fazlardan biri olan α fazının ise bant aralığı çok daha küçüktür. Bu özellikleri

nedeniyle galyum oksit ile ilgili çalışmalar genellikle β fazı üzerinde olmaktadır (Ortiz 2001; Zinkevich 2004).

β -Ga₂O₃ atmosfer koşullarında yalıtkan bir malzemedir. Fakat 500°C sıcaklık üzerinde yarıiletken özellik göstermektedir (Ortiz 2001). Yüksek sıcaklıklarda kimyasal ve ısı kararlılığı nedeniyle 500°C ve üzeri sıcaklıklarda indirgeyici gazları algılamada, 900°C ve üzeri sıcaklıklarda ise oksijen gazını algılama da kullanılabilir. Optik özelliğinden kaynaklı kullanım özelliklerini göz önünde bulundurduğumuzda; geniş bant aralığı nedeniyle derin UV ışığa karşı fotoiletkenlik özelliği gösterir. Bu yüzden UV dedektörlerde (Ji 2006; Oshima 2009) farklı elementlerin katkısıyla farklı renklerde ışımaya yapmasından dolayı düz panel ekranlar gibi birçok farklı alanda lüminesans malzeme olarak kullanılmaktadır (Miyata 2000; Hao 2004). İnce filmlerin üretilmesinde kullanılan pek çok yöntem ince filmlerin üretiminde de kullanılmaktadır. Üretim yöntemleri; spreylendirme (Ortiz 2001; Hao 2004; Ji 2006), manyetik sıçratma yöntemi (Fleischer 1992; Miyata 2000; Marie 2008) ve sol-gel (Miyata 2000) en yaygın üretim yöntemleri olmaktadır. Bu çeşitli yöntemlerden kullanışlı olan saçırma tekniğidir. Radyo frekans magnetron saçırma tekniği kullanılarak Ga₂O₃ ince filmlerin büyütülmesi ile ilgili pek çok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Düşük enerjili Ar⁺ iyon bombardımanı altında saçırma ile büyütülen Ga₂O₃ filmlerin yapısı incelenmiştir. Bu çalışmada neodimyum katkılı Ga₂O₃ ince filmler radyo frekans magnetron püskürtme ile silisyum alttaşı üzerine büyütülmüştür. Nd katkılı β -Ga₂O₃ filmleri için fotolüminesans etkisi, yapısal özellikler, optik absorpsiyon ve elektriksel iletkenlik özellikleri araştırılmıştır. Araştırma bulguları sonucunda çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır. Elipsometrik spektroskopisi (ES) verileri gelen 66.2°'lik açı altında 1.5 eV ve 5.0 eV aralığında taranmıştır. ES spektrumları, elipsometrenin temel denkleminde tanımlanan açıların ölçülmesinden oluşmaktadır:

$$r_p/r_s = \tan\Psi e^{i\Delta} \quad (1)$$

olup ve sırasıyla ışığın paralel ve dik polarizasyonu için yansıma katsayılarıdır.

Yüzey sıcaklığı etkisi ile sentezlenen tüm filmlerin alttaşı sıcaklığı ne olursa olsun amorf olduğu bulunmuştur. XRD spektrumu ise 32° ve 64°'de iki geniş pik elde edilmiştir. Bu pozisyonlar β -Ga₂O₃'ün ana kırınım piklerinin konumlarına karşılık gelmektedir. TEM gözlemleri filmlerin amorf olduğunu göstermiştir. Numunelerin tümü 3 eV altında şeffaf olduğu gözlemlenmiştir. Nd katkılı β -Ga₂O₃ filmlerin katkısız olan filmlere göre çok yakın olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmanın sonucunda ise termal koşullar altında şeffaf olduklarından dolayı kızılötesi bölgedeki Nd'den gelen tipik sinyaller kolaylıkla tespit

edilebilmektedir. Bu nedenle ışık yayan diyodlar için kullanılması ümit verici olduğu gözlemlenmiştir (Marie 2008).

Bir başka çalışmada ise, güneş foto dedektörleri üretmek için radyo frekans magnetron saçtırma yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırma için ek olarak plazma destekli moleküler ışın epitaksi (MBE) yöntemi ile de galyum oksit film büyütülerek metal-yarıiletken-metal (MSM) kontrol numunesi yapılmıştır. Alt taş malzemesi olarak safir kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, MBE yöntemi ile büyütülen galyum oksit ince film amorf kristal yapı, zayıf stokiometri ve pürüzlü yüzey nedeniyle yapısal bozukluk, oksijen boşlukları ve sarkan sınırlar nedeniyle birçok kusura sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, β -Ga₂O₃ ince filme göre daha küçük bant aralığı ve daha büyük Urbach enerjisi, yüksek yoğunluklu kusurların varlığı gözlemlenmiştir. β -Ga₂O₃ fotodedektörleri ise gelişmiş yüzey rekombinasyonu nedeniyle yüksek performans, kolay büyük ölçekli ve düşük maliyetli olması sebebiyle ticari ve askeri alanlardaki uygulamalar için faydalı olmaktadır (Qian 2017).

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan da anlaşılacağı gibi, galyum oksit ince film üzerinde karşılaşılan sıkıntılar şunlardır:

- Üretim maliyetinin yüksek olması
- Daha yüksek verimliliğe sahip ince filmlerin üretilmemesi

Araştırmamızda bu problemlere karşı bu şekilde sonuçlara varıldı:

- Ga₂O₃ film büyütme RF magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak yapıldı. Bunun sebebi ise bu tekniğin diğer tekniklere göre düşük masraflı olmasıdır.
- Kaliteli kristal yapıya sahip ince filmler üretilmeye çalışıldı.

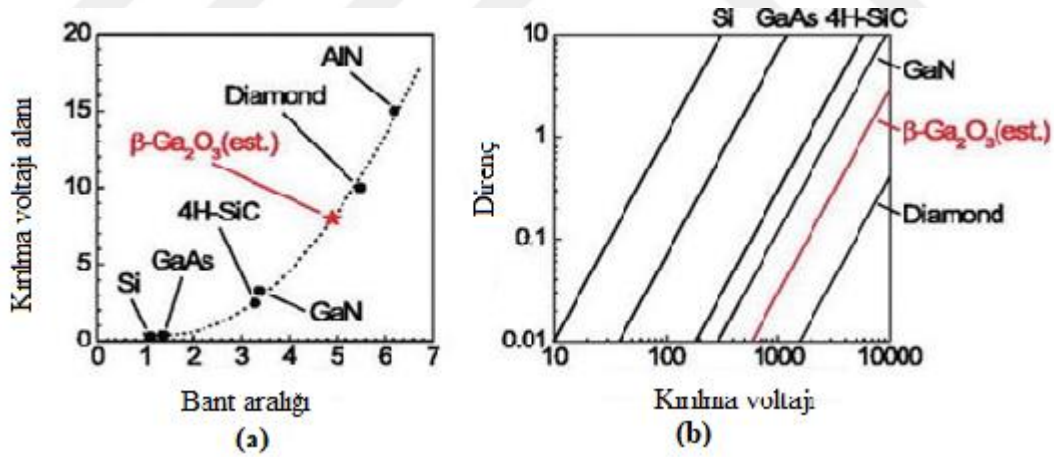
Araştırmanın temel amacı, ince filmlerinin radyo frekans (RF) magnetron saçtırma tekniği ile morfolojik, yapısal ve optik özellikleri incelemektir. Ek olarak farklı RF gücü, farklı argon gaz akışı ve farklı sıcaklıktaki büyütülen ince filmlerin büyütülmesindeki en uygun koşullar belirlenmeye çalışılmıştır. Farklı alt taşlar üzerinde büyütme yapılmıştır. Bu alt taşların da malzemenin yapısal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Büyütmelemlerden sonrada yapısal özelliklerini incelemek için X ışını kırınımı (XRD) ölçümü, morfolojik özelliklerini incelemek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri ve optik özelliklerini incelemek için de yansıma, soğurma (UV/Vis) ölçümleri alınmıştır. Bundan sonraki hedefimiz ise elde edilen filmler üzerine farklı yapılar büyütme yeni aygıtlar geliştirmek için çalışmalar yapmaktır.

KURAMSAL TEMELLER

Galyum Oksit Ga_2O_3 Malzemesi

Çeşitli endüstrilerde pratik uygulamalar için oksit yarıiletken cihazların geliştirilmesine yönelik çok sayıda araştırma yapılmış ve genel olarak geniş bant aralığına sahip malzemeler umut verici olmuştur. Galyum oksit malzemesi de saydam yarıiletken oksit malzeme grubunda yer almaktadır. Galyum oksit malzemesi alan etkili transistörler, lityum iyon bataryalar ve güneş pilleri, UV fotodedektörler ve gaz sensörlerinde kullanılan yüksek uygulama potansiyeli nedeniyle popüler olan bir malzemedir. Bu kısımda araştırdığımız malzemenin yapısal, optik ve elektronik özelliklerinden bahsedilecektir.

Galyum oksit, malzeme özelliklerine dayanarak diğer yarıiletkenlere göre ümit verici bir geleceğe sahiptir. Şekil 1’de gösterildiği gibi güç ve opto elektronik uygulamalarında sadece Si değil, SiC ve GaN’den daha yaygın olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Bunun nedeni de yüksek kırılma voltajı ve düşük dirençli olmasından kaynaklanmaktadır (By Badriyah Alhalaili 2017).



Şekil 1. a) Çeşitli yarıiletken malzemeler için bant aralığı ve kırılma voltajı alanı arasındaki ilişki, **b)** Büyük yarıiletken için kırılma voltajının bir fonksiyonu olarak direnç (Amerikan Fizik Enstitüsü 2012)

Yapısal özellikleri

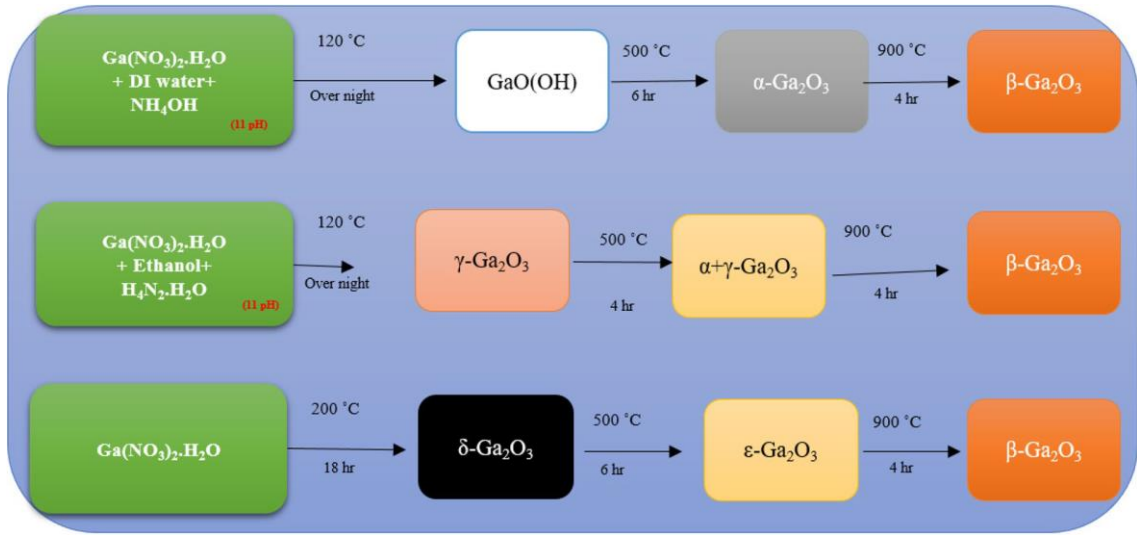
$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ince filmi 1950’de gözlemlendi ve 1960’da Geller tarafından da kristal yapısı keşfedildi. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ C2/m uzay grubunun bir parçasıdır. Dört kafes parametresi ile taban merkezli bir düzenlemeye sahiptir. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ’in birim hücresi iki farklı Ga atomuna ve üç farklı O atomuna sahiptir. Birim hücreyi oluşturan kristal yapıları oktahedral (Ga) ve tetrahedral (Ga)’dır. b eksenini boyunca, kenarları paylaşan çift zincirli (Ga) oktahedral,

köşeleri paylaşan (Ga) tetrahedral zincirleri ile bağlanır. Birim hücre, düzensiz bir kübik dizide yan yana yerleştirilmiş ve yakın üç farklı oksijen iyonundan oluşmuştur (By Badriyah Alhalaili 2017).

Tablo 1. β -Ga₂O₃'in temel özelliklerinin özeti (By Badriyah Alhalaili 2017)

Yapısal Parametreler	Nitelikler
Kristal Yapı	Monoklinik
Simetri Grubu	C2/m
Kafes Parametreleri	
A	12.214Å
B	3.037Å
C	5.798Å
B	103.83Å
Yasak Bant Aralığı (Eg)	4.83 eV (indirect) 4.87 eV (direct) at RT
Yoğunluk	5.863 g/cm ³
Katkı (n/p tipi)	Ti/Zn, Ge, Mg
Elektron İlgisi	3.50 eV
Etkin Elektron Kütlesi	0.342 mc
Elektron Mobilitesi (Hareketliliği)	10 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Taşıyıcı Yoğunluğu	10 ¹³ – 10 ¹⁶ cm ³
Gerçek Dielektrik Sabiti	9.9-10.2
Erime Noktası	1800°
Isı Sığası	0.49-0.56 Lg ⁻¹ K ⁻¹
Isısal İletkenliği	
[100]	(10.9±1.0 W/mK)-(13 W/mK)
[-201]	13.3±1.0 W/mK
[001]	14.7±1.5 W/mK
[110]	(27.0±2.0 W/mK)-(21 W/mK)
Reaktif İndeks 532 nm	
II [100]	1.9523
(100)	1.901

Galyum oksit (Ga₂O₃); α , β , γ , δ ve ϵ olmak üzere beş farklı kristal yapıya sahiptir. Ga₂O₃ tek kristalin polimorfları, korindon (α), monoklinik (β), kusurlu spinel'e karşılık gelen (γ) ve ortorombik (ϵ) olup, δ fazı ortorombik fazın bir formu olarak kabul edilir (Hongpeng, Lei 2020). Farklı sentez protokollerinin şeması Şekil 2'de gösterilmektedir (Adiyta, Mayora 2020).



Şekil 2. Galyum Oksitin farklı sentez şeması

Kararlı olan fazlar ; α ve β fazlarıdır. Tablo 2’de bu fazlar ve özellikleri gösterilmektedir. β fazı, ısı ve kimyasal olarak en kararlı fazdır (Zinkevich 2004; Litimein 2009). Atmosfer koşullarında β -Ga₂O₃ 4.7 – 4.9 geniş bant aralığı nedeniyle yalıtkan özellik göstermesine rağmen, 500° üzerinde n-tipi yarıiletkenlik özellik göstermektedir (Ortiz 2001).

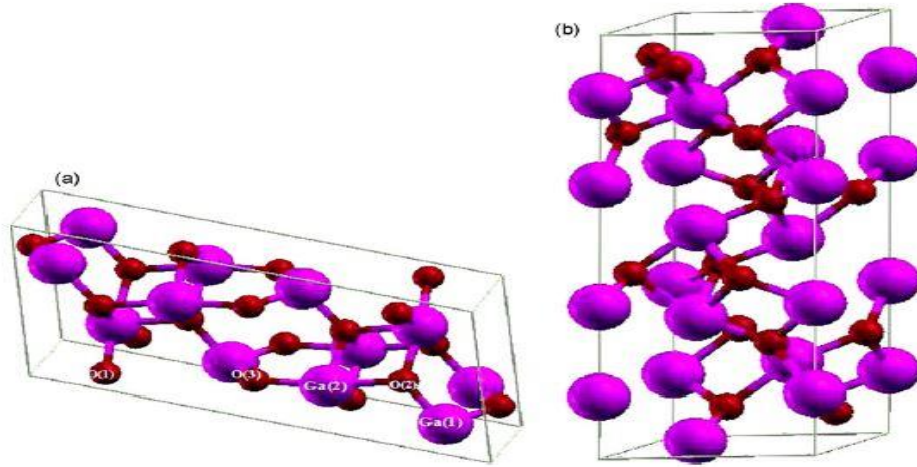
Tablo 2. Ga-O sisteminin fazları ve özellikleri (* Yarı kararlı fazlar) (Zinnkevich 2004)

Faz	Bileşim (at % O)	Pearson Sembolü	Uzay Grubu	Prototipi	Kafes Parametresi (nm, deg)
α -Ga ₂ O ₃ *	60	hR30	R $\bar{3}$ c	α -Al ₂ O ₃	a = 0.49791(6) c = 1.3437(4)
β -Ga ₂ O ₃	60	mC20	C2/m	β -Ga ₂ O ₃	a = 1.2214(3) b = 0.30371(9) c = 0.57981(9) β = 103.83(2)
γ -Ga ₂ O ₃ *	60	cF56	Fd $\bar{3}$ m	Al ₂ MgO ₄	a = 0.822
δ -Ga ₂ O ₃ *	60	cI80	Ia $\bar{3}$	Ti ₂ O ₃	a = 1.000
ϵ -Ga ₂ O ₃ *	60	oP40	Pna2 ₁	κ -Al ₂ O ₃	
Ga ₂ O ₃ *	33.3			Amorf	

Şekil 3’de galyum oksit malzemesinin α ve β fazları gösterilmektedir. Monoklinik β -Ga₂O₃ atmosfer basıncı ve sıcaklığında kararlı bir yapıdır. Bu fazda, O²⁻ anyonları çok az deforme olmuş yüzey merkezli kübik kafes yapısını oluşturur ve katyonlarda tetrahedral ve oktahedral boşluklarında oluşur. α yapısı ise deforme olmuş hegzagonal sıkı paket yapısında yer alır. Ga³⁺ iyonları oktahedral boşlukların 2/3’de bulunur (Machon 2006).

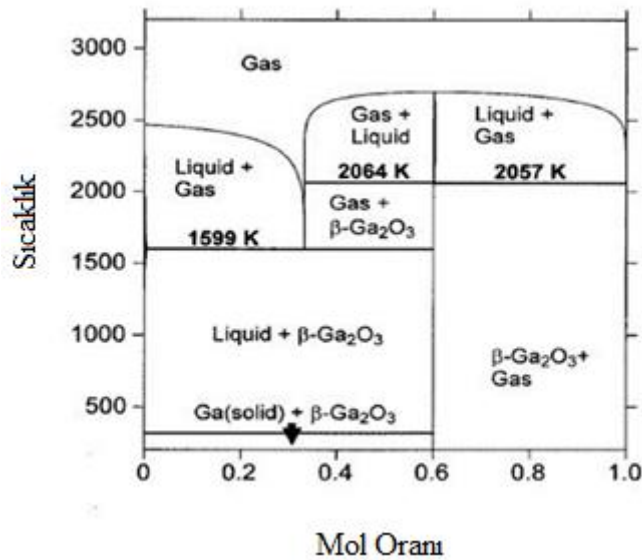
Bu fazlar arasında monoklinik yapıda olan β fazının yüksek özelliklerinden dolayı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Uygulama alanlarına örnek verecek olursak; derin mor ötesi ışınım için optik sınırlayıcılar, yüksek sıcaklıklarda kararlı gaz sensörleri, lüminesans

malzeme olarak ince film düz panel ekranlar, güneş filmleri dönüştüren aygıtlar ve GaAs üzerinde yansıma yapmayan kaplamalar olarak verilebilir (M. Ogita 1999; Al-Kuhaili 2003; Machon 2006; Litimein 2009).

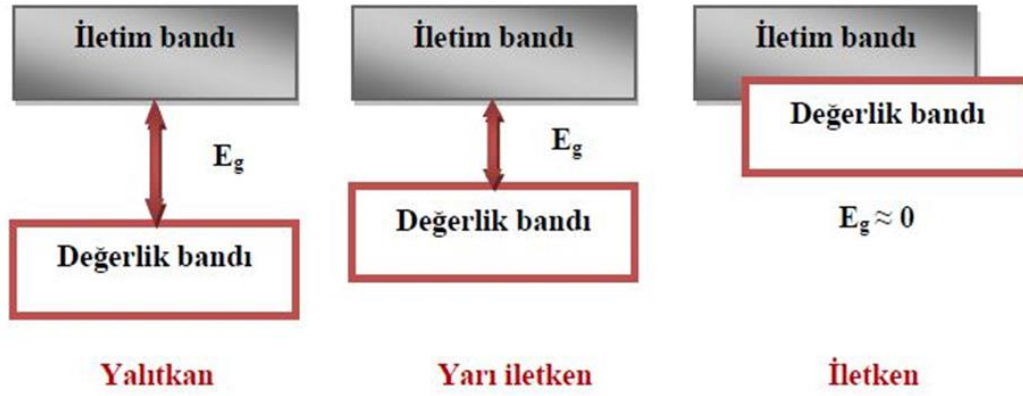


Şekil 3. a) β -Ga₂O₃ (farklı simetriye sahip 3 oksijen bölgesi; O(1), O(2) ve O(3), Galyum atomları tetrahedral ve oktahedral boşluklarda (sırasıyla; Ga(1), Ga(2)) **b)** α -Ga₂O₃ (Litimein 2009)

Şekil 3'deki faz diagramında da görüldüğü gibi kararlı olan β fazı; 1725°C ergime sıcaklığına sahiptir. Hidroksit, asetat okzalot ve nitratın 600° sıcaklık üzerinde kalsinasyonu ile elde edilmektedir (Ortiz 2001; Litimein 2009). Galyum oksit filmler üzerinde yapılan araştırmalarda, genellikle 900 – 1050°C arasında yapılan 1 saatlik tavlama işlemi ile β kristal yapısı elde edilmiştir (Ogita 1999-2001; Baban 2005).



Şekil 4. 1 bar (1×10^5 Pa) basınçta Ga-O faz diyagramı (Zinkevich 2004)

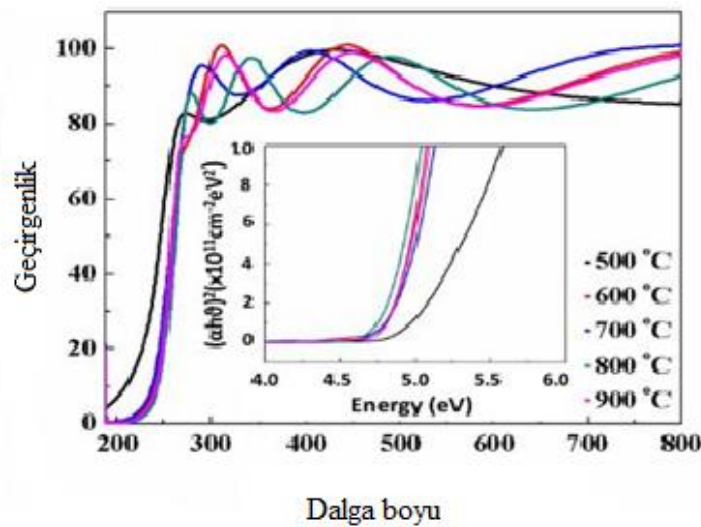


Şekil 5. Bant genişliklerine göre malzemelerin sınıflandırılması

Galyum oksitin β fazının en önemli özelliklerinden birisi de geniş bant aralığına sahip olmasıdır ($E_g \approx 4.9$ eV). Galyum oksit malzemenin fazları arasında pek çok fark mevcuttur. Optoelektronik özellikleri açısından bant genişliği verilebilir. β -Ga₂O₃ 4.9 eV bant aralığına sahip iken α -Ga₂O₃ 2.41 eV bant genişliğine sahiptir (Machon 2006). β -Ga₂O₃ atmosfer koşullarında yalıtkan malzeme özelliği gösterirken, yüksek sıcaklıklarda ($>500^\circ$) n-tipi yarıiletken özellik gösterir (Ortiz 2001).

Optik ve Elektronik Özellikleri

Optik şeffaflığı değerlendirmek ve bant aralığını belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bir çalışmada, çöktürülmüş ve tavlanmış galyum oksit ince filmlerinin spektral iletim özellikleri ele alınmıştır. Şekil 6'da gösterildiği gibi görünür aralık da (400-700 nm) bir soğurma yoktur ve yaklaşık 245 nm'de keskin bir soğurma mevcuttur. Genel olarak, UV bölgesindeki soğurma kenarı, valans bandından iletim bandına geçişlerden kaynaklanmaktadır.



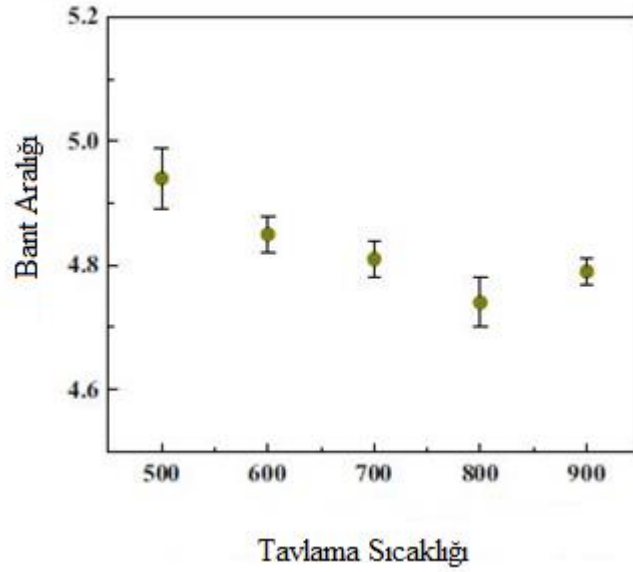
Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda tavlanmış ince filmlerin spektral geçirgenlik özellikleri ve ince filmlerin bant aralığını belirlemek için absorpsiyon verileri (Nanthakishore Makeswaran 2019)

Doğrudan bant aralığı olan β -Ga₂O₃ için güç yasasını izler;

$$(\alpha h\nu) = B \quad (2)$$

Burada $h\nu$ gelen fotonun enerjisi, α soğurma katsayısı, B soğurma kenar genişliği ve E_g kenar genişliğidir. Biriktirilen ve tavlanan galyum oksit ince filmlerden elde edilen absorpsiyon verileri Şekil 6'nın iç kısmında verilmiş ve yüksek emilim bölgesi içinde doğrusal bir grafik ortaya çıkmıştır. Regresyon analizi ve grafiğin doğrusal bölgesinde $h\nu = 0$ 'da bant aralığı değerini sağlar (Nanthakishore Makeswaran 2019).

Şekil 7'de ise sıcaklığın bir fonksiyonu olarak E_g varyasyonu gösterilmiştir. Galyum oksit' in bant aralığı 4.9 eV' dur. Fakat bu grafikten de belirtildiği üzere tavlama sıcaklığı arttıkça bant aralığı değeri azalmaktadır. Tavllanmış ince filmlerin E_g değeri 4.94-4.78 eV aralığında değişir. 800°C'de tavlama için en düşük 4.74 eV değerine 900°C'de ise 4.78 eV değerine yükseldi. Bu sıcaklıklardaki tavlamalar daha iyi kristal ve daha pürüzsüz bir yüzeye sahip amorf-kristalli bir yapı göstermiştir.



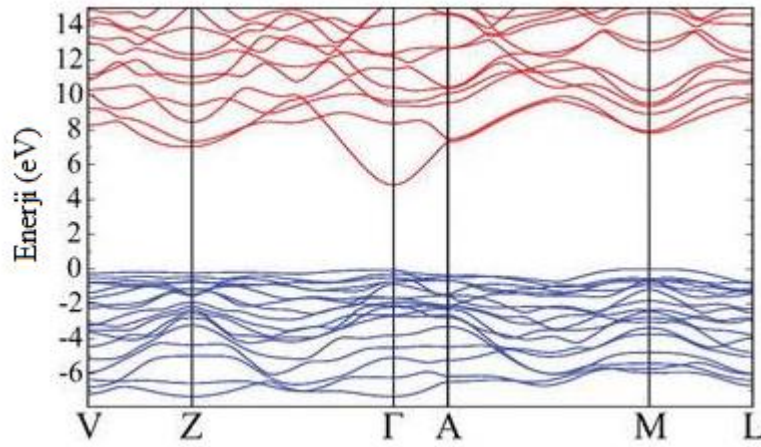
Şekil 7. Tavlama sıcaklığı olan ince filmlerin bant aralığı varyasyonu

Bu çalışma gösteriyor ki, tavlama sıcaklığının artırılması yapısal kaliteyi ve paketleme yoğunluğunu kademeli bir şekilde iyileştirdiği görülmüş ve 900°C'de tavlandığında en iyi optik şeffaflık ve bant aralığı elde edilmektedir (Nanthakishore Makeswaran 2019).

Başka bir çalışmada ise; galyum oksit' in soğurma spektrumları 255-260 nm civarında olmakla beraber 270 nm' de hafif soğurma kenarlarını göstermiştir. 260 nm' deki bant, intrinsik bant-bant geçişinden kaynaklanırken, 270 nm' deki bant ise iletim bandındaki Ga³⁺ boşluğundan kaynaklanır. Soğurma aralığı (225-260 nm) değerlik bandından iletim bandına geçişten elde edilir. Galyum oksit' in soğurmasını, gelen ışığın polarizasyonundan etkilenir.

260 ve 270 nm’ deki soğurma kenarı arasındaki fark ise değerlik bandından geçişte kullanılarak elde edilmektedir (By Badriyah Alhalaili 2017).

By Badriyah Alhalaili ve arkadaşları tarafından Galyum oksit’ in bant yapısını hesaplamak için yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) kullanılmış ve aşağıdaki Şekil 8’de verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi Γ noktasında tespit edilen 4.87 eV’ nin doğrudan bant aralığından çok az olan M noktasında bulunan değerlik bandı maksimum değeri (VBM) olan 4.83 eV dolaylı bir bant aralığına sahiptir. Yapılan çalışmalarda β -Ga₂O₃’in dolaylı bir bant aralığına sahip olduğunu gösterdi, fakat dolaylı geçişlerin zayıf olduğu ve boşluklar arasındaki küçük enerji farkından dolayı doğrudan bant aralığı malzemesidir. Pik Emilimi 4.9 eV’ da meydana gelir (By Badriyah Alhalaili 2017).



Şekil 8. β -Ga₂O₃ elektronik bant yapısı (Amerikan Fizik Enstitüsü 2010)

Galyum oksit; UV (3.2-3.6 eV), mavi (2.8-3.0 eV), yeşil (2.4 eV) ve kırmızı olmak üzere dört emisyon üretebilir. Geniş bant aralığı nedeniyle, kızılötesinden UV’ ye farklı emisyonlarına neden olan bir dizi kusur durumu mevcuttur, çünkü geniş bant aralığı kendinden kaynaklanan hata durumuna sahiptir. Ga₂O₃’ in bant aralığının 4.8 eV olduğu bilinmektedir. Bu durumda bandın kenarından başlayan UV emisyonu serbest elektronlardan ve kendinden sıkışan boşlukların rekombinasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna ek olarak mavi ışıltama bir elektronun oksijen boşluklarının oluşturduğu bir kusur verici durumunda yeniden birleşmesi ve galyum boşluğu veya galyum-oksijen boşluk çiftinin oluşturduğu bir alıcı durumundaki boşluktan kaynaklanmaktadır. Yeşil emisyon Be, Ge, Sn, Zr, Li ve Si gibi safsızlıklar katıldığında elde edilebilir. Yeşil ışıltamanın kendi kendine hapsolmuş veya bağlı eksitonlarla ilişkili olduğu ileri sürülmüştür. Saf ve Si katkılı β -Ga₂O₃ tek kristallerinin uyarılması ve fotolüminesansı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, katkısız numunelerin spektrum karakteristiklerinin uyarma ve emisyon dalga boylarından bağımsız olduğunu göstermiştir. Si-katkılı numunenin uyarma ve emisyon dalga boyları ile

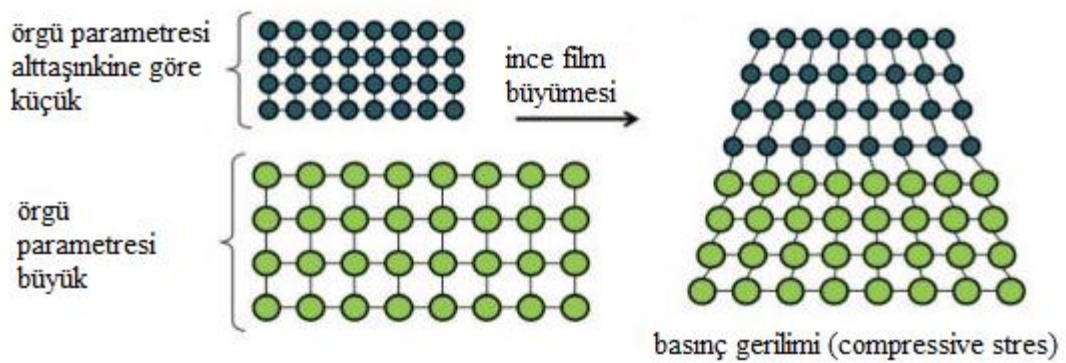
yüksek oranda ilişkili olan mavi bir emisyon ürettiği görülmüştür. Azot katkısının da kırmızı emisyonu neden olduğu gözlemlenmiştir (By Badriyah Alhalaili 2017).

İnce Filmlerde Kalıcı Gerilime Sebep Olan Faktörler

İnce filmlerde kalıcı gerilimin kontrol edilmesi optoelektronik aygıt uygulamaları için oldukça önemlidir. Bu gerilim aygıtta çatlama ve tabaka kalınlığının sınırlandırılması (Mizushima et al. 2006) gibi problemlere yol açmaktadır. Basınç gerilimi ise, katmanlara ayrılma, kabarcıklaşma ve burkulma problemlerine (Moon et al. 2002) yol açmaktadır. Bu problemler de aygıtta kısa devre oluşumuna (Chason et al. 2013) neden olmaktadır. Aşağıda ince filmlerde kalıcı gerilime neden olan durumlar incelenmiştir.

a. Örgü uyumsuzluğu kaynaklı gerilim

Üzerine büyütülen alt taşın örgü sabitleri ile filmin örgü sabitleri arasındaki fark nedeniyle oluşan gerilimdir. Bu durumda büyütülen filmin kalıcı gerilimini etkileyen faktörlerden birisidir. Şekil 9'da basınç gerilimi gösterilmektedir.



Şekil 9. İnce filmlerdeki basınç gerilimi gösterimi (Sneed et al. 2015)

Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, malzemenin örgü sabiti alt taşın örgü sabitinden küçük olduğu durumda, küçük örgü sabiti kendini diğerinin örgüsünü benzetmek için içeriye doğru bir gerilim oluşturacaktır. Bu gerilime basınç gerilimi (compressive stress) denilmektedir. Buna ek olarak, büyütülen malzemenin örgü parametresi alt taş malzemesinin örgü parametresinden daha büyük örgü sabitine sahip ise bu durumda da alt taşın örgüsünü dışarıya doğru çekmeye çalışacaktır. Bu durumda çekme gerilimini (tensile stress) meydana getirecektir.

b. Termal kaynaklı gerilim

İnce film büyütülürken altlık ve film sıcaklığa maruz kaldığında termal genişleme katsayıları oranında bir genişleme olayı gerçekleşmektedir. Bu olayda ince filmde gerilim oluşmasına neden olmaktadır. RF saçırma yönteminde ince film büyütülürken alt taş belli bir

sıcaklıktadır ve bu şekilde büyütme işlemi yapılmaktadır. Bu durum da ince filmin kalıcı gerilimini etkileyen faktörlerden birisidir.

c. Tane sınırlarının birleşmesinden dolayı gerilme oluşumu

Filmler küçük kristallerden oluşmakta ve bu tanecikler birleştiğinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu tanecikler büyüdükçe birleşir ve aralarındaki boşluk azalır. Tanecikler gelişmeye başlamaktadır ve tanecikler arasındaki etkileşimler elastik deformasyon boşluklarını dolduracak kadar kuvvetli olduğu noktaya kadar etkileşirler. Bu durumun sonunda taneciklerin birleşme sınırında çekme (tensile stress) ortaya çıkmaktadır.

d. Yüzey etkilerinden kaynaklı gerilim

Malzemenin biten kenarında meydana gelen ve filmi dengede tutmaya çalışan bir gerilim durumudur.

e. Büyüme aşamasından kaynaklanan gerilim

İnce filmler de büyüme sırasında sıklıkla görülen bir gerilim türüdür. Termal genleşme veya örgü uyumsuzluğuna bağlı olmayıp, büyüme gerilimi olarak adlandırılmaktadır. İnce filmlerin dengede olmadığı zaman büyüme gerilimi ortaya çıkar.

f. Fazla boşluk yok oluşundan kaynaklanan gerilim

İnce film düşük sıcaklıkta büyütülüyorsa yüzey yayılımı az olmaktadır ve boşluk yoğunluğunun denge değerinden büyük olması beklenmektedir. Fazla boşluklar yok olduğu zaman hacim değişikliği filmde bir gerilemeye neden olmaktadır. Bu gerilimin değeri, boşluk bölge özelliklerine (film-atlık arası bölge, tanecik sınırları, kenar çıkıkları), boşlukların hacmine bağlı olmaktadır.

g. Safsızlık etkisinden kaynaklı gerilim

Yapılan çalışmalarda kirliliklerin gerilime etkisi net bir şekilde anlaşılmamıştır (Doerner and Nix 1988). Genellikle ince filmler de oksijen gerilim üzerinde çok fazla etkiye sahip olduğu ve çekme gerilimini azaltmaya meyilli olduğu değerlendirilmiştir. Saçtırma metodu ile büyütülen ince filmlerde kalıcı gerilime etkileri olduğu literatürdeki çalışmalarda belirtilmektedir (Thornton and Hoffman 1989).

İnce Film Büyütme Teknikleri

İnce filmler yarıiletken teknolojisinin gelişmesinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Nano bilim ve nano teknolojinin gelişmesiyle yüksek hareketliliğe sahip transistör ve çoklu kuantum kuyulu güneş pilleri gibi yüksek teknolojik aygıt üretiminde kullanılmaktadır. İnce

filmler sayesinde malzeme maliyetinin azalması ve yüksek verimlilik elde etme olanağı nedeniyle Ar-Ge faaliyetleri daha çok artmıştır. İnce filmin özelliği bir alt taş üzerine atom veya moleküllerin atomik boyutlarda ince bir tabaka olarak çeşitli tekniklerle yerleştirilmesidir. Atomik boyutlara inilmesi nedeniyle kuantum mekanik kuramlarıyla malzemenin farklı fiziksel özellikleri açıklanmaktadır. İnce filmler büyütülürken çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Her tekniğin avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Genel olarak ince film büyütme teknikleri ile ilgili birçok sınıflandırma mevcuttur. Depolanacak malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre incelenirse; buhar, katı ve sıvı fazda büyütme olarak üçe ayrılmaktadır.

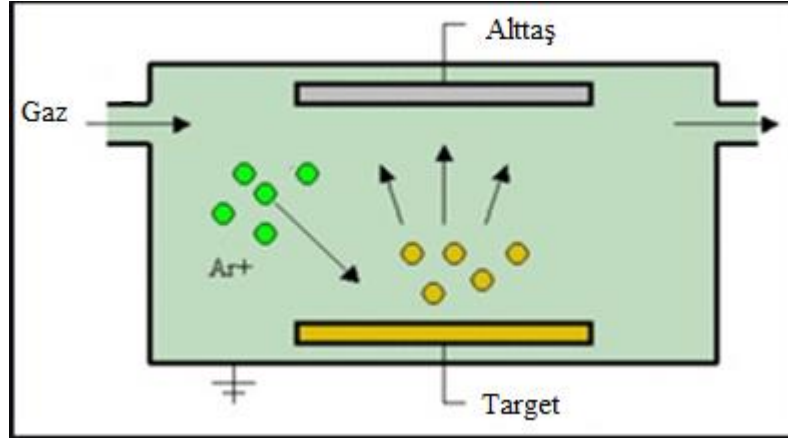
Tablo 3. İnce film büyütme teknikleri

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

Bu tezde kullanılan yöntem, fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniğinin bir dalı olan radyo frekans (RF) magnetron saçtırma tekniğidir.

Radyo Frekans Magnetron Saçtırma Tekniği (RF-Sputter)

Tekniğin adı İngilizcede ‘sputtering’ kelimesinden gelmekte olup sıçratma anlamına gelmektedir. Saçtırma yüzeylerin erozyonu ve filmlerin çökertilmesi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Yarıiletken levhaları desenlemek, yüzeyleri temizlemek, mikro işlemek ve derinlik profillemesi için kullanılır. Saçtırma, genellikle bir yüzeyde elektriksel olarak hızlandırılabilen yüklü parçacıklar üreten plazmalar vasıtasıyla uygulanır. Sıçratma işlemi genel olarak Şekil 10’da gösterilmektedir. Yüklü parçacık katı maddenin yüzeyini veya yüzeye yakın atomları, bağları koparmak ve atomları yerinden sökmek için yeterli enerji ile etkiler. Bu işlem sırasında bir veya daha fazla atom katıdan çıkarsa, saçtırılmış atomlar olarak kabul edilir.



Şekil 10. Sıçırma cihazının çalışma şeması

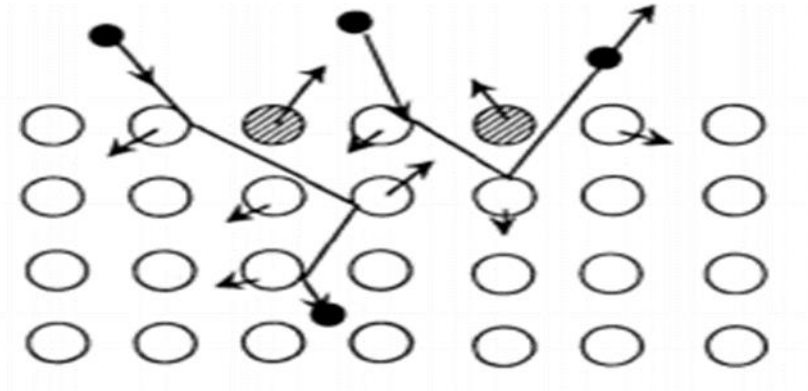
Bu teknikte altlık mevcut olup film bu alttaş üzerine büyütülmektedir. Sıçratmaya maruz olan malzemeye hedef denilmektedir. Enerjisi yüksek olan parçacıklar hedef yüzeyine bombardıman yaparak hedeften sıçratma meydana getirmektedir. Hedef malzemenin atom veya molekülleri buhar fazına geçer ve hedef ile altlık arasındaki bölgeye doğru hareket eder. Sıçratmayı sağlamak için kullanılan gaz, ağır asal gaz iyonlarıdır. Yaygın olarak kullanılan gaz Argon gazıdır. İlk olarak sistemin içerisi yaklaşık 10^{-6} torr başlangıç basıncına alınır. Bunun nedeni, kirliliğe sebep olabilecek oksijen ve diğer parçacıkların sistemden atılmasıdır. Daha sonra, sisteme çalışma gazı verilir. Burada gaz verildiğinden ortam basıncının 10^{-3} torr seviyesine gelmesi beklenir. Bir sonraki aşamada ise sisteme güç verilir ve çalışmada kullanılan güç radyo frekans gücüdür. Eğer oda sıcaklığı dışında sıcaklıkla büyütme yapılacak ise sıcaklık da istenilen seviyeye getirilir. Devamında ise sistemin içerisinin gözlemlenebildiği pencere yardımıyla plazma olup olmadığına bakılır. Plazma var ise bir sonraki aşamaya geçilir ancak plazma yok ise sistemde veya deney aşamalarında bir sorun var demektir. Eğer sistemde güç kaynağı dışında bir problem varsa hedef ile hedefin üzerine takılan ve plazmanın doğrultu boyunca gitmesini sağlayan mekanizma birbirine değebilir ve kısa devre oluşturur. Bu nedenle plazma oluşmaz. Kısa devre durumunda sistem kapatılır ve malzemeler zımpara ve metanol ile iyi bir şekilde temizlenmektedir. Plazmada artı ve eksi iyonlar, atomlar, moleküller, elektronlar ve birçok parçacık bulunmaktadır. Plazma oluştuktan sonra büyütmeden önce hedef bombardıman edilmelidir. Hedef yüzeyi üzerindeki kirliliklerin temizlenmesi yapılmaktadır. Sonra perde (shutter) adı verilen altlığın üzerini kapatan aparat açılır ve ince film büyütmesi yapılmaktadır.

Plazmadaki atomların altlığa doğru harekete geçmesi şu şekilde olmaktadır: Hedef malzemeye negatif voltaj uygulanır ve hedef pozitif iyonlarla bombardıman edilmektedir. Hedef malzeme sistemin katodu olur. Bu voltaj ile ivmelenen iyonlar hedefe vurarak hedef atomlarının sıçratılmasına neden olmaktadır. Kaplamak istediğimiz malzeme sıçratılan

malzemenin karşısında olduğundan dolayı sıçratılan malzeme altlık üzerine büyütülmektedir. Hedeften sıçratılan atomlar çalışma gazı molekülleriyle çarpışarak saçılırlar. Büyüme devam ederken pencereden plazma kontrol edilmelidir. Çünkü bazen plazma gidebilmektedir. Plazma gitmesi durumunda güç kaynağı kapatılmalıdır. Çünkü bazen plazma gidebilmektedir. Plazmanın gitmesi durumunda güç kaynağı kapatılmalıdır. Aksi halde hedef malzeme zarar görebilmektedir. Güç kapandıktan sonra çalışma gazı yeniden verilerek plazma tekrar oluşturulmaya çalışılmalıdır. Bu süre içerisinde altlık üzerindeki shutter kapatılıp plazma oluşunca tekrar açılmalıdır. Altlık, homojen büyümeyi sağlayabilmek için altındaki mekanizma sayesinde sürekli dönmektedir. Bu dönme hızını ayarlayarak istenilen şekilde büyüme yapılabilmektedir.

Sıçratma Mekanizması

Alttaş üzerine kaplanmasını istediğimiz malzeme, enerjili iyon bombardımanının hedefidir. İyon madde ile etkileşime girdiğinde yeterli enerjinin maddeye aktarılması ile hedef malzemenin atomları sıçratılabilir. Çarpışma durumunda momentum transferi olmaktadır. Çarpışma sonrası meydana gelebilecek durumlar Şekil 11’de gösterilmektedir.



Şekil 11. İyon madde etkileşimi ve sıçratma mekanizması (Keleşoğlu 2011)

Hedefe gelen düşük enerjili iyonların bir kısmı atomu sökmeden geldiği ortama geri dönebilirler. Yüzeyden saçılan iyonların büyük bir bölümü nötr hale geçerek geri dönmektedirler. İyonlar ise ortama yönelmektedirler. Daha yüksek enerjiye sahip olan iyonlar ise hedef yüzeyinde nötr hale geçtikten sonra ya hedef malzemenin daha iç kısımlarına sokulabilirler yada enerjileri bittiğinde, orada sıkışık halde kalabilirler. Hedef malzemeden atomları sıçratabilmesi için iyonların minimum 20 ile 30 eV arasında enerjiye sahip olmaları gerekmektedir. İyonlar hedef yüzeyini bombardıman ettiğinde, ortama sadece atomlar değil ikincil elektronlar da salınmaktadır. Katot da negatif gerilim olduğundan dolayı ikincil elektronlar katottan ivmelendirilerek ittirilmektedirler. İkincil elektronların ulaştıkları enerji

seviyesi ortamdaki gaz moleküllerini iyonlaştırabilmektedir. İkincil elektronların varlığı plazmanın kararlılığını sağlamaktır.

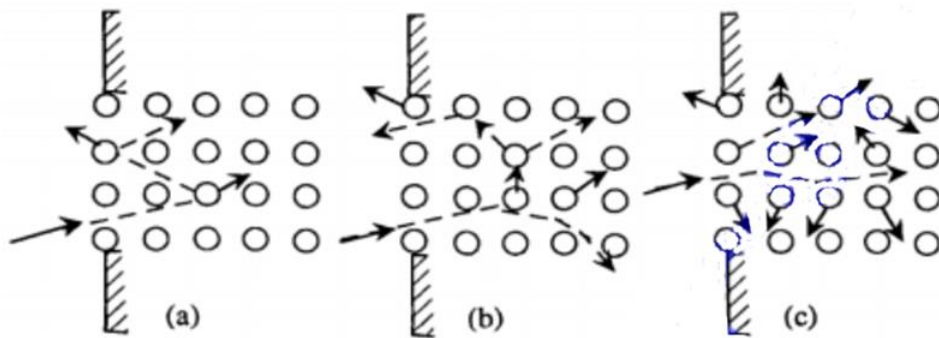
Sıçratma verimi

Sigmund, sıçratma verimini yaptığı bilimsel çalışmalar sonucunda sıçratma işlemi parametrelerine bağlı olarak ortaya koymuştur. Bu parametre de hedef atom kütlesi M_t , iyon kütlesi M_i ise olarak verilsin. Eğer M_i değeri M_t değerine yakınsa iyon hedef etkileşiminde yeterli momentum transferi oluşmaktadır.

Şekil 12. a) da iyonun ilk enerjisi atomlar arası bağı koparabilecek kadar yüksek ise hedef atomu yüzeyden koparabilmektedir. Bu durumda iyonun enerjisi ilk çarptığı atomu koparmaya yetebilecek kadardır ve zincirleme çarpışmalara olanak sağlayacak kadar yüksek değildir.

Şekil 12. b) de ilk çarpılan atom enerjisini zincirleme olarak diğer atomlara aktarabilmektedir. Bu atomlar yüzeye doğru itilerek bazıları yüzey enerjisini aşarsa yüzeyden ayrılarak ortama girerler. Zincirleme çarpışma olması için hedefe yönlendirilen iyon enerjilerinin keV ile MeV arasında olması gerekmektedir.

Şekil 12. c) de ise zincirleme çarpışmadan farklı olarak derinlere giden atom miktarının daha fazla olmasıdır. Bu mekanizmayı sağlamak için ağır ve çok atomlu iyonlarla bombardıman yapılmalıdır. Aniden durdurulan bu iyonların enerji aktarımı sadece derin yerde küçük bir hacimde meydana gelmektedir.



Şekil 12. İyon-atom çarpışması a) Tekli çarpışma (düşük enerjili) b) Doğrusal zincirleme çarpışma c) Dalıcı çarpışma (Keleşoğlu 2011)

Sigmund modeli özellikle zincirleme çarpışmayı ele almaktadır. Diğer mekanizmalara ise kısmi olarak uymaktadır. Modele göre, hedef üzerine dik bir iyon demeti ile elde edilen sıçratma verimi Y (iyon başına sıçratılan atom sayısı ile verilmektedir) aşağıdaki ifade ile verilmektedir:

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

Denklemden U eV cinsinden hedef atomları arasındaki bağ enerjisi, Z_i , Z_t sırasıyla iyon ve hedef atomunun atom numaralarıdır. Bu bağ enerjisi metal bir hedef malzeme için iyonlaşma enerjisine, moleküler bir malzeme için kovalent bağ enerjisine eşittir. Eşitlikteki α değeri ise M_t/M_i oranıyla bağlantılı birimsiz bir sabittir. $S_n(\varepsilon)$ ifadesi ise ε değerine bağlı üniversal bir fonksiyondur.

$$\varepsilon = \left(\frac{M_t}{M_i + M_t} \right) \left(\frac{a}{Z_i Z_t e^2} E \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{0.855 a_0}{(Z_i^{2/3} + Z_t^{2/3})^{1/2}} \quad a_0 = 0.529 \text{ Å} \quad (5)$$

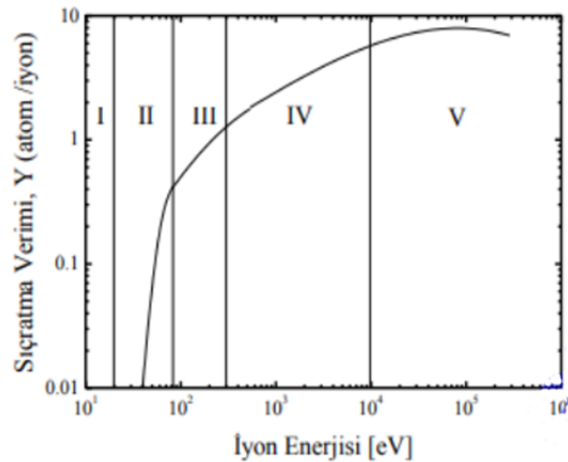
Eşitlikteki E , çarpan iyon enerjisi (eV), a hedef atomunun çekim alanı yarıçapı (cm) ve e , elektron yüküdür.

Sıçratma veriminin de deneysel olarak hesaplanabildiği belirtilmiştir (Keleşoğlu 2011).

$$Y = \frac{N_t}{N_i} = F \frac{\Delta W}{I t M_t} \quad (6)$$

Eşitlikte N_t sıçratılan atom sayısını ve N_i yüzeyi döven iyon sayısını belirtmektedir. I akım t , sıçratma süresi ΔW , hedefteki kütle azalması ve F ise Faraday sabitidir.

Deneysel modele göre, yüzeye çarpan iyon enerjisi arttıkça sıçratma verimi de artmaktadır. Sıçratma veriminden bahsedilirken iyon demetinin yüzeye dik geldiği varsayılmaktadır. Çünkü diğer durumda eşitliğe çarpma açısını da dahil etmek gerekmektedir. Deneysel model kullanılarak bakırın iyonlarıyla bombardımanın da iyon enerjisine bağlı sıçratma verimi aşağıdaki Şekil 13’de gösterilmiştir.

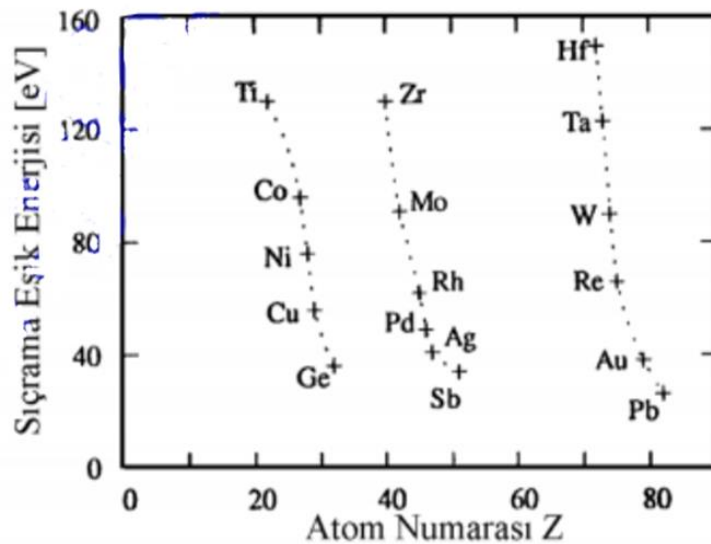


Şekil 13. Bakırın iyonlarıyla bombardımanında iyon enerjisine bağlı olarak sıçratma verimi (Keleşoğlu 2011)

Grafik beş farklı bölgeye ayrılarak yorumlanmıştır. 1. Bölgede iyonların enerjileri 20 eV den düşüktür ve bu enerji sıçratma işlemi için yetersiz olmaktadır. Bu bölgede sıçratma oluşumu gözlemlenmez ve iyon enerjisinin 20 eV a ulaşmasıyla ilk sıçratma meydana gelmektedir. Bu değere ‘Eşik enerjisi’ değeri denir. 2. Bölgede iyon enerjisi 20 ile 80 eV arasında değer almaktadır. Sıçratma veriminde iyon enerjisi ile doğrusal ve hızlı bir artış vardır. 3. Bölgede 80 ile 300 eV enerji aralığında doğrusal artış devam etmekte olup, 2. Bölgeye göre daha az olmaktadır. Bu bölgede sıçratma mevcut olduğundan metal kaplama daha mümkündür. 4. Bölgede artan iyon enerjisi ile dalıcı çarpışma gözlemlenmektedir. İyonlar derinliklere saplandığından dolayı sıçratma verimi düşmeye başlar. Son olarak 5. Bölge de ise ağırlıklı olarak dalıcı çarpışma hakimdir. İyonlar yüzeyde fazla çarpışmaya maruz kalmadan hedefin derinliklerine doğru indiklerinden dolayı sıçratma verimi düşmeye başlar.

Sıçratma işleminde Ar yerine H^+ veya He^+ gibi hafif iyonlar kullanılsaydı iyonların yüzeyden içeri dalması kolay olduğundan 5. Bölgede birkaç bin eV da daha düşük iyon enerjileri ortaya çıkar. Yani iyonlar hafifledikçe eğri sola doğru yönelmeye başlar ve verimi daha da düşürmektedir. Xe ve Hg gibi ağır iyonlar kullanıldığında ise 5. Bölgenin başlangıcı yaklaşık 50.000 eV değerine kadar yükselmektedir (Keleşoğlu 2011)

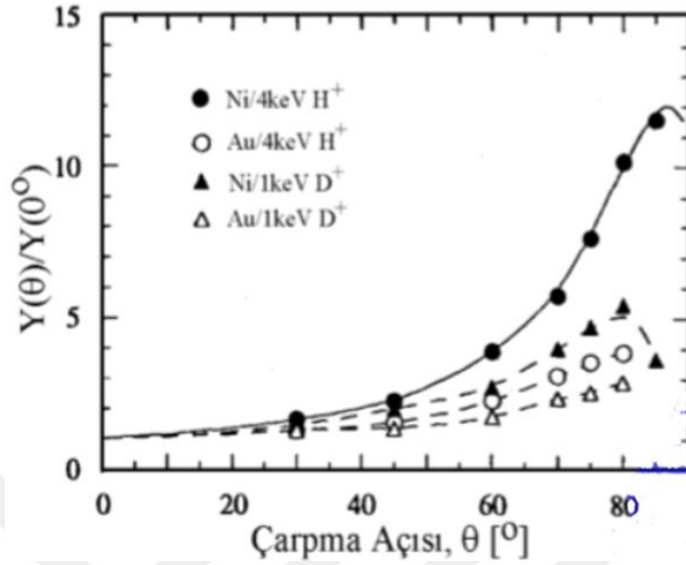
Karakteristik bölgelerin ortaya çıkış yerleri yalnızca iyon türüyle değil hedef malzemenin türü ile de ilgilidir. Bununla ilgili çalışma Şekil 14’de gösterilmektedir.



Şekil 14. Hg^+ iyonları ile bombardıman edilen farklı hedef malzemeleri için eşik iyon enerjileri (Keleşoğlu 2011)

Eşik sıçratma enerjisi 40-130 eV olan pek çok geçiş metalini göstermektedir. Geçiş metalllerinde artan atom numarası ile birlikte gerekli minimum enerji değeri düzenli olarak azaldığı gözlemlenmiştir.

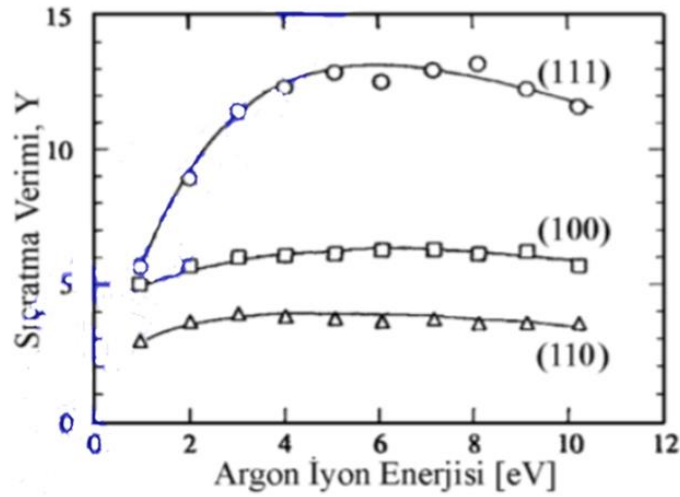
Sıçratma verimi için diğer önemli parametre ise çarpışma açısıdır. Hedef yüzeyine gelen iyonların belli açıda gelmesi ile sıçratma veriminde önemli değişimler gözlenmiştir. Şekil 15’de sıçratma veriminin çarpışma bağıllığı gösterilmektedir.



Şekil 15. Sıçratma veriminin çarpışma açısına bağıllığı (Ni ve Au hedef malzeme için) (Keleşoğlu 2011)

Yüzeye çarpan iyon hüzmesinin yüzeye dik olmayıp yüzeye belli bir açı ile çarpması durumunda sıçratma veriminde önemli değişimler olmaktadır. Şekilde açı arttıkça sıçratma veriminin arttığı gözlemlenirken, açı azaldıkça sıçratma veriminin azaldığı gözlemlenmektedir. 80° ve üzerindeki açılarda maksimum verime ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle hafif iyonlar kullanıldığında veya iyonları enerjisi arttıkça maksimum verimin alındığı açı 90°’ye yaklaşmaktadır (Keleşoğlu 2011).

Sıçratma veriminin etkilendiği diğer parametre ise hedef malzemesi tanelerinin iyon hüzmesine göre yerleşim düzlemleridir. Şekil 16’da kristal düzlemlerin sıçratma verimine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 16. Kristal düzlemlerinin sıçratması verimine etkisi (Ag hedef için) (Keleşoğlu 2011)

Şekil 16'da (111) kafes düzleminin sıçratma verimi diğer düzlemlere oranla daha yüksektir. Bunun nedeni ise düzlemin atom yoğunluğunun diğerlerine göre yüksek olması ve iyonların dalıcı çarpma oranlarının düşük olması ile açıklanmaktadır (GD Magnuson 1963). Düzlemsel atom yoğunluğu azaldıkça iyonların sıçratma olmadan kafes sistemi içerisine dalması kolay olmakta ve sıçratma verimi azalmaktadır.

X Işını Kırınımı (XRD)

Elektromanyetik ışınma, madde ile etkileşiminde hem dalga hem de parçacık özelliği göstermektedir. Işığın parçacık özelliği gösterdiğine en iyi kanıt Compton saçılması gösterilmektedir. Işığın dalga özelliği gösterdiğine ispat olarak girişim ve kırınım ile ilgili yapılan deneyler örnek verilebilmektedir. X ışınımı ölçümlerinin bilimsel temeli ise kırınım ve girişim olayıdır. Işığın dalga davranışına baktığımızda, ışık hareket ederken dar bir aralık ve ya engel ile karşılaştığında aralık ve ya engelin kenarına yakın bir yerden bükülmektedir ve ışık bu aralık ve ya engeli geçtiğinde her yöne yayılmaktadır. Bu olay kırınım olarak adlandırılmaktadır.

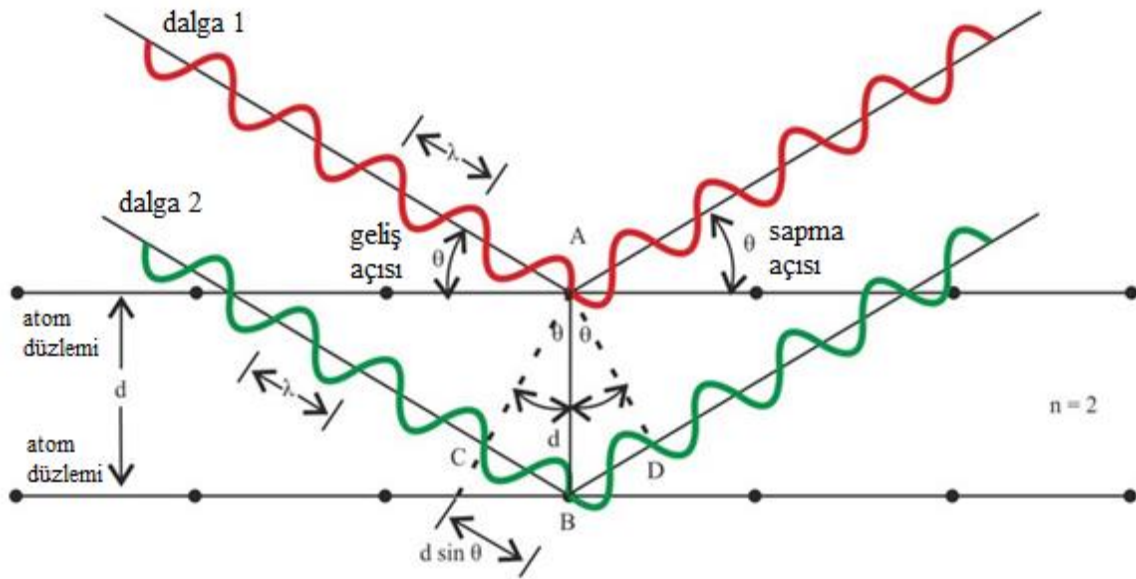
Girişim ise, bir ve ya daha fazla eş frekanslı dalgaların birbirleriyle etkileşimlerine dayanan bir durumdur. Bu durumda dalgalar birbirlerini destekleyecek konumda girişim oluştururlar ise, burada genlik artar ve yapıcı girişim oluşur. Eğer bu dalgalar birbirini yok edecek şekilde girişim oluştururlar ise, yıkıcı girişim oluşturmaktadır.

Eş frekanslı dalgaların girişimlerinin bir sonucu, kırınım olarak nitelendirilmektedir. Kırınım ve girişim elektromanyetik ışınma olan dalga özelliğinin bir sonucudur. Kırınım olayının oluşması için ışığın karşılaştığı yarığın boyutu ile dalga boyunun birbirine yakın değerler olmasıdır. Yarığın boyutu ne kadar küçük olursa kırınım etkileri de daha baskın olmaktadır. Bu durumda neden X ışını kullanılması gerektiğini göstermektedir. X ışını

dalga boyu yaklaşık $1\text{\AA}$ mertebesinde. X ışını malzemeye gönderdiğimizde, atomlar arası mesafe de angstrom mertebesinde olduğundan dolayı kırınım şartı sağlanmış olup, malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi elde edilmektedir.

Ünlü bilim adamı Laue, sürekli X ışını demetini bir kristal üzerine gönderdi ve kırınımına uğramasını sağladı. Kırınımına uğrayan ışımaların belirli doğrultularda yoğunlaştığını gözlemledi ve şöyle yorumladı: Kristalin tabakalarından kırınımına uğrayan X ışını dalgaları yapıcı girişim yaparak yoğun doğrultuları oluşturmuştur.

W. H. Bragg ise, bulduğu bağıntı sayesinde kristal düzlemler arasındaki uzaklık değeriyle kristale gönderilen X ışınının kırınım açısıyla arasındaki ilişkiyi keşfederek X ışını kırınımı ölçümleri sonucunda, kristalin yapısal parametreleri hakkında bilgi alınabileceğini göstermektedir. Bragg yasası, Young' un çift yarık deneyinin bir benzeridir. Kaynaktan paralel gelen X ışınları, kristal düzleme geldiğinde kırınımına uğrayarak yapıcı girişim oluşturmaktadır. Gelen X ışınının dalga boyuna λ diyelim. Kristal düzlem ile gelen X ışını arasındaki açı θ diyelim. Düzlemler arası mesafe de d , kırınım mertebesini de n olarak gösterelim. Bragg kırınımını gösteren Şekil 17'de gösterilmektedir.



Şekil 17. Bragg kırınımının temsili gösterimi

Grafığe göre CB ve BD uzaklıkları toplamına yol farkı denilmektedir. Yol farkı, gelen ışığın dalga boyunun tam katlarında yapıcı girişim olmaktadır. Bragg yasasının formülü;

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (7)$$

olarak belirtilmiştir. Kırınım mertebesinde $n = 1$ alındığında Bragg formülü şöyle olmaktadır.

$$2d_{hkl}\sin\theta = \lambda \quad (8)$$

Bu denklemde hkl miller indisleridir. Bir X ışını kristalin üzerine gönderildiğinde kırınım açısı ile ışının dalga boyu biliniyorsa kristalin düzlemleri arasındaki mesafe (d) bulunabilmektedir.

Soğurma ve yansıma spektroskopisi

Bir foton madde ile etkileştiğinde soğurma, yayılım ve yansıma olayları gerçekleşmektedir. Kuantum modeli, atomların yörüngelerinin belirli enerjilerde bulunabileceğinin ve bu yörüngeler arası geçişlerde atomik spektrumlar kavramlarını ortaya koymaktadır. Elektromanyetik ışın, madde ile etkileşerek malzeme atomları tarafından soğrulduğu zaman enerji düzeyleri uyarılmış olmaktadır. Bu olaya soğurma olayı denilmektedir. Uyarılmış enerji düzeyinden bir alt enerji düzeyine geçişlerde bir foton yayınlanmaktadır. Bu olaya ise yayılım denilmektedir.

Lambert yasasına göre, fotonun soğurucu bir ortama girdiğinde fotonun şiddetinin malzeme kalınlığının artışı ile azalacağı söylenilmektedir. UV/Vis soğurma spektroskopisi geçen ışık şiddetini ölçer ve gönderdiği ışık şiddeti de belli olduğundan dolayı aradaki farklı ölçerek soğurma şiddetini ölçmektedir. Spektrometre, soğrulan ışımaların şiddetini farklı dalga boyları için analiz ederek, dalga boyuna karşılık soğurma grafiğini çizmektedir. Mor ötesi-görünür bölge soğurma spektroskopisinin çalışma mekanizması şöyledir;

Işık kaynağı malzemeye gönderildiğinde, dalga boyu seçiciden geçmekte ve dalga boyu bilinmektedir. Numuneye gelen ışık soğurucu malzeme ile etkileşime girerek bir kısmını soğurur ve diğer kısmı ise malzemeden geçmektedir. Dedektör numuneden geçen ışık şiddetini saymaktadır. Referans numunede ölçülecek olan numunenin yanına konulup ikisi birlikte ölçüm yapılmaktadır. Bu durumda kalibrasyon da yapılmaktadır. Elde edilen veriler bilgisayara kaydedilmekte ve bilgisayar içerisindeki program sayesinde geçirgenliğe karşılık dalga boyu, soğurmaya karşılık dalga boyu grafikleri çizilmektedir.

Yansıma ölçümleri de mor ötesi-görünür bölge soğurma spektrometresi yardımıyla ölçülebilmektedir. Burada ışık malzeme ile etkileşiminde kısmen de olsa yansımaya maruz kalmaktadır. Gelen ve yansıyan ışık oranları verilmekte olup yansıyan ışık dedektör yardımıyla toplanmaktadır. Referans numune de ölçülerek veriler bilgisayara gönderilir ve program sayesinde yüzdelik yansıma oranına karşılık dalga boyu grafiği çizilmektedir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Elektron mikroskoplarının bir çeşidi olan taramalı elektron mikroskobu (SEM)'in çalışma prensibi şu şekilde verilebilmektedir; tungsten katottan elektronlar, termoiyonik alan

yoluyla salınmakta ve bu elektronlar dar bir demet şeklinde merceklere odaklanmaktadır. Bobinler yardımıyla elektron demeti numunenin yüzeyine çarpmaktadır. Bu elektronlara birincil elektron denilmektedir. Bu kısımda elektron ve numune etkileşiminde birçok fiziksel olay meydana gelmektedir. Bunlardan birisi şudur: birincil elektronlar malzeme atomlarıyla ve onların elektro statik alanlarıyla etkileşime girmekte olup yörüngedeki elektronlarla çarpışma gerçekleştirebilmektedir. Bu çarpışmada yalnızca yön değiştirme söz konusu olduğundan elektronun hızı değişmediğinden dolayı elektronun enerjisi de değişmemektedir. Bu elektronların bazıları malzeme yüzeyinden tekrar çıkabilmektedir ve bunların enerjileri, demetteki elektronların enerjilerine yakın olmaktadır. Bu elektronlara geri saçılan elektronlar denilmektedir. Bu kısımda malzemeye bakan dedektör ile geri saçılan elektronlar kaydedilmektedir. Kaydedilen bu veriler foto çoğaltıcı yükseltece gitmektedir. Geri saçılan elektronlardan alınan sinyaller, malzemenin atom numarasına bağlı olduğundan dolayı malzemedeki farklı elementler hakkında bilgi alınmaktadır. Elektron numune etkileşiminin bir diğer fiziksel olayı ise ikincil elektronlar olmaktadır. Gönderilen elektronlar, numunedeki atomun yörünge elektronları ile çarpışarak kendi atomlarından kopmaktadırlar. Bu elektronlara ikincil elektronlar denilmektedir. Bu elektronlar, dedektörde algılanarak, sinyalleri foto çoğaltıcı yükseltece göndermektedir. Alınan sinyaller bilgisayarda resimlere dönüşmekte olup bu resimler malzemenin yüzey morfolojisi hakkında bilgi sunmaktadır. Buna ek olarak, katmanlı malzemelerin kalınlıkları hakkında kesit görüntüsü alınarak bilgi verilebilmektedir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Yüzey morfolojisi hakkında bir başka bilgi kaynağı da atomik kuvvet mikroskobu (AFM)' dur. Çalışma prensibi elektronların kuantum tünelleme esasına dayanmaktadır. Klasik fizik kurallarına göre, enerjisi bariyer enerjisinden küçük olan bir parçacık bariyer içerisinden geçemez. Bariyer in içi yasaklanmış bölgedir. Fakat kuantum fiziğine göre serbest bir parçacığın dalga fonksiyonu sürekli olmalı ve eksponansiyel olarak bariyer içerisinde azalmalı ve yine bariyerin diğer tarafında da sürekli olmalıdır. Bu durumda parçacığın bariyer içerisinden sonlu bir tünelleme ihtimali olduğunu göstermiştir. Tip ile piezo sürücüye akım uygulanarak görüntüleme yapılmaktadır. Cantilever üzerine lazer ışını düşürülmektedir. Yansıyan ışın demeti iki ve ya dört segmentli fotodedektör üzerine düşmektedir. Lazer ışınının aşağı ve yukarı hareketi ile dikey kuvvetleri, sağa ve sola hareketi ile yatay kuvvetleri ölçmektedir. Görüntü kalitesini en çok etkileyen faktör tip kalitesi olmakta ve en iyi tip sivri uçlu olmalı ve uç çapı 5 nm' den küçük olmalıdır. Tip ile yüzey arasındaki etkileşimlerden dolayı birkaç modda çalışma yapılmaktadır.

MATERYAL ve YÖNTEMLER

Materyal Özellikleri

Araştırmada üzerine ince film büyütmek için çeşitli alttaşlar kullanılmıştır. Bunlar, p-tipi silisyum, indiyum kalay oksit (ITO) ve cam olmaktadır. Kullanılan alttaş özelliklerine değinecek olunursa; cam olarak, dikdörtgen şeklinde olan soda kireç camı (soda lime glass) kullanılmıştır. Amerikan ulusal standart bürosunun (National Bureau of Standards) verdiği 620 numaralı sertifikaya göre, cam malzemesinin içerisinde ağırlıkça % 72.08 silisyum dioksit (SiO_2), % 14.39 sodyum oksit (Na_2O) ve çok az yüzdelikte diğer maddelerden bulunmaktadır.

Araştırmada kullanılan hedef galyum oksit hedeftir.

Büyütmelere başlamadan önce ilk olarak tüm alt taşlar, istenilen boyutlarda DAYTAM laboratuvarındaki hassas dilimleme (DİCER) cihazı vasıtasıyla kesildi. Sonrasında malzemelere temizleme işlemi uygulandı. Alttaşlar temiz odada (ISO 7 sınıfı) malzeme özelliğine göre farklı temizleme işlemlerinden geçirildi. p-tipi silisyum alt taşlar RCA adı ile verilen temizleme işleminden geçirildi. RCA-1 ve RCA-2 olarak iki aşamada oluşmaktadır. Organik kalıntıları silisyum yüzeyinden sökmek için RCA-1 kullanılmaktadır. Burada amaç ise silisyum üzerine doğal olarak oluşan ince oksit tabakayı kaldırmaktır. RCA-2 ise daha ileri kirlilikleri temizlemek için kullanılmaktadır.

- İlk olarak behere aseton konuldu ultrasonik titreşimde 10 dakika silisyumlar bekletildi.
- Sonra metanol konulup yine ultrasonik titreşimde 10 dakika bekletildi.
- Daha sonra da de iyonize su (DI) konulup ultrasonik titreşimde 5 dakika bekletildi. Sonra da RCA temizleme işlemlerine geçildi.

RCA 1’de izlenilecek yollar:

- De iyonize su (DI), amonyum hidroksit (NH_4OH), hidrojen peroksit (H_2O_2) sırasıyla 325 ml, 65 ml ve 65 ml miktarında (5:1:1 oranında) kullanıldı.
- Solüsyonu 60°C’ye kadar ısıtıldı.
- Baloncuklar çıkmaya başladığında silisyumlar bu solüsyonun içerisine atıldı ve 10 dakika bekletildi.

- Sonra silisyumlar DI suyla yıkandı.
- % 10'luk hidroflorik asit (HF) çözeltisinde 30 saniye bekletildi.
- Azot gazıyla kurutuldu ve RCA-2'den sonra deneye hazır hale getirildi.

RCA 2'de sırasıyla izlenen yollar:

- De iyonize su (DI), hidrojen klorür (HCl), hidrojen peroksit (H₂O₂) sırasıyla 300 ml, 50 ml ve 50 ml miktarında (6:1:1 oranında) kullanıldı.
- Solüsyonu 60°C'ye kadar ısıtıldı.
- Baloncuklar çıkmaya başladığında silisyumlar bu solüsyonun içine atıldı ve 10 dakika bekletildi.
- DI suyla yıkandı.
- % 10'luk hidroflorik asit (HF) çözeltisinde 30 saniye bekletildi.
- DI su ile yıkandı tekrar DI su ile 10 dakika ultrasonik titreşimde bekletildi.
- Tekrar DI su ile yıkandı, azot gazıyla kurutuldu ve numuneler büyütme için hazır hale getirilmiştir.

Bu temizleme işlemi süresince çeşitli güvenlik önlemlerine uyulması gerekmektedir. Bunlar, göz koruması ve asit malzemeleri için özel eldivenler kullanılmalıdır. Bu aşamalar, çeker ocakta eldiven ve gözlük giyilerek temiz odada yapıldı. Bu arada en önemli kısım hidrojen peroksit malzemesidir. Patlayıcı bir kimyasaldır ve bu nedenle malzeme devamlı ısıya maruz bir şekilde tutulmamalıdır. Göz ve deri ile hidrojen peroksit etkileşime girerse, suyla 15 dakika boyunca yıkanmalı ve acilen uzman doktora gidilmelidir.

Cam alt taşlar için aşağıda verilen prosedürler uygulandı.

- İstenilen boyutta kesilen camlar sıvı sabun ile ovalayarak yıkandı.
- Normal suda yıkandı.
- DI su içerisinde konularak ultrasonik titreşimde 15 dakika boyunca bekletildi.
- Sonra suyu döküp yeniden DI su ile yıkandı tekrar DI su koyup ultrasonik titreşimde 15 dakika boyunca bekletildi.
- Daha sonra tekrar DI su ile yıkandı.
- Hidrojen peroksit (H₂O₂) ve sülfürik asit (H₂SO₄) solüsyonunu sırasıyla 65 ml ve 325 ml miktarında (1:5 oranında) kullanıldı.
- Camlar bu solüsyon içerisinde bir gün bekletildi.
- İki defa DI su ile yıkandı.
- DI su koyup ultrasonik titreşimde 15 dakika bekletildi. Bu işlem iki defa tekrar edildi.
- Sonra DI su ile yıkandı ve DI su içerisinde bekletildi.

- Büyütme yapılacağı zaman DI sudan sonra izopropanol dan geçirilerek azot gazı ile kurutuldu.

İndiyum kalay oksit (ITO) için de aşağıda verilen işlemler uygulandı.

- DI su da ultrasonik titreşimde 10 dakika boyunca bekletildi.
- Asetonla ultrasonik titreşimde 10 dakika bekletildi.
- Daha sonra izopropanol ve ya etanol ile ultrasonik titreşimde 10 dakika bekletildi.
- Tekrar DI su ile ultrasonik titreşimde 5 dakika boyunca bekletildi. Bu işlem iki kez yapıldı.
- Azot gazı ile kurutuldu ve film büyötmeye hazır hale getirildi.

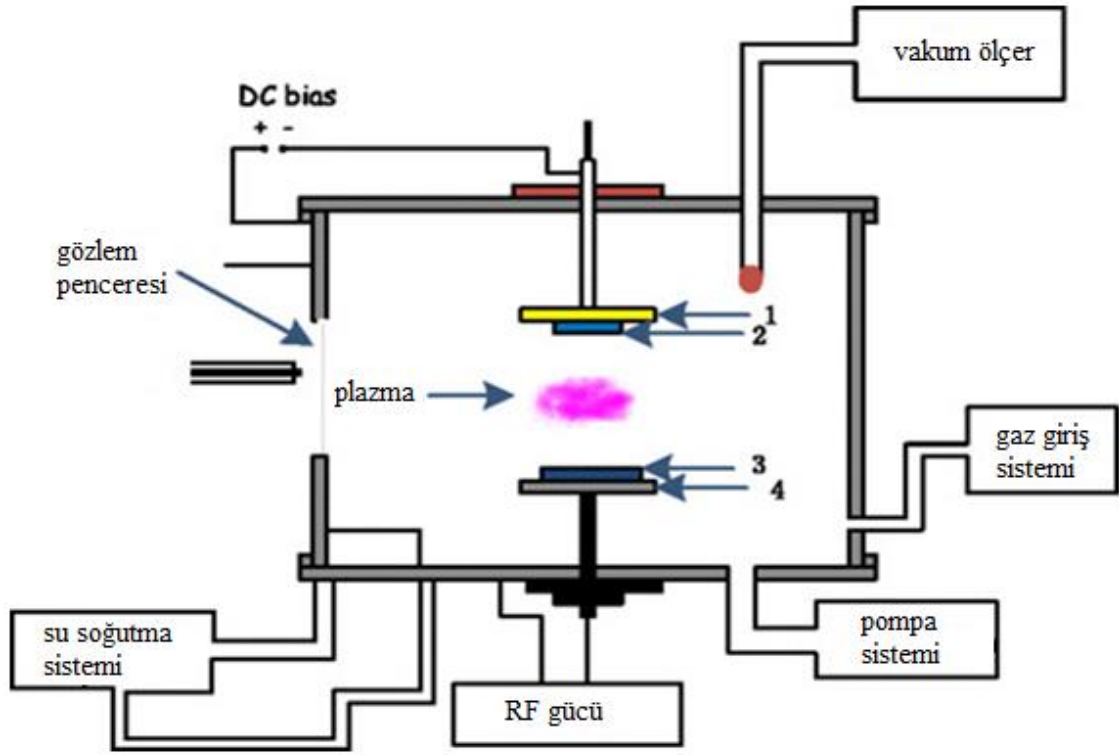
İndiyum kalay oksit (ITO)'ler DI suda bekletilmemeli çünkü yüzeyinde yeni bir film oluşabilmektedir.

Büyötmeye Kullanılan RF Magnetron Saçtırma Sistemi

Araştırmada kullanılan sistem VAKSİS mühendislik şirketinden satın alınan PVD-MİDAS 3M (Sistem numarası: VK-160-2) markalı saçtırma sistemidir. Deneysel çalışmalar, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde temiz odada (ISO 7 sınıf) aşağıda verilen sistemle yapılmıştır:

- En Düşük Basınç $\leq 5 \times 10^{-8}$ Torr,
- Alt taş Boyutu 10,16 – 20,32 Çap,
- Alt taş Isıtma Maksimum,
- Alt taş Döndürme 3 – 30 rpm (Dakikadaki tur sayısı),
- Kontrol Tam Otomatik
- Gerektiğinde Soğutma Sistemi,
- 2 Adet RF güç kaynağı ve 1 adet DC güç kaynağı toplamda 3 adet hedef malzeme koyma imkanı mevcuttur.

Kaplama yukarı yönlüdür. İstenilen açıda büyötmeye yapılabilir. Şekil 18'de radyo frekans magnetron saçtırma (RF Sputter) sisteminin şematik şekli gösterilmektedir.



Şekil 18. Radyo Frekans Magnetron Saçtım sisteminin şematik gösterimi 1) Alt taş zemini, 2) Alt taş malzeme, 3) Target, 4) RF gücü

RF magnetron saçtırma yönteminde büyüme plazma ortamında gerçekleştirilmektedir. İlk olarak plazmanın oluşturulması gerekmektedir. Magnetler materyali iyonize ederek malzemenin plazma formuna geçmesini sağlarlar. İstenilen malzeme alt taş üzerine yönlendirilerek orada yoğunlaşması sağlanır ve ince film oluşturulur.

Kullandığımız sistem, çeşitli mekanik parçalardan oluşmaktadır. Bunlarda bahsedecek olursak, ilk olarak sistemin içerisine direkt bağlı vakum sistemi mevcuttur. Sistemde temel olarak iki pompa vardır. Biri mekanik pompa diğeri ise turbo moleküler pompadır. Ayrıca sıvı azotun takıldığı bir aparatta mevcuttur. Sıvı azot çok düşük basınçlarda hızlı düşmesi için kullanılmaktadır. Çalışmamızda sıvı azot kullanılmadı.

Sistemin kontrolü tamamen otomatiktir. Sistemin yanında bir bilgisayar monitörün içerisinde grafik ara yüzü yüklüdür. Grafiksel kontrolde büyüme anında tüm sistemin şekli görülebilir ve değerlere anında müdahale edilebilmektedir. Bu sistemde, vakuma al komutuna basıldığında ilk olarak mekanik pompa devreye girmektedir. Mekanik pompanın basınç değeri yaklaşık 10^{-3} Torr olduğunda devreden çıkmaktadır. Daha düşük seviyedeki basınçlara ulaşmak için turbo moleküler pompa devreye girmektedir. Turbo moleküler pompa yavaş yavaş hızı artarak, tam kapasite çalışma hızı olan % 100'e yaklaşık 5-10 dakika arasında ulaşabilmektedir. Vakuma almaya başlanıldığında itibaren 2,5 saat sonra yaklaşık 10^{-6} Torr değerine gelmektedir.

Normal şartlarda büyötmeye başlamak için bu basınç değeri yeterlidir ancak sistemin içerisinde daha temiz olması isteniyorsa biraz daha beklenebilir. Bu sayede basınç 10^{-7} Torr değeriine gelmektedir. Sistemin vakuma alma işlemi bittiğinde içeriye çalışma gazı verilmektedir. Çalışma gazları argon (Ar), oksijen (O) ve azot (N) olmak üzere üç tanedir ve sisteme bağlıdır. Bu borulara akan gaz miktarını ölçen sistemler takılıdır ve anlık olarak otomasyonda sccm (dakikadaki santimetreküpten akan akış) değeri olarak gösterilmektedir. Bu değerin değişimini anlık olarak görmek mümkündür.

Cihaz, radyo frekans güç kaynağı ile çalışıyor olup silindirik bir mekanizmaya bağlıdır. Mekanizmada bulunan boşluğa hedef malzeme konulmaktadır ve üzerine yanlarda vidaları olan ortası yuvarlak boşluk olan plazma yönlendirici aparatı mekanik olarak yerleştirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken durum bu aparatın alttaki iletken mekanizma ile kontak yapmamasıdır. Bu kısımlar multimetre ile kontrol edilir. Akım kaçığı durumunda plazma yönlendirici ile alt aparatı, aseton ile temizlenmelidir.

Plazma yönlendiricinin işlevi ise plazmayı bir alana yoğunlaştırıp, plazmanın doğultu şeklinde alttaş üzerine homojen olarak gitmesini sağlamaktır. Alt taşların konulduğu tablonun üzerinde alt taş tutucu vardır ve bu aparat 3 – 30 rpm (dakikadaki tur sayısı) arasında dönmektedir. Büyüme koşulları sağlandığında alt taş tutucu döndürme açılır ve istenilen döndürme hızı ile döndürölmektedir. Plazma yönlendiricinin sağ üst köşesinde kalınlık sensörü mevcuttur ve bu sensör altın ile kaplanmışır. Bu sensörün kalınlığı doğru ölçtüğünden emin olmak için şöyle bir yol izlendi:

Kaplanan numunenin KLA Tensör Profilometre (P-7) ile ölçümü yapıldı. Değerler karşılaştırılarak sensör otomasyon ayarı yaparak kalibrasyon yapıldı. Bu sayede, kaç nanometre büyötmek istiyorsak sensörün anlık ölçüm yapmasıyla istenilen kalınlığa ulaşıldığında perde sayesinde büyüme durdurulmaktadır. Kalınlık sensörünün bir ömrü vardır ve ömrü bittiğinde içerisindeki malzeme çıkarılıp yeni malzeme konulmaktadır. Bunun dışında, sistemin içerisinde ve alttaşın altında ve plazma yönlendiricinin üzerinde konumlanabilen perde (shutter) adında metal levha bulunmaktadır. Bu levhalar sistemde istenilen her an için kapalı pozisyona gelebilmektedir. Alttaşı plazmadan koruyarak büyümei önleyebilmektedir. Hedef malzemeyi de kapalı pozisyonda iken üstünü perdeleyerek korumaktadır. Büyümede istenmeyen bir durum olduğu zaman geçici olarak perde kapatılır ve plazma gitmeden problem çözülebilmektedir.

Sistemin içindeki diğeri bir aparat ise kaban adı verilen ve sistemin içerisindeki tüm yüzeyi kaplayan ince bir tabakadır. Bunlar sistemin içerisindeki tüm yüzeylere vidalanmışır. Sistemin içerisindeki genel temizliği yapılmak istendiğinde bunlar sökülerek gerekli

kimyasallarla temizlenir. Azotla kurutulur ve tekrar yerine yerleştirilir. Sistemin iç temizliği bunların dışında ilk olarak süpürge makinası ile iç taraf her yer çekilmektedir. Toz ve benzeri kaba kirler bu sayede temizlemektedir. Sistemin dış yüzeyi ısıtıcı aparatına bağlanmıştır. İçerideki yüzeye yapışmış oksijeni kısmen buharlaştırmak için yüzey ısıtıcı mevcuttur. Bu sayede yüzey ısıtılır ve yüzeydeki oksijenler buharlaştırılır. Vakumlanarak sistem dışına atılmaktadır. Sistemin içerisinde cam bir pencere bulunmaktadır. İçerinin temizlenmesine yaramaktadır. Pencerenin kontrolü dışarıdaki bir mekanik kol tarafından sağlanmaktadır. Kol çevrilirken içeriye oksijen sızabileceğinden dolayı yavaşça döndürülmelidir.

Sistemin dışındaki aparatlardan bahsedelim. Sistemin altında çeşitli bilgisayar kasaları bulunmaktadır. Bunlar sistemin otomatik çalışma programının ve grafik ara yüzünün yüklenip çalıştırıldığı kasalardır. Radyo frekans doğru akım güç kaynakları ve bunların çalışıp çalışmadığını anlaşılabileceği çeşitli ikaz ışıkları bulunmaktadır. Arka tarafta gaz akış boruları bunlar oksijen, azot ve argon ve bunların kaynağa bağlı olduğu vanalar bulunmaktadır. Ayrıca bunların makinaya bağlı olan kısımlarında gaz miktarı ölçüm sensörleri bulunmaktadır. Sistemin arka kısmında güç kaynaklarının, yüzey ısıtıcısının ve çeşitli aparatların ana sigortaları bulunmaktadır. Sistemin ön panel kısmında ise üstte bilgisayar ekranı altta ise bilgisayar aç-kapa, DC saçtırma aç-kapa ve DC göstergeleri ve bunun altında ise sistem aç-durdur ve en altta sol tarafta ise ana şalter 0 ve aç düğmesi bulunmaktadır.

Sistemi kapatma aşamaları ise şöyledir. Önce bilgisayar kapa butonu sonra açıksa DC dur butonu ve daha sonra sistemi durdur butonuna basılır. En son şalter sıfır konumuna getirilir ve işlem bitirilmiş olur. Açma aşaması kapatma aşamasının tam tersi olmakla birlikte önce şalter açılır sonra sistem açılır ve en son bilgisayar açılmaktadır. Büyümenin gerçekleştiği laboratuvar bir temiz odadır ve kendine özel kıyafeti mevcuttur ve bu elbise ile girilmek zorundadır. Ayrıca tüm büyütme ve deney aşaması boyunca eldiven giyilerek ve numunenin kirlenmesine özen gösterilmektedir. Bu tekniğin kullanılmasının birçok avantajı mevcuttur:

- Tekniğin dünyaca bilinen ve tanınmış olması,
- Tekniğin maliyetinin diğer bazı tekniklere göre ucuz olması,
- Çok çeşitli malzemeler kullanılabilmesidir. Metal malzemelerde genellikle Doğru Akım Saçtırma (DC Sputter) kullanılırken iletken olmayan malzemelerde Radyo Frekans Saçtırma (RF Sputter) kullanılmaktadır.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Büyütme Parametreleri

Büyütme yaparken sıcaklık ve basınç parametreleri değiştirilmiştir. 5, 6, 8 ve 10 militorr basınçlarında 150°, 300° ve 450°'de farklı sıcaklık değerlerinde Ga₂O₃ ince filmleri cam, indiyum kalay oksit (ITO) ve p-tipi silisyum alt taşları üzerine büyütüldü. Buradaki amaç; radyo frekans gücünün malzemenin kristal yapısı kalitesine etkilerini araştırmaktır. Büyütme işleminden sonra malzememizin kristal kalitesini arttırmak için tavlama işlemi uygulandı. Tavlama işlemi cam numuneler için 450°'de içeriye azot (N) gazı verilerek 20 dakika boyunca silisyum numuneler için ise 900°'de ve içeriye yine azot (N) gazı verilerek 30 dakika boyunca tavlandı.

Farklı basınç ve farklı sıcaklık değerlerinde yapılan büyütmede, tüm alt taşlar (cam ve p-tipi silisyum) için uygulanan büyüme koşulları (alttaş sıcaklığı, çalışma basıncı, kalınlık gibi) Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan büyütmede, tüm alttaşlar (cam ve p-Si) için uygulanan büyütme koşulları

RF gücü (Watt)	Alttaş sıcaklığı (C°)	Argon (sccm)	Başlangıç basıncı (Torr)	Çalışma basıncı (Torr)	Büyütme süresi (dakika)	Film kalınlığı (nm)
50	150	35	5×10^{-6}	6×10^{-3}	300	100
	300					
	450					
50	150	35	5×10^{-6}	8×10^{-3}	120	50
	300					
	450					
50	150	35	5×10^{-6}	10×10^{-3}	240	95
	300					
	450					
100	450	20	5×10^{-6}	5×10^{-3}	60	80

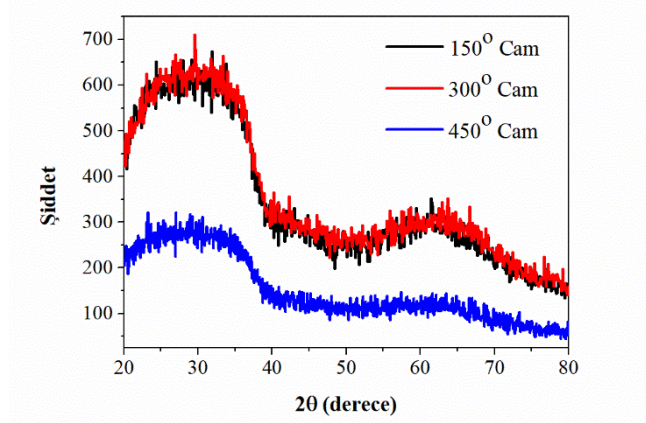
Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyon

X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri

X-ışını kırınımı ölçümleri alınarak kristalin yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olduğundan dolayı, numunelerimizin yapısını öğrenebilmek için X ışını kırınımı

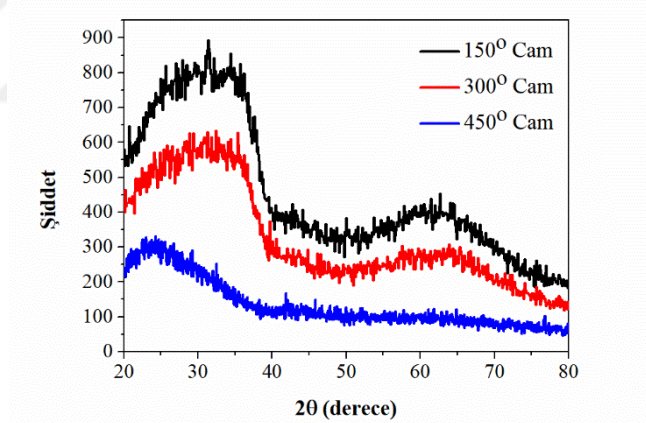
ölçümleri alınmıştır. Ga_2O_3 ince filmlerin yapısal analizi için D-2 Phaser Bruker ($\text{CuK}_\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$) markalı X-ışını Kırınımı (XRD) ölçüm cihazı kullanıldı.

6 militorr basınçta 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 19'da gösterilmektedir.



Şekil 19. 6 militorr basınç ve 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

6 militorr basınçta 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 20'de gösterilmektedir.



Şekil 20. 6 militorr basınç ve 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

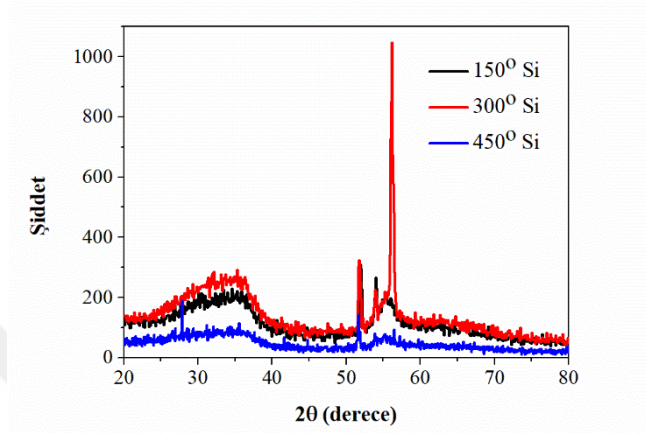
Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin XRD grafiklerinde herhangi bir pik gözlenmedi. Yayvan şekilde tümsek davranış gösteren bu grafikler, cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin amorf yapıda olduğu bulgusuna ulaşıldı. Farklı sıcaklık değerlerinde tüm cam alttaşlar için amorf yapıya sahip Ga_2O_3 ince filmi elde edilmiştir.

Burada ölçümlerimiz yüzeysel (grazing) biçiminde alınmıştır. Bu da 5-100 nm yüzeyden ölçüm alındığını göstermektedir.

Farklı alttaşlar üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerine sıcaklığın etkisini araştırmak için farklı alttaş olan indiyum kalay oksit (ITO) malzemesi kullanıldı. 6 militorr, 8 militorr ve

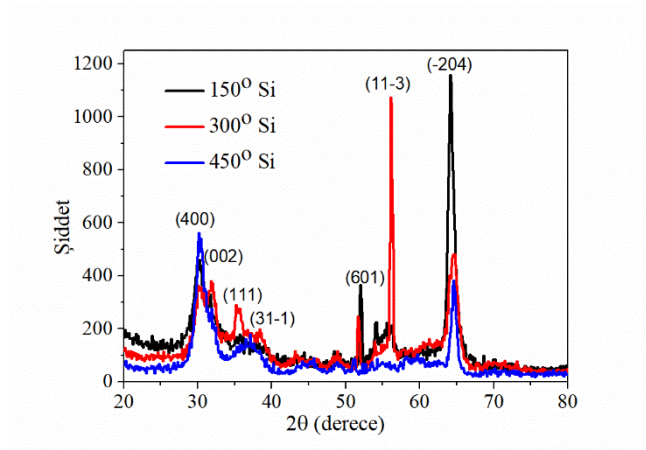
10 militorr basınç altında ITO alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin XRD grafiklerinde herhangi bir pik gözlenmedi. XRD grafiğinde oluşan pikler ITO'nun kendi karakteristik pikleri olduğu belirtildi. Bu nedenle yapılan diğer büyütme işlemlerinde ITO alttaş kullanılmadı.

6 militorr basınçta 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 21'de gösterilmektedir.



Şekil 21. 6 militorr basınç ve 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

6 militorr basınçta 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 22'de gösterilmektedir.



Şekil 22. 6 militorr basınç ve 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

Yaklaşık olarak $30^\circ - 31^\circ$ ve 64° 'ler de karakteristik pikler gözlemlenmiştir. Bu pikler Ga_2O_3 malzemesinin monoklinik kristal yapısına ve (400), (002) ve (-204) yönelimlerine sahip karakteristik pikleridir (PDF kodu: 98-008-3645 / 98-003-4243).

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

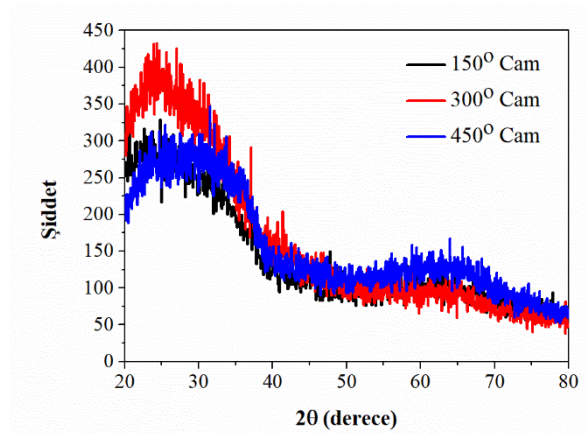
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (9)$$

Bu ifade de D kristalin tanecik boyutu, β pikin yarı yükseklik tam genişliği, θ Bragg'ın kırınım açısı λ kullanılan X –ışını dalga boyu ve $K = 0,9$ kullanılan sabit olarak verilmektedir. Bu formülden yararlanarak, numunelerimizin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

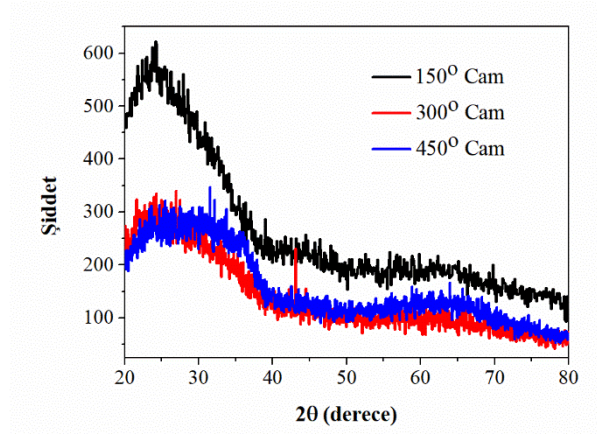
Uygulanan büyütme sıcaklığı – Alttaş	Yarı yükseklik tam genişliği (FWHM)	Miller indisi (hkl)	Gözlenen 2θ (°)	Literatür 2θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Örgü sabitleri (Å°)
150°– p- Si	0,94	(400)	30,11	30,05	9,9	a=12,214
		(002)	31,76	31,74		b=3,037
		(-204)	64,20	64,17		c=5,798
300°– p- Si	1,29	(400)	30,05	30,05	7,2	a=12,230
		(002)	31,73	31,74		b=3,040
		(-204)	64,17	64,17		c=5,800
450°– p- Si	2,15	(400)	30,05	30,05	7,8	a=12,230
		(002)	31,73	31,74		b=3,040
		(-204)	64,17	64,17		c=5,800

8 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 23’de gösterilmektedir.



Şekil 23. 8 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

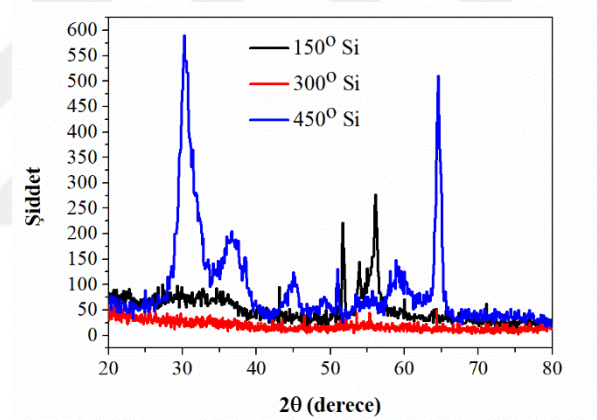
8 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 24’de gösterilmektedir.



Şekil 24. 8 miltorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

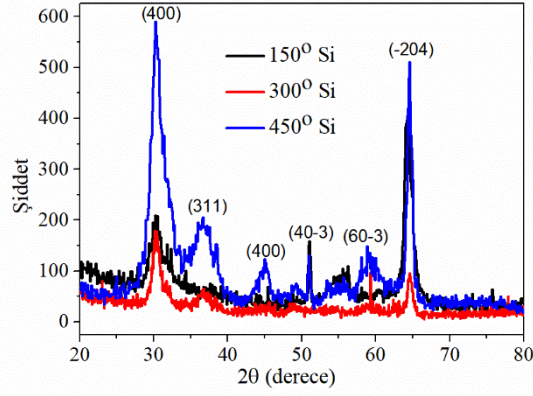
Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 malzemenin XRD verileri incelendiğinde yaklaşık olarak amorf yapıda olduğu gözlemlenmiştir.

8 miltorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 25’de gösterilmektedir.



Şekil 25. 8 miltorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

8 miltorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 26’da gösterilmektedir.



Şekil 26. 8 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

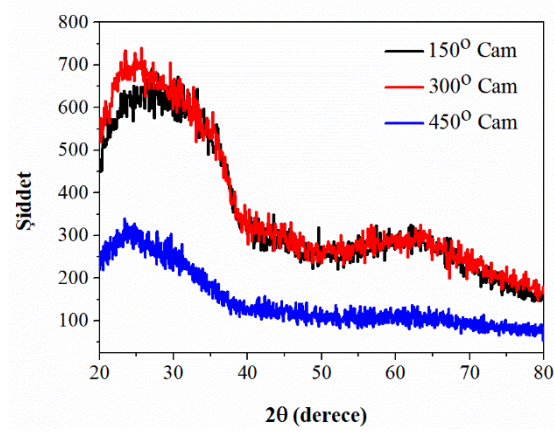
Yaklaşık olarak 30° – 31° ve 64°'ler de karakteristik pik gözlemlenmiştir. Bu pikler Ga₂O₃ malzemesinin monoklinik kristal yapısına ve (400), (002) ve (-204) yönelimlerine sahip karakteristik pikleridir (PDF kodu: 98-008-3645 / 98-003-4243). Ayrıca 450° sıcaklıkta, ~ 35,59° ve 44,16°'de pikler gözlenmiş ve bu piklerin kübik Ga₂O₃ malzemesinin (311) ve (400) yönelimine karşılık gelen pikler olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (Gopal et al. 2018) .

Numunelerimizin yapısal parametreleri Scherrer bağıntısı yardımıyla hesaplanmış ve bunlar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

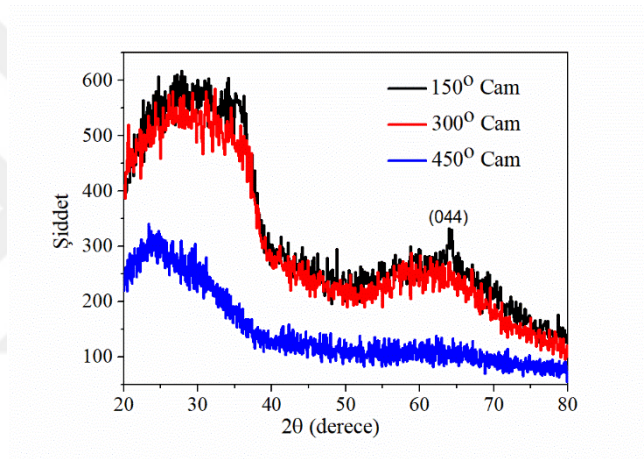
Uygulanan büyütme sıcaklığı – Alttaş	Yarı yükseklik – tam genişliği (FWHM)	Miller indisi (hkl)	Gözlenen 2θ (°)	Literatür 2θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Örgü sabitleri (Å°)
150°– p- Si	1,20	(400)	30,05	30,05	7,8	a=12,230
		(002)	31,73	31,74		b=3,040
		(-204)	64,17	64,17		c=5,800
300°– p- Si	0,72	(400)	30,11	30,05	13	a=12,214
		(002)	31,76	31,74		b=3,037
		(-204)	64,20	64,17		c=5,798
450°– p- Si	0,74	(400)	30,11	30,05	12,7	a=12,214
		(002)	31,76	31,74		b=3,037
		(-204)	64,20	64,17		c=5,798

10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 27'de gösterilmektedir.



Şekil 27. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

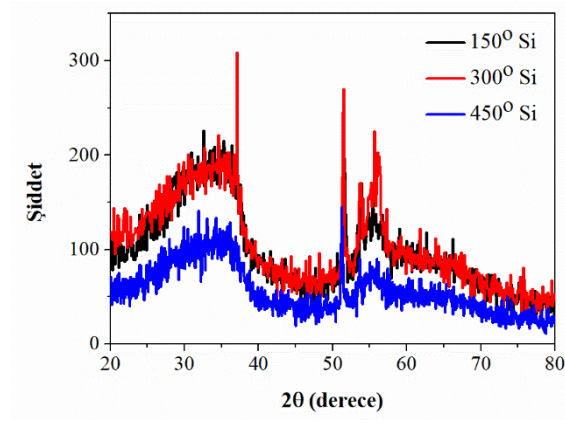
10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 28’de gösterilmektedir.



Şekil 28. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin XRD grafiği

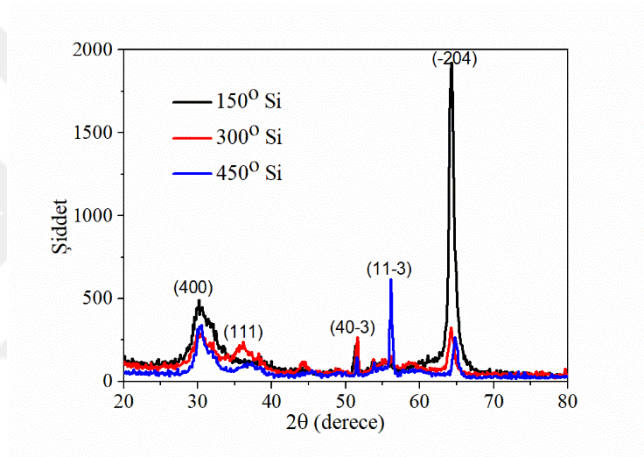
Cam alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 malzemenin XRD verileri incelendiğinde yaklaşık olarak amorf yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Yalnızca 150° sıcaklıkta büyütülen Ga_2O_3 ince filmin de $\sim 63,91^\circ$ ’de pik gözlemlendi ve bu pikin kübik Ga_2O_3 ’in Gamma fazına sahip (044) (R. Gopal et al. 2018) yönelimine karşılık gelen pik olduğu anlaşılmıştır (PDF kodu: 98-015-2085).

10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 29’da gösterilmektedir.



Şekil 29. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 30'da gösterilmektedir.



Şekil 30. 10 militorr basınç ve 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

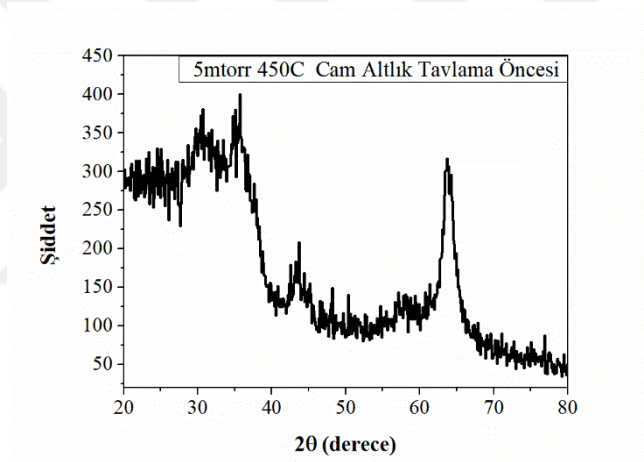
Yaklaşık olarak 30° – 31° ve 64°'ler de karakteristik pik gözlemlenmiştir. Bu pikler Ga₂O₃ malzemesinin monoklinik kristal yapısına ve (400), (002) ve (-204) yönelimlerine sahip karakteristik pikleridir (PDF kodu: 98-016-6198 / 98-088-3645).

Numunelerimizin yapısal parametreleri Scherrer formülü ile hesaplanmış ve bunlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyüme sıcaklığı – Alttaş	Yarı yükseklik – tam genişliği (FWHM)	Miller indisi (hkl)	Gözlenen 2θ (°)	Literatür 2θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Örgü sabitleri (Å°)
150°– p- Si	0,88	(400) (002) (-204)	30,10 32,00 64,79	30,05 31,74 64,17	10,6	a=12,208 b=3,031 c=5,751
300°– p- Si	0,73	(400) (002) (-204)	30,10 32,00 64,79	30,05 31,74 64,17	12,8	a=12,208 b=3,031 c=5,751
450°– p- Si	0,74	(400) (002) (-204)	30,11 31,76 64,20	30,05 31,74 64,17	12,7	a=12,214 b=3,037 c=5,798

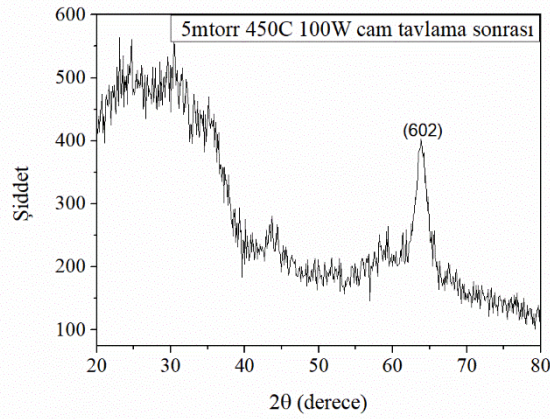
5 militorr basınçta 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 31’de gösterilmektedir.



Şekil 31. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında cam alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

Cam numunede pikler gözlemlenmiştir. Tavlama öncesinde ~ 30,51°, 35,48°, 43,34° ve 63,72°’de pikler gözlemlenmiştir (PDF kodu: 98-016-6198).

5 militorr basınçta 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 32’de gösterilmektedir.



Şekil 32. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

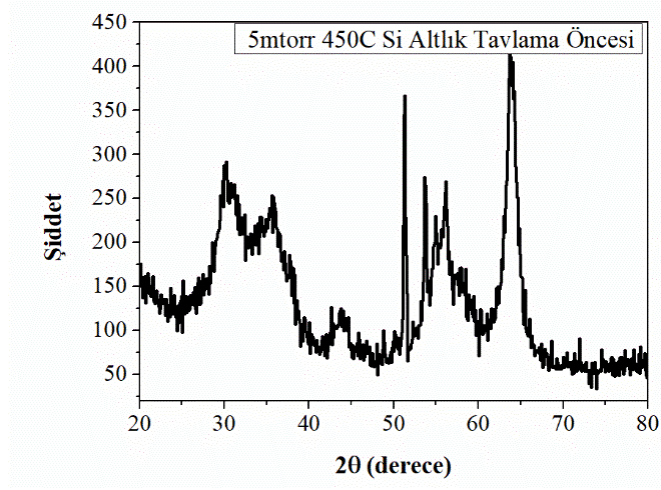
Yaklaşık olarak 30,51°, 35,48° ve 43,34° deki pikler tavlamadan sonra belirginliği azalmıştır (PDF kodu: 98-003-4243). Bu büyütme de literatürdeki bir çalışma göz önüne alınarak yapıldı (K.H. Choi, H.C. Kang 2014). Makalede safir alttaş kullanılmış ve sıcaklık 500° sıcaklıkta büyütülmüştür. Aynı çalışma şartlarını 450° sıcaklık altında ve cam alt taş üzerine büyütme yapılmıştır. XRD sonuçlarına bakıldığında cam alttaş üzerinde Ga₂O₃ malzemesinin büyüdüğü gözlemlenmiştir.

Numunelerimizin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Farklı sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme sıcaklığı – Alttaş	Yarı yükseklik – tam genişliği (FWHM)	Miller indisi (hkl)	Gözlenen 2θ (°)	Literatür 2θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Örgü sabitleri (Å°)
450°– Cam	1,44	(400)	30,05	30,05	6,5	a=12,230
		(002)	31,73	31,74		b=3,040
		(-204)	64,17	64,17		c=5,800

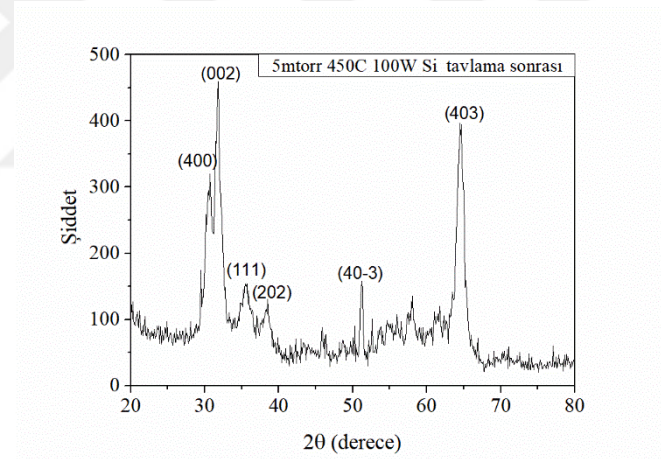
5 militorr basınçta 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin tavlama öncesi XRD grafiği Şekil 33’de gösterilmektedir.



Şekil 33. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında p-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

XRD grafiğine bakıldığında ~ 35,71°, 44,10°, 51,32°, 53,70°, 56,14° ve 63,68°deki pikler gözlemlenmiştir(PDF kodu: 98-0166198).

5 militorr basınçta 450° sıcaklıklar altında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin tavlama sonrası XRD grafiği Şekil 34’de gösterilmektedir.



Şekil 34. 5 militorr basınç ve 450° sıcaklık altında p-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin XRD grafiği

Tavlama sonrasında pikler daha da belirgin hale gelmiştir. Bunlar Ga₂O₃ malzemesinin monoklinik kristal yapısına ve (400), (002) ve (-204) yönelimine karşılık gelen karakteristik pikleridir (PDF kodu: 98-003-4243).

Numunelerimizin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar Tablo 9’da verilmiştir.

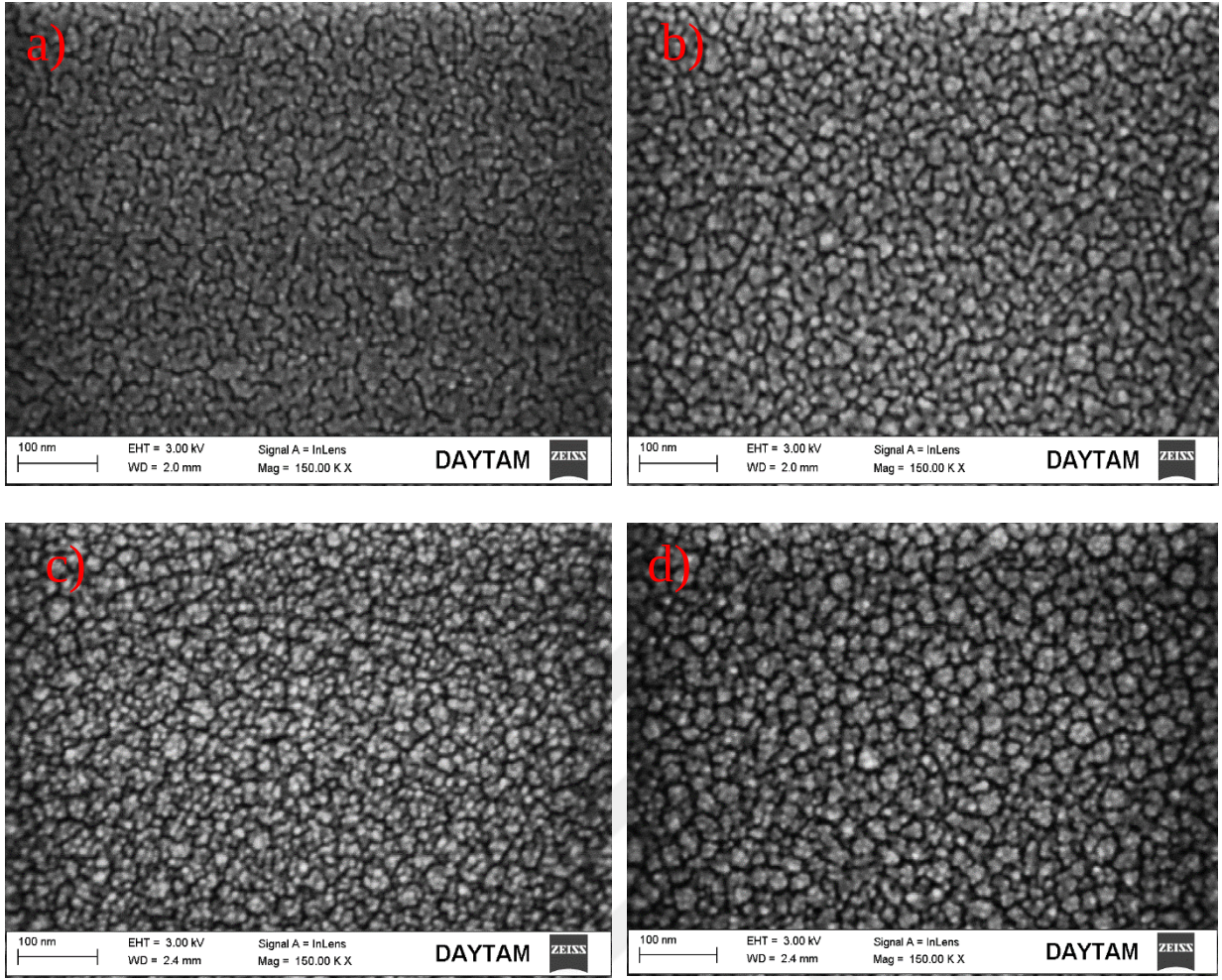
Tablo 9. Farklı sıcaklıklar altında p-tipi silisyum alttaşı üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin bazı yapısal parametreleri

Uygulanan büyütme sıcaklığı – Alttaş	Yarı yükseklik tam genişliği (FWHM)	Miller indisi (hkl)	Gözlenen 2θ (°)	Literatür 2θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Örgü sabitleri (Å°)
450°– p- Si	0,96	(400)	30,05	30,05	9,7	a=12,230
		(002)	31,73	31,74		b=3,040
		(-204)	64,17	64,17		c=5,800

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ölçümleri

Yapılan çalışmada, büyüttüğümüz ince filmler vakum ortamında 5 nm kalınlığında altın ile kaplanmıştır. Bunun nedeni, malzemedeki aşırı elektron birikimini engellemek ve fazlalık olan elektronların atılmasıdır. Ek olarak Au'nın iletkenliğinden dolayı daha iyi SEM görüntüsü almayı sağlamaktır. Taramalı elektron mikroskobu resimleri Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezindeki (DAYTAM) ileri spektroskopi laboratuvarındaki Zeiss marka Sigma 300 modeli SEM cihazı tarafından alınmıştır.

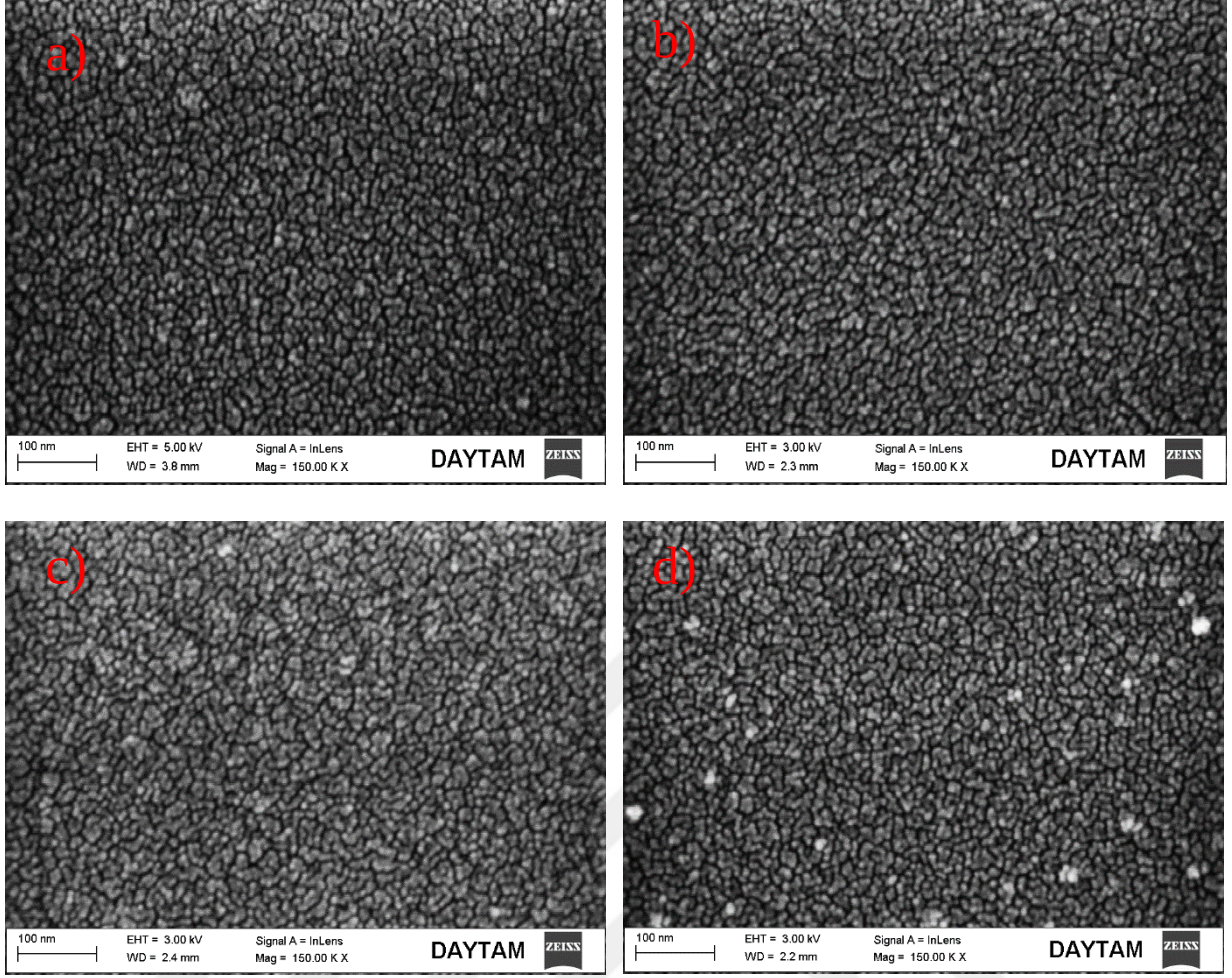
Farklı basınçlarda ve 450° derece sıcaklık altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerin 150000X büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 35'de gösterilmiştir.



Şekil 35. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki **a)** 5 militorr basınçtaki **b)** 6 militorr basınçtaki **c)** 8 militorr basınçtaki **d)** 10 militorr basınçtaki SEM görüntüleri

Şekil 35’de SEM görüntüleri incelendiğinde filmlerin kristal tanecik boyutları belirgin şekilde görülmekte ve çizgisel kusurlar gözlenmemektedir. 6, 8 ve 10 militorr basınçlardaki büyültmelerde Ga_2O_3 ince filminde, yüzeyde topaklanma şeklinde büyümeler ortaya çıkmaktadır. SEM resimleri, uygulanan bütün basınç değerlerinde periyodik ve tanecikli yapıyı göstermektedir. SEM görüntüleri çekilen alanlar için Ga_2O_3 ince film büyümesinin hemen hemen homojen oldukları söylenebilmektedir. Burada özet olarak; basıncın değişimi ile Ga_2O_3 ince filminin morfolojik özelliklerinin değişmediği SEM analizinden ortaya çıkmaktadır.

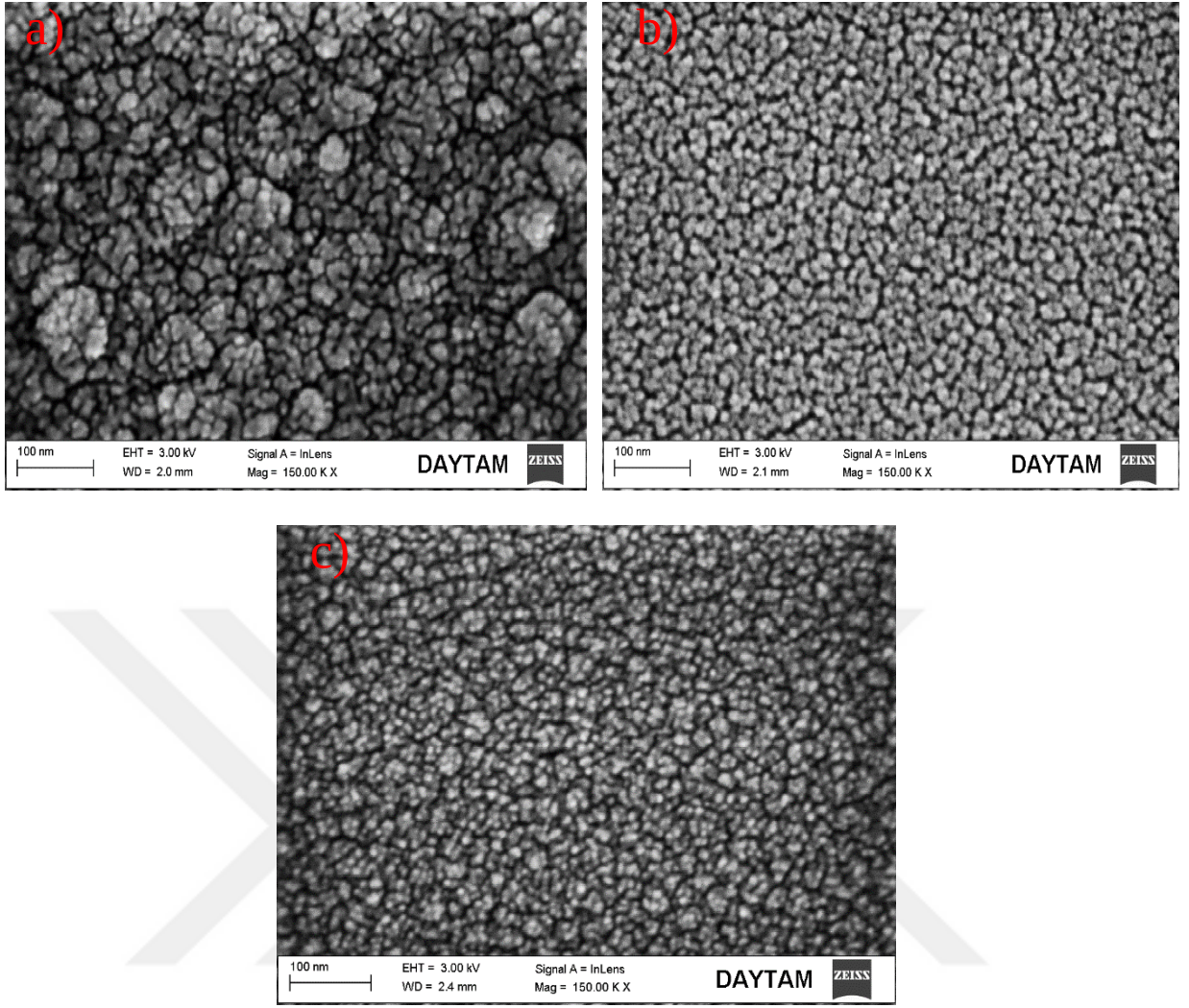
Farklı basınçlarda ve 450° derece sıcaklık altında p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerin 150000X büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 36’da gösterilmiştir.



Şekil 36. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki **a)** 5 militorr basınçtaki **b)** 6 militorr basınçtaki **c)** 8 militorr basınçtaki **d)** 10 militorr basınçtaki SEM görüntüleri

Şekil 36’da SEM görüntüleri daha nettir ve tanecikli periyodik yapı gözlenmektedir. 8 militorr basınçta topaklanma türü büyüme diğerlerine kıyasla daha çok olduğu tespit edilirken, malzemenin yüzey morfolojik yapısının farklı basınçlarda çok fazla değişmediği gözlenmektedir.

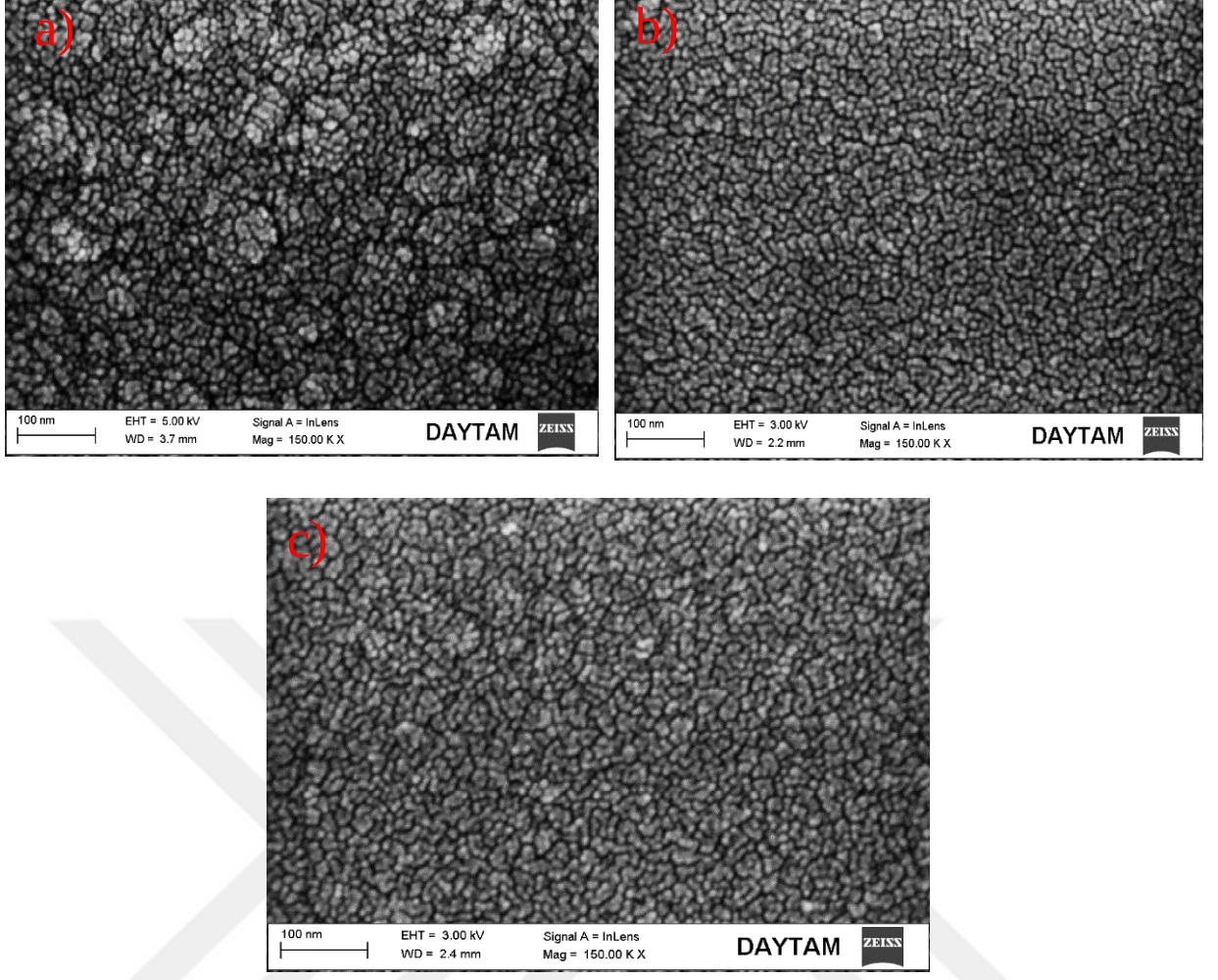
8 militorr basınçta farklı sıcaklık değerinde cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 37’de gösterilmektedir.



Şekil 37. Cam alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki **a)** 150° sıcaklıktaki **b)** 300° sıcaklıktaki **c)** 450° sıcaklıktaki SEM görüntüleri

Şekil 37’deki SEM sonuçları, cam üzerine farklı sıcaklık değerlerinde büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin sıcaklık değişimi ile nasıl değiştiğini göstermektedir. 150° sıcaklıktaki ince film yapısında topaklanma şeklindeki büyüme daha belirgin görünmektedir. 300° sıcaklıktaki ince film yapısında topaklanma şeklinde büyüme mevcut olmayıp tanecik sınırları daha belirgindir. 450° sıcaklıktaki büyüme de ise topaklanma şekli büyümenin daha az olduğu gözlenmektedir. Tanecikli yapılar 150° ve 450° sıcaklıkta daha net olmakla birlikte filmler homojen bir yapıya sahiptir. Herhangi bir çizgisel kusur gözlenmemektedir.

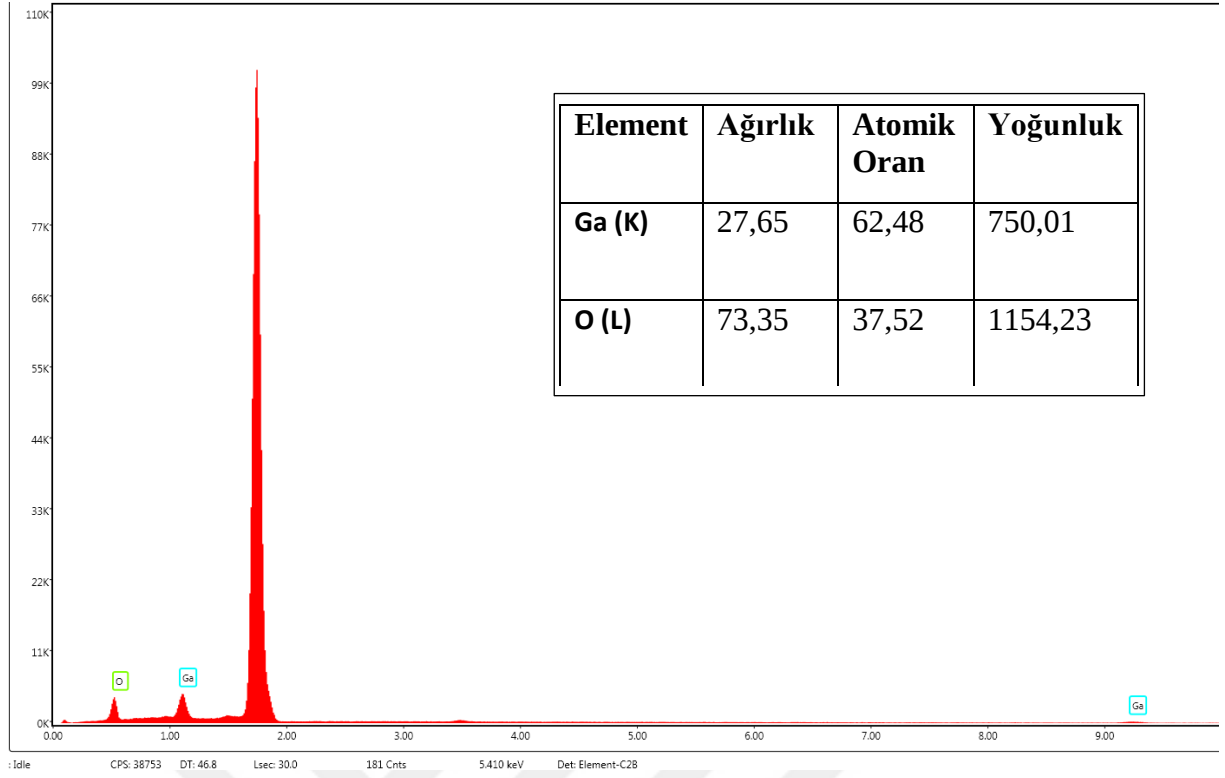
8 militorr basınçta farklı sıcaklık değerinde p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 38’de gösterilmektedir.



Şekil 38. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin 150000X büyütmedeki **a)** 150° sıcaklıktaki **b)** 300° sıcaklıktaki **c)** 450° sıcaklıktaki SEM görüntüleri

Şekil 38'deki SEM sonuçları, cam üzerine farklı sıcaklık değerlerinde büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin sıcaklık değişimi ile nasıl değiştiğini göstermektedir. 150° sıcaklıktaki ince film yapısında topaklanma şeklindeki büyüme daha belirgin görünmektedir. Tanecikli yapılar tüm filmlerde belirgin ve homojen yapıya sahip olduğu gözlemlenmektedir. Sıcaklık değişimi malzemenin tanecik boyutunun azalmasına sebep olduğu da SEM görüntülerinden elde edilmektedir.

Yapılan SEM analizlerinin sonucunda EDX ölçümleri de alınmakta olup sonuçları Şekil 39'da gösterilmiştir.

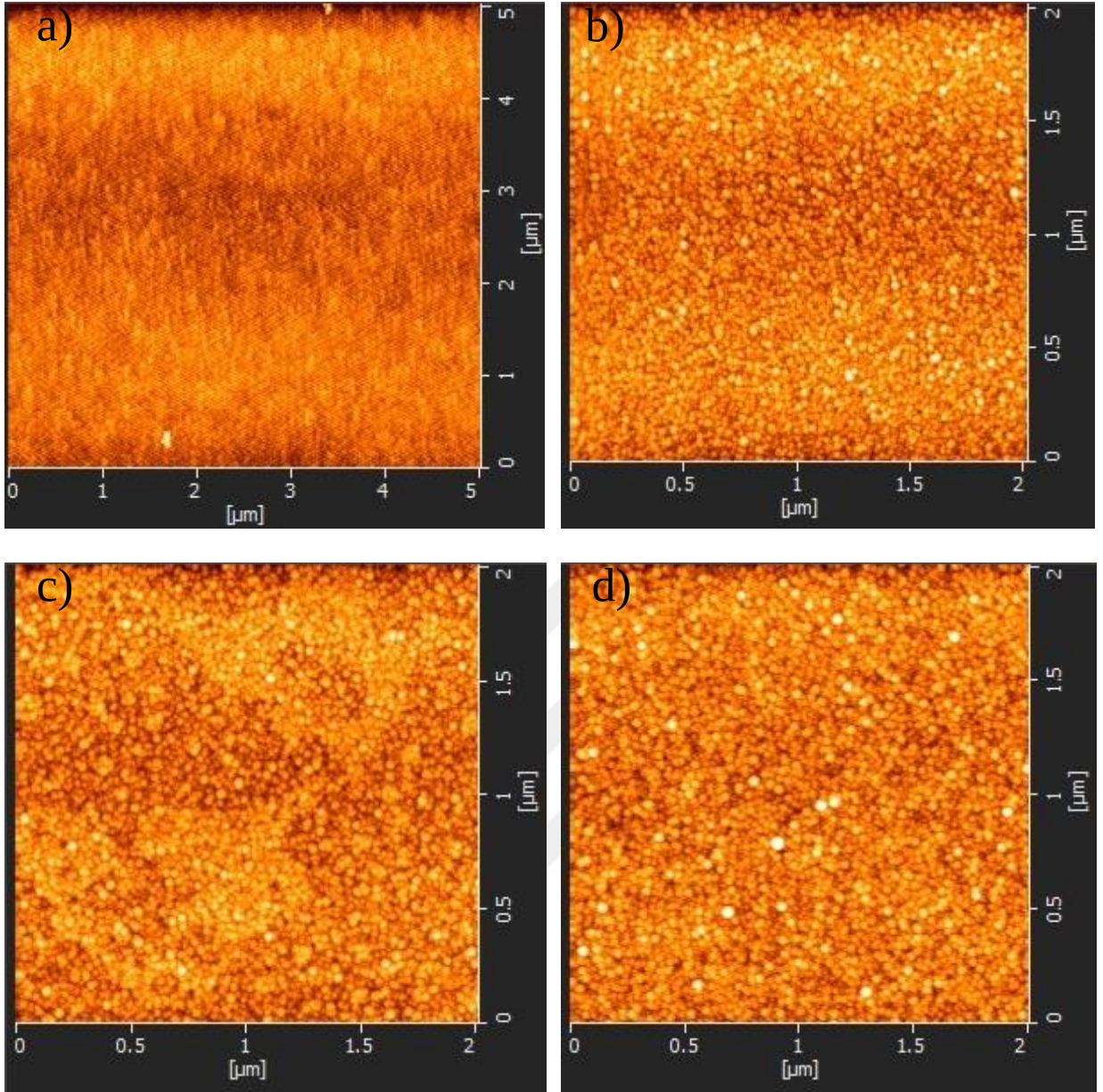


Şekil 39. SEM analizleri sonucunda EDX ölçüm sonuçları

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçümleri

Yaptığımız çalışmada AFM ölçümü alırken çeşitli operasyon modlarından biri olan arada bir temas modu (tapping mod) kullanılmaktadır. Tip temas etmeyen moda göre daha yakın olmaktadır ve tip zaman zaman yüzeye hafifçe değmektedir. Bu araştırmadaki AFM ölçümlerinde, farklı frekanslara sahip tipler kullanılmıştır ve genellikle $1 (\mu\text{m})^2$ ve $5 (\mu\text{m})^2$ alanlarında ölçümler alınmıştır. Elde edilen ölçümler DAYTAM ileri spektroskopi laboratuvarındaki Hitachi 5100N model AFM cihazı ile alınmıştır.

Farklı basınç değerlerinde (5, 6, 8, 10 militorr) ve 450° sıcaklıkta cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin iki boyuttaki AFM görüntüleri Şekil 40’da gösterilmiştir.



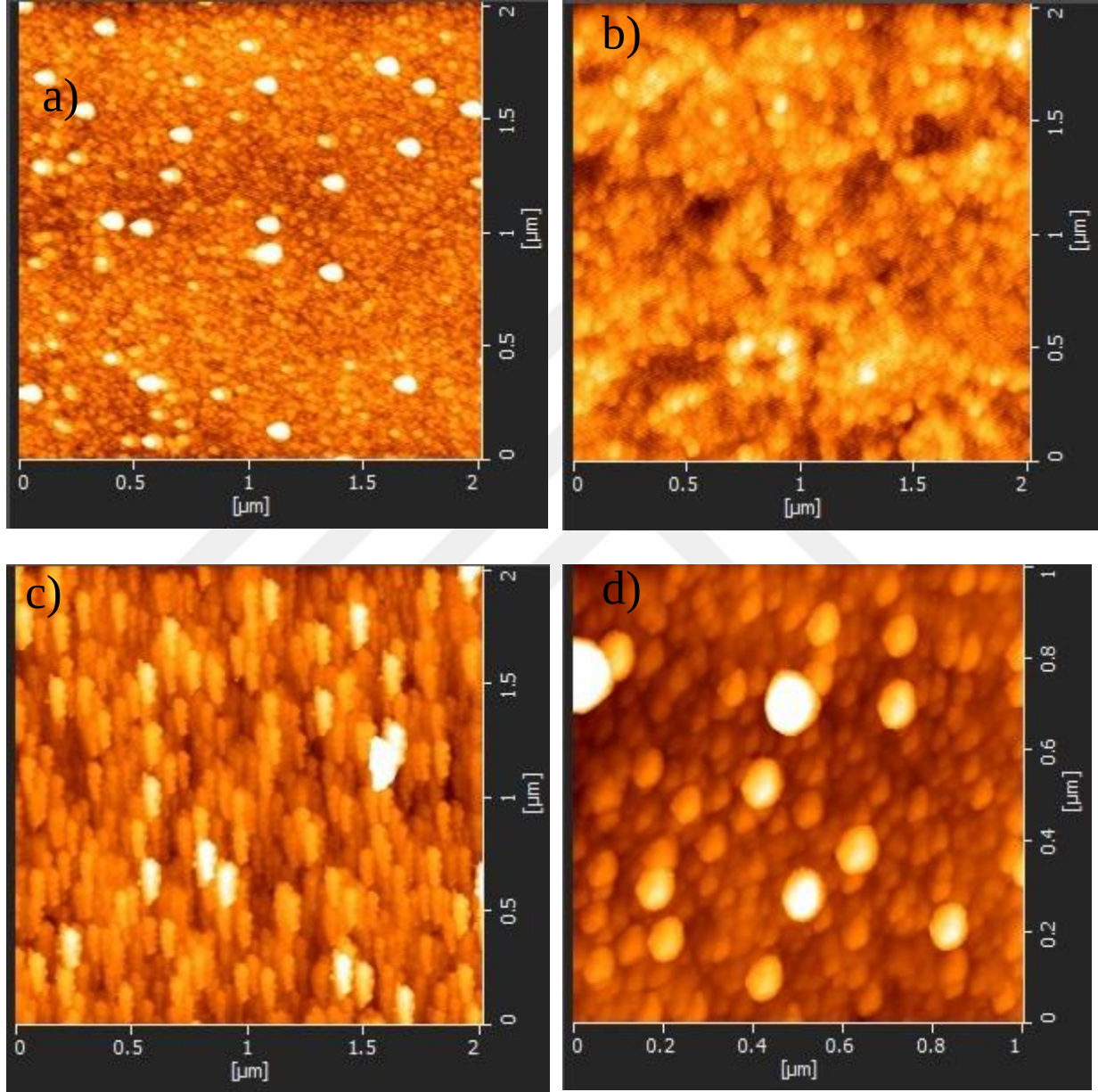
Şekil 40. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin **a)** 5 militorr **b)** 6 militorr **c)** 8 militorr **d)** 10 militorr basınçta iki boyuttaki AFM görüntüleri

Farklı basınç değerleri için, cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,48$ nm den $\sim 1,29$ nm ye değişmiştir. Cam alttaş için en düşük pürüzlülük değeri 5 militorr basınca karşılık gelen 0,48 nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri 8 militorr basınca tekabül eden 1,29 nm olarak elde edilmiştir.

Uygulanan 8 militorr basınç ile cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin maksimum yüksekliği 6,69 nm ve bu en yüksek değerdir. Uygulanan 5 militorr basınç ile cam alttaş üzerindeki Ga_2O_3 ince filminin maksimum yüksekliği en düşük değer olan 2,46 nm olarak elde edilmiştir. 8 militorr basınçta cam alt taş için maksimum derinlik (S_v) değeri 5,30 nm ile en yüksek değerdir. En düşük maksimum derinlik değeri ise 5 militorr basınç değerine

karşılık gelen 2,19 nm olarak elde edilmiştir. Basınç değerlerini kontrol etmenin, daha iyi morfolojik özelliklere sahip olan filmler üretebilmemizi sağladığı sonucuna varılabilir.

Farklı basınç değerlerinde (5, 6, 8, 10 militorr) ve 450° sıcaklıkta p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin iki boyuttaki AFM görüntüleri Şekil 41’de gösterilmiştir.



Şekil 41. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin **a)** 5 militorr **b)** 6 militorr **c)** 8 militorr **d)** 10 militorr basınçta iki boyuttaki AFM görüntüleri

Farklı basınç değerleri için, p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,90$ ’ nm den $\sim 2,29$ ’ nm ye değişmiştir. p-tipi silisyum alttaş için en düşük pürüzlülük değeri 6 militorr basınca karşılık gelen 0,90 nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri 10 militorr basınca tekabül eden 2,29 nm olarak elde edilmiştir.

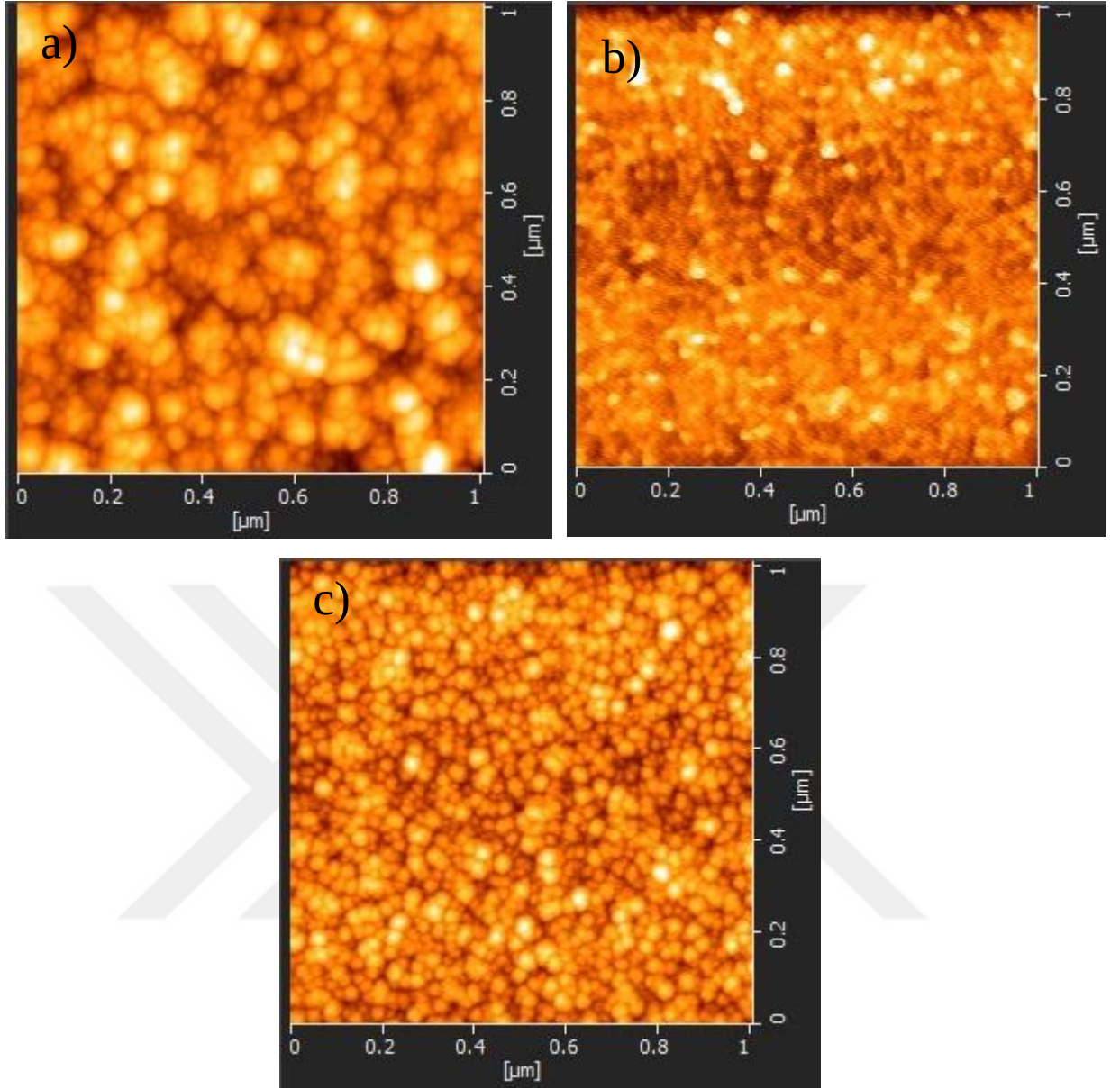
Uygulanan 10 militorr basınç ile p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin maksimum yüksekliği 11,50 nm ve bu en yüksek değerdir. Uygulanan 6 militorr basınç ile p-tipi silisyum alttaş üzerindeki Ga_2O_3 ince filminin maksimum yüksekliği en düşük değer olan 4,25 nm olarak elde edilmiştir. 8 militorr basınçta p-tipi silisyum alttaş için maksimum derinlik (S_v) değeri 4,38 nm ile en yüksek değerdir. En düşük maksimum derinlik değeri ise 5 militorr basınç değerine karşılık gelen 3,25 nm olarak elde edilmektedir.

Farklı basınç değerleri (5, 6, 8 10 militorr) ve 450° sıcaklıkta çeşitli alttaşlar üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin morfolojik parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 10. Farklı basınç değerlerinde cam ve p-tipi silisyum alttaşlarının üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri

RF gücü (Watt)	Büyütme basıncı	Alttaş	Ortalama pürüzlülük (S_a) (nm)	Maksimum derinlik (S_v) (nm)	Maksimum yükseklik (S_p) (nm)	Ortalama mutlak eğim (Δ_a) (°)
50	6 militorr	Cam	0,96	3,72	5,25	2,65
		p-Si	0,90	4,09	4,25	0,43
50	8 Militorr	Cam	1,29	5,30	6,69	1,20
		p-Si	1,33	4,38	8,73	0,25
50	10 Militorr	Cam	0,92	3,62	5,89	3,33
		p-Si	2,29	4,31	11,50	0,36
100	5 Militorr	Cam	0,48	2,19	2,46	0,26
		p-Si	0,93	3,25	7,29	0,57

8 militorr basınç ve farklı sıcaklık değerlerinde (150° , 300° , 450°) cam alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin iki boyuttaki AFM görüntüleri Şekil 42’de gösterilmiştir.



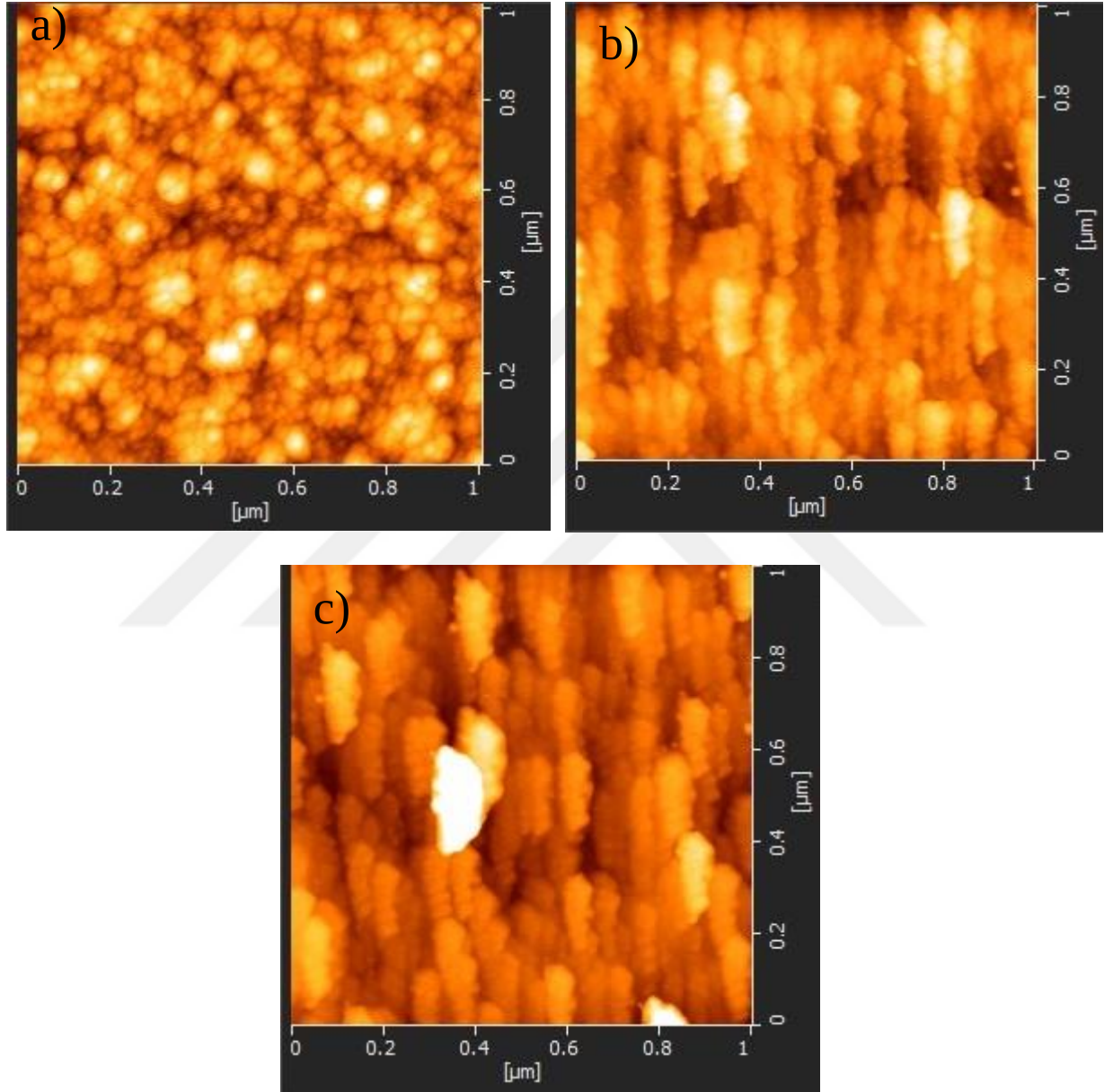
Şekil 42. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin **a)** 150° sıcaklık **b)** 300° sıcaklık **c)** 450° sıcaklıkta üç boyuttaki AFM görüntüleri

Farklı sıcaklık değerleri için, cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,45$ nm den $\sim 4,51$ nm ye değişmiştir. Cam alttaş için en düşük pürüzlülük değeri 300° sıcaklık değerine karşılık gelen $0,45$ nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri 150° tekabül eden $4,51$ nm olarak elde edilmiştir.

Uygulanan 150° sıcaklık ile cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin maksimum yüksekliği $18,14$ nm ve bu en yüksek değerdir. Uygulanan 300° sıcaklık ile cam alttaş üzerindeki Ga_2O_3 ince filminin maksimum yüksekliği en düşük değer olan $2,52$ nm olarak elde edilmiştir. Cam alttaş için en yüksek ortalama mutlak eğimini (Δa) 450° sıcaklık değerine karşılık gelen $3,46^\circ$ nm iken, en düşük ortalama mutlak eğim 300° sıcaklık değerine karşılık gelir ve değeri $0,36^\circ$ olmaktadır. 150° sıcaklık da cam alttaş için maksimum derinlik (S_v) değeri $14,9$ nm ile en yüksek değerdir. En düşük maksimum derinlik değeri ise 300°

sıcaklık değerine karşılık gelen 1,63 nm olarak elde edilmiştir. Sıcaklık değerlerini kontrol etmenin yararı, sıcaklık arttıkça tanecik boyutunun azaldığı sonucuna varılabilir.

8 militorr basınç ve farklı sıcaklık değerlerinde (150°, 300°, 450°) p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin iki boyuttaki AFM görüntüleri Şekil 43’de gösterilmiştir.



Şekil 43. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin **a)** 150° sıcaklık **b)** 300° sıcaklık **c)** 450° sıcaklıkta üç boyuttaki AFM görüntüleri

Farklı sıcaklık değerleri için, p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin ortalama pürüzlülük değerleri $\sim 0,83'$ nm den $\sim 3,10'$ nm ye değişmiştir. p-tipi silisyum alttaş için en düşük pürüzlülük değeri 300° sıcaklık değerine karşılık gelen 0,83 nm olarak elde edilirken, en yüksek pürüzlülük değeri 150° tekabül eden 3,10 nm olarak elde edilmiştir.

Uygulanan 150° sıcaklık ile p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filminin maksimum yüksekliği 13,65 nm ve bu en yüksek değerdir. Uygulanan 300° sıcaklık ile p-tipi silisyum alttaş üzerindeki Ga₂O₃ ince filminin maksimum yüksekliği en düşük değer olan 3,46 nm olarak elde edilmiştir. 150° sıcaklık da p-tipi silisyum alttaş için maksimum derinlik (S_v) değeri 11,25 nm ile en yüksek değerdir. En düşük maksimum derinlik değeri ise 300° sıcaklık değerine karşılık gelen 2,55 nm olarak elde edilmiştir. Buradan çıkan sonuç, 150° sıcaklıkta yapı cam alttaş üzerine büyütülen filmler gibi iken 300° ve 450° sıcaklıkta ile yapı değişmekte ve adacık şeklinde büyüme olduğu gözlemlenebilir.

8 militorr basınçta ve farklı sıcaklık değerlerinde (150°, 300°, 450°) çeşitli alttaşlar üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin morfolojik parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 11. 8 militorr basınçta ve farklı sıcaklık değerlerinde cam ve p-tipi silisyum alttaşlarının üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin bazı morfolojik parametreleri

Sıcaklık (°)	Alttaş	Ortalama pürüzlülük (S _a) (nm)	Maksimum derinlik (S _v) (nm)	Maksimum yükseklik (S _p) (nm)	Ortalama mutlak eğim (Δ _a) (°)
150	Cam	4,51	14,9	18,14	1,60
	p-Si	3,10	11,25	13,65	1,50
300	Cam	0,45	1,63	2,52	0,36
	p-Si	0,83	2,55	3,46	0,16
450	Cam	1,22	4,44	4,21	3,46
	p-Si	1,84	4,78	7,09	0,24

Optik Karakterizasyon

Soğurma (UV/Vis) ve Yansıma (Reflectance) ölçümleri

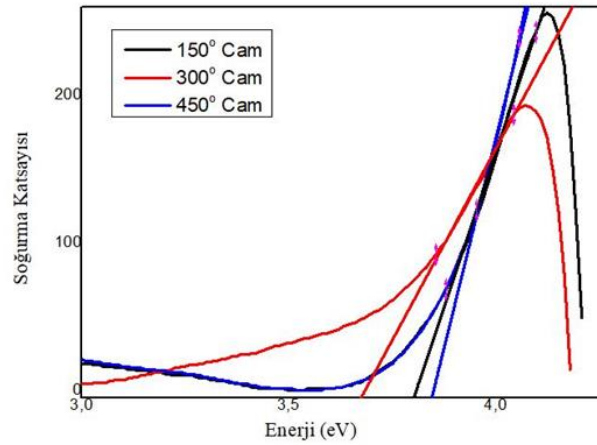
Yapılan bu çalışmada soğurma ve yansıma ölçümleri, DAYTAM İleri spektroskopi laboratuvarındaki LAMBDA 1050 UV/Vis/NIR modeline sahip olan Spektrofotometre cihazı ile oda sıcaklığında ölçüm alınmıştır. Bu çalışmada 190 nm ile 1100 nm arasındaki dalga boyu değeri için soğurma ölçümleri alınmıştır.

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

$$(\alpha h\nu)^n = C(h\nu - E_g) \quad (10)$$

Burada C sabit, $h\nu$ foton enerjisi, n, bant aralığı türüne göre ölçülen parametre, E_g ise kullanılan materyalin optik bant aralığı enerjisini ifade eder. $n = 1$ kabul edildi ve yukarıdaki formül kullanılarak izinli direkt optik enerji aralığı değerleri hesaplandı. UV/Vis/NIR Spektrofotometre ile soğurmaya karşı dalga boyu grafiği elde edilmiştir. Soğurma grafiği kullanılarak enerjiye karşılık soğurma katsayısı grafiği elde edildi. Bu grafiğin lineer bölgedeki değeri kullanılarak, optik bant aralığı enerjilerini hesaplamak için doğrusal çizgiler çizilmiştir. Bu yapılan teknik işleme fit atma olayı denmektedir ve Origin çizim programı sayesinde yapılmıştır.

6 militorr basınçta 150° , 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için soğurma katsayısına karşı enerji (E) grafiği Şekil 43’de verilmiştir.



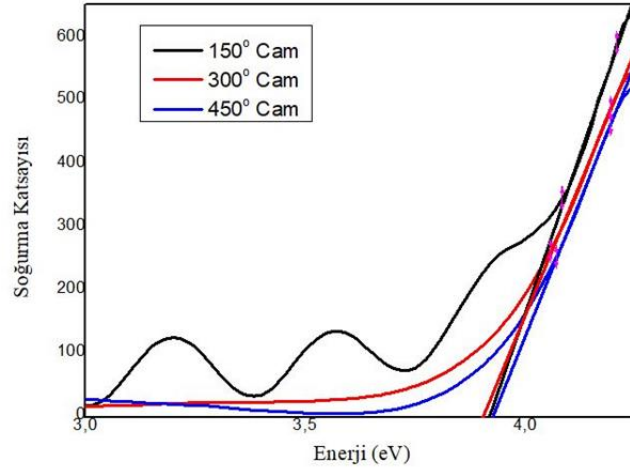
Şekil 44. 6 militorr basınçta 150° , 300° ve 450° sıcaklıklarda cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği

Buradan 6 militorr cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin farklı sıcaklıklar için optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

Tablo 12. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri

Uygulanan Sıcaklık	Optik Bant Aralığı Enerjisi (E_g) (eV)
150°	3,80
300°	3,68
450°	3,85

Farklı sıcaklık değerleri için optik bant aralığı enerjileri birbirine yakın değerler çıkmıştır. 450° sıcaklık için en yüksek bant aralığı enerjisi elde edilirken, 300° sıcaklıkta büyütülen filmin optik bant aralığı enerjisi en düşük değer olarak bulunmuştur. Bu değerler, incelenen çalışmalardan daha küçük olmaktadır.



Şekil 45. 8 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklarda cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği

8 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için soğurma katsayısına karşı enerji (E) grafiği Şekil 44’de verilmiştir.

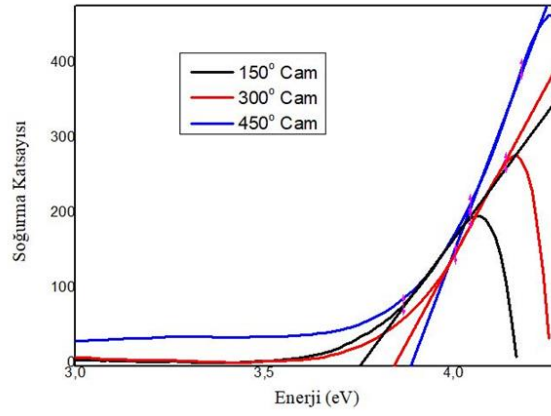
Tauc formülünden yararlanılarak, 8 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerin optik bant aralığı (E_g) değerleri hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

Tablo 13. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri

Uygulanan Sıcaklık	Optik Bant Aralığı Enerjisi (E_g) (eV)
150°	3,92
300°	3,90
450°	3,93

Optik bant aralığı enerjileri birbirlerine çok yakın değerler çıkmıştır. 450° sıcaklık için en yüksek bant aralığı enerjisi elde edilirken, optik bant aralığı enerjisi en düşük olan sıcaklık değeri 300° olmuştur.

10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için soğurma katsayısına karşı enerji (E) grafiği Şekil 45’de verilmiştir.



Şekil 46. 10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklarda cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği

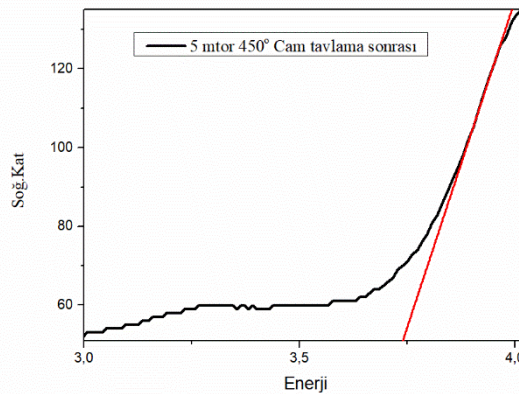
Tauc formülünden yararlanılarak, 10 militorr basınçta 150°, 300° ve 450° sıcaklıklar altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerin optik bant aralığı (E_g) değerleri hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

Tablo 14. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri

Uygulanan Sıcaklık	Optik Bant Aralığı Enerjisi (E_g) (eV)
150°	3,76
300°	3,84
450°	3,89

Farklı sıcaklık değerleri için bant enerjileri yakın olup, en yüksek bant aralığı 450° iken en düşük bant aralığı 150° olmaktadır. Bu ölçüm sonuçlarına bakıldığında büyütülen tüm filmler bildirilen çalışmalardaki değerlerden daha küçük olmaktadır. (Machon et al. 2006; Saurabh Yadav et al. 2020)

5 militorr basınçta 450° sıcaklık altında cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için soğurma katsayısına karşı enerji (E) grafiği Şekil 46'da verilmiştir.



Şekil 47. 5 militorr basınçta ve 450° sıcaklıkta cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için enerjiye karşı soğurma katsayısı grafiği

Tauc formülünden yararlanılarak, 5 mitorr basınçta ve 450° sıcaklık altında cam alttaş üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerin optik bant aralığı (E_g) değerleri hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

Tablo 15. Farklı sıcaklıklar için cam üzerine büyütülen Ga₂O₃ ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi (E_g) değerleri

Uygulanan Sıcaklık	Optik Bant Aralığı Enerjisi (E _g) (eV)
450°	3,58

Sonuç olarak, literatür çalışmalarına en yakın bant aralığı enerjisi değeri 3,92 eV değerine sahip olan 8 mitorr basınçta ve 450° sıcaklıkta büyütülen ince film olurken en düşük bant aralığı enerjisi 3,58 eV değerine sahip olan 5 mitorr basınçta ve 450° sıcaklıkta büyütülen ince film olmaktadır.

SONUÇ ve TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada, RF Magnetron Saçırma (RF-Sputter) tekniği kullanılarak cam ve p-tipi silisyum alttaşlar üzerine Ga_2O_3 ince filmleri farklı büyütme koşulları uygulanarak büyütüldü. Araştırmada, bu çeşitli büyütme koşullarının kullanılmasının temel nedeni büyütme koşullarının ince filmin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkisini incelemektir. Bunun yanında farklı alttaş kullanılmasının nedeni kullanılan alttaşın filmin kristal yapısı ve bazı fiziksel özellikleri üzerine etkisini incelemektir. Aşağıdaki Tablo 16'da XRD ölçümünden elde edilen filmin çeşitli yapısal özellikleri verilmektedir.

Tablo 16. Üretilen ince filmlerin bazı yapısal parametreleri

Basınç - Uygulanan büyütme sıcaklığı - Alttaş	Miller indisi (hkl)	Gözlenen 2 θ (°)	Literatür 2 θ (°)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Örgü sabitleri (Å)
5 mtorr -450° – Cam	(400)	30,05	30,05	6,5	a=12,230
	(002)	31,73	31,74		b=3,040
	(-204)	64,17	64,17		c=5,800
5 mtorr -450° – p- Si	(400)	30,05	30,05	9,7	a=12,230
	(002)	31,73	31,74		b=3,040
	(-204)	64,17	64,17		c=5,800
6 mtorr -150° – p- Si	(400)	30,11	30,05	9,9	a=12,214
	(002)	31,76	31,74		b=3,037
	(-204)	64,20	64,17		c=5,798
6 mtorr -300° – p- Si	(400)	30,05	30,05	7,2	a=12,230
	(002)	31,73	31,74		b=3,040
	(-204)	64,17	64,17		c=5,800
6 mtorr -450° – p- Si	(400)	30,05	30,05	7,8	a=12,230
	(002)	31,73	31,74		b=3,040
	(-204)	64,17	64,17		c=5,800
8 mtorr -150° – p- Si	(400)	30,05	30,05	7,8	a=12,230
	(002)	31,73	31,74		b=3,040
	(-204)	64,17	64,17		c=5,800
8 mtorr -300° – p- Si	(400)	30,11	30,05	13	a=12,214
	(002)	31,76	31,74		b=3,037
	(-204)	64,20	64,17		c=5,798
8 mtorr -450° – p- Si	(400)	30,11	30,05	12,7	a=12,214
	(002)	31,76	31,74		b=3,037
	(-204)	64,20	64,17		c=5,798
10 mtorr -150° – p- Si	(400)	30,10	30,05	10,6	a=12,208
	(002)	32,00	31,74		b=3,031
	(-204)	64,79	64,17		c=5,751
10 mtorr -300° – p- Si	(400)	30,10	30,05	12,8	a=12,208
	(002)	32,00	31,74		b=3,031
	(-204)	64,79	64,17		c=5,751
10 mtorr -450° – p- Si	(400)	30,11	30,05	12,7	a=12,214
	(002)	31,76	31,74		b=3,037
	(-204)	64,20	64,17		c=5,798

Farklı RF güçleri ve sıcaklık şartlarında cam üzerine kaplanan Ga_2O_3 ince filmlerinin X-ışını kırınımı ölçüm analiz sonuçları analiz edilecek olursa, Tablo 16'da verildiği gibi $\sim 30,05^\circ$, $31,74^\circ$ ve $64,17^\circ$ 'ler de karakteristik pikler gözlemlenmiştir. Bu pikler Ga_2O_3 malzemesinin monoklinik kristal yapısına ve (400), (002) ve (-204) yönelimine sahip karakteristik pikleridir (PDF kodu: 98-016-6198). İnce filmin örgü parametreleri $a = 12,336$, $b = 3,078$ ve $c = 5,864$ Å olmaktadır. Ayrıca diğer yapısal parametrelerde PDF kodu sayesinde elde edilmiştir. Ölçülen bazı pik değerleri literatürdeki piklerden yaklaşık $0,1^\circ$ kaymıştır. Bunun nedeni büyütme sırasında numuneye bulaşan kirlilikler olarak değerlendirilebilir. Elde edilen diğer cam alttaşlar üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinden alınan XRD ölçümlerinde pik gözlenmemiştir. Tümsek davranış gösteren spektrum elde edilmiştir. Bu bulgu malzemenin kristal yapıda değil amorf yapıda büyüdüğünü göstermektedir. Bu tümseklerin şiddet ve genişlikleri az miktarda farklıdır. Bu ise farklı sıcaklık ve RF gücüyle büyüyen ince filmlerin yapısının çok az miktarda değiştiği şeklinde değerlendirilebilir. Cam alttaş üzerine Ga_2O_3 ince filmlerinin örgü sabitleri $a = 12,230$, $b = 3,040$ ve $c = 5,800$ Å olarak elde edilmiştir.

p-tipi silisyum üzerine farklı RF gücü ve sıcaklık değerleri için büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin XRD ölçüm sonucunda, yaklaşık $30,05^\circ$, $31,74^\circ$ ve $64,17^\circ$ değerlerinde pikler vermiştir. Bu pikler yaygın olarak monoklinik Ga_2O_3 (400), (002) ve (-204) düzlemlerinin karakteristik pikleridir (98-008-3645). Pikler kayma yaparak $30,11^\circ$, $31,76^\circ$ ve $64,20^\circ$ değerlerine değişim göstermiştir. Bu kayma miktarı, büyüme esnasındaki kirlilik ve safsızlıklardan kaynaklanabilir. Ayrıca, $\sim 35,59^\circ$ ve $44,16^\circ$ 'de pikler gözlenmiş ve bu piklerin kübik Ga_2O_3 malzemesinin (311) ve (400) yönelimine karşılık gelen pikler olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmıştır (R. Gopal et al. 2018). Uygulanan 8 miltorr basınç ve 300° sıcaklık ortamında p-tipi silisyum üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filminin kristal tanecik boyutu 130,62 nm iken 6 miltorr basınç ve 300° sıcaklıkta kristal tanecik boyutu 72,93 nm olmakta neredeyse yarısına kadar azalmış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, basıncın değiştirilmesiyle ince filmin yapısında da değişiklik yapılabileceği düşüncesini desteklemektedir. p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin örgü sabitleri $a = 12,214$, $b = 3,037$ ve $c = 5,798$ Å olarak elde edilmiştir.

SEM ölçümü de incelenen malzeme ile ilgili önemli bilgiler vermektedir. Farklı basınç değerlerinde cam üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmler için şu sonuçlar çıkarılmaktadır. Bütün uygulanan basınç değerlerinde periyodik ve tanecikli yapı açıkça görülmektedir. 8 ve 10 miltorr basınçtaki büyümelerde topaklanma şeklinde büyümeler ortaya çıkmaktadır ve Ga_2O_3 ince filminin gözenekli yapısı diğerlerine kıyasla daha net olarak gözükmektedir. SEM

görüntüleri çekilen alanlar için Ga_2O_3 ince filmlerinin büyümesinin hemen hemen homojen oldukları söylenebilmektedir. Yapılar benzer özellik göstermektedir ancak 8 ve 10 militorr basınçlarındaki büyütmelelerde düzgün şekilli kristallere ve iyi tanımlanmış sınırlara sahip bir yüzey elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmi 150° sıcaklık değerindeki SEM analizinde yapı topaklı ve kristal boyutu belirgin tane sınırları düzgündür ancak sıcaklık arttıkça kristal yapının küçüldüğü ve filmin kalitesinin bozulduğu gözlemlenmektedir. Partikül büyüklüğü alttaş sıcaklığı ile değişmektedir. Sonuçta; basıncın değişmesi ile Ga_2O_3 ince filmlerinin yapısal özelliklerinin de değişebileceği SEM analizinden görülmektedir.

p-tipi silisyum alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin SEM analizleri değerlendirildiğinde, 8 militorr basınçta topaklanma şeklindeki büyüme daha belirgindir. Kristal sınırlar belirgin ve çizgisel kusurlar gözlemlenmemektedir. Saçtırma gücünün artması tane boyutunun önce artmasına sonra da azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle 5 militorr basınçta büyütülen ince filmin tane boyutunun küçüldüğünü görülmektedir. Sıcaklık farkına baktığımızda ise yapı düşük sıcaklıkta daha belirgin topaklanma daha fazla gözlemlenmiştir. Tane büyüklüğü düşük sıcaklıkta daha fazladır. Sıcaklık arttıkça gözenekli yapı ortaya çıkmaktadır fakat boyut alttaş sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu eğilimin oksit malzemeler için genel bir durumdur (Battu et al. 2018). Sonuç olarak; elde edilen morfolojik yapıların, XRD analizleri ile uyum içerisinde.

Atomik kuvvet mikroskobu sonuçları malzemenin morfolojik ve yüzeysel özellikleri üzerine önemli bilgiler vermektedir. AFM sonuçları analiz edilerek, Ga_2O_3 ince filmleri için pürüzlülük değerleri açısından uygulanan büyütme şartları arasındaki en uygun değerler bulunmuştur. Cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için uyguladığımız büyütme koşulları altında mümkün olan en düşük ortalama pürüzlülüğe sahip ince film, 50 Watt RF gücü, 10 militorr basınç ve 450° sıcaklık şartlarında büyütülen filmde elde edilmiştir. Cam alttaş üzerine Ga_2O_3 ince filmlerinden en yüksek pürüzlülüğe sahip film ise 50 Watt RF gücü, 8 militorr basınç ve 450° sıcaklık şartlarında büyütülen ince filmde elde edilmiştir. Buna ek olarak, 150° , 300° ve 450° sıcaklıkta 8 militorr basınçta büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin sıcaklığa bağlı AFM analizleri sonucunda ise en yüksek pürüzlülük değeri 150° sıcaklıktaki, en düşük pürüzlülük değeri ise 300° sıcaklıktaki ince filmde elde edilmiştir. p-tipi silisyum alt taş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinden en yüksek pürüzlülüğe sahip ince film, 10 militorr basınç ve 450° sıcaklık şartlarında büyütülen filmde elde edilirken, en düşük pürüzlülük değeri 6 militorr basınç ve 450° sıcaklıkta büyütülen ince filmde elde edilmiştir. Literatürde çeşitli yöntemler kullanılarak büyütülen Ga_2O_3 malzemenin yüzey morfolojisi

üzerine çalışmalar vardır. M. Li ve arkadaşları RF magnetron saçtırma ile SiC alttaş üzerine Ga_2O_3 büyütmüşlerdir. AFM ölçümünü tavlama öncesi ve sonra almışlardır. Bunun sonucunda da tavlama öncesinde filmin yüzeyi ada şeklinde ve tane boyutu küçüktür. Belirgin tane ara yüzü vardır. 800° sıcaklıkta tavlama işleminden sonra tane boyutu artmakta ve boşlukların sayısı termal difüzyon ve tane büyüklüğünün artması nedeniyle azaldığı gözlemlenmiştir (M. Li et al. 2019). J. Castillo ve arkadaşları da termal oksidasyon ve RF magnetron püskürtme ile iki farklı yöntemle Ga_2O_3 ince filmi büyütmüşlerdir. Yapılan çalışma da AFM analizleri sonucunda RF saçtırma yönteminin daha yüksek kimyasal bir saflık ve kristalizasyon kalitesi sahip düzgün yüzey olduğu gözlemlenmiştir (J. Castillo et al. 2019). Sonuçta, hem filmin büyütme koşulları hem de kullanılan alttaş malzemesi, filmin yüzeysel parametrelerinden biri olan pürüzlülük değerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Büyütülen ince filmlerin optik özelliklerinin araştırılmasında, soğurma ve yansıma ölçümleri de alınmış ve analiz edilmiştir. Tablo 17’de farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerin optik bant aralığı enerjileri aşağıda verilmektedir.

Tablo 17. Farklı basınç ve sıcaklık değerlerinde cam alttaş üzerine büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin optik bant aralığı enerjileri

Uygulanan RF gücü (Watt)	Büyütme basıncı	Sıcaklık ($^\circ$)	Kullanılan alt taş	Optik bant aralığı enerjisi (eV)
50	6 militorr	150	Cam	3,80
		300		3,68
		450		3,85
50	8 militorr	150	Cam	3,92
		300		3,90
		450		3,93
50	10 militorr	150	Cam	3,76
		300		3,84
		450		3,89
100	5 militorr	450	Cam	3,58

Cam alttaş üzerine farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde büyütülen Ga_2O_3 ince filmleri için optik bant aralığı enerjileri 8 militorr basınç altında birbirlerinde çok yakındır. En yüksek bant aralığı 8 militorr basınçta elde edilirken, en düşük optik bant aralığı 5 militorr basınç altında elde edilmiştir. Farklı basınçlarda büyütülen Ga_2O_3 ince filmlerinin optik bant aralığı enerjileri de birbirinden farklı çıkmaktadır. Bu değerler, daha önce literatürdeki çalışmalardan daha küçüktür (Sun Jian-xu et al. 2017; S. Yadav et al. 2020). Sonuç olarak, basınç değerleri optoelektronik cihazların tasarımı için çok önemli olan Ga_2O_3 ince filminin optik bant

aralığını değerlerini değiştirmiştir. Malzemenin optik özelliklerini araştırmak için de soğurma ölçümleri de alınarak analiz edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Al-Kuhaili, M. F., Durani, S. M. A. and Khawaja, E. E., 2003. Optical properties of gallium oxide films deposited by electron-beam evaporation, *Applied Physics Letters*, 83(22), 4533-4535.
- and C. V. Ramana, 2019 *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 8 (7)
- Baban, C., Toyoda, Y. and Ogita, M., 2005. Oxygen sensing at high temperatures using Ga₂O₃ films, *Thin Solid Films*, 484, 369-373.
- By Bahriyah Alhalaili, Howard Mao, Saif Islam, 2017. Ga₂O₃ Nanowire synthesis and device applications, Synthesis and Applications
- Chason, E., Jadhav, N., Pei, F., Buchovecky, E. and Bower, A. 2013. Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms. *Progress in Surface Science*, 88, 103-131.
- Doerner, M. F. and Nix, W. D. 1988. Stresses and deformation processes in thin films on substrates. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 14, 225-268.
- Fleischer, M. and Meixner, H., 1992. Characterization and crystallite growth of semiconducting high-temperature stable Ga₂O₃ thin films, *Journal of Materials Science Letters*, 11, 1728-1731.
- GD Magnuson, C. C. 1963. Sputtering Yields of Single Crystals Bombarded by 1 to 10 keV Ar⁺ Ions. *Journal of Applied Physics*, 3267
- Hao, J., Lou, Z., Renaud, I. and Cocivera M., 2004. Electroluminescence of europium doped gallium oxide thin films, *Thin Solid Films*, 467, 182185.
- Ji, Z., Du, J., Fan, J. and Wang, W., 2006. Gallium oxide films for filter and solar-blind UV detector, *Optical Materials*, 28, 415-417.
- Keleşoğlu, E. 2011. Sert kaplamalar, Üretim Teknikleri ve özellikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Liu, Z., Yamazaki, T., Shen, Y., Kikuta, T., Nakatani, N., Li, Y., O₂ and CO sensing of Ga₂O₃ multiple nanowire gas sensors. *Sensors and Actuators B* 2008; 129: 666-670.
- Ling-Xuan Qian, Ze-han WU, Yi-Yu Zhang, P. T. Lai, Xing-Zhao and Yan-Rong Li, 2017. Ultrahigh-Responsivity, Rapid-Recovery, Solar-Blind Photodetector Based on Highly Nonstoichiometric Amorphous Gallium Oxide, Chengdu 610054, China
- Litimein, F., Rached, D., Khenata, R. and Baltache, H., 2009. FPLAPW study of the structural, electronic and optical properties of Ga₂O₃: Monoclinic and hexagonal phases, *Journals of Alloys and Compounds*, 488(1), 148-156.
- Machon, D., McMillan, P. F., Xu, B. and Dong, J., 2006. High pressure study of the β-to-α transition in Ga₂O₃, *Physical Review B*, 73, 094125(9).
- Marie, P., Portier, X. and Cardin, J., 2008. Growth and characterization of gallium oxide thin films by radiofrequency magnetron sputtering, *Physica Status Solidi (a)*, 205, 1943-1946.
- Miyata, T., Nakatani, T. and Minami, T., 2000. Manganese-activated gallium oxide electroluminescent phosphor thin films prepared using various deposition methods, *Thin Solid Films*, 373, 145-149.
- Mizushima, I., Tang, P. T., Hansen, H. N. And Somers, M. A. J. 2006. Residual stress in Ni-W electrodeposits. *Electrochimica Acta*, 51,6128-6134.
- Moon, M. W., Chung, J. W., Lee, K. R., Oh, K. H., Wang, R. and Evans, A. G. 2002. An experimental study of the influence of imperfections on the buckling of compressed thin films. *Acta Materialia*, 50, 1219-1227.

- Nanthakishore Makeswaran, Anil K. Battu, Roy Swadippta, Felicia S. Manciu, Ogita, M., Higo, K., Nakanishi, Y. and Hatanaka, Y., 2001. Ga₂O₃ thin film for oxygen sensor at high temperature, *Applied Surface Science*, 175-176, 721-725.
- Ogita, M., Saika, N., Nakanishi, Y. and Hatanaka, Y., 1999. Ga₂O₃ thin films for high temperature gas sensors, *Applied Surface Science*, 142, 188-191.
- Ortiz, A., Alonso, J. C., Andrade, E. and Urbiola, C., 2001. Structural and Optical Characteristics of Gallium Oxide Thin Films Deposited by Ultrasonic Spray Pyrolysis, *Journal of The Electrochemical Society*, 148(2), F26-F29.
- Oshima, T., Okuno, T., Arai, N., Suzuki, N., Hino, H. and Fujita, S., 2009. Flame Detection by a β -Ga₂O₃-Based Sensor, *Japanese Journal of Applied Physics*, 48, 011605-011611.
- Sneed, B. T., Young, A. P. and Tsung, C. -K. 2015. Building up strain in colloidal metal nanoparticle catalysts. *Nanoscale*, 7, 12248-12265.
- Stenzel, O. 2005. *The Physics of Thin Film Optical Spectra*, Springer.
- Thornton, J. A. and Hoffman, D. W. 1989. Stress-related effects in thin films. *Thin Solid Films*, 171, 5-31.
- Wang, Y.W., Liang, C.H., Wang, G.Z., Gao, T., Wang, S.X., Fan, J.C., Zhang, L.D., Preparation and characterization of ordered semiconductor CdO nanowire arrays. *Journal of Materials Science Letters* 2001; 20: 1687-1689.
- Zinkevich, M. and Aldinger, F., 2004. Thermodynamic Assessment of the Gallium-Oxygen System, *Journal of the American Ceramic Society*, 87(4), 683-691.
- Zoltan, H., Jozsef, M., Gabor, K., Ferenc, R., Peter, D., Roy, C.H., Kuperberg, J.M., Role of oxygen vacancy defect states in the ntype conduction of beta-Ga₂O₃. *Journal of Applied Physics* 1999; 86: 37923796.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Hülya Akçay
Doğum tarihi:	1 Mart 1992
Doğum Yeri:	Erzurum
Uyruğu:	T.C.
Adres:	Şükrüpaşa Mah. Meydan Bulvarı Onurkent Sitesi Kat:4 No:21
Tel:	05395902518
E-mail:	hlyakcy92@gmail.com
Eğitim	
Lise:	Şükrüpaşa Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Katıhal Fiziği Anabilim Dalı
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	
Almanca:	
Rusça:	
Diğer	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1.	
2.	