



**RF MANYETİK SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN $ZnGa_2O_4$ İNCE
FİLMLEİN YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Kübra KARAKAYA KONUKÇU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FOTONİK BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kübra KARAKAYA KONUKÇU

31/07/2024

RF MANYETİK SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN $ZnGa_2O_4$ İNCE FİMLERİN YAPISAL, MORFOLOJİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kübra KARAKAYA KONUKÇU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Bu çalışmada kristal kalitesi yüksek, iyi optiksel özelliklere sahip ve düzgün morfolojide $ZnGa_2O_4$ (çinko gallat) ince filmlerin üretimi hedeflendi. İnce filmler RF manyetik saçtırma yöntemi kullanılarak korning cam alttaşlar üzerine; farklı güç değerlerinde, 400°C alttaş sıcaklığında büyütüldü. Kullanılan $ZnGa_2O_4$ target 2 inç çap, 0,250 inç kalınlık, %99.99 saflık oranı ve bakır plaka 2 inç çap, 0,125 inç kalınlık özelliklerine sahipti. 100W, 150W ve 200W güç değerlerinde büyütülen numuneler sırasıyla S1, S2 ve S3 olarak adlandırıldı. Büyütülen ince filmlerin optik özellikleri UV-VIS (Mor Ötesi ve Görünür Bölge), kristal yapısı XRD (X-Işını Kırınımı) ve yüzey morfolojisi AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) cihazları ile belirlendi. İnce filmlerin bant enerjisi aralığı UV-VIS karakterizasyon verileri kullanılarak Origin Yazılımında Tauc Plot yöntemi kullanılarak belirlendi ve literatürde belirtilen 4,5-5,2 eV değer aralığında olduğu görüldü. Filmlerin optik geçirgenlik değerleri S1, S2 ve S3 numuneleri için sırasıyla %91,004, %91,097, %89,323 olarak belirlendi. Üretilen $ZnGa_2O_4$ ince filmlerinin optik geçirgenlik özelliklerinin literatürdeki değerlere uygun olduğu görüldü. Dalga boyları ise sırasıyla 419,76 nm, 377,63 nm ve 351,80 nm elde edildi. S3 kodlu numunenin en kısa dalga boyuna sahip olduğu görüldü. Bu da onun en yüksek enerjiye sahip fotonları içerdiğini gösterdi. S3 numunesi için yüksek enerji geçişlerine sahip olduğu, dolayısıyla bu numunelerin UV bölgede aktif olduğu görüldü. XRD verileri incelendiğinde S3 kodlu numunemizde ana tepe (220) gözlemlendi. Bu tepe özellikle spinel yapısında karakteristik bir piktir ve bu tepenin belirginliği ile malzemenin düzenli kristal yapıda olduğu belirlendi. AFM analizlerine göre RF gücünün artışı ile RMS değerlerinde belirgin bir artış gözlemlendi. Bu artışın, film yüzeyinde daha fazla düzensizlik ve pürüzlülüğe yol açtığı, bu durumun optik geçirgenliği olumsuz etkilediği bulundu. Yapılan araştırmanın yüksek performanslı derin UV bölge fotodetektörlere ve diğer birçok teknolojik çalışmaya katkı sağlaması hedeflendi.

Bilim Kodu : 20226
Anahtar Kelimeler : RF manyetik saçtırma, $ZnGa_2O_4$, ince film, UV-VIS, XRD, AFM
Sayfa Adedi : 51
Danışman : Doç. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ

INVESTIGATION OF STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND OPTICAL
PROPERTIES OF ZnGa₂O₄ THIN FILMS PRODUCED BY RF MAGNETRON
SPUTTERING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Kübra KARAKAYA KONUKÇU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

This study aimed to produce ZnGa₂O₄ (zinc gallate) thin films with high crystal quality, excellent optical properties, and smooth morphology. The thin films were deposited on corning glass substrates using RF magnetron sputtering at different power values and a substrate temperature of 400°C. The ZnGa₂O₄ target used had a diameter of 2 inches, a thickness of 0.250 inches, and a purity of 99.99%, while the copper backing plate had a diameter of 2 inches and a thickness of 0.125 inches. The films deposited at 100W, 150W, and 200W power values were designated as S1, S2, and S3, respectively. The optical properties of the films were characterized using UV-VIS (Ultraviolet-Visible) spectroscopy, the crystal structure was analyzed using X-Ray Diffraction (XRD), and the surface morphology was examined using Atomic Force Microscopy (AFM). The bandgap energies of the films were determined using the Tauc Plot method in Origin Software, showing values within the literature-reported range of 4.5-5.2 eV. The optical transmittance values of the films were found to be 91.004%, 91.097%, and 89.323% for S1, S2, and S3, respectively. These values were consistent with those reported in the literature, indicating that the optical transmittance properties of the produced ZnGa₂O₄ thin films were in line with previous findings. The wavelengths of the films were measured as 419,76 nm, 377,63 nm, and 351,80 nm, with the S3 sample showing the shortest wavelength. This suggests that the S3 sample contains the highest energy photons. The S3 sample exhibited high-energy transitions, indicating that it is active in the UV region. XRD analysis revealed a prominent (220) peak in the S3 sample, which is characteristic of the spinel structure and confirms that the material has a well-ordered crystal structure. AFM analysis showed a significant increase in RMS (Root Mean Square) values with increasing RF power, indicating increased surface roughness and irregularity, which negatively affected the optical transmittance. The study aims to contribute to high-performance deep UV photodetectors and other technological applications.

Science Code : 20226
Key Words : RF magnetic sputterings, ZnGa₂O₄, thin film, UV-VIS, XRD, AFM
Page Number : 51
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ

TEŞEKKÜR

Tez projemin hazırlanmasında ve tamamlanmasında emeği geçen, bilgi ve deneyimlerini paylaşmayı esirgemeyen, çalışmamın titizlikle yürütülmesi ve sonuçlandırılması için her türlü desteği sağlayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ 'e sonsuz teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde tez çalışmalarımızı gerekleştirmemizde desteklerini esirgemeyen, çok kıymetli katkıları olan, değerli hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e sonsuz teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu süreçte benimle birlikte araştırıp, öğrenip yardımını ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Bager KONUKÇU'ya desteklerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Öđrenim hayatım boyunca daima destekçim olan canım ailem; annem Fatma KARAKAYA, babam Bilal KARAKAYA, abim Harun KARAKAYA ve ablam Esra ÖZTEK'e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK ALTYAPI VE KURAMSAL BİLGİLER	5
2.1. Çinko Gallat ($ZnGa_2O_4$).....	5
2.1.1. $ZnGa_2O_4$ kristal yapısı.....	6
2.2. İnce Film Üretim Yöntemleri.....	7
2.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD).....	8
2.3.1. Saçtırma yöntemi	9
2.3.2. DC saçtırma	10
2.3.3. Reaktif saçtırma	10
2.3.4. RF manyetik saçtırma.....	10
2.4. $ZnGa_2O_4$ İnce Film Üretilmesi	12
3. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ	15
3.1. Mor Ötesi ve Görünür Bölge (UV-VIS) Optik Geçirim Spektroskopisi	15
3.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Tekniği	17
3.3 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	21

	Sayfa
4. DENEYSEL VERİLER VE TARTIŞMALAR	25
4.1. Mor Ötesi ve Görünür Bölge (UV-VIS) Verileri ve Tartışmaları.....	25
4.1.1. Origin programında Tauc Plot ile ZnGa ₂ O ₄ Optik Bandgap hesabı.....	26
4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Verileri ve Tartışmaları.....	31
4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Verileri ve Tartışmaları	32
5. SONUÇLAR	41
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ZnGa ₂ O ₄ ince film büyütülürken kullanılan parametre değerleri.....	12
Çizelge 4.1. ZnGa ₂ O ₄ JCPDS Kart No: 00-038-1240 nolu dosyada ilgili değerlere karşılık gelen standart malzemenin kafes sabiti değerleri.....	32
Çizelge 4.2. Büyütülen ince filmlerin 3x3 µm ² ve 5x5 µm ² yüzey alanında taranan farklı RF güç değerlerine göre RMS değerleri.....	40



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. $ZnGa_2O_4$ 'ün kübik spinel yapısı.....	6
Şekil 2.2. İnce film üretim yöntemleri.....	7
Şekil 2.3. Manyetik saçtırma yönteminin şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.1. UV-VIS spektrometresinin çalışma prensibi.....	15
Şekil 3.2. Bragg kırınım yasası şematik gösterimi	17
Şekil 3.3. XRD'nin temel prensibinin gösterimi	18
Şekil 3.4. 2θ sapmasına göre faz kaymasının yapıcı (soldaki şekil) veya yıkıcı (sağdaki şekil) girişimler neden olduğunu gösteren şematik gösterim.....	19
Şekil 3.5. AFM cihazı bileşenleri ve manivela sivri ucu	22
Şekil 4.1. $ZnGa_2O_4$ ince film UV-VIS dalga boyu-yüzde geçirgenlik grafiği.....	25
Şekil 4.2. Origin Programında Tauc Plot yöntemi ile "S1 - $ZnGa_2O_4$ 100 W 400 derece" numunesinin bant gap hesabı.....	29
Şekil 4.3. Origin Programında Tauc Plot yöntemi ile "S2 $ZnGa_2O_4$ 150 W 400 derece" numunesinin bant gap hesabı.....	29
Şekil 4.4. Origin Programında Tauc Plot yöntemi ile "S3 - $ZnGa_2O_4$ 200 W 400 derece" numunesinin bant gap hesabı.....	30
Şekil 4.5. S1 kodlu $ZnGa_2O_4$ ince film numunesine ait XRD kırınım deseni (X-ekseni pik noktası 2θ değeri: $37,28^\circ$).....	31
Şekil 4.6. S2 kodlu $ZnGa_2O_4$ ince film numunesine ait XRD kırınım deseni (X-ekseni pik noktası 2θ değeri: $35,71^\circ$).....	31
Şekil 4.7. S3 kodlu $ZnGa_2O_4$ ince film numunesine ait XRD kırınım deseni (X-ekseni pik noktası 2θ değeri: $32,94^\circ$).....	32
Şekil 4.8. 100 W RF gücü ile kaplanan S1 Kodlu $ZnGa_2O_4$ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı $3 \times 3 \mu m^2$	34
Şekil 4.9. 100 W RF gücü ile kaplanan S1 Kodlu $ZnGa_2O_4$ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı $5 \times 5 \mu m^2$	35
Şekil 4.10. 150 W RF gücü ile kaplanan S2 Kodlu $ZnGa_2O_4$ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı $3 \times 3 \mu m^2$	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. 150 W RF gücü ile kaplanan S2 Kodlu ZnGa ₂ O ₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 5x5 µm ²	37
Şekil 4.12. 200 W RF gücü ile kaplanan S3 Kodlu ZnGa ₂ O ₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 3x3 µm ²	38
Şekil 4.13. 200 W RF gücü ile kaplanan S3 Kodlu ZnGa ₂ O ₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 5x5 µm ²	39



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. (a) Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki NVTS-500 saçırma sistemi (b,c) Çinko gallat ($ZnGa_2O_4$) Target	13
Resim 2.2. RF manyetik saçırma yöntemi ile büyütülen, analizlere hazır $ZnGa_2O_4$ ince film numuneleri	14
Resim 3.1. UV-VIS spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S)	16
Resim 3.2. XRD ölçümleri gerçekleştirilen $ZnGa_2O_4$ ince film numuneleri.....	20
Resim 3.3. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan APD 2000 PRO XRD cihazı	21
Resim 3.4. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan hpAFM cihazı.....	22

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

eV	Elektronvolt
P_{Argon}	Sistem (Saçtırma/Proses) basıncı
mTorr	Millitorr; bir basınç ölçü birimidir
λ	Dalgaboyu
θ	X-ışını demetinin düzleme gelme açısı
d_{hkl}	Kristaldeki atomların düzlemleri arasındaki mesafe
μm	Mikrometre (10^{-6} m)
nm	Nanometre (10^{-9} m)
Å	Angstrom (10^{-10} m)

Kısaltmalar

Açıklamalar

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AZO	Alüminyum katkılı çinko oksit
FWHM (β)	Yarı maksimumda tam genişlik
Ga	Galyum
ITO	İndiyum kalay oksit
LED	Işık yayan diyot
O	Oksijen
PLD	Darbeli lazer biriktirme
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
TCO	Saydam ve iletken oksit
UV-VIS	Mor ötesi ve görünür bölge
XRD	X-ışını kırınımı
Zn	Çinko
ZnGa₂O₄	Çinko gallat
ZnO	Çinko oksit

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojiye dayalı cihazların sürekli geliştirilmesi, malzeme üretim teknolojilerinin gelişmesine, daha da önem kazanmasına ve bilimin bu konuda hızla yol kat etmesine olanak tanımıştır. Malzeme üretim teknolojisinde ince film formatındaki materyaller kullanılması, teknolojik araçların elektriksel, optik ve mekanik gibi temel karakteristik özelliklerinin yüksek oranlarda iyileştirilmesine imkân tanır. Elektriksel özellikleri dolayısıyla süperiletken/ yarıiletken cihazlarda, devre elemanları yapımında, kimyasal özellikleri sayesinde korozyona karşı koruma gerektiren alanlarda, daha geniş kapsamda incelendiğinde çeşitli uygulamalarda ince film kullanımı ile karşılaşılmaktadır [1, 2]. İnce film kullanım alanı genişliği ve üretme yöntemlerindeki hızlı değişim dolayısıyla yeni araştırmalara ve geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında teknolojik cihazların üretiminde kullanımına katkı sağlamak amacıyla ince filmlerin yapısal, optik ve morfolojik özellikleri üzerine araştırmalar, deneyler ve analizler yapılmıştır.

Şeffaf iletken oksit (TCO) malzemeler düşük özdirenç özelliğinin vermiş olduğu avantajlar sayesinde, birçok alanda kullanılır ve birçok teknolojik uygulama alanında araştırmalara konu olurlar. Bu gibi avantajları sayesinde, uzaktan cihaz yönetimi, bilgiye kolay erişilebilmesi vb. birçok teknolojik uygulamada kullanılırlar. Fotovoltaik (PV) güneş hücresi uygulamalarında, dedektörler uygulamalarında, dokunmatik ekanlarda, ince panel ekranlarda, ince film transistörlerde, ışık yayan diyotlarda (LED-Light Emitting Diode) aktif katman olarak kullanım alanları bulmuşlardır.

Malzeme üretim teknolojinde TCO malzemesi olarak birçok kullanım alanı bulunan İndiyum kalay oksit (ITO–Indium Tin Oxide) malzemesi de uygulama genişliği, kimyasal kararlılığı, farklı üretim teknikleri ile üretilebilmesi, yüksek optik geçirgenliği ve iyi elektriksel iletkenliği dolayısıyla tercih edilen TCO malzemelerindendir. Ancak ITO malzemesinin belirtilen avantajlarının yanı sıra, indiyum kaynaklarında ki yetersizlik dolayısıyla ve yüksek verimlilikte aygıtların üretilmesine olan ihtiyaç, bu malzemenin fiyatının yükselmesine sebep olmuştur. Bunun yanı sıra ITO'nun mekanik esnekliğinin yüksek olmaması, toksik bir element olması, hidrojen plazma altındaki kararsızlığı sebebiyle, araştırmalar indiyumun kullanımının azaltılması ve alternatif TCO ince filmler geliştirilmesi konusunda yönelime sebep olmuştur [2].

Dolayısıyla araştırılan malzemeler arasından çinko oksit (ZnO) malzemesinin, geniş bant aralığı (3,1-3,5 eV aralığında), düşük direnci ($5 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$), zehirli etkilerinin olmaması, üretim rezerv 'inde sorun yaşanmaması ve maliyetinin yüksek olmaması ZnO tabanlı ince filmlerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapılması konusunda yönelimi arttırmıştır. ZnO malzemesinin avantajlarının yanı sıra, metal oksit malzemelerin tek başına gösterdiği iletkenliğin yeterli olmadığı yapılan araştırmalarca bilinmektedir. Saf ZnO malzemeleri yüksek öz direnç değerine sahiptirler. Ancak Al, Ga vb. elementler ile katkılanmaları sonucu iletkenlik kazanmaktadırlar [3]. ZnO'nun özellikleri, biriktirme ve biriktirme sonrası işlem koşullarına da bağlıdır; çünkü bu özellikler, seçilen katkı elemanının doğası, biriktirme işlemi sırasında oksijenin adsorpsiyonu, film biriktirme sıcaklığı ve biriktirme sonrası tavlama atmosferi gibi koşullarla önemli ölçüde değişir. Malzemelerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri sonradan eklenen katkı maddeleri sayesinde iyileştirilebilmektedir [4-7].

Bu çalışmamızda birçok literatür çalışmasına konu olan ZnO malzemesinden farklı olarak yarı tek kristalli - P tipi bir yarıiletken olan galyum (Ga) katkılı çinko oksit (ZnO) malzemesinin morfolojik, yapısal ve optik özellikleri laboratuvar ortamında yapılan testlerle araştırılmıştır. İyi elektriksel iletkenliği, yüksek optik geçirgenliği, toksik olmaması ve düşük maliyetli olması nedenleriyle, çinko gallat (ZnGa_2O_4) ince filmlerin teknolojik cihazların üretimine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Çinko gallat (ZnGa_2O_4) malzemesi farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Sol-jel [8], darbeli lazer biriktirme [9], metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) [10] ve RF manyetik alanda sıçratma yöntemi bu yöntemlerden bazılarıdır. Bu büyütme yöntemleri arasında, RF manyetik saçtırma yöntemi, büyüme parametrelerinin kontrol edilmesinin zorlayıcı olmaması, iyi yapışma ve nispeten daha düşük işletme maliyeti gibi birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, RF manyetik saçtırma yöntemi sıklıkla malzemenin elektriksel ve optik özelliklerini önemli ölçüde bozan polikristalin veya amorf film yapıları da üretebilmektedir [11].

Saçtırma sistemi kullanımı iletken, yalıtken, yarıiletken malzeme biriktirilmesine imkân tanır. İletken malzemeler DC Manyetik Saçtırma ve yalıtken malzemeler RF manyetik saçtırma yöntemi ile biriktirilir. Bu tez çalışmamız kapsamında ZnGa_2O_4 targettan RF Manyetik Saçtırma yöntemi ile farklı koşullarda (saçtırma basıncı, alttaş sıcaklığı vb.)

ZnGa₂O₄ ince filmleri elde edilmiştir. İnce filmlerinin karakterizasyonlarının incelenmesi ve literatür karşılaştırması gelişen teknolojiye katkı sağlamak amacıyla yapılmıştır. Kaplama sırasında alttaş olarak korning cam kullanılmıştır. Kaplama da kullandığımız cihaz Gazi Üniversitesi bünyesinde olan NANOVAK marka NVTS-500 cihazıdır. Üretim parametreleri olan RF gücü, hedef ile altlık arasındaki mesafe, işlem sırasındaki Argon basıncı, alttaş sıcaklığı, biriktirme sıcaklığı ve biriktirme hızı gibi biriktirme parametrelerinin ince filmler üzerindeki etkileri gözlenmiş ve dolayısıyla biriktirme parametrelerinden en uygun yöntemin belirlenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Biriktirme parametreleri ince filmlerin nihai özelliklerini doğrudan etkilemektedir [2].

ZnGa₂O₄ ince film büyütülerek; yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonları araştırılmıştır. Geliştirilen filmlerin özellikleri karakterizasyon cihazları ile belirlenmektedir. Örneklerin optik, yapısal ve morfolojik özelliklerinin anlaşılabilmesi için, mor ötesi ve görünür bölge optik geçirim spektroskopisi (UV-VIS), X-ışınları kırınımı (XRD) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) karakterizasyon cihazları kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında RF manyetik alanda sıçratma yöntemi, UV-VIS, XRD ve AFM karakterizasyon verileri ışığında elde edilen çinko gallat (ZnGa₂O₄) ince filmlerin değişen parametrenin, filmlerin karakteristikleri üzerine olan etkileri anlaşılmiş olup; farklı çalışmalarda kristal kalitesi yüksek çinko gallat (ZnGa₂O₄) ince filmlerin gelişen teknolojiye kullanımı için en uygun karakteristik özelliklerin belirlenmesi hedeflendi.



2. TEORİK ALTYAPI VE KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Çinko Gallat ($ZnGa_2O_4$)

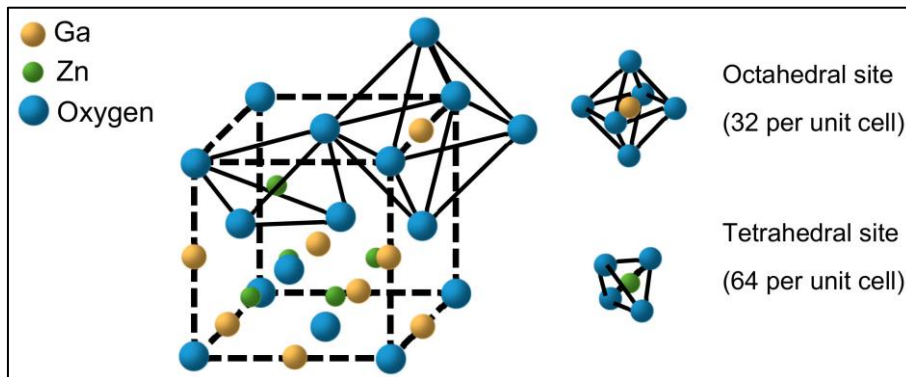
Çinko gallat ($ZnGa_2O_4$) ilk kez 1994 yılında Omata ve arkadaşları tarafından yeni bir UV-şeffaf elektronik iletken olarak keşfedildi. İndiyum kalay oksit (ITO) ve alüminyum katkılı çinko oksit (AZO) gibi diğer şeffaf iletken oksit (TCO) malzemeleriyle karşılaştırıldığında $ZnGa_2O_4$ 'ün daha yüksek iletkenlik, daha iyi stabilite ve daha düşük toksisite gibi çeşitli avantajları olduğu tespit edilmiştir [12]. $ZnGa_2O_4$ ayrıca bu malzemelere kıyasla daha yüksek bir iş fonksiyonuna sahiptir, bu da onu organik güneş pillerindeki delik taşıma katmanlarında kullanım için daha iyi bir aday haline getirmektedir [12]. 4,5-5,2 eV arasında bant aralığı enerjisine sahip olan $ZnGa_2O_4$ yarıiletkeni ilginç bir lüminesans emisyonu sunmaktadır [13]. Bu malzeme, UV'ye yakın bölgede şeffaftır ve UV ışığının veya düşük voltajlı elektronların uyarılması altında güçlü bir mavi lüminesansa sahiptir [14, 15]. Başka bir ifade ile, 280 nm'nin üzerinde bir dalga boyuna sahip ışığa duyarlılığı olmaması nedeniyle özgün fotodedektörlerin üretimi için ideal bir aday olarak düşünülebilir. Yüksek serbest elektron konsantrasyonunda (10^{19} cm^{-3} ortası), yüksek elektron hareketliliğine ($\sim 100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) sahip olan $ZnGa_2O_4$ 'ün elektronik cihazlarda kullanım açısından umut verici bir malzeme haline gelmesinin en önemli sebebi agresif kimyasal ortamlardaki yüksek dirençli ve geniş bir sıcaklık aralığında kararlı olmasıdır [16]. $ZnGa_2O_4$ fotokataliz, optoelektronik ve fotovoltaik gibi çeşitli alanlardaki potansiyel uygulama alanı bulmaktadır [17].

$ZnGa_2O_4$ ince filmleri, radyo frekansı (RF) manyetik saçtırma, kimyasal buhar biriktirme (CVD), sol-jel işleme ve darbeli lazer biriktirme (PLD) gibi çeşitli tekniklerle sentezlenir. Bunlar arasında PLD ve saçtırma, fiziksel buhar biriktirme kategorisine aitken CVD, metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ve sis CVD'den oluşur. MOCVD'nin yüksek biriktirme oranı ve tek kristalli yapılara yol açan geniş alan homojenliği nedeniyle tercih edildiği bulunmuştur [18]. Aslında, RF manyetik saçtırma, büyüme parametrelerinin kolay kontrol edilebilirliği, mükemmel paketleme yoğunluğu, güçlü yapışma, mükemmel film kalınlığı tekdüzeliği ve nispeten düşük işletme maliyeti nedeniyle geniş alan uygulamaları için çeşitli büyütme teknikleri arasında en başarılı olanı olmuştur [18]. Polikristalin veya amorf film yapıları genellikle malzemenin optoelektronik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen RF manyetik saçtırma yöntemiyle elde edilir [2]. Kristalin yönelimi genellikle X-ışını yönlendirme (XRD) modeliyle tanımlanırken, genellikle $ZnGa_2O_4$ 'ün stokiyometrik

özellikleriyle (Zn/Ga oranı) ilişkili olan kristallik, lüminesans yoğunluğuyla orantılıdır. Büyüme koşullarına önemli ölçüde dikkat edilerek daha iyi lüminesans özellikleri elde edilebilir [19]. Bu nedenle substrat türleri, substrat sıcaklığı ve oksijen basıncı gibi bu büyüme koşullarının analizleri gereklidir. Kimyasal buhar biriktirme için öncüllerin konsantrasyonu da biriktirilen filmin stokiometriyle ilgili önemli bir parametredir.

2.1.1. ZnGa₂O₄ kristal yapısı

AB₂O₄ kristallerinin spinel yapısı ilk olarak 1915 yılında Bragg ve Nishikawa tarafından belirlenmiştir [20]. Çeşitli spinel oksitler önemli optoelektronik özelliklere sahiptir çünkü bunlar geniş bant aralığına sahip malzemelerdir [21] ve ZnGa₂O₄ de bunlardan biridir. 'Spinel' adını mavi, mor ve pembenin farklı tonlarında bulunabilen kırmızı bir değerli taştan alır [22]. Spinel yapı malzemesi ZnGa₂O₄, ZnO ve Ga₂O₃'ten oluşur ve bu nedenle ikili bileşik oksit olarak adlandırılır [23]. Spinel kristali kübik simetriktir, Fd3m uzay grubuna sahiptir, oksijen atomları kübik yakın pakette ve katyon atomları yüz merkezli kübik pakettedir. Spinel yapısı iki tiptir: normal spinel ve ters spinel ve ZnGa₂O₄ bu yapıların her iki tipine de sahip olabilir. Normal spinelde, iki değerlikli Zn katyonları oksijen atomlarıyla tetrahedral olarak koordine edilirken, Ga katyonları Şekil 2a'da gösterildiği gibi oktahedral bölgeleri işgal eder [24]. İki değerli Zn katyonları normal spinel kristalindeki tetrahedral bölgelerin sekizde birini doldurur ve üç değerlikli Ga katyonları oktahedral bölgelerin yarısını doldurur. Başka bir spinel yapısı, Zn katyonlarının ve Ga katyonlarının yarısının oktahedral bölgeleri işgal ettiği ve Ga katyonlarının diğer yarısının tetrahedral bölgeleri işgal ettiği ters spinel yapısı olarak bilinir. Ara atomik dağılımlar da sıklıkla meydana gelebilir ve bunlar tersinme derecesi ile karakterize edilir [25]. Normal spinel yapısı ters spinel yapısına tercih edilir. Bu nedenle burada normal spinel yapısına özel önem verilmiştir [26,27]

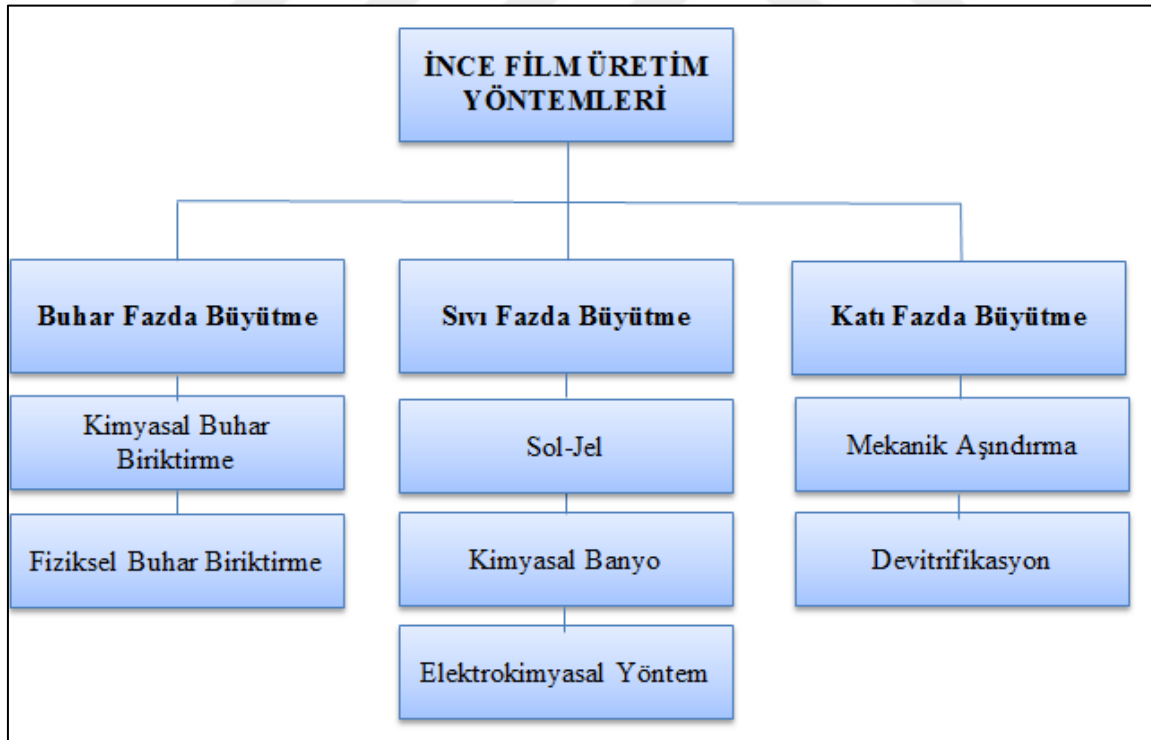


Şekil 2.1. ZnGa₂O₄'ün kübik spinel yapısı [28]

Şekil 2.1’de tetrahedral olarak koordine edilmiş Zn atomları yeşil renkte, oktahedral olarak koordine edilmiş Ga atomları sarı renkte ve oksijen atomları mavi renkte gösterilmiştir.

2.2. İnce Film Üretim Yöntemleri

Malzeme biliminin önemli bir yönü, malzemelerin belirli özellikler verecek şekilde üretildiği kinetik ve termodinamik koşulların kontrolüdür. İnce film biriktirme, birkaç nanometre ile 100 mikrometre arasında çok ince bir malzeme filminin veya çok katmanlar oluşturmak üzere bir kaplamanın üzerine kaplanması teknolojisidir [29]. İnce film üretiminde üretim yöntemi ve üretim parametreleri gibi etkenler ince filmin kristal kalitesi vb. özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Hedeflenen kalitede ince film üretim yöntemi ve parametrelerinin tespiti teknolojinin gelişimine katkı sağlamak amacıyla önem arz etmektedir. Günümüz teknolojisinde elektronik cihazlarda kullanılan aktif ve pasif katmanların çoğunu ince filmler oluşturmaktadır. İnce film biriktirme, yarı iletkenlerin, güneş panellerinin, disk sürücülerinin ve optik cihazların üretiminde kullanılır.



Şekil 2.2. İnce film üretim yöntemleri

2.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

PVD yöntemi kullanılarak ince film üretimi malzemenin, belirli bir kaynaktan buharlaşma yada saçtırma yoluyla fiziksel olarak uzaklaştırıldığı, buhar parçacıklarının enerjisiyle bir vakum veya kısmi vakum yoluyla taşındığı ve geniş bir vakumlu kaplama prosesleri sınıfını kapsar.

Malzemenin vakum odası içerisinde buhar fazına dönüştüğü, ince film halinde bir alt tabaka yüzeyinde yoğunlaştırıldığı, çok yönlü bir kaplama işlemidir. İnce film katmanlarının buhar fazından biriktirilmesi çeşitli tekniklerle gerçekleştirilir. Optik, görüntüleme, dekoratif, tribolojik ve enerji üreten/tasarruf endüstrilerinde uygulama alanı bulan yüksek hacimli kaplama üretiminde yaygın olarak kullanılan fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknikleridir. Kaplama malzemeleri dielektrik bileşikler, metaller, alaşımlar veya karışımlar olarak sınıflandırılır. Aynı malzeme biriktirme işlemine bağlı olarak farklı optik, elektriksel ve mekanik özellikler sergileyebilir.

Endüstriyel alanlar için, biriktirme hızının optimize edilecek en iyi parametre olduğunu düşünülmekte fakat bilim adamları genellikle kaplama özelliklerini iyileştirmeye odaklanmışlardır [30,31]. Genel olarak PVD, parçacıkların hedeften nasıl çıkarılabileceğine dair saçtırma ve buharlaştırma olarak iki ana işleme ayrılabilir. Buharlaşma yönteminin süreç aşamasında daha düşük atom enerjisi, kaplama üzerine daha az hapsedilen gazlar, yüksek değerlerde vakum basınç ihtiyacı, daha büyük kütleler ile parçacık aktarımı ve alt tabakaya daha düşük oranlarda yapışma sunar. Bu nedenler dolayısıyla buharlaştırma işleminin endüstriyel uygulamaların kullanımında ve yüzey morfolojisi özelliğinin önemli kalite gerekliliği olmadığı durumlarda, kalın filmler için kullanımı daha uygundur. Ek olarak, kirlenmiş parçacıklar potaya hapsedilebilir ve ardından kaplanacak parçaya doğru hareket edebilir. Bu olaylar gerçekleştirilen kaplamanın saflığı azaltır [32].

Bu nedenle saçtırma prosesi, pürüzlülüğün, tane büyüklüğünün, stokiometrinin vb. kalite gereksinimlerinin biriktirme oranına oranla daha önemli olduğu uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Bazı uygulamalarda, alttaş malzemesinin erime sıcaklığı veya soğutma işlemi aşamasında ortaya çıkan; istenmeyen gerilimler nedeni ile biriktirme işlemi yönünden sıcaklık sınırlaması ortaya çıkarır [33,34]. Bu nedenle PVD biriktirme işlemleri arasında saçtırma özel bir öneme sahiptir. Pazar ihtiyacında yaşanan artışlar, ilk teknikleri kullanarak

çözülmesi imkânsız olan durumlara yol açmaktadır. Dolayısıyla bu durum da yeni araştırmalara olan ihtiyacı arttırmakta ve yeni kaplama özelliklerinin araştırılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, buharlaşma sürecini inceleyen diğer gelişmelere rağmen, saçtırma biriktirmede daha fazla ilerleme ve daha fazla değişiklik kaydedilmiştir; ileri düzey araştırmacıların istekleri doğrultusunda gerçekten ilginç sonuçlar akılda tutulmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma esas olarak manyetik saçtırma tekniklerine odaklanmıştır.

2.3.1. Saçtırma yöntemi

Saçtırma (Püskürtme/Sputtering); yüksek enerjili iyonlardan (tipik olarak Ar) oluşan bir ışın hedef yüzeyi bombaladığında, o yüzeydeki atomlar veya moleküller bir duman bulutu olarak dışarı saçılır. Eğer bir alt katman eş zamanlı olarak dumanın yoluna yerleştirilirse, bu parçacıklar bunun üzerinde birikerek filmler oluşturacaktır. Maruz kalma süresi, deşarj voltajı, hedef ile altlık arasındaki mesafe, altlık sıcaklığı vb. gibi çeşitli parametrelerin kontrol edilmesiyle çeşitli nitelikte ince filmler biriktirmek mümkündür [18].

Saçtırma yöntemi; Kaynak malzemedan düşen atomların iyonize gaz partikülleri ile bombardıman edilerek baz malzemenin kaplanması işlemidir. Saçtırma işlemi yüzey aşındırma, yüzey saflaştırma, ince film kaplama ve yüzey analiz işlemlerinde sıklıkla kullanılır. Bu yöntem kullanılarak ileri teknoloji gerektiren birçok optik ve optoelektronik cihaz, güneş pilleri, fotodetektörler, kameralar, sensörler ve görüntüleme cihazları üretilmektedir [35].

Saçtırma çeşitleri

- DC saçtırma
- Reaktif saçtırma
- RF manyetik saçtırma [39]

İnce filmlerin kaliteli üretimi vakumlu ortamda biriktirilmesi ile sağlanabilir. Bunun için genellikle tercih edilen yöntem Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemidir [36]. Bu yöntem özetle hedef malzemelerin buharlaştırılarak altlık malzemeler üzerine bırakılması prensibine dayanır. PVD yöntemine dayalı olarak geliştirilmiş yöntemlerden DC saçtırma, Reaktif saçtırma ve RF manyetik saçtırma yöntemlerinden aşağıda bahsedilmektedir.

2.3.2. DC saçtırma

Saçtırma işleminin DC güç kaynağı ile gerçekleştirilmesinin önemli avantajları, düşük maliyetli ve kontrollü ince film kaplamalara olanak sağlamasıdır. DC saçtırma kaplama sisteminde kaplanacak hedef malzeme (katot), alt tabakaya (anot) paralel olarak yerleştirilir. 17 katoda bir DC elektrik akımı (-2 ila -5kV aralığında) uygulanır ve alt tabakaya pozitif bir yük uygulanır. Plazmadaki inert gaz atomları ile serbest elektronlar arasındaki çarpışmalar nedeniyle gaz atomları iyonlaşacaktır. Pozitif yüklü iyonize parçacıklar, DC tarafından oluşturulan elektronik alan nedeniyle doğrudan hedef malzemeye doğru hareket edecek ve içindeki atomların dışarı fırlamasına neden olacaktır. Fırlatılan atomlar substrat yüzeyinde yoğunlaşarak hedef malzemenin ince filmini oluşturur. DC saçtırma, birçok metalik malzemenin kaplanması için uygun bir yöntemdir. Ancak dielektrik malzemelerin kaplanması sırasında ark oluşumuna ve zehirlenmelere yol açarak kaplama işleminin durmasına neden olması sınırlayıcı özelliklerindedir, bu nedenle yalıtkan malzemelerin kaplanmasında tercih edilmez.

2.3.3. Reaktif saçtırma

Saçtırma hızlanma potansiyelini doğrudan yalıtkan yüzeyine uygulamak mümkün olmadığından, yalıtkanlar DC saçtırma tekniğiyle sıçratılamaz. İyon bombardımanı sırasında biriken pozitif yük nötralize edilemez. RF sıçratma tekniğinde bu durum yalıtkan hedefin arkasındaki metal iletken elektroda yüksek frekans potansiyeli uygulanarak çözülür. Hedef, püskürtülecek hedefin arkasına krom-bakır film yerleştirilerek metalize edilir. Katot malzemesinin polarizasyonunu alternatif akım (AC) ile değiştirerek hedef, sıralı ve sürekli olarak iyonlar ve elektronlarla bombardıman edilir. Bu nedenle, pozitif yük elektronlar tarafından nötralize edilecek ve yalıtkan hedef iyonlar ve elektronlar tarafından bombardımana tutulacağından saçılma meydana gelebilecektir. RF saçtırma tekniği yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çünkü hem iletken hem de iletken olmayan hedefler için kullanılabilir. AC sıçratma genellikle 13,56 MHz frekans seviyesinde gerçekleştirilir [37].

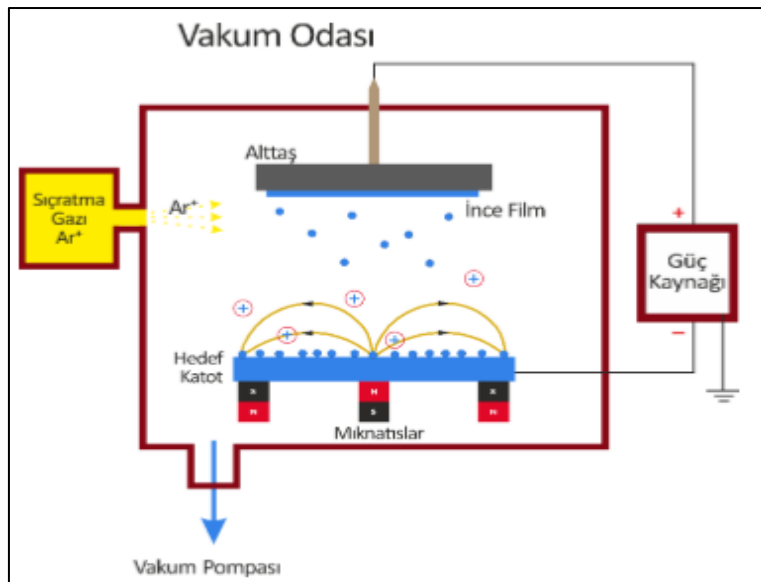
2.3.4. RF manyetik saçtırma

Manyetik saçtırma tekniği, geniş bir alana homojen ve iyi yapışan kaplamalar yapmak için endüstriyel olarak en çok tercih edilen kaplama türüdür. Çok yüksek erime noktalarına sahip

hedef malzemenin seçim kolaylığı, yüksek biriktirme hızı ve aynı zamanda kalınlık kontrolünün kolaylığı gibi büyük avantajlar sunmaktadır. Temel saçtırma biriktirmede plazmadaki düşük iyonizasyon verimlerinin kısıtlanması, manyetik saçtırmanın keşfiyle çözülmüştür. Hedef yüzeyine paralel şekilde oluşturulan bir manyetik alan, ikincil elektron hareketini sınırlar, bu da hedefin yakınında iyonlaştırıcı elektron-atom çarpışması olasılığını artırır.

DC saçtırma yalnızca metaller ve alaşımlar gibi numunelerin iletilmesi için kullanılırken RF saçtırma dielektrikler için kullanılır. Saçtırma oranını arttırmak için katodun arkasına mıknatıslar yerleştirilerek manyetik alan oluşturulur. Bu, çarpışma olasılığını (yani hızı) artırmak için iyonların ve elektronların yörüngelerini katlar ve saçtırma verimi artar.

Bu sistemin benzersizliği, filmleri aynı anda birden fazla alt tabaka üzerine biriktirmek için altı alt tabaka yuvasının bulunmasıdır. Ayrıca, özel filmler oluşturmak için reaktif gazların verilmesi hükmü de bulunmaktadır. Numune değişimi vakumda yapılabilir (yük kilit odası sistemi). Temiz çevre için tüm sistem turbo ile boşaltılmaktadır. Aynı zamanda düzgün kaplama için diferansiyel olarak değişken hıza sahiptir [38].



Şekil 2.3. Manyetik saçtırma yönteminin şematik gösterimi

2.4. ZnGa₂O₄ İnce Film Üretilmesi

Bu tez kapsamında, korning cam alttaşlar üzerine, ZnGa₂O₄ ince filmler RF manyetik saçtırma yöntemi kullanılarak büyütüldü. Kaplamadan önce alttaşlar (substratlar) ilk olarak aseton ve alkolle temizlendi. Ardından 30 dakika boyunca deiyonize suda ultrasonik temizleme yapıldı ve nitrojen gazında üfleme kurutma yapıldı. Hedef kaplama kalınlığının hangi sürede elde edebileceğinin tespiti için deneme kaplamaları yapıldı. Deneme kaplamasında 30 dakikada 80 nm kalınlık elde edildi. Hedef 200 nm kalınlıktı ve parametre ayarları yapılarak tekrar kaplama yapıldı. Kullanılan parametre değerleri Tablo 1.6 'da belirtildi. Farklı güç değerlerinde büyütülen ince filmler 100W, 150W ve 200W için sırasıyla S1, S2 ve S3 olarak adlandırıldı.

Çizelge 2.1. ZnGa₂O₄ ince film büyütülürken kullanılan parametre değerleri

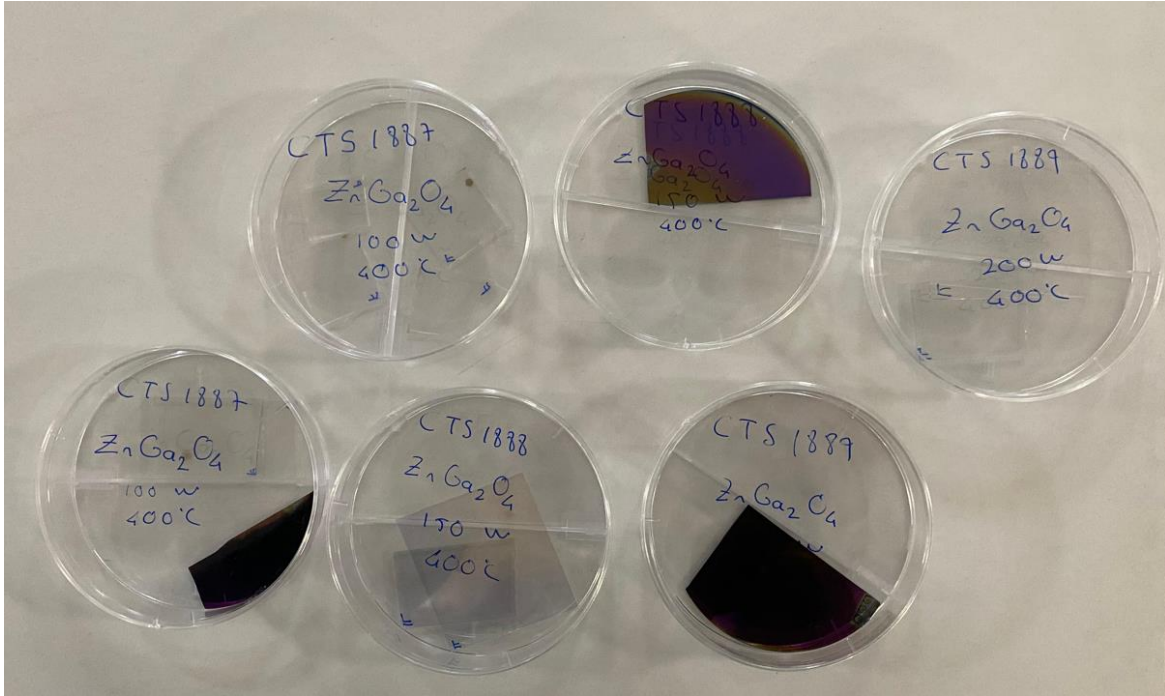
Hedef Malzeme	Çinko gallat (ZnGa ₂ O ₄)
P _{Argon} (Saçtırma/Proses basıncı)	5 mTorr
Alttaş Malzemeleri	Korning Cam
Alttaş Sıcaklığı	400 °C
RF Güç	100-150-200 Watt (S1, S2, S3)
Hedef Kalınlık	Min.200 nm

İnce film kaplama kalınlıklarının gözlemlenebilmesi için, kaplamadan sonra Profilometre kullanıldı. Sırasıyla 105 dakika, 83 dakika, 64 dakika ve 100W, 150W, 200W güç değerleri ile 200 nm kalınlık elde edildi.



Resim 2.1. (a) Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki NVTS-500 saçırma sistemi (b,c) Çinko gallat ($ZnGa_2O_4$) Target

Resim 1.1.(a)'da verilen NVTS-500 sistemi; Yükleme, hazırlama ve büyütme odasını, transfer mekanizmalarını ve bilgisayara bağlı kontrol ünitesini içerir. Yükleme, hazırlama ve büyütme odası ultra yüksek vakum koşulları altında tutulur. Büyütme odasında; Bir alt tabaka ısıtıcısı, homojenliği sağlamak için bir alt tabaka döndürücü, alt tabakanın yüklenmesi ve aktarılması için hareketli mıknatıslar, kaynak hücreleri, kaynak kesiciler ve bir gözlem penceresi bulunmaktadır. NVTS-500 cihazında büyütme odası, sıvı azot ile soğutulan bir yapı ile çevrilmiştir. Sıvı azot sayesinde kaynak hücreler arasında oluşan termal etkileşim minimize edilir. Bu sayede, ortamdaki artık gazlar soğuk yüzeyde hapsedilerek büyütülen filmde istenmeyen yabancı maddelerin oluşması engellenir.



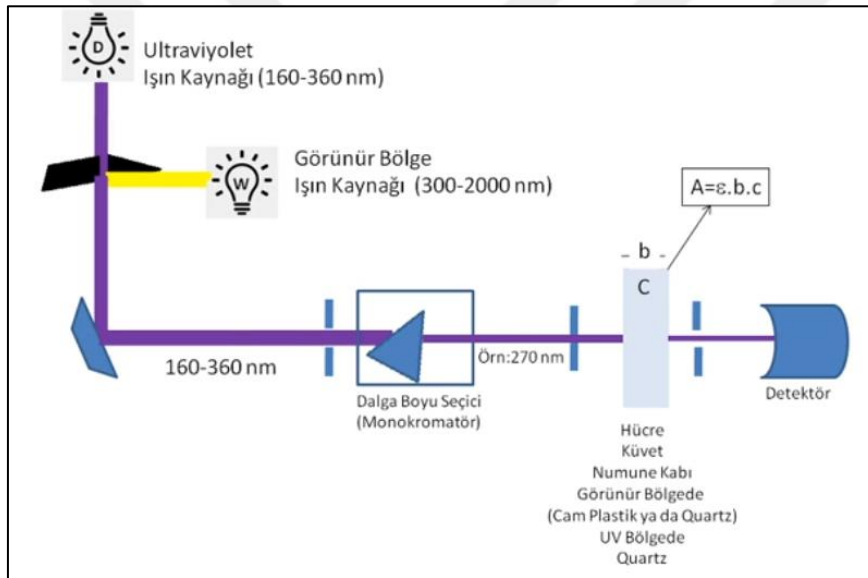
Resim 2.2. RF manyetik saçırma yöntemi ile büyütülen, analizlere hazır $ZnGa_2O_4$ ince film numuneleri

Büyütülen $ZnGa_2O_4$ ince filmler (Resim 2.2.) UV-VIS, XRD ve AFM cihazları ile optik, yapısal ve morfolojik analizleri yapılması için hazırlandı.

3. KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

3.1. Mor Ötesi ve Görünür Bölge (UV-VIS) Optik Geçirim Spektroskopisi

UV-VIS spektroskopisi, ultraviyole (UV) ve görünür (VIS) ışığın farklı dalga boylarında bir numune tarafından soğurulan, yansıtılan veya geçirilen ışık miktarını ölçmek için kullanılan bilimsel bir tekniktir. İşlem, bir UV-VIS ışık demetinin numuneden geçirilmesini ve içinden geçen ışık miktarının ölçülmesini içerir. Bu şekilde ışığın emilim ve iletim modelini analiz ederek numunenin bileşenleri tanımlanabilir ve miktarı belirlenebilir. UV-VIS spektrometresinin çalışma prensibi Şekil 3.1’te gösterildi.



Şekil 3.1. UV-VIS spektrometresinin çalışma prensibi

Tipik olarak, UV-VIS spektrumlarını belirlemek için numuneleri ölçerken absorbans ölçülür. $A = -\log T$ olarak tanımlanır, burada T geçirgenliktir.

Ultraviyole görünür (UV-VIS) spektrofotometreler, numuneyi UV boyunca görünür dalga boyu aralığına kadar ışıkla aydınlatmak için bir ışık kaynağı kullanır. Cihazlar daha sonra her dalga boyunda numune tarafından soğurulan, geçirilen veya yansıtılan ışığı ölçer.

UV-VIS spektrofotometrisi çok yönlü bir tekniktir ve bir yüzyıla yakın süredir çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. UV-VIS spektrofotometreleri malzeme test/araştırma,

kimya/petrokimya ve biyoteknoloji/ilaç laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

Genel olarak UV-VIS spektroskopisi, Beer-Lambert yasasına göre bir çözeltildeki element konsantrasyonlarını niceliksel olarak belirlemek için kullanılır [40]:

$$A = \text{Log}_{10}(I_0 / I) = \epsilon cL, \quad (3.1)$$

burada A ölçülen absorbanstır, I_0 belirli bir dalga boyunda gelen ışığın yoğunluğudur, I iletilen yoğunluktur, L numuneden geçen yol uzunluğudur, c soğuran türlerin konsantrasyonudur ve ϵ bilinen bir sabittir her tür ve dalga boyu için molar soğurma veya yok olma katsayısıdır [40].



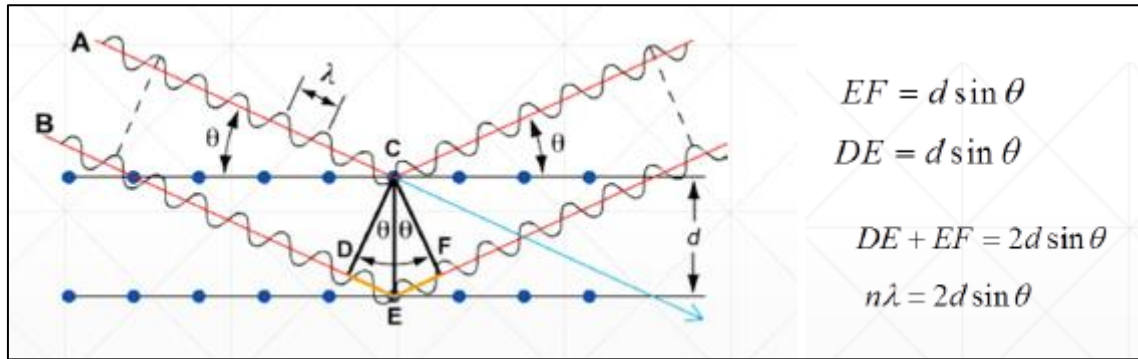
Resim 3.1. UV-VIS spektrometresi (Perkin Elmer Lambda 2S)

Bu çalışması kapsamında büyütülen çinko gallat (ZnGa_2O_4) ince film yapılarının optik özellikleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Resim 3.1'de belirtilen Perkin Elmer Lambda 2S marka UV-VIS spektrometresi kullanılarak analiz edildi.

3.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Tekniği

Max von Laue ve Co (1912), kristalli maddelerin, bir kristal kafes içindeki düzlemlerin aralığı ile yakın bir şekilde X-ışını dalga boyları için üç boyutlu kırınım ızgaraları gibi davrandığını keşfetti [41]. X-ışını kırınımı yöntemi kristalli yapıların ve atomik aralıkların araştırılması için yaygın bir tekniktir. Bir X-ışını her yöne kırarak bir kristalin atomik ve moleküler yapısını belirlemek mümkündür. Genel olarak XRD aracının işlevi, inorganik örneklerden toz veya katı halindeki, polikristalin ve amorf formdaki bir malzemenin fazını tanımlamak ve analiz etmektir. XRD, niteliksel ve niceliksel analiz için kullanılabilir [41]. Kantitatif analizde sunulan veriler iki teta açısını, tepe yoğunluğu ve kafes sabiti miktarını içerir. Niteliksel analiz için veriler, faz tipinin, faz bileşiminin (yüzde), kristalit boyutunun, yöneliminin ve diğerlerinin tanımlanması şeklinde olabilen faz analizini [41].

X-ışını kırınımı, X-ışınlarının (10 ila 0,01 nm) ve kristal yapılı bir numunenin yapıcı girişim olayına dayanır. Belirtilen bu X-ışınları bir katot ışın tüpü kullanımı ile üretilir, monokromatik radyasyon üretmebilmek için filtrelenir, konsantre hale getirilmek üzere şartlandırılır ve numuneye yönlendirilir. Gelen ışınların numuneye etkileşimi, Bragg yasası ile belirtilen şartlar karşıladığı zaman yapıcı girişim (ve kırılan ışın) meydana gelir [42].



Şekil 3.2. Bragg kırınım yasası şematik gösterimi [43]

Numuneye ulaşan paralel ışınlar arasındaki yol farkı, dalga boyunun tam katı olduğunda yapıcı girişim oluşur. Bu olguya Bragg'ın Kırınım Yasası denir.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.2)$$

Eşitlikte; n bir tam sayı ($n=1, 2, 3...$) ve kırınımın mertebesi, λ X-ışınlarının dalga boyu, d kırınımı oluşturan kristaldeki atomların düzlemleri arasındaki mesafe (belirli bir Miller indeksine sahip düzlem), ve θ kırınım açısıdır (1.2). Kristal yapılarda aynı Miller İndeksine sahip en yakın iki paralel düzlem arasındaki mesafe d_{hkl} olarak gösterilir. Bu yasa, elektromanyetik radyasyonun dalga boyunu, bir kristal numunedeki kırınım açısı ve kafes aralığı ile ilişkilendirir. Kırınımına uğrayan bu X ışınları daha sonra tespit edilerek işlenir ve sayılır. Numuneyi 2θ açısı aralığında tarayarak, toz halindeki malzemenin rastgele yöneliminden dolayı kafesin tüm olası kırınım yönleri elde edilmelidir. Kırınım tepeler noktalarını d -aralıklarına dönüştürmek, bileşiğin tanımlanmasına olanak tanır çünkü her bileşik bir dizi benzersiz d -aralığına sahiptir. Bu olay, d -aralıklarının standart referans modelleriyle karşılaştırılması sonucu elde edilebilir [42].

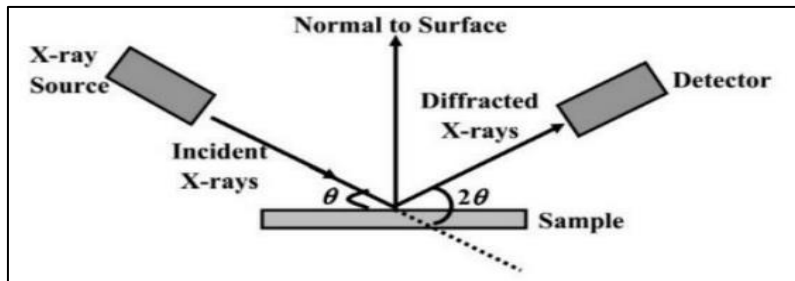
Bragg yansıması sadece;

$$n\lambda \leq 2d \quad (3.3)$$

dalgaboyu şartı sağlandığında meydana gelir.

Bu koşulu, görünür ışık dalgaboyu ile sağlamak mümkün olmadığı için X-ışınları kullanılır. Kırınımına uğramış yansımalar Bragg yasası ile tanımlanan belirli açılarda oluşur [43].

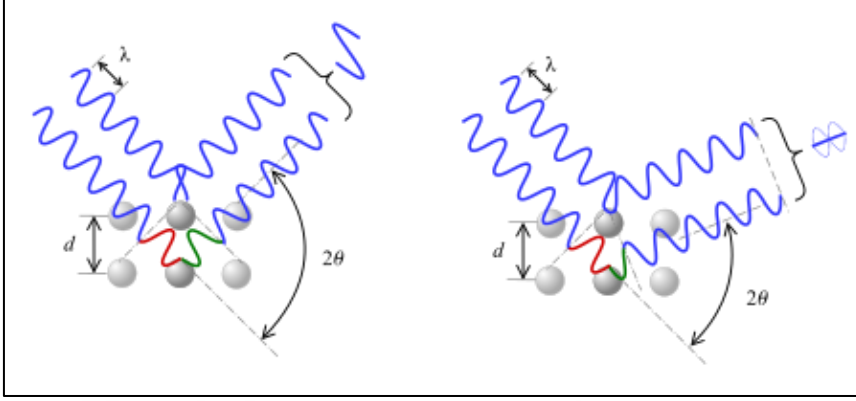
Aynı dalga boyuna ve faza sahip iki ışın kristal katıya yaklaşır ve içindeki iki farklı atomdan saçılır. Alttaki ışın ekstra $2d\sin\theta$ uzunluğunu kat eder. Yapıcı girişim, bu uzunluk radyasyonun dalga boyunun tam katına eşit olduğunda meydana gelir.



Şekil 3.3. XRD'nin temel prensibinin gösterimi [41]

Şekil 3.4.'de gelen ışın, farklı ışık yolları arasındaki yol uzunluklarını oluşturan d mesafeli bir açığa (θ) sahiptir. Bu, yapıcı dalga girişimine neden olur, bu olgu Bragg denklemi ile

analiz edilebilir [41]. Ortaya çıkan kırınım deseni, belirli bir 2θ değeri ile birlikte değişen bağıl yoğunluk ile bir dizi kırınım tepe reaksiyonu şeklindedir.



Şekil 3.4. 2θ sapmasına göre faz kaymasının yapıcı (soldaki şekil) veya yıkıcı (sağdaki şekil) girişimler neden olduğunu gösteren şematik gösterim.

X ışınlarının kristal yapı analizinde kullanılmasının temel nedeni, X ışınlarının dalga boyuyla ilgilidir. Çünkü X-ışını dalga boyu ile atomların çapları ve atomlar arasındaki uzaklıklar aynı mertebededir. Bu sayede X-ışınları malzemenin atomlarıyla kolaylıkla etkileşime girebilir (kırınım, girişim vb.).

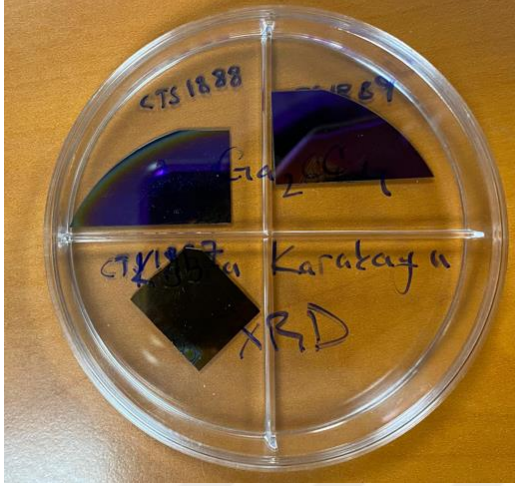
Bir X ışını bir malzeme ile etkileşime girdiğinde, ışınların bir kısmı emilecek, iletilecek ve bir kısmı da kırınıma uğrayacaktır. XRD'nin tespit ettiği şey bu dağınık kırınımdır. Saçılan X-ışını ışınında fazlar farklı olduğu için birbirini iptal eder ve bazıları da faz aynı olduğu için birbirini güçlendirir. Birbirini güçlendiren X-ışını ışınlarına *kırınım ışınları* denir. X ışınları test edilecek malzemenin kristal kafesine ateşlendiğinde ışınlar kırılır ve parmak izi adı verilen belirli desenler oluşturur [41].

X-ışınlarını yorumlayabilmek için Miller İndislerini de bilmek gerekir. Birim hücrenin tekrarlanmasıyla oluşan paralel düzlemler kristallerde oluşan yönleri ve mesafeleri tanımlamaktadır. Kristalografik düzlemlere *miller endeksleri* denir.

X-ışını kırınımı cihazlarında sistem uygunluğuna bağlı olarak çok çeşitli uygulamalar ve ölçümler yapılabilir. Bu uygulamalar; toz kırınımı (Bragg-Brentano-simetrik tarama) analizleri, X-ışını yansıma ölçümleri (X-ışını Yansıması-XRR), otlatma olaylı X-ışını kırınımı (GIXRD) analizleri, küçük açılı X-ışını saçılması ölçümleri (SAXS), gerilme ve kalıntı gerilme ölçümleri, sıcaklık ve basınç kontrollü ölçümler, tercih edilen yönelim ve

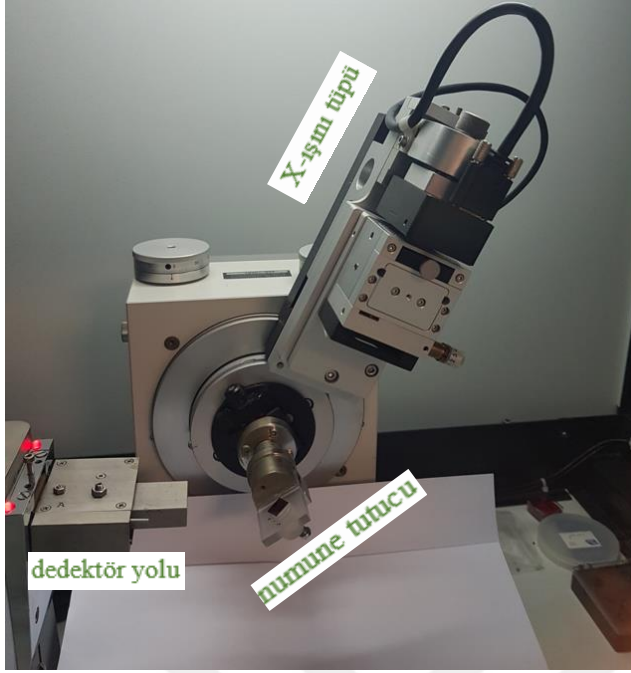
kutup figürü ölçümleri, tek kristal ölçümleri, karşılıklı kafes uzay haritalama ölçümleri olarak sayılabilir. İstenilen uygulamaya bağlı olarak farklı özelliklere sahip cihazlar ve cihaz bileşenleri kullanılmalıdır [2]. Bu tez çalışmasında *toz kırınımı (Bragg Brentano-simetrik tarama)* analiz yöntemi kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında RF manyetik saçırma yöntemi ile büyütülen S1, S2 ve S3 kodlu $ZnGa_2O_4$ ince film numuneleri XRD analizlerinde kullanıldı.



Resim 3.2. XRD ölçümleri gerçekleştirilen $ZnGa_2O_4$ ince film numuneleri

X-ışını kırınımı cihazları temel olarak üç ana parçadan oluşur. Bunlar; numune tutucu parça, X-ışını tüpü yolu ve dedektör (sayıcı) yoludur (Resim 3.3.).

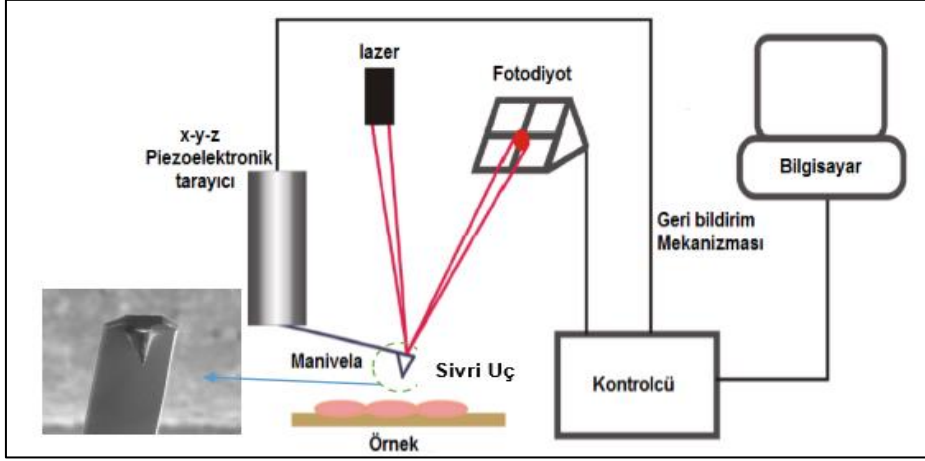


Resim 3.3. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan APD 2000 PRO XRD cihazı

Tez kapsamında üretilen $ZnGa_2O_4$ ince filmlerin ölçümleri Resim 3.3'te gösterilen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan $CuK\alpha$ (1.5406 Å) kaynaklı APD 2000 PRO XRD kaynaklı XRD cihazı ile yapıldı.

3.3 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu, yüzey biliminde 10^{-10} m veya nanometrenin onda biri atomik çözünürlükte görüntüler elde etmek için kullanılan, numune yüzeyinin topografik analizini gerçekleştiren bir tarama mikroskobudur [44]. İnce filmlerde yüzey pürüzlülüğünün, yüzey karakteristiklerini doğrudan etkilemesi dolayısıyla AFM ölçümleri çok önemli bir parametredir. Yüzey düzgün değilse katmanlar arasında bozulmalar meydana gelebilir. Bu nedenle ince filmlerin tanecik boyutlarının ve yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi için geliştirilen cihazlar da önem kazanmaktadır.



Şekil 3.5. AFM cihazı bileşenleri ve manivela sivri ucu [50]

AFM cihazı çalışma prensibi şematik gösterimi Şekil 3.5'te verildi. Esnek bir manivela ve manivelaya bağlı, yüzeyi taramak için kullanılan sivri uçlu bir uçtan oluşur. Manivela çoğunlukla silikon veya silikon nitrürdür. Uç numune yüzeyine yaklaştırıldığında uç ile yüzey arasındaki Hooke yasası kuvvetleri manivelanın bükülmesine neden olur. Ölçüm, manivelanın bükülmesiyle gerçekleştirilir ve manivelanın bir ucundan dedektöre bir lazer ışını yansıtılır [46].



Resim 3.4. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan hpAFM cihazı

Bu tez çalışmasında ince film numunelerinin AFM ölçümleri Nanomagnetics Instruments marka hpAFM cihazı ile gerçekleştirildi. Cihaz, yaylı bir konsolun ucuna entegre edilmiş bir ucun, uç ile numune arasındaki atomlar arası mesafe içerisine getirildiğinde, ucun atomları ile yüzeyin atomları arasındaki potansiyellerin geliştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Konsolun sapması ölçülerek yüzeyin topoğrafik özellikleri haritalandırılır.

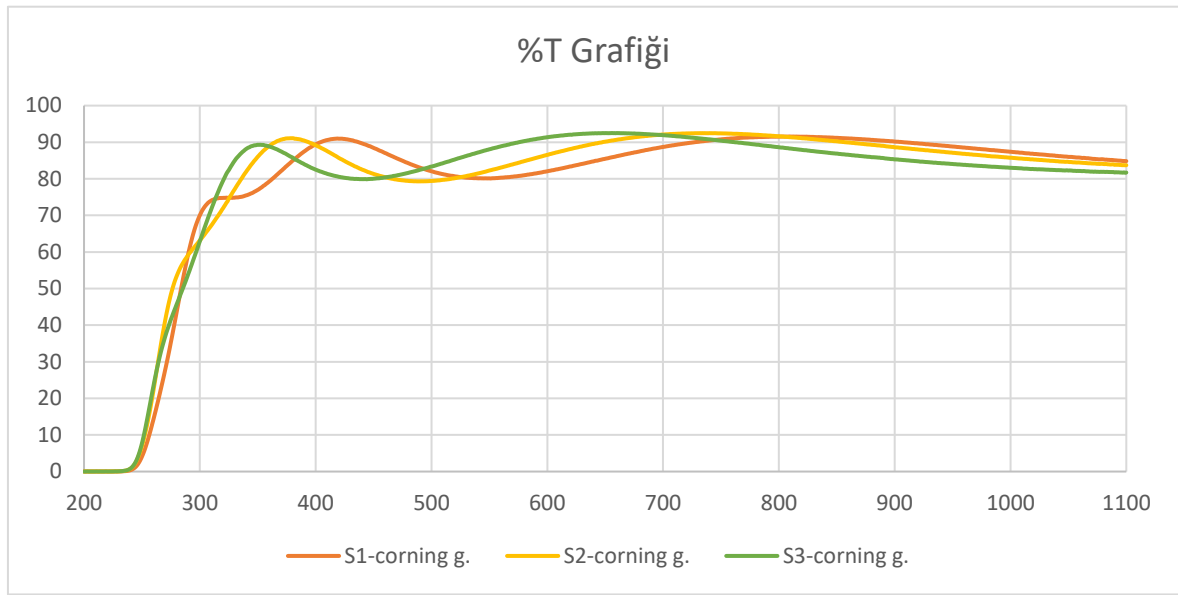




4. DENEYSEL VERİLER VE TARTIŞMALAR

4.1. Mor Ötesi ve Görünür Bölge (UV-VIS) Verileri ve Tartışmaları

ZnGa₂O₄ numunelerinin ultraviyole ve görünür bölge spektroskopisi (UV-VIS) analizlerin amacı TCO'lar için çok önemli bir parametre olan görünür bölgedeki optik geçirgenlik değerinin belirlenmesidir. Ölçümler 200-1100 nm dalga boyu aralığında yapıldı. UV-VIS ölçümleri sonucunda elde edilen yüzde optik geçirgenlik grafiği Şekil 4.1'de verildi.



Şekil 4.1. ZnGa₂O₄ ince film UV-VIS dalga boyu-yüzde geçirgenlik grafiği

Elde edilen veriler ışığında ZnGa₂O₄ filmlerinin 400-800 nm dalga boyu aralığındaki optik geçirgenlik değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Bu dalga boyu aralığı aynı zamanda Şekil 4.2 de görüleceği üzere elektromanyetik spektrum bölgeleri içerisinde yer alan görünür bölgeyi de kapsamaktadır.

Hesaplama sonucunda ZnGa₂O₄ 100W 400°C proses değerlerinde kaplanan ince filmimizi ifade eden S1 kodlu corning glass için %91,004; ZnGa₂O₄ 150W 400°C proses değerlerinde kaplanan ince filmimizi ifade eden S2 kodlu corning glass için %91,097 ve ve ZnGa₂O₄ 200W 400°C proses değerlerinde kaplanan ince filmimizi ifade eden S3 kodlu corning glass için %89,323 optik geçirgenlik değerleri bulunmuştur.

Değerler, farklı işlem koşullarında kaplanan $ZnGa_2O_4$ ince filmlerinin optik geçirgenlik oranlarını göstermektedir. Üretilen bu $ZnGa_2O_4$ örneklerinin optik geçirgenlik değerlerinin literatürdeki değerlere yakın olduğu görülmektedir (400-800 nm dalga boyu için ortalama %70-93) [47, 48].

Bu tez çalışması ile elektromanyetik spektrum içerisinde yer alan dalga boylarından nasıl yararlanılacağı ve gelecekte yapılacak araştırmalara ne gibi katkıları olabileceği konuları için uygun veriler elde edilmeye çalışıldı. UV-VIS absorpsiyon verilerinden yararlanılarak numunelerimizin bant gap hesabı Tauc Plot yöntemi kullanılarak Origin programında gerçekleştirildi.

Çinko gallat ($ZnGa_2O_4$) ince filmlerin bant aralığı enerjisi 4,5-5,2 eV arasında olduğundan daha önce teorik altyapı ve kuramsal bilgiler bölümümüzde bahsedilmişti. Büyütülen ince filmimizin bu bant aralığı enerjisi arasında olup olmadığı, literatürleriyle uygun veriler elde edilip edilmeyeceği bant gap hesabı yapılarak gözlemlendi.

4.1.1. Origin programında Tauc Plot ile $ZnGa_2O_4$ Optik Bandgap hesabı

Bant aralığı enerjisi malzemenin optik özelliklerini etkileyen parametrelerden birisidir. Yarı iletken malzemelerin optik özellikleri, malzemenin çeşitli uygulama alanlarında kullanımı için oldukça önemlidir [49]. Tauc grafiği, malzemelerin optik özelliklerini analiz etmek için güçlü bir araçtır ve birçok uygulamada kritik bir parametre olan bant aralığı enerjisi hakkında değerli bilgiler sağlayabilir. Bu çalışmada bant aralığı enerjisinin değeri, UV-VIS absorpsiyon spektrumunun deneysel verilerinden yararlanılarak Origin yazılımına gömülü Tauc grafiği yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Hesaplamalar sırasında giriş verileri olarak RF manyetik saçırma yöntemiyle biriktirilen Ga katkılı Zn_2O_4 ince filmimizin UV-VIS absorpsiyon verileri kullanılmıştır. UV-VIS karakterizasyonundan elde edilen malzeme numunesinin absorpsiyon (A), dalga boyu (λ), kalınlığı (t) ve elektron geçiş tipi (n) verileri kullanılmıştır.

Yarı iletken fiziğinde, bir yarı iletkenin bant aralığı iki temel tipte olabilir; doğrudan bant aralığı veya dolaylı bant aralığı. İletim bandındaki minimum enerji durumu ve değerlik bandındaki maksimum enerji durumunun her biri, Brillouin bölgesindeki belirli bir kristal

momentum (k-vektörü) ile karakterize edilir. Momentum farklıysa malzemede "dolaylı bir boşluk" vardır. Elektronların ve deliklerin kristal momentumu hem iletim bandında hem de valans bandında aynıysa bant aralığına "doğrudan" adı verilir; bir elektron doğrudan bir foton yayabilir. "Dolaylı" bir boşlukta, elektronun bir ara durumdan geçmesi ve momentumu kristal kafese aktarması gerektiğinden bir foton yayılamaz [50].

Doğrudan bant aralığı malzemelerinin örnekleri arasında hidrojenlenmiş amorf silikon ve InAs ve GaAs gibi bazı III-V malzemeleri bulunur. Dolaylı bant aralığı malzemeleri arasında kristalin silikon ve Ge bulunur. AlSb gibi bazı III-V malzemeleri de dolaylı bant aralığıdır. Literatür çalışmaları periyodik tablonun II, III ve VI sütunlarında yer alan çinko gallat ($ZnGa_2O_4$) malzemesinin doğrudan bant aralığına sahip malzemeler arasında olduğunu doğrular niteliktedir. Bu nedenle bu çalışmada tauc plot yöntemi ile bant gap hesabı yapılırken elektron geçiş tipi (n) değeri 2 olarak alınmıştır.

Tauc Plot yöntemi, enerjiye bağlı soğurma katsayısının (α) aşağıdaki denklemlerle ifade edilebileceği varsayımına dayanmaktadır:

$$(\alpha h\nu)^n = K(h\nu - E_g) \quad (4.1)$$

Burada " α " soğurma katsayısı, " $h\nu$ " gelen foton enerjisi, " K " enerjiden bağımsız bir sabit, " E_g " bant aralığı enerjisi ve " n " ise foton enerjisidir. Tauc denkleminde n, emilimden sorumlu elektronik geçişlerin doğasına bağlı olarak aşağıdaki değerleri alabilen geçiş sürecini karakterize eden sayıdır.

1. $n=2$ (doğrudan izin verilen geçiş)
2. $n=1/2$ (dolaylı izin verilen geçiş)
3. $n=2/3$ (doğrudan geçiş yasak)
4. $n=1/3$ (yasak dolaylı geçiş)

Doğrudan bant aralığı enerjisi $n=2$ için Tauc Grafiği denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$(\alpha h\nu)^2 = K(h\nu - E_g) \quad (4.2)$$

Eğer dalga boyuna karşı yoğunluk eğrileri (Şekil 4.2./4.3./4.4.) herhangi bir doğrusal kısım göstermeseydi o zaman onu dolaylı bant aralığı enerjisi açısından kontrol edebilirdik.

Dolaylı bant aralığı enerjisi için $n=1/2$ veya 0,5 ve Tauc denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$(\alpha h\nu)^{0.5} = K(h\nu - E_g) \quad (4.3)$$

Ancak Origin programında yapılan hesaplamalar sonucu $n=2$ değeri ile doğrusal kısımlar tespit edilebilmiştir (Şekil 4.2./4.3./4.4.).

Hesaplamalarda film kalınlığı; RF manyetik saçırma yöntemi ile elde ettiğimiz $ZnGa_2O_4$ ince filmimizin kalınlığı (t) olan 200 nm değeri kullanılmıştır. Formülasyonda soğurma katsayısı (α) hesabı yapılırken kalınlık değeri gereklidir.

$$\alpha = (\ln(C2)/t) \quad (4.4)$$

C2: Numunelerimizin (S1 – S2 – S3) UV-VIS ‘deki geçirgenlik sonuçlarının % değeridir.

Örneğin CTS1887 malzemesinin 1100 dalga boyu 85,593 geçirgenlik değerine karşılık gelen değerinin α hesabı;

$$\alpha = (\ln(85,593/100)/200)$$

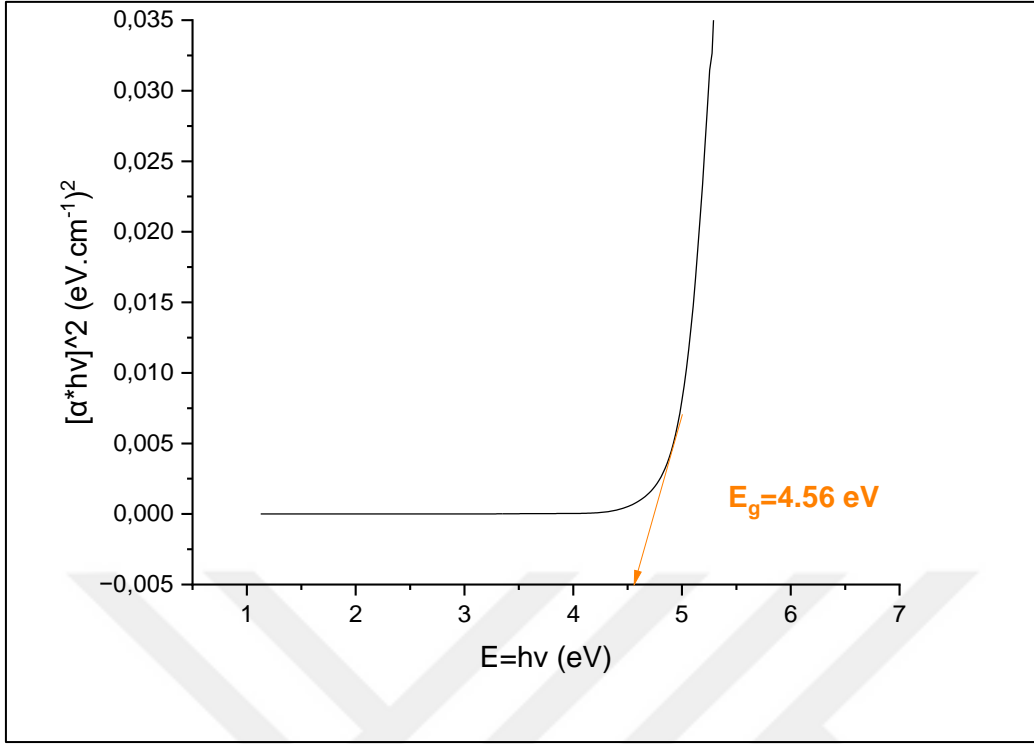
şeklinde hesaplanmaktadır.

Absorbans verilerinden başlayarak doğrudan bant aralığı enerjisini kontrol etmek için Tauc Grafiği denklemi (4.2) uygulanmıştır,

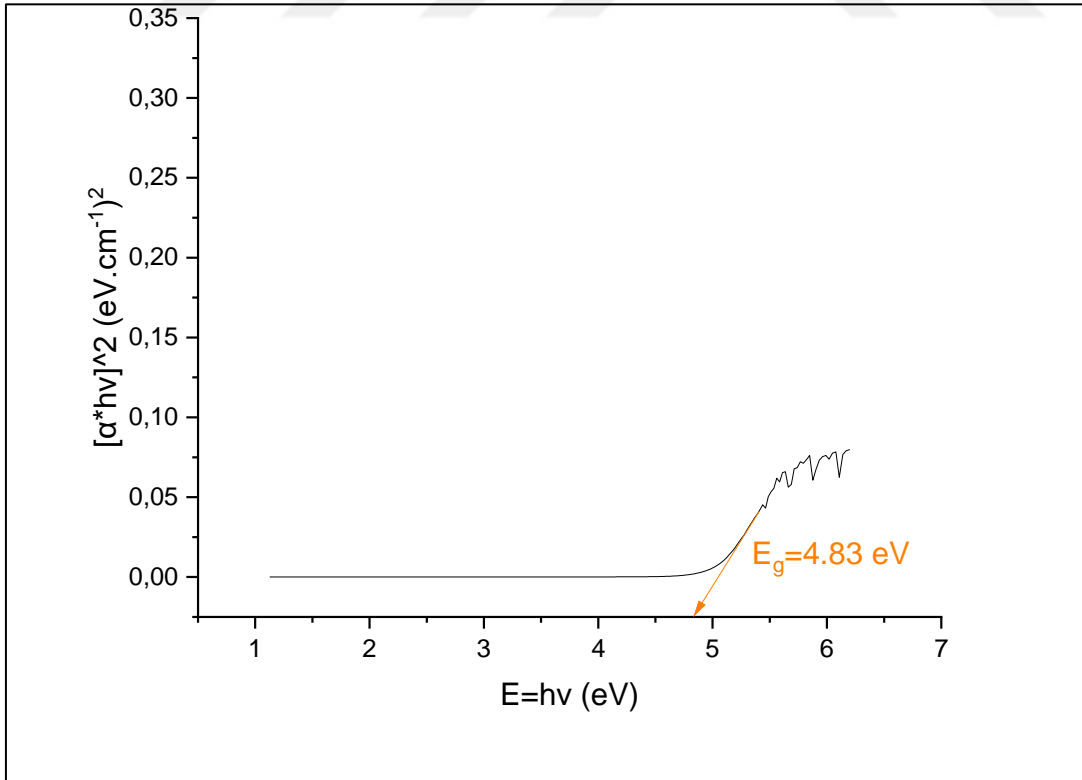
Denklemi (4.2) kullanarak grafiği çizeceğiz;

$h\nu = 1240/\text{wavelength}$ on X-axis

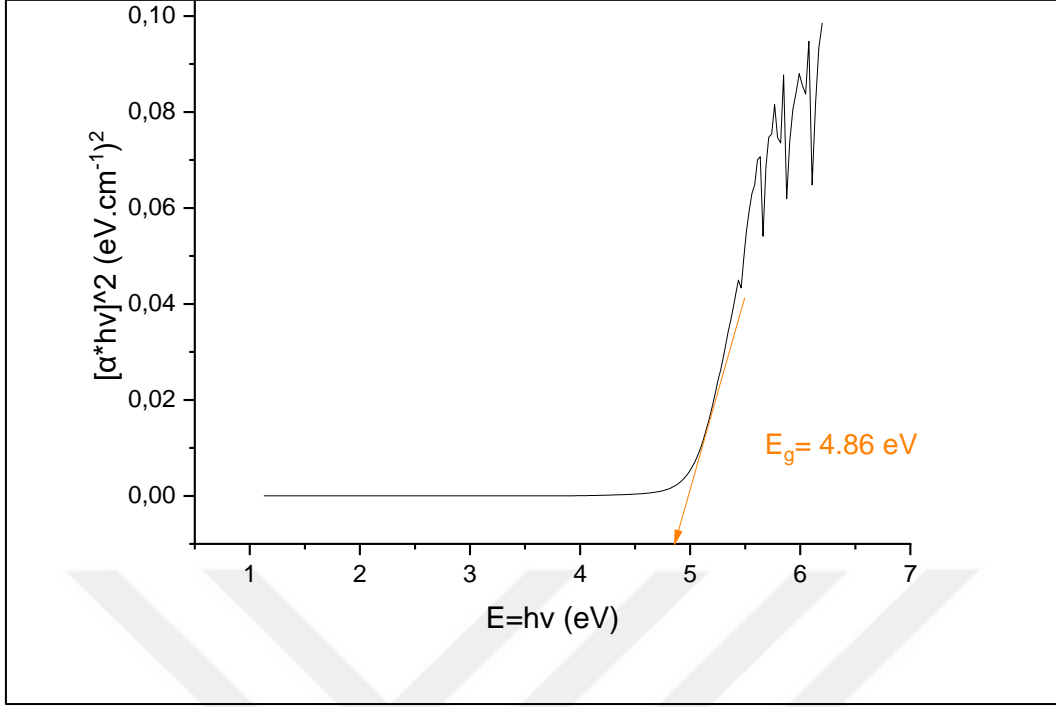
$$(2.303 \times \text{Absorbance} \times \text{Energy})^2 \text{ on Y-axis} \quad (4.5)$$



Şekil 4.2. Origin Programında Tauc Plot yöntemi ile ‘‘S1 - ZnGa₂O₄ 100 W 400 derece’’ numunesinin bant gap hesabı



Şekil 4.3. Origin Programında Tauc Plot yöntemi ile ‘‘S2 ZnGa₂O₄ 150 W 400 derece’’ numunesinin bant gap hesabı



Şekil 4.4. Origin Programında Tauc Plot yöntemi ile ‘‘S3 - ZnGa₂O₄ 200 W 400 derece’’ numunesinin bant gap hesabı

Eğrilerin üzerinde doğrusal kısımlar görülebilmektedir (Şekil 4.2-4.3-4.4). Dolayısıyla sonuçlar ZnGa₂O₄ malzemesinin doğasının; doğrudan bant aralığına sahip malzemeler arasında olduğunu doğrular niteliktedir.

Bu malzeme S1 ZnGa₂O₄ 100 W 400 derece – direkt için yaklaşık 4,56 eV bant aralığı değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bu malzeme S2 ZnGa₂O₄ 150 W 400 derece - direkt için yaklaşık 4,83 eV bant aralığı değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

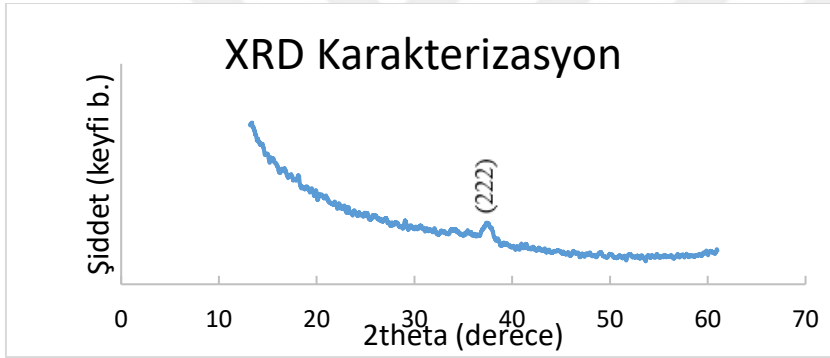
Bu malzeme S3 ZnGa₂O₄ 200 W 400 derece - direkt için yaklaşık 4,86 eV bant aralığı değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çinko gallat (ZnGa₂O₄) yarıiletken malzemesinin bant aralığı enerjisinin 4,5-5,2 eV arasında bir geniş bant aralığına sahip olduğu bilgisi teorik altyapı ve kuramsal bilgiler kısmında detaylı bir şekilde verilmişti. Dolayısıyla elden edilen verilere göre numunelerin enerji bant aralığının literatürde belirtilen değer aralığında olduğu gözlemlendi.

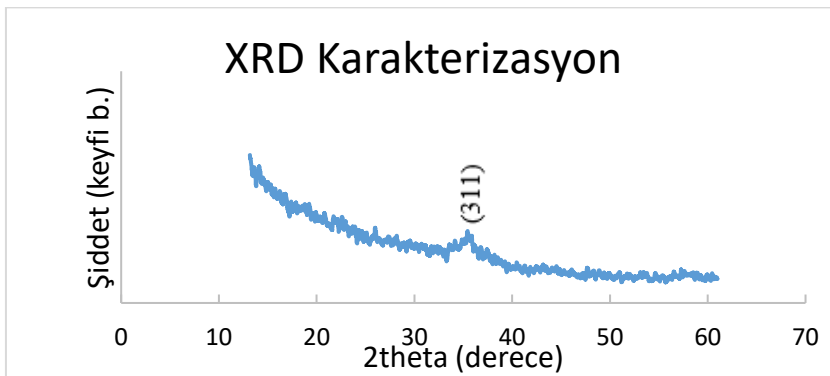
4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Verileri ve Tartışmaları

RF manyetik saçırma yöntemi kullanılarak büyütülen çinko gallat ince filmlerin yapısal analizleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan 1,5406 Å dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ kaynaklı XRD cihazı ile yapıldı. X-ışını kırınımı analizlerinde amaç, numunelerde oluşan kristal yapıları ve fazları bulmaktır.

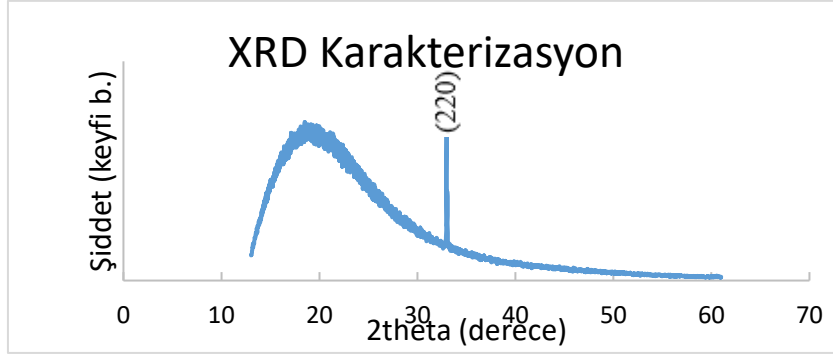
Ölçümler sırasında XRD cihazı dedektörü, numune tarafından kırılan X-ışını ışını tespit etmek için, hem numune hem de detektör belirli bir açısal hızda hareket etti. XRD ölçümleri sırasında X tüpü sabit kalmaktadır. 20° ile 60° arası ölçüm alınarak pik değerleri gözlemlendi. X tüpünün içerisinde bakır kaynak kullanıldı. X-ışınlarının bu bakır kaynaklara çarpması sonucu ölçümler gerçekleştirildi.



Şekil 4.5. S1 kodlu ZnGa_2O_4 ince film numunesine ait XRD kırınım deseni (X-ekseni pik noktası 2theta değeri: $37,28^\circ$)



Şekil 4.6. S2 kodlu ZnGa_2O_4 ince film numunesine ait XRD kırınım deseni (X-ekseni pik noktası 2theta değeri: $35,71^\circ$)



Şekil 4.7. S3 kodlu $ZnGa_2O_4$ ince film numunesine ait XRD kırınım deseni (X-ekseni pik noktası 2θ değeri: $32,94^\circ$)

Şekil 4.5 ve şekil 4.6 'deki S1 ve S2 numuneleri için çok belirgin olmayan tepeler sırasıyla (222), (311) ve ana tepe Şekil 4.7 'da S3 numunesi için (220) düzlemlerinde gözlemlendi. S3 kodlu ince film numunesinin spinel yapı $ZnGa_2O_4$ tozuna karşılık gelen polikristalin yapıya sahip olduğunu görüldü (JCPDS Kart No: 00-038-1240 toz kırınım dosyası).

Şekil 4.7 'da (220)'den $ZnGa_2O_4$ 'nın (002) düzleminden gelen yansımalara ait yoğun bir tepe vardır. Buna göre, (220)' de farklı güç değerleri ile kristal kalitesinin değiştiği gözlemlendi. Ayrıca, filmler corning cam alt tabakalar üzerinde üretildiği için, camın amorf yapısı XRD deseninde gözlemlenir. Bu nedenle, 35° ile 60° arasında bir azalma gözlemlendi. (220) yön düzlemi için saf numunenin kafes sabiti değeri, karşılık gelen standart malzemenin değerinden biraz daha büyük olduğu tespit edildi (JCPDS Kart No: 00-038-1240). Bu farkın nedeni malzemenin iyileşmesi olabilir. Çünkü oksijen boşlukları Ga atomları doldurulabilir ve bu da kafes gerginliğinde artışa yol açar [51].

Çizelge 4.1. $ZnGa_2O_4$ JCPDS Kart No: 00-038-1240 nolu dosyada ilgili değerlere karşılık gelen standart malzemenin kafes sabiti değerleri

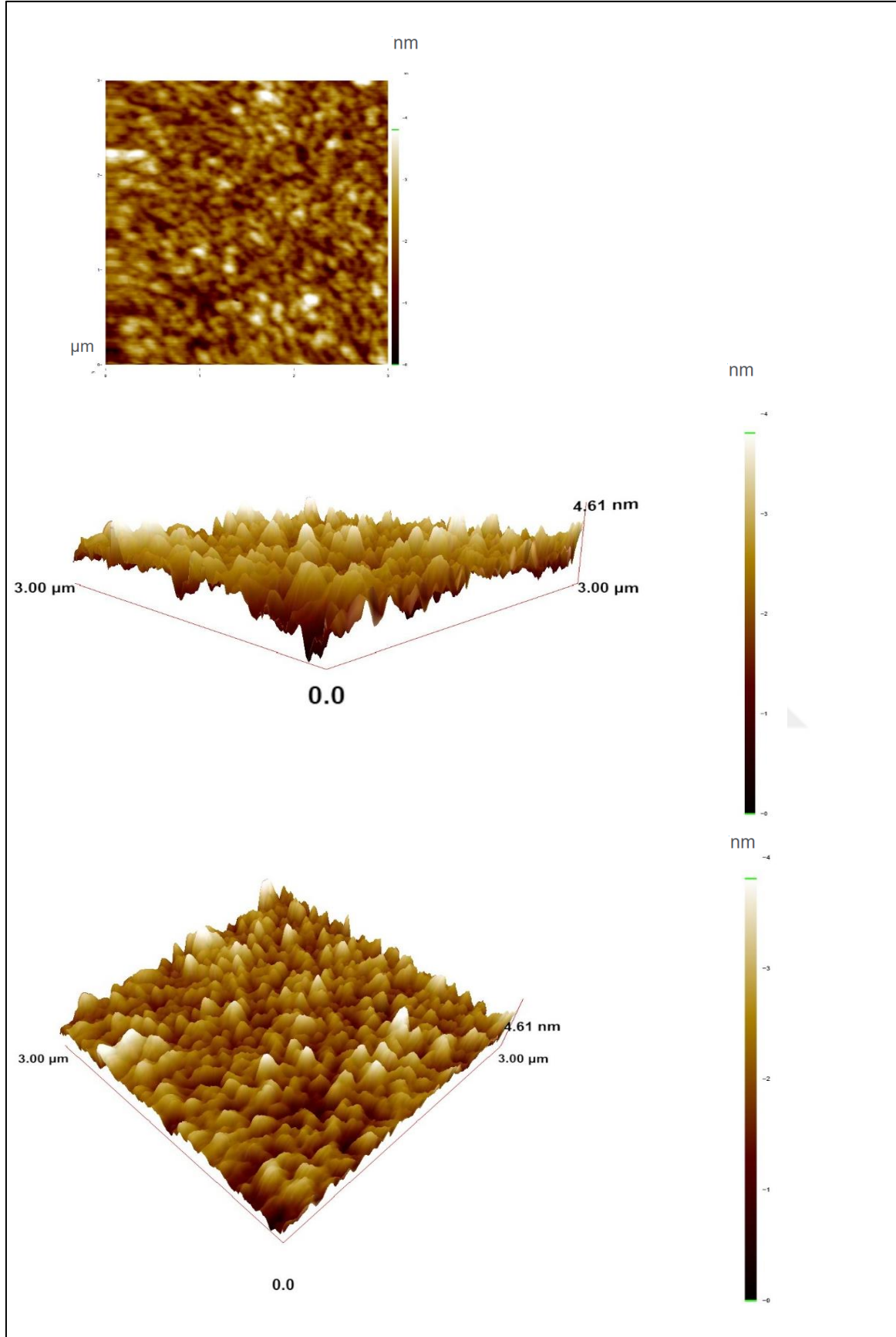
2th	i	h	k	l
30.315	28	2	2	0
35.700	100	3	1	1
37.345	13	2	2	2

4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) Verileri ve Tartışmaları

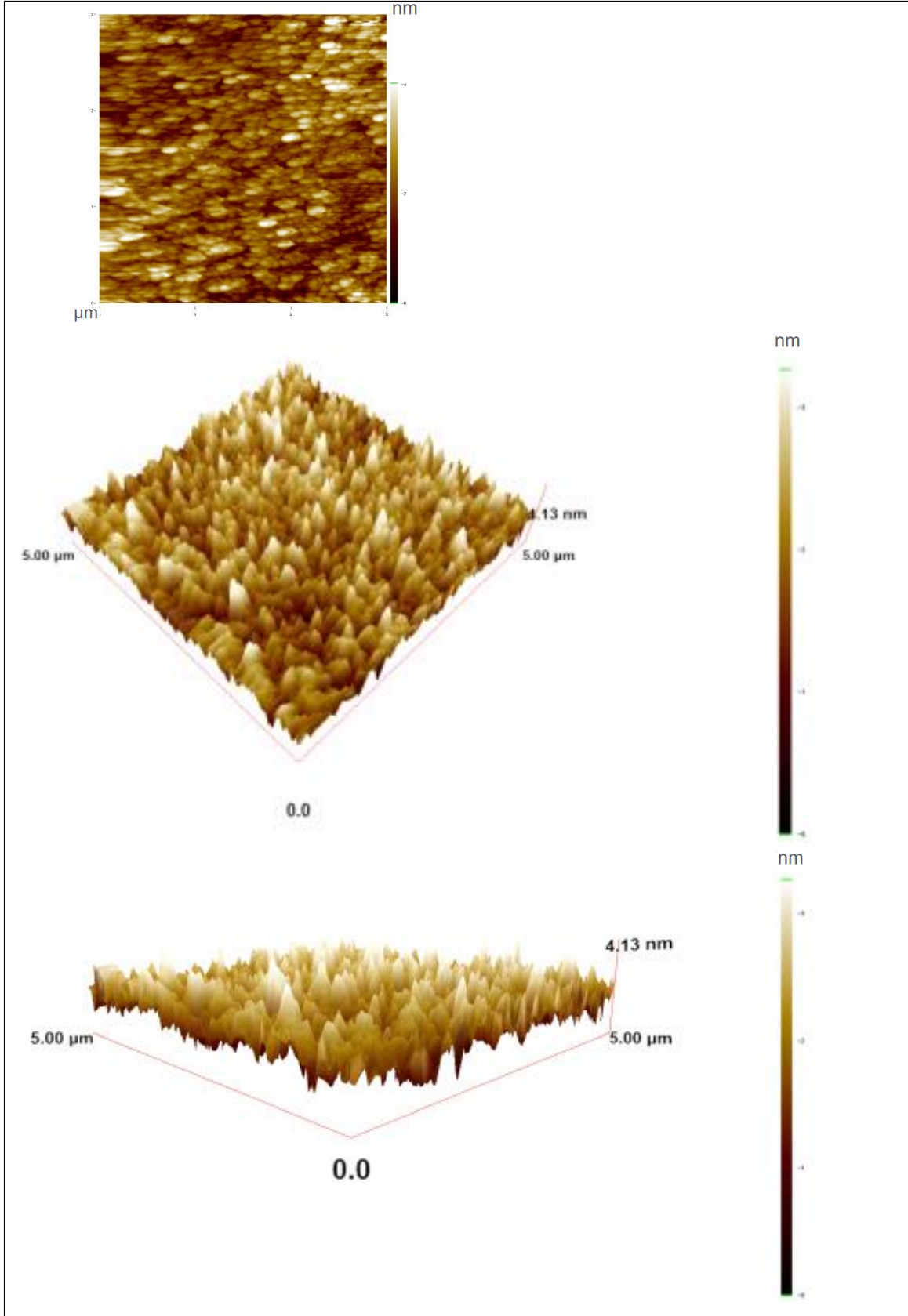
Büyütülen $ZnGa_2O_4$ filmlerinin yüzey topografisi, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) cihazı ile ölçüldü. Bu sayede numunelerin ortalama karekök (RMS) yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgiler elde edildi. Corning cam alttaşlar üzerine oda sıcaklığında ve farklı RF güç

değerlerinde (100W, 150W ve 200W) büyütülen $ZnGa_2O_4$ ince filmlerinin AFM ölçümleri temassız modda, $3 \times 3 \mu m^2$ 'lik ve $5 \times 5 \mu m^2$ 'lik yüzey alanları taranarak, yüzey analizleri yapıldı. S1, S2 ve S3 kodlu numunelerin 2D (iki boyutlu) ve 3D (üç boyutlu) görüntüleri sırasıyla Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'te verildi. $ZnGa_2O_4$ ince filmlerin RMS yüzey pürüzlülüğü değerleri S1, S2 ve S3 kodlu numuneler için Çizelge 4.3'te belirtildi.

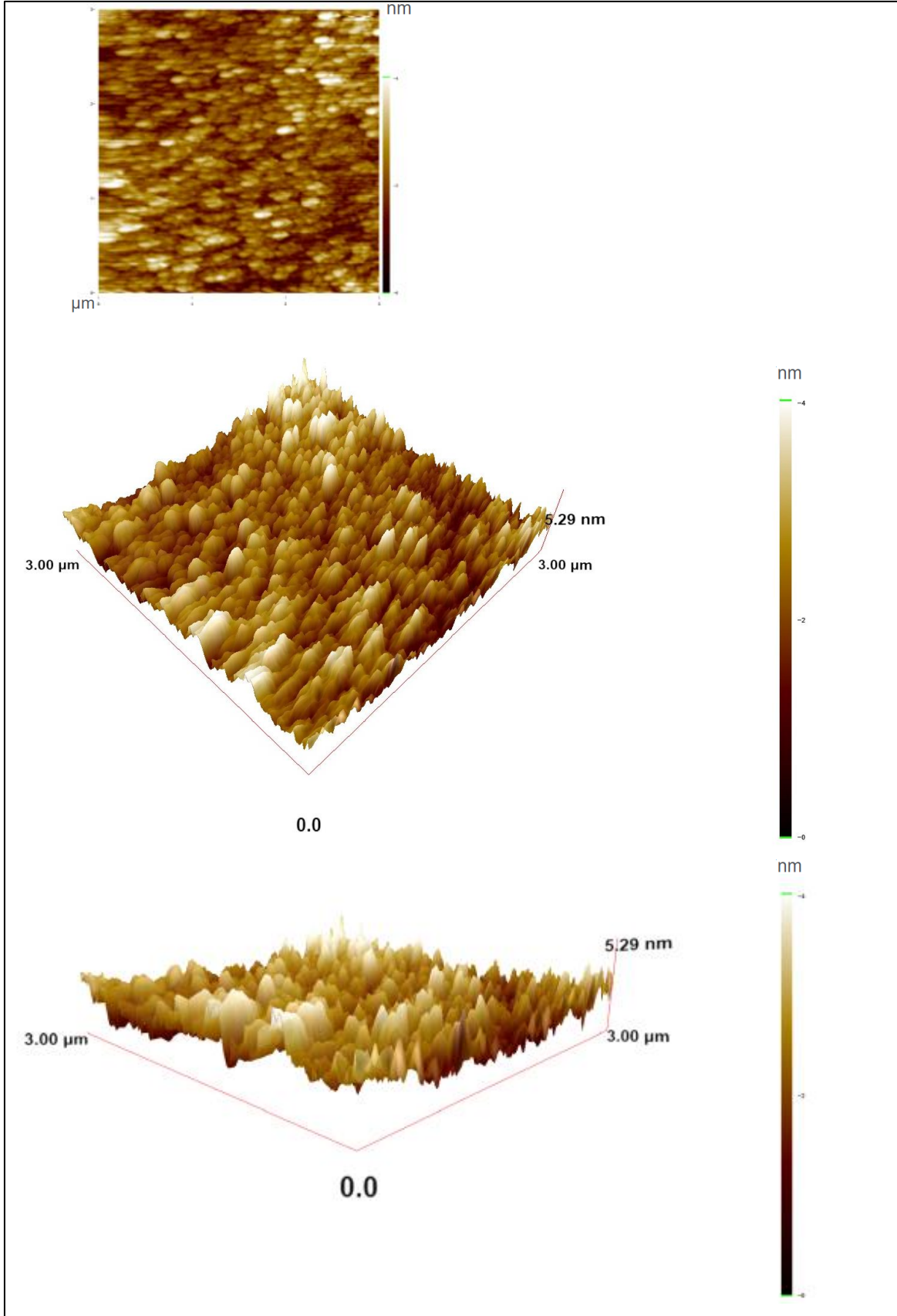
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntülerinde Korning alttaş üzerine kaplamalarda 100 W, 150 W ve 200 W RF gücünde hazırlanan numunelerin homojenliğinin iyi olduğu ve AFM görüntülerinden hesaplanan yüzey pürüzlülüğünün kök ortalama kare (RMS) değerlerinin artan RF güç değeri ile arttığı görüldü. Artan RF gücü ile birlikte RMS değerindeki bu artış, parçacık boyutundaki büyüme ile ilişkilendirilmiş olup, sonuçların tez çalışması kapsamında yapılan XRD analizleri ile uyumlu olduğu görüldü.



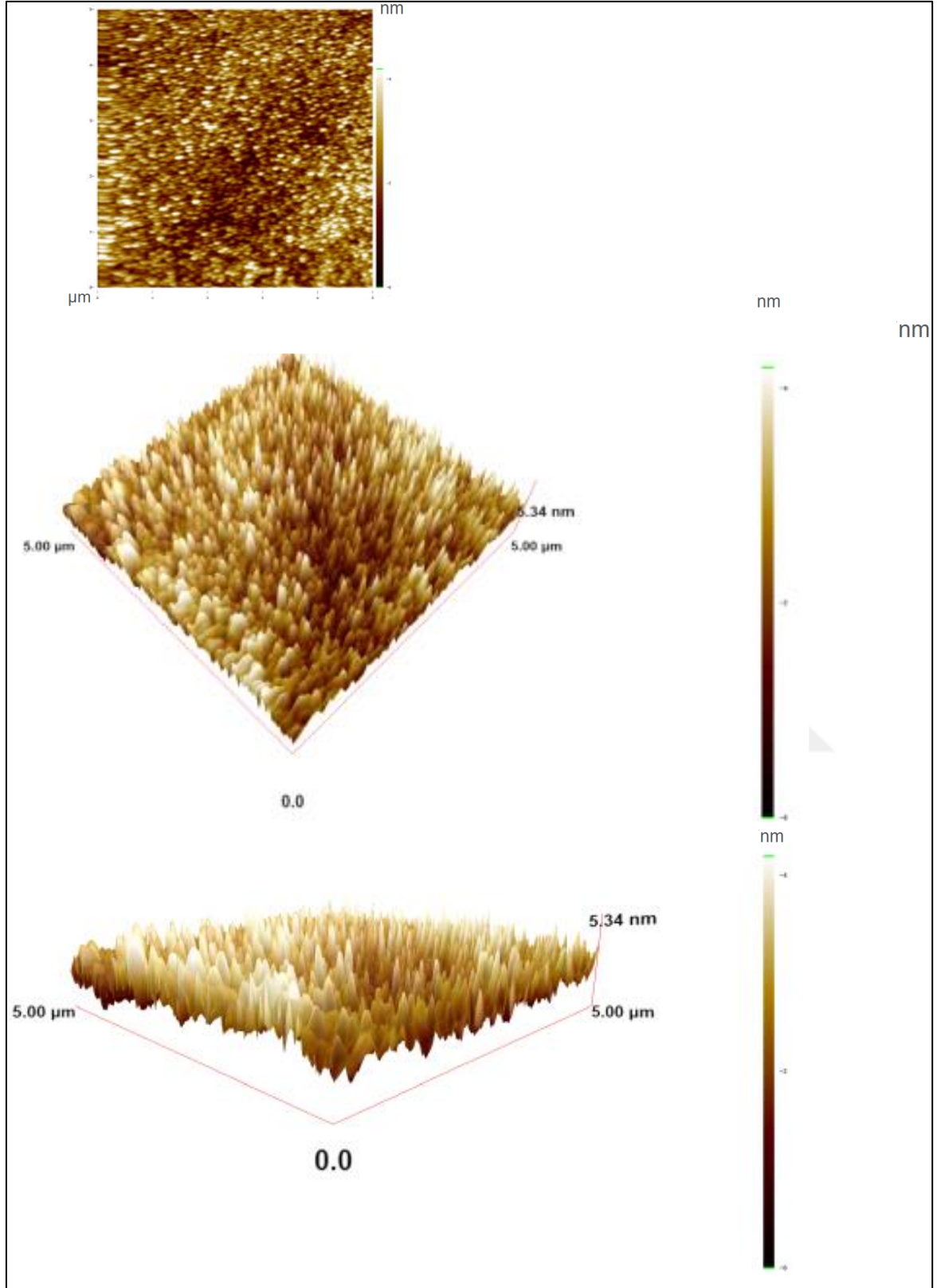
Şekil 4.8. 100 W RF gücü ile kaplanan S1 Kodlu ZnGa₂O₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri- Yüzey alanı 3x3 μm²



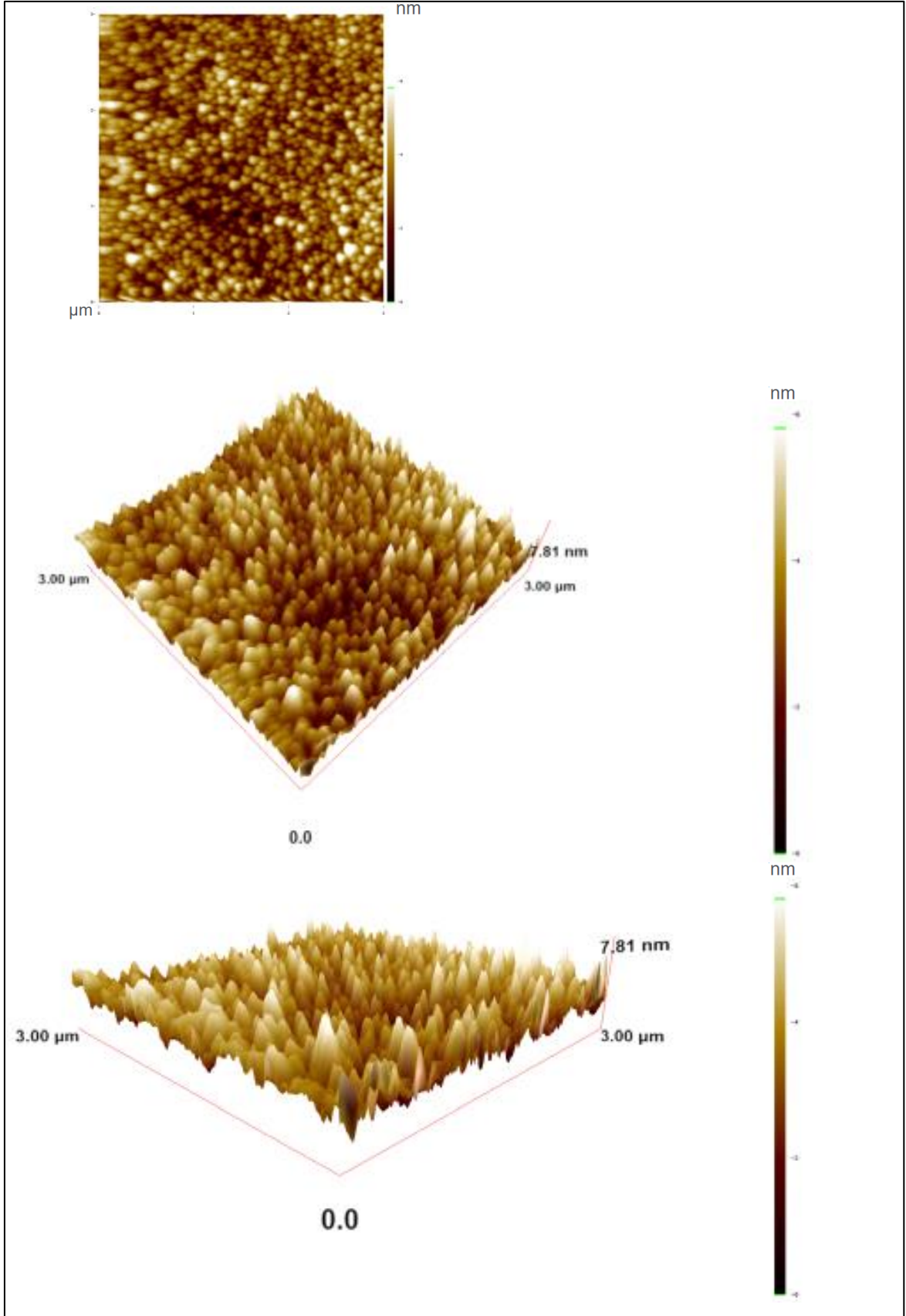
Şekil 4.9. 100 W RF gücü ile kaplanan S1 Kodlu ZnGa₂O₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 5x5 μm²



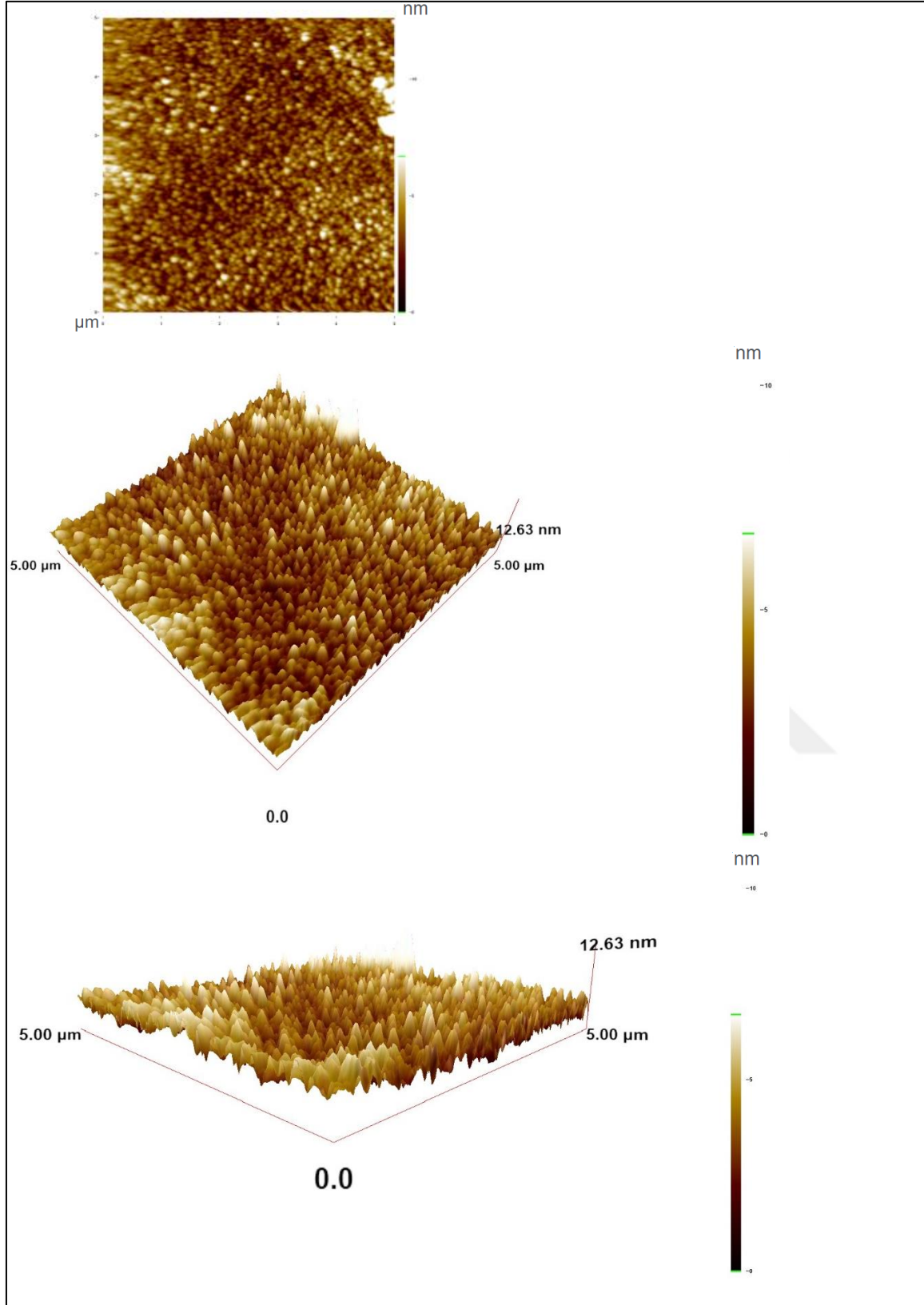
Şekil 4.10. 150 W RF gücü ile kaplanan S2 Kodlu ZnGa₂O₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 3x3 μm²



Şekil 4.11. 150 W RF gücü ile kaplanan S2 Kodlu ZnGa₂O₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 5x5 μm²



Şekil 4.12. 200 W RF gücü ile kaplanan S3 Kodlu ZnGa₂O₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 3x3 μm²



Şekil 4.13. 200 W RF gücü ile kaplanan S3 Kodlu ZnGa₂O₄ ince filmlerin AFM cihazı ile belirlenen yüzey analizi 2d ve 3d görüntüleri - Yüzey alanı 5x5 μm²

Çizelge 4.2. Büyütülen ince filmlerin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ve $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ yüzey alanında taranan farklı RF güç değerlerine göre RMS değerleri

Numune	Taranan Yüzey alanı (μm^2)	RF gücü (W)	RMS (nm)
S ₁	3x3	100	4.61
	5x5	100	4.13
S ₂	3x3	150	5.29
	5x5	150	5.34
S ₃	3x3	200	7.81
	5x5	200	12.63

İnce filmlerin yüzey morfolojisi deney tekniğine ve deneysel parametrelere göre değişir. İnce filmlerin mekanik, elektriksel ve optik özellikleri yüzey morfolojisinden etkilenir. Elektriksel iletkenliğin ve optik geçirgenliğin geliştirilmesi, tane sınırının azaltılması ve aktif yüzey genişlemesi ile sağlanabilir [53]. Yapılan analizler sonucu artan RF güç değeri ile ince filmlerin RMS değerlerinde de artış olduğu gözlemlendi. Yüksek RF gücü ile kaplanan ince filmler daha yüksek pürüzlülük ve düzensizlikler gösterdi. Genellikle yüzey pürüzlülüğü arttıkça, ışığın filminden geçişi azalır ve optik geçirgenlik değerlerinde bir düşüş gözlemlenir [54]. Araştırmamız en düşük optik geçirgenlik değerinin RF gücü en yüksek S3 kodlu, RMS değeri yani yüzey pürüzlülüğü en yüksek numunemiz olduğu göz önüne alındığında literatür bilgilerini doğruladı.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, çinko gallat ($ZnGa_2O_4$) ince filmlerin üretilmesi RF manyetik saçtırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Korning cam alttaş üzerine oda sıcaklığında, $400^\circ C$ alttaş sıcaklığında, farklı RF güç değerlerinde (100W, 150W ve 200W) çinko gallat ince filmler üretildi.

Çinko gallat ince filmlerin üretilmesinde düşük ark, yüksek plazma verimliliği, düşük basınçlarda üretim gerçekleştirilebilir gibi avantajlarından dolayı RF manyetik saçtırma sistemi tercih edildi. Üretilen ince filmlerin optik, yapısal ve morfolojik karakterizasyonları UV-VIS, XRD ve AFM spektrometre ölçüm cihazları kullanılarak gerçekleştirildi.

Çinko gallat ince filmlerin UV-VIS absorbans verileri kullanılarak, Origin Gömülü yazılımında Tauc Plot yöntemi ile Bragg kırınım yasasından yararlanılarak bant enerjisi aralığı hesaplandı. Üretilen çinko gallat yarıiletken malzemesinin, malzemenin literatürlerde verilen bant enerji aralığı ile (4.5-5.2 eV) uyumlu olduğu gözlemlendi. Bu, yapılan ölçümlerin doğruluğunu ve malzemenin beklenen özelliklerle uyumlu olduğunu gösterdi. S3 'ün en yüksek enerji band aralığına (4.86 eV) sahip olduğunu ve S1 'in en düşük enerji band aralığına (4.56 eV) sahip olduğu gözlemlendi. Geniş bant aralığı, malzemenin UV ışığını iyi absorbe edebilmesini sağlar. Bu, S3'ün daha yüksek enerjili fotonları emdiğini ve bu malzemenin ışığı daha etkili bir şekilde absorbe edebileceğini gösterdi. $ZnGa_2O_4$ malzemesinin enerji bant aralığı arttıkça, bu malzemenin izolasyon özelliklerinin iyileşmesi beklenebilir, ancak bu durum elektriksel iletkenlik açısından dezavantajlı olabilir. Hangi özelliklerin daha önemli olduğu, malzemenin kullanılacağı uygulamaya bağlıdır. Genel olarak, enerji bant aralığı daha yüksek olan $ZnGa_2O_4$ malzemesi, izolasyon ve optik uygulamalar için daha uygun olabilirken, daha düşük bant aralığı elektriksel iletkenlik gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabilir.

Proses koşullarının optik geçirgenlik üzerindeki etkisini değerlendirdiğimizde S1 ve S2 numuneleri, sırasıyla %91,004 ve %91,097 optik geçirgenlik değerlerine sahiptir. Bu iki numun arasında RF gücünün artışına (100W 'dan 150W değerine) rağmen, optik geçirgenlik değerlerinde çok küçük bir fark gözlemlendi. S3 örneği ise %89,323 optik geçirgenlik değerine sahiptir. RF gücündeki artış (200W) ile optik geçirgenlik değerinde bir düşüş gözlemlendi. Bu düşüş, yüksek RF gücünün film üzerindeki etkisiyle ilgili olabilir; yüksek

enerji girişinin film yapısını ve dolayısıyla optik özelliklerini değiştirebileceği düşünülebilir. $ZnGa_2O_4$ numunelerinin optik geçirgenlik değerlerinin literatürdeki değerlere yakın olduğu görülmektedir (400-800 nm dalga boyu için ortalama %70-93).

S1, S2 ve S3 kodlu numunelerin dalga boyu sırasıyla 419,76 nm, 377,63 nm ve 351,80 nm elde edilmiştir. S3'ün en kısa dalga boyuna sahip olduğunu görüyoruz, bu da onun en yüksek enerjiye sahip fotonları içerdiği ve daha kısa dalga boylarında ışığı emme kapasitesine sahip olduğu anlamına gelir. Ayrıca dalga boyu farklılıkları, renk özelliklerini etkileyebilir ve malzeme farklı optik uygulamalarda farklı performanslar sergileyebilir.

Çinko gallat ince filmlerin XRD analizleri, $1,5406\text{\AA}$ dalga boyuna sahip $CuK\alpha$ ışınları uygulanarak $20^\circ < 2\theta < 60^\circ$ aralığında $0,06$ derecelik adımlı tarama ile kırınım desenleri alınarak yapıldı. XRD desenleri incelendiğinde, üretilen S1, S2 ve S3 kodlu ince film numunelerinin yüzeylerinin homojen, kompakt ve boşluksuz bir yapıya sahip olduğu görüldü. S1 ve S2 numunesinde belirgin olmayan tepeler gözlemlenirken, S3 numunesinde ana tepe gözlemlendi. Bu tepeler sırasıyla (222) ve (311) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Tepelerin belirgin olmaması, kristal yapısının veya numunenin yoğunluğunun az olabileceğini, ya da analiz koşullarının bu piksellerin daha az görünür olmasına neden olabileceğini gösterdi. Ana tepe, (220) düzlemini temsil etmektedir. Bu tepe, genellikle $ZnGa_2O_4$ gibi spinel yapıdaki malzemelerin belirgin bir özelliğidir. (220) tepe, özellikle spinel yapısında karakteristik bir piktir ve bu tepenin belirginliği, malzemenin düzenli kristal yapısına işaret eder. Altta sıcaklığı uygulanması ve RF güç değerinin artması ile çinko gallat ince film yapısının kristalleşme eğilimi gösterdiği gözlemlendi. S3 'ün (220) tepe göstermesi, malzemenin spinel tipi bir yapıda olduğunu doğrular ve bu, numunenin polikristalin bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Bu durum, S3 numunesinin düzenli bir kristal yapı sergilediğini ve iyi bir kristaliteye sahip olduğunu gösterdi.

Çinko gallat ince filmlerin AFM analizleri incelendiğinde, RF gücündeki artışla birlikte RMS değerlerinde genel bir artış gözlemlendi. Bu artış, RF gücünün yüzey işlemede neden olduğu değişikliklerin bir sonucu olabilir. Yüksek RF gücünün, film yüzeyinde daha fazla enerji birikmesine ve dolayısıyla pürüzlülüğün artmasına neden olduğu gözlemlendi. Yüzey pürüzlülük değerinin artması, RF gücünün artmasına bağlı olarak partiküllerin büyümesiyle ilişkilidir. Bu veri, ışığın filmden geçişini kısıtlayarak optik geçirgenliğin azalmasıyla bağlantıyı anlamamızı sağladı. Çünkü S3 kodlu numunemizde yüzey pürüzlülüğünü ifade

eden RMS değeri en yüksek değerde iken aynı numune için optik geçirgenlik değeri en düşük değerde idi. Morfolojik açıdan elde edilen sonuçlar XRD analizleri ile uyum içerisindedir. Bu sonuçlar, ince film kaplama süreçlerinde RF gücünün optimize edilmesi gerektiğini ve film kalitesinin iyileştirilmesinin optik performans açısından önemli olduğunu vurguladı.

Yapılan analizlere göre, $ZnGa_2O_4$ ince filmlerinin RF magnetron püskürtme yöntemi ile üretimi sırasında RF gücündeki artışın, filmin yüzey pürüzlülüğünü artırarak optik geçirgenlikte bir düşüşe yol açabileceği sonucuna varıldı.

Bu bulgular, $ZnGa_2O_4$ ince filmlerinin üretiminde RF gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. RF gücündeki artış, yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmakta, bu da filmlerin optik ve elektronik özelliklerini iyileştirmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün kontrolü, yüksek kaliteli ince film üretimi için kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, ince film kaplama süreçlerinin optimizasyonu için önemli veriler sunmaktadır.

Tüm deneysel ölçümler, Gazi üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezinde gerçekleştirilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Ellmer, K., Kudella, F. (2011). *Transparent conductive zinc oxide - Basics and applications in thin film solar cells*. New York: Springer, 45-52.
2. Kahveci, E. (2017). *Galyum katkılı çinko oksit ince filmlerin karakterizasyonu ve üretim parametrelerinin ince filmlere olan etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara, 78-93.
3. Uzun, Ş. (2012). *Sol-gel yöntemiyle büyütülen indiyum katkılı çinko oksit filmlerin elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32-38.
4. Ellmer, K., Kudella, F., Mientus, R., Schieck, R. and Fiechter, S. (1994). Influence of discharge parameters on the layer properties of reactive magnetron sputtered ZnO films. *Thin Solid Films*, 247(1), 15–23.
5. Agrawal, S., Rane, R., Mukherjee, S. (2013). ZnO thin film deposition for TCO application in solar cell. In *Conference Papers in Science* (Vol. 2013, No. 1). Cairo: Hindawi Publishing Corporation, 718692.
6. Dumont, E., Dugnoille, B., Bienfait, S. (1999). Simultaneous determination of the optical properties and of the structure of r.f.-sputtered ZnO thin films. *Thin Solid Films*, 353, 93–99.
7. Evcimen Duygulu, N., Kodolbas, A. O. and Ekerim, A. (2014). Effects of argon pressure and r.f. power on magnetron sputtered aluminum doped ZnO thin films. *Journal of Crystal Growth*, 394, 116–125.
8. Hussen, M. K., Dejene, F. B., Gonfa, G. G. (2018). Effect of citric acid on material properties of ZnGa₂O₄³⁺ nanopowder by sol-gel method. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 124, 390.
9. Shi, Q., Wang, C. Z., Zhang, D., Li, S. H., Zhang, L. M., Wang, W. J. and Zhang, J. Y. (2012). Luminescence of Cr³⁺ doped ZnGa₂O₄ thin films deposited by pulsed laser ablation. *Thin Solid Films*, 520, 6845–6849.
10. Lina, X., Chen, D., Niu, W., Huang, C. Y., Horng, R. H., Cheng, L. C., Talwar, D. N., Lin, H. H., Lee, J. F. and Feng, Z. C. (2019). Evolution of the local structure and crystal phase for thin ZnGaO films grown by metal organic chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 520, 89–95.
11. Wang, W.-K., Liu, K.-F., Tsai, P.-C., Xu, Y.-J. and Huang, S.-Y. (2019). Influence of annealing temperature on the properties of ZnGa₂O₄ thin films by magnetron sputtering. *Coatings*, 9(12), 859.
12. İnternet: Target Materials. (t.y.). Zinc Gallate (ZnGa₂O₄) PLD Target. Web: <https://target-materials.com/products/zinc-gallate-ZnGa2O4-pld-target>. Son Erişim Tarihi: 18/03/2024.

13. Shi, Q., Zhang, J., Cai, C., Cong, L. and Wang, T. (2008). Synthesis and photoluminescent properties of Eu³⁺-doped ZnGa₂O₄ nanophosphors. *Materials Science and Engineering: B*, 149, 82–86.
14. Cheng, Y., Sun, K. (2020). Color modification of ZnGa₂O₄: Yb³⁺, Er³⁺, Tm³⁺ upconversion phosphors with the doping of Sn⁴⁺ and Ge⁴⁺ ions. *Applied Optics*, 59, 7313–7320.
15. Abritta, T., Blak, F. H. (1991). Luminescence study of ZnGa₂O₄: Co²⁺. *Journal of Luminescence*, 48, 558–560.
16. Sosman, L. P., Abritta, T., Pereira, A. C. and Vargas, H. (1994). Photoacoustic spectroscopy of Co²⁺ in ZnGa₂O₄ and MgGa₂O₄. *Chemical Physics Letters*, 227, 485–489. [CrossRef]
17. Wang, B., Wang, H., Tu, B., Xu, P., Wang, W. and Fu, Z. (2022). Theoretical insight into optical properties of ZnGa₂O₄ transparent ceramic. *Materials Today Communications*, 31, 104846.
18. Aleksandrova, M., Ivanova, T., Hamelmann, F., Strijkova, V. and Gesheva, K. (2020). Study of sputtered ZnO: Ga₂O₃ films for energy harvesting applications. *Coatings*, 10(650), 85-93.
19. İnternet: Moarefzadeh, A. (t.y.). *Simulation and modeling of physical vapor deposition (PVD) process*. Web: <https://www.wseas.org/multimedia/journals/mechanics/2012/54-615.pdf>, Son Erişim Tarihi: 16/03/2024.
20. Grimes, R. W., Anderson, A. B., Heuer, A. H. (1989). Predictions of cation distributions in AB₂O₄ spinels from normalized ion energies. *Journal of the American Chemical Society*, 111, 1–7.
21. Zerarga, F., Bouhemadou, A., Khenata, R. and Bin-Omran, S. (2011). Structural, electronic and optical properties of spinel oxides ZnAl₂O₄, ZnGa₂O₄ and ZnIn₂O₄. *Solid State Sciences*, 13, 1638–1648.
22. Kushwaha, A. K. (2014). Vibrational, elastic properties and sound velocities of ZnGa₂O₄ spinel. *Computational Materials Science*, 85, 259–263.
23. Hsieh, I. J. (1994). Growth of ZnGa₂O₄ phosphor by radio frequency magnetron sputtering. *Journal of the Electrochemical Society*, 141, 1617.
24. De Vos, A., Lejaeghere, K., Vanpoucke, D. E. P., Joos, J. J., Smet, P. F. and Hemelsoet, K. (2016). First-principles study of antisite defect configurations in ZnGa₂O₄: Cr persistent phosphors. *Inorganic Chemistry*, 55, 2402–2412.
25. Zhang, L., Ji, G. F., Zhao, F. and Gong, Z. Z. (2011). First-principles study of the structural, mechanical and electronic properties of ZnX₂O₄ (X = Al, Cr, and Ga). *Chinese Physics B*, 20, 047102.

26. Dixit, H., Tandon, N., Cottenier, S., Saniz, R., Lamoen, D., Partoens, B., Van Speybroeck, V. and Waroquier, M. (2011). Electronic structure and band gap of zinc spinel oxides beyond LDA: $ZnAl_2O_4$, $ZnGa_2O_4$ and $ZnIn_2O_4$. *New Journal of Physics*, 13, 063002.
27. Chen, M.-I., Singh, A. K., Chiang, J.-L., Horng, R.-H. and Wu, D.-S. (2020). Zinc gallium oxide—A review from synthesis to applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 3, 22-45.
28. Wang, W.-K., Xu, Y.-J., Huang, S.-Y., Liu, K.-F. and Tsai, P.-C. (2019). Structural characteristics and photoluminescence properties of sputter-deposited $ZnGa_2O_4$ thin films on sapphire and Si(100) substrates. *Journal of Materials Science*, 25, 122-136.
29. Kurt, E. (2021). *RF magnetron sıçratma parametrelerinin nikel oksit ince filmlerin elektrokromik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 45-63.
30. Rubshtein, A. P., Vladimirov, A. B., Korkh, Y. V., Ponomov, Y. S. and Plotnikov, S. A. (2017). The composition, structure and surface properties of the titanium-carbon coatings prepared by PVD technique. *Surface & Coatings Technology*, 309, 680–686.
31. Musil, J. (2015). *Advanced hard nanocomposite coatings with enhanced toughness and resistance to cracking*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 377-463.
32. Baptista, A., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Pinto, G. and Fernandes, L. (2018). On the Physical Vapour Deposition (PVD): *Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications*. Proceedings of the 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), Columbus, 746–757.
33. Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. New York: Elsevier, 78-93.
34. Mattox, D. M. (2003). *The foundations of vacuum coating technology*. New York: Noyes Publications, 112-125.
35. Karakuş, E. and Koç, M. M. (2017). *Galyum katkılı çinko-oksit ince filmlerin özelliklerine sıçratma gücünün ve kaplama sonrası uygulanan ısıtma işleminin etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 122-136.
36. Ergünhan, B. H. (2017). *Galyum katkılı çinko-oksit ince filmlerin özelliklerine sıçratma gücünün ve kaplama sonrası uygulanan ısıtma işleminin etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 45-63.
37. Davidse, P. D. (1967). Theory and practice of RF sputtering. *Microelectronics Reliability*, 6(4), 336.
38. İnternet: RF/DC Magnetron Sputtering system. (t.y.). Web: <https://www.bose.res.in/departments/TRC/rfdcmss.jsp>, Son Erişim Tarihi: 22/03/2024.

39. İnternet: Agilent Technologies, Inc. (2021). *UV-Vis spectroscopy: Basics and applications* (Primer No. 5980-1397EN). Agilent Technologies. Web: <https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397en-agilent.pdf>, Son Erişim Tarihi: 22/03/2024.
40. Wang, H., Chu, P. K. (2013). Surface characterization of biomaterials. In P. K. Chu & X. Liu (Eds.), *Characterization of biomaterials*. New York: Elsevier, 105-174.
41. Fatimah, S., Ragadhita, R., Al Husaeni, D. F. and Nandiyanto, A. B. D. (2022). How to calculate crystallite size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer method. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 2(1), 65-75.
42. Bunaciu, A. A., Udriştioiu, E. G. and Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: Instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299.
43. İnternet: Kantitatif analiz metodolojisi. (t.y.). Web: <https://www.atomikateknik.com/uploads/belgeler/xrd-rietveld-egitim-sunumu-9840.pdf>. Son Erişim Tarihi: 12/04/2024.
44. Jagtap, R. N. and Ambre, A. H. (2006). Overview literature on atomic force microscopy (AFM): Basics and its important applications for polymer characterization. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 13(4), 368-384.
45. Lindsay, S. M. (2009). *Introduction to nanoscience*. New York: Oxford University Press, 78-103.
46. İnternet: AFM'nin temel çalışma prensibi. (t.y.). Web: https://tr.wikipedia.org/wiki/Atomik_kuvvet_mikroskobu. Son Erişim Tarihi: 01/05/2024.
47. Kim, J. K., Lee, J. M., Lim, J. W., Kim, J. H. and Yun, S. J. (2010). High-performance transparent conducting Ga-doped ZnO Films deposited by RF magnetron sputter deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 49(4S), 04DP09.
48. Yoo, J., Lee, J., Kim, S., Yoon, K., Park, I. J., Dhungel, S. K. and Yi, J. (2005). High transmittance and low resistive ZnO films for thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 480(1-2), 213-217.
49. Mursyalaat, V., Variyani, V. I., Arsyad, W. O. S. and Firihi, M. Z. (2023). The development of program for calculating the band gap energy of semiconductor material based on UV-Vis spectrum using delphi 7.0. *Journal of Physics: Conference Series*, 2498, 012042.
50. İnternet: Direct and indirect band gaps. (t.y.). Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_and_indirect_band_gaps. Son Erişim Tarihi: 16/05/2024.
51. Aydoğdu, H. S., Uzkalan, S. (2019). The structural, surface morphology, optical and electrical properties of ZnO film doped gallium at 10%. *Journal of Scientific Reports-A*, 43, 108-124.

52. Alev Kızılbulut, A. (2014). *Gainas yapılarının XRD ile karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 102-108.
53. Aydođu, H. S., Uzkalan, S. (2019). The structural, surface morphology, optical and electrical properties of zno film doped gallium at 10%. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (043), 108-124.
54. Yuan, L. (2018). Characterization of ZnGa₂O₄ thin films: Effect of RF magnetron sputtering power. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 235–243.







Gazili olmak ayrıcalıktır...