



**TERMİYONİK VAKUM ARK YÖNTEMİ İLE
KATKILI ÇİNKO OKSİT İNCE FİLM ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sercan Sadık ERDEM

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZKAN

FİZİK ANABİLİM DALI

Ocak 2020

Bu tez çalışması 18. FENBIL.16 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TERMİYONİK VAKUM ARK YÖNTEMİ İLE KATKILI ÇİNKO
OKSİT İNCE FİLM ÜRETİMİ**

Sercan Sadık ERDEM

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZKAN

FİZİK ANABİLİM DALI

Ocak 2020

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

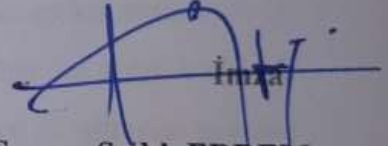
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21/01/2020


Sercan Sadık ERDEM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMİYONİK VAKUM ARK YÖNTEMİ İLE KATKILI ÇİNKO OKSİT İNCE FİLM ÜRETİMİ

Sercan Sadık ERDEM

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZKAN

Bu araştırmada, önemli bir yarıiletken bileşik olan ZnO ince filmlerin üç farklı Ag, Cu ve Co elementleri ile katkılanması ve farklı fiziksel özellikleri incelenmiştir. İnce filmlerin üretimi plazma destekli Termiyonik Vakum Ark (TVA) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen katkılı ZnO ince filmlerinin mikroyapısal, yüzeysel ve optiksel gibi fiziksel özellikleri sırası ile X-ışını kırınım (XRD), AFM, FESEM, UV-Vis spektrofotometre ve FL ölçüm cihazları ile incelenmiştir. Mikroyapısal ölçümünden her iki altlık üzerinde katkılan filmlerin yapısı hegzagonal olarak bulunmuştur. Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Ag, Cu ve Co katkılı filmlerde ortalama tanecik büyüklükleri sırası ile 35,65, 30,53 ve 78,37, 30,22 ve 78,37, 38,09 nm olarak elde edilmiştir. Bu değerler filmlerin nano – boyutta olduğunu açıklamıştır. Üç katkılı ZnO filmlerde ise en büyük tanelere cam altlık üzerinde rastlanmıştır. AFM ve FESEM analizlerinden filmlerin yüzeylerinin homojen, çatlaksız ve boşluksuz büyümesi barizdir. AFM ölçümünden elde edilen pürüzlülük değerleri cam ve Si alttaşlar üzerine kaplanan Ag, Cu ve Co katkılı filmler için 34, 13 ve 9,35, 10,62 ve 18,3, 9,95 nm olarak belirlenmiştir. Filmlerin pürüzlülük değerlerinin artması hesaplanan tanecik büyüklükleri ile desteklemiştir. Optiksel özelliklerden, cam alttaş üzerine üretilen Ag, Cu ve Co katkılı filmlerde (330-1100 nm aralığında) elde edilen geçirgenlik değerleri 11,85, 21,78 ve 70,85% olarak bulunmuştur. Cam ve Si alttaşlar üzerinde hazırlanan Ag, Cu ve Co katkılı filmlerde ortalama kırılma indisi sırasıyla 2,013, 2,058 ve 1,630, 1,820 ve 1,669, 2,000 olarak elde edilmiştir. Filmetriks ölçümü sonucunda elde edilen kalınlık değerleri Ag, Cu ve Co katkılı ZnO

ince filmlerde 73, 75 ve 84, 80 ve 88, 90 nm cam ve Si alttaşlar için bulunmuştur. Bu çalışmada kullanılan TVA tekniğinin özellikle nano-boyutta katkılı ince filmler üretilmesi için uygun ve başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

2020, xii+86 sayfa

Anahtar Kelimeler: ZnO, Yarıiletken, Yasak enerji aralığı, Optik zellikler, Yüzey zellikleri, Mikroyapı zellikleri.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

PRODUCTION OF DOPED ZnO THIN FILMS USING THERMIONIC VACUUM ARC METHOD

Sercan Sadık ERDEM

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Asst. Prof. Mehmet ÖZKAN

In this research, a significant semiconductor compound, ZnO doped with three different Ag, Cu and Co elements and different physical properties were investigated. All thin films were produced utilized plasma assisted Thermionic Vacuum Arc (TVA) technique. The physical properties of the produced doped ZnO thin films were evaluated in terms of X-ray diffraction (XRD), atomic force microscopy (AFM), field emission scanning electron microscopy (FESEM), Ultra violet-Visible (UV-Vis) spectrophotometer and photoluminescence (PL), respectively. On both substrates, according to the microstructural measurement, the films structure was found to be hexagonal. The average particle size values of Ag, Cu and Co-doped films produced on glass and Si substrates were obtained as 35,65, 30,53 and 78,37, 30,22 and 78,37, 38,09 nm, respectively. These values proved that the films were nano-sized. For all doped films, the largest grains were found on a glass substrate. Regarding to the surface results, the homogeneous, crack-free and void-free growth on the surfaces of the films was obviously seen. The roughness values obtained from AFM measurement were 34, 13 and 9,35, 10,62 and 18,3, 9,95 nm for Ag, Cu and Co-doped films coated on glass and Si substrates. The increase in the roughness values of the films was fully supported by the calculated mean particle size values as well. Based on the optical properties, the transmittance values of Ag, Cu and Co-doped films (in 330-1100 nm range) were recorded as 11,85, 21,78 and 70,85% on the glass substrate. The average refractive indices of Ag, Cu and Co-doped films prepared on glass and Si substrates were 2,013, 2,058 and 1,630, 1,820 and 1,669, 2,000,

respectively. The thickness values obtained by Filmetrics measurement for Ag, Cu and Co-doped ZnO thin films were 73, 75 and 84, 80 and 88, 90 nm on glass and Si substrates, respectively. It was concluded that the TVA technique used in this study was especially suitable and successful for producing nano-sized doped thin films.

2020, xii + 86 pages

Keywords; ZnO, Semiconductors, Band gap energy, Optical properties, Surface properties, Microstructural properties.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÖZKAN'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Suat PAT'a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Ayrıca hayatım boyunca bana hep iyi birer örnek olan, güven ve ilgilerini esirgemeyen sevgili annem Hatice ERDEM ve sevgili babam Necip Sadık ERDEM'e, her zaman yanımda olan canım ikiz kardeşim Ercan Mehmet ERDEM'e ve hayatımın her alanında olduğu gibi bu araştırma boyunca da desteğini esirgemeyen sevgili eşim Gözde ERDEM'e her şey için teşekkür ediyorum.

Bu çalışmamı, varlıklarıyla en büyük manevi destekçilerim olan canım kızlarım İklim ERDEM ve İdil ERDEM'e ithaf ediyorum. “Yolunuzu her zaman akıl ve bilimin ışığıyla aydınlatın güzel kızlarım.”

Sercan Sadık ERDEM

Afyonkarahisar, 2020

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	3
2.1 Yarı İletkenler	3
2.2 ZnO İnce Filmler	5
2.2.1 Ag Katkılı ZnO İnce Filmler.....	7
2.2.2 Cu Katkılı ZnO İnce Filmler	9
2.2.3 Co Katkılı ZnO İnce Filmler	10
3. MATERYAL ve METOT.....	12
3.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD).....	12
3.2 Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği	14
3.2.1 Vakum Odası.....	16
3.2.2 Katot.....	17
3.2.3 Anot Materyali Potası	18
3.2.4 Katot Akımı Güç Kaynağı	19
3.2.5 Anot Potansiyeli Güç Kaynağı.....	19
3.2.6 Pompa Sistemleri	20
3.2.7 Vakum Ölçüm Sistemleri.....	21
3.2.8 Ampermetre ve Voltmetre Sistemleri	21
3.2.9 İnce Film Kalınlık Ölçüm Sistemleri	21
3.3 Kullanılan Analiz Cihazları	22
3.3.1 X-Işını Kırınım (XRD) Cihazı	22
3.3.2 X-Işını Kırınımı Geometrisi ve Bragg Yasası.....	22
3.3.3 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM)	25
3.3.4 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM).....	27

3.3.5 UV-Vis Spektrofotometre	31
4. BULGULAR.....	34
4.1 Gümüş (Ag) Katkılı ZnO İnce Filmleri	34
4.1.1 Mikro Yapısal Özellikler.....	35
4.1.2 Yüzey Özellikleri	39
4.1.3 Optik Özellikler.....	41
4.2 Bakır (Cu) Katkılı Çinko Oksit (ZnO).....	46
4.2.1 Mikro Yapısal Özellikler.....	46
4.2.2 Yüzey Özellikleri	52
4.2.3 Optik Özellikler.....	53
4.3 Kobalt (Co) Katkılı Çinko Oksit (ZnO).....	57
4.3.1 Mikro Yapısal Özellikler.....	58
4.3.2 Yüzey Özellikleri	63
4.3.3 Optik Özellikler.....	64
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	69
6. KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

eV	Elektron volt
FWHM	pik noktasının maksimum şiddetinin yarısında tam genişlik
N	Birim yüzey alanı başına düşen kristalitlerin sayısı
Å	Angstrom
θ	Theta
μ	Mikro
m	Meter
nm	Nanometre
A	Amper
°C	Santigrat
V	Volt
k	Kilo
W	Watt
λ	Dalga boyu
d	Kalınlık
D	Tanecik büyüklüğü
ξ	Mikro-gerilme
δ	Dislokasyon yoğunluğu
Pa	Paskal
N	Newton
R_a	Pürüzlülük ortalaması
I_T	Geçen ışığın şiddeti
I_E	Gelen ışığın şiddeti
R	Yansırma
I_R	Yansıtılan ışığın şiddeti
S	Saçılan ışık
I_s	Saçılan ışık şiddeti
A	Absorbans
I_A	Absorbe edilmiş ışığın şiddeti

Kısaltmalar

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Au	Altın
CdS	Kadmiyum solfit
Co	Kobalt
Cu	Bakır
DC	Direkt akım
Fe	Demir

FESEM	Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu
FL	Fotolüminesans
GaAs	Galyum arsenit
GaN	Galyum Nitrat
Ge	Germanyum
GOF	Goodness of fit
İn	İndyum
INFLPR	National Institute For Laser, Plasma and Radiation Physics
LaB ₆	Lantanum hexaboride
LED	Işık yayan diyet
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
QD	Kuantum noktaları
RF	Radyo frekans
RMS	Ortalama karekök
Sb	Antimony
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbit
STM	Yüzey tünelleme mikroskop
TCO	Şeffaf iletken oksit
TVA	Termiyonik vakum ark
UV	Ultraviyole
W	Tungsten
XRD	X-ışını kırınım
Zn	Çinko
ZnO	Çinko oksit
ZnS	Çinko sülfür
ZnSe	Çinko selenyum

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Üç, iki, bir ve sıfır boyutlu yarı iletken bir yapıda bir bant için durumların ideal yoğunluğu	3
Şekil 2.2 Kuantum noktalarının dökme yarı iletkenlere göre elektronik yapısı.....	4
Şekil 2.3 ZnO ince filmlerin kristal şekilleri.....	6
Şekil 2.4 Wurtzite ve Rocksalt ZnO'nin soğurma grafikleri.....	6
Şekil 3.1 Fiziksel buhar biriktirme işleminin şematik gösterimi	12
Şekil 3.2 Gelişmiş kaplamalar için mevcut fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniklerinin bölümlenmesi	14
Şekil 3.3 TVA sisteminin şematik çizimi.....	15
Şekil 3.4 TVA sisteminin fotoğrafı	16
Şekil 3.5 TVA sisteminde kullanılan vakum odası	17
Şekil 3.6 TVA tekniğinde kullanılan katot.....	17
Şekil 3.7 Kullanılan katot fotoğrafı.....	18
Şekil 3.8 TVA sisteminde deney sırasında kullanılan güç kaynakları panoları.....	20
Şekil 3.9 Deney sırasında kullanılan mekanik ve turbomoleküler pompa düzeneği.....	21
Şekil 3.10 Bragg yasasının görüntüsü	24
Şekil 3.11 FESEM cihazının düzeneği.....	26
Şekil 3.12 Uç sapması nedeniyle lazer yol uzunluğu değişikliklerinde AFM temel tespit yöntemi	28
Şekil 3.13 Bir güç ve prob – örnek ayırımı fonksiyonun diyagramı	29
Şekil 3.14 AFM ölçümü ve pürüzlülük tayini.....	30
Şekil 3.15 Bir örnekteki ışık etkileşimi.....	31
Şekil 3.16 Optik sistem konfigürasyon	33
Şekil 4.1 Cam üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin XRD deseni.....	36
Şekil 4.2 Si üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin XRD deseni.....	38
Şekil 4.3 a, c ve d) Cam ve b, e ve f) Si alttaş üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM ve FESEM görüntüleri	40
Şekil 4.4 Cam alttaş üzerine kaplanan Ag katkılı ZnO ince filmlerin absorpsiyon ve geçirgenlik eğrileri.....	42

Şekil 4.5 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin kırılma indis grafikleri	43
Şekil 4.6 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO ince filmlerin yansıma grafikleri	43
Şekil 4.7 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin fotoluminesans grafikleri	45
Şekil 4.8 Cam üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin XRD deseni	48
Şekil 4.9 Si üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin XRD deseni	50
Şekil 4.10 a, c ve d) Cam ve b, e ve f) Si alttaş üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM ve FESEM görüntüleri	52
Şekil 4.11 Cam alttaş üzerine kaplanan Cu katkılı ZnO ince filmlerin absorbands ve geçirgenlik eğrileri	54
Şekil 4.12 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin kırılma indislerinin grafikleri	55
Şekil 4.13 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin yansıma grafikleri	55
Şekil 4.14 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin fotoluminesans grafikleri	57
Şekil 4.15 Cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin XRD deseni	59
Şekil 4.16 Si üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin XRD deseni	61
Şekil 4.17 a, c ve d) Cam ve b, e ve f) Si alttaş üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM ve FESEM görüntüleri	63
Şekil 4.18 Cam alttaş üzerine kaplanan Co katkılı ZnO ince filmlerin absorbands ve geçirgenlik eğrileri	65
Şekil 4.19 a) Cam ve b) Si alttaş üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin kırılma indislerinin grafikleri	66
Şekil 4.20 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin yansıma grafikleri	67
Şekil 4.21 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin fotoluminesans grafikleri	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 ZnO özelliklerinin diğer geniş aralıklı yarı iletkenlerle karşılaştırılması	5
Çizelge 3.1 Çeşitli elementler ve bileşikler için erime sıcaklıkları ve uygun pota materyali	19
Çizelge 4.1 Ag katkılı ZnO ince film üretim parametreleri	34
Çizelge 4.2 Cam üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri.....	37
Çizelge 4.3 Si üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri.....	39
Çizelge 4.4 Cu katkılı ZnO ince film üretim parametreleri	46
Çizelge 4.5 Cam üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri.....	49
Çizelge 4.6 Si üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri.....	51
Çizelge 4.7 Co katkılı ZnO ince film üretim parametreleri	57
Çizelge 4.8 Cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri.....	60
Çizelge 4.9 Si üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri.....	62

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında yarı iletken teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ve bilinen ZnO yarı iletken ince filmlerin, Termiyonik Vakum Ark (TVA) yöntemi ile Ag, Cu ve Co katkılanarak optik, yüzey ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

ZnO bileşiği birçok alanda kullanılmaktadır. ZnO tek kristallerin oda sıcaklığında yasak enerji aralığı 3,1, 3,2 ve 3,3 eV'dir (Srikant ve Clarke 1998). İnce film olarak üretiliğinde ise 3,3 eV değerine ulaşmaktadır. Üretim teknikleride göze alındığında ince film olarak üretilmesi avantaj sağlamaktadır. Yasak enerji aralığının değiştirilmesi yapının başta optik özelliklerini değiştirmektedir. Bu yüzden literatür incelendiğinde ZnO yarı iletken bileşiğine katkılama işlemleri yapılmaktadır (Neumark 1997). Literatüre bakıldığında, Al, Ag, In, Sb, Co, Fe gibi birçok atomun farklı oranlarda katkılanarak başta optik özellikleri gibi çeşitli özelliklerdeki değişimlerinin incelendiği görülmektedir.

ZnO ince filmleri katkılama işlemleri için birçok farklı üretim tekniği de kullanılmaktadır. Üretim tekniği ince filmlerin optik özelliklerinde baskın rol oynar. Bu teknikler kimyasal ve fiziksel olmak üzere ikiye ayrılabilir. Fiziksel teknikler arasında, RF sıçratma, DC sıçratma, vakumda buharlaştırma, lazer demeti buharlaştırma gibi yöntemler kullanılır (Li ve Gao 2004, Matsubara vd. 2003).

ZnO ince filmler kaynaklara göre üç farklı kristal yapıda olabilirler. Bunlar Rocksalt, Çinko blend ve Wurtzite kristal yapıdadır.

Bu çalışmada, plazma destekli Termiyonik Vakum Ark (TVA) tekniği kullanarak ZnO ince filmleri cam ve Si alttaşlar üzerine Ag, Cu ve Co katkılanarak üretilmiştir. Daha sonra bu filmlerin sırasıyla optiksel, yüzeysel ve mikroyapısal özelliklerinin katkısız ZnO ince filmlere karşın değişimleri ortaya konulmuştur. TVA sistemi, bir plazma destekli fiziksel buhar depolama (PVD) sistemidir. Kullanılan teknik yüksek vakum altında kaplamalar gerçekleştirmektedir ve istenilen malzeme türüne göre üretilen ince filmler; homojen, sıkı yapılı, yüksek yüzey tutunmalı ve nano-boyutludur. TVA tekniği ile katkılı

ince filmleri üretmek diğer fiziksel veya kimyasal yöntemlere göre daha hızlıdır. Yani malzemenin erime sıcaklığına kıyasla daha yüksek biriktirme hızına sahiptir.

Literatür araştırmasına göre, XRD sonuçlarından elde edilen desenlerden yola çıkarak Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmleri polikristal yapıdadır. Özellikle ZnO ait (100) piki yapılarda karşımıza çıkmaktadır. Cam ve Si altlıkların XRD analizleri karşılaştırıldığında ise cam üzerine kristallenmelerin daha kolay olduğu yönünde bir sonuca varılmıştır.

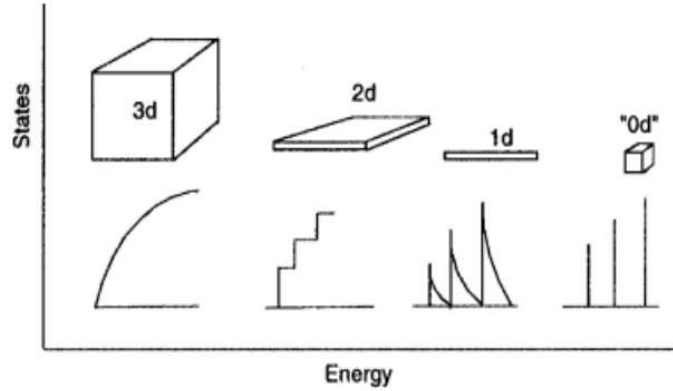


2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Yarı İletkenler

Yarı iletken nanokristaller, son on yılda nanobilim ve nanoteknoloji alanında büyük ilgi görmüştür. Birçok önemli nanoyapı, Si veya Ge gibi grup IV elementlerinden, GaAs gibi tip III-V yarı iletken bileşiklerden veya CdS gibi tip II-VI yarı iletken maddelerden meydana gelir (Poole ve Owens 2003).

Yıllar geçtikçe, yarı iletkenlerin yüzeylerini neredeyse atomik hassasiyetle kontrol edebilme yeteneği, yarı iletken yapıların daha da idealleşmesini sağlamıştır: kuantum kuyuları, teller ve noktalar. Bir an için malzemenin ayrıntılı atom seviyesi yapısını göz ardı ederek, her biri homojen yarı iletken malzemeden yapılmış ve mükemmel yüzey sonlandırmasıyla, farklı boyutlara sahip basit geometrik nesneleri (2, 1 ve 0) hayal etmek mümkündür. Bu tür yapılar, kuantum mekaniğinin öngördüğü elektronik durumların yoğunluğundaki idealize varyasyonları sergilemeli, 3 boyutlu örneğin sürekli seviyeleri, 0 boyutlu örneğin ayırık durumlarına dönüşmüştür (Alivisatos 1996) (Şekil 2.1).

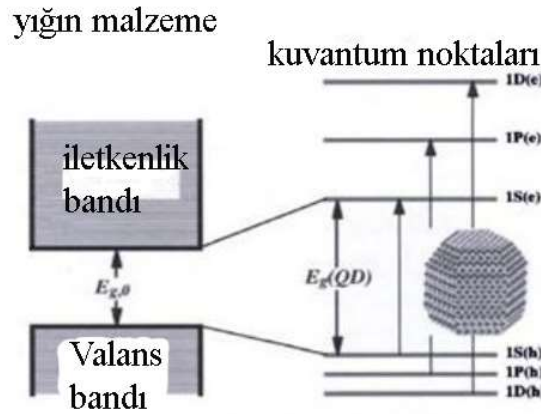


Şekil 2.1 Üç, iki, bir ve sıfır boyutlu yarı iletken bir yapıda bir bant için durumların ideal yoğunluğu

Yarı iletken NC'lerin büyük ilgisinin asıl nedeni elektronik davranışları, imalatlarına nispeten kolay ve ucuz yaklaşımları, sağlamlıkları ve yüzeylerinin esnek manipülasyonlarıdır. Yarı iletken elemanlardan yapılan nanoparçacıkların en çarpıcı özelliği, dökme malzemenin özelliklerine kıyasla boyutuna bağlı optik özelliklerinde

belirgin değişiklikler olmasıdır. Bu özel davranış, nanometrik ölçekte klasik fizik yasalarının artık geçerli olmadığı ancak kuantum mekaniği ile düşünmek zorunda olduğumuz gerçeği göz önüne alınarak açıklanabilir (Cohen-Tannoudji vd. 1977).

Pauli'nin dışlama ilkesine göre enerji seviyeleri (Şekil 2.2); yasak enerji aralığı artık sadece malzemeye bağlı olan sabit bir parametre haline gelmemektedir. Yaklaşık 10 nm büyüklüğünde 104 atoma karşılık gelen yarı iletken bir partikül olduğunu düşünürsek, elektronik uyarımlar partikül sınırlarından etkilenir ve partikül boyutundaki değişikliklere enerji spektrumlarını ayarlayarak cevap verir. Bu koşullarda, parçacık büyüklüğü yasak enerji boşluğu enerjisini doğrudan etkiler. Bu fenomen kuantum büyüklüğü etkisi olarak bilinir, böylece onu gösteren nano ölçekli parçacıklara genellikle kuantum noktaları (QD) denir (Klimov 2003).



Şekil 2.2 Kuantum noktalarının dökme yarı iletkenlere göre elektronik yapısı

II-VI bileşik yarı iletkenler her zaman ilginç bir yarı iletken sınıflandırma olmuştur. On yıldan fazla bir süredir II-VI yarı iletkenler opto-elektronik alanda olası uygulamaları nedeniyle artan ilgi görmüştür. Geniş bant aralığı bulunan II-VI yarı iletkenleri, mavi ila ultra-mor (UV) spektrum aralığındaki verimli yayıcılarıdır ve muhtemelen ışık yayan lazer diyotlardaki GaN gibi malzemelerin de yerini almaya adaydır (Gutowski vd. 2002). Bazı benzerliklere rağmen II-VI yarı iletkenlerin her biri kendi benzersiz ve yeni fiziksel özelliklerini gösterir. Bu bileşikler çoğunlukla kübik (çinko blende) veya altıgen (wurtzite) yapı içinde kristalleşir. Bu yapılar, çizelge 2.1'de gösterildiği gibi çok çeşitli bant boşluklarında ve örgü sabitlerinde meydana gelir.

Çizelge 2.1 ZnO özelliklerinin diğer geniş aralıklı yarı iletkenlerle karşılaştırılması

Malzeme	Yapı	Örgü sabitleri		Yasak enerji aralığı (eV)
		a (Å)	c (Å)	
ZnO	Wurtzite	3,249	5,207	3,37
ZnS	Wurtzite	3,823	6,261	3,8
ZnSe	Zinc blende	5,668	-	2,7
GaN	Wurtzite	3,189	5,185	3,39
6H - SiC	Wurtzite	3,081	15,12	2,86

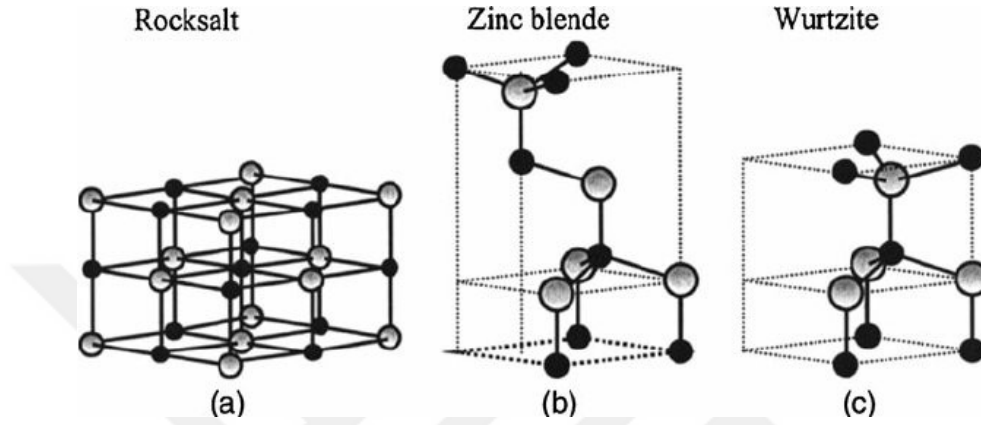
Yasak enerji aralıkları malzemenin özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu optik absorpsiyon, elektriksel iletkenlik ve kırılma indisi gibi özellikleri içerir. Malzemeler normalde doğrudan veya dolaylı yarı iletkenler olarak yasak enerji tipine göre sınıflandırılır. Doğrudan yasak enerji aralığı yarı iletkenlerinin, dolaylı yasak enerji aralığı yarı iletkenlerine göre avantajlı oldukları çünkü dalga vektörünün korunmasını sağlamak için fononlara ihtiyaç duymadıkları görülmüştür. II-VI bileşiklerinin çoğunun doğrudan yasak enerji aralıklı yarı iletkenler olarak bulunduğu ve kısa dalga boyu uygulamaları için optik alana hakim olduğu bulunmuştur. Işık yayan diyot (LED'ler) ve ultraviyole fotodetektör (Fasol ve Nakamura 1997), UV mavi yarı iletken lazer (Bagnall 1997) ve benzeri çeşitli uygulamalarda kullanılırlar.

2.2 ZnO İnce Filmler

ZnO ince filmler özellikle optik özelliklerinin (yasak enerji aralığı) değiştirilmesi amacıyla katkılama işlemlerine tabi tutulurlar. Katkılama işlemleri sonucunda iki atomlu yapılar oluşabildiği gibi üç atomlu yapıların da oluşması mümkündür. Bu oluşumlar esnasında kristal yapı ve mikroyapı özellikler değişiklik gösterdiğinden dolayı optik özellikler de oldukça fazla miktarda değişim gösterirler.

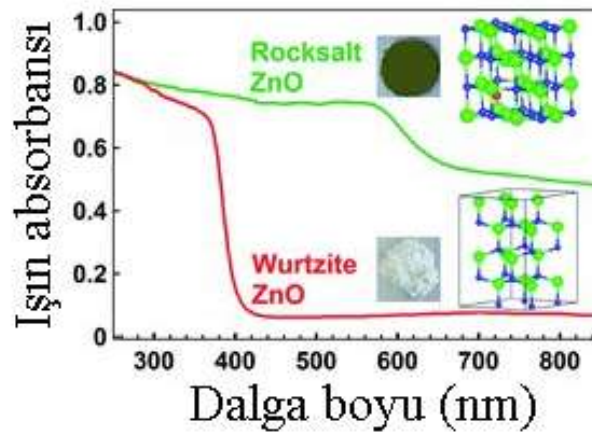
ZnO ince filmlerin üretilmeleri ile ilgili birçok yayın mevcuttur. Bu tezde ise Ag, Cu ve Co katkıları incelendiğinden dolayı, literatür özeti kısmında bu katkılar ile elde edilmiş akademik çalışmalar sınırlı tutulmuştur.

ZnO ince filmler üç farklı kristal yapıda olabilirler, makaleler incelendiğinde genellikle kristal yapısının wurtzite yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 2.3’de ise ZnO ince filmlerin olabilecek kristal yapılarının şematik gösterimi gösterilmiştir. Siyah küreler çinko ve beyaz küreler de oksijeni temsil etmektedir. Şekil 2.3’den (Özgür vd. 2005) aynen alınmıştır.



Şekil 2.3 ZnO ince filmlerin kristal şekilleri

ZnO ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri ise oksijen konsantrasyonuna ya da yapılardaki oksijen boşluklarına göre değişmektedir. Aynı zamanda ZnO’in elektromanyetik dalgayı soğurması da kristal yapısı ile alakalıdır. Şekil 2.4’de Wurtzite ve Rocksalt ZnO’nun soğurma grafikleri görülmektedir. Bu grafikler Razavi’den alınmıştır (Razavi-Khosroshahi vd. 2017). Rocksalt tipi yapılarda yasak enerji aralığı değeri 1,8 eV değerine kadar azalmıştır. Şekil 2.2 (Razavi-Khosroshahi vd. 2017) kaynaktan aynen alınarak kullanılmıştır.



Şekil 2.4 Wurtzite ve Rocksalt ZnO’nin soğurma grafikleri

ZnO ince filmler katkısız olarak üretildiğinde 3,37 eV'lik ve 60 meV bağlanma enerjili direkt band geçişli n-tipi bir yarı iletkenidir. Katkılanması ile de en popüler saydam iletken oksit yapılar üretilbilmektedir. ZnO, elektronik yapılar için kullanılan bir yarı iletken iken farklı katkılar sonucunda çok farklı özellik sergiler ve teknolojinin birçok alanında kullanılır.

2.2.1 Ag Katkılı ZnO İnce Filmler

Dias vd. (2019) yapmış olduğu çalışmada Ag katkılı ZnO katkılı yapılar elde edilmiş ve bu yapıların antimikrobiyal özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. İlgili yayında Ag katkılı ZnO nanoyapılar için XRD analizlerine yer verilmiştir. Bu sonuçlara göre Ag katkılı ZnO yapılar Wurtzite yapıda olduğu ve %1-3 aralığında yapılan Ag katkısının XRD piklerinde görülmediğine değinilmiştir.

Xu vd. (2018) yapmış oldukları yayında, Ag katkılı ZnO ince filmlerin birçok optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılabileceğinden bahs edilmektedir. Bu çalışmada, ekonomik bir üretim sistemi olarak sol-gel yöntemi kullanılmıştır. Üretilen filmler wurtzite kristal yapıdadır. ZnO ait XRD piklerinin ise (100), (002) ve (101) düzlemlerine ait oldukları bulunmuştur. Geçirgenlik değerleri ortalama %80 civarındadır. 375 nm civarında ise FL piki vermektedir.

Ag katkılı ZnO ince filmlerin bir diğer özelliği ise fotokatalitik özelliklere sahip olmasıdır. Sutanto vd. (2015) çalışmalarında bu özellik ile ilgili çalışmışlardır. Bu çalışmada üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin XRD sonuçlarına göre (002) düzleminde şiddetli bir X-ışın yansıması elde edilmiştir. Ag katkılı ise (002) dışındaki düzlemlere ait yansımalar XRD grafiğinden kaybolmuşlardır. Geçirgenlik grafiği ise katkısız ZnO ince filmlere göre çok değişmiştir. Özellikle 400 nm civarında çok büyük bir geçirgenlik değeri elde edilmiştir.

Ag katkılı ZnO ile ilgili bir diğer çalışma ise Lanjewar ve Gohel (2017) tarafından sol-gel döndürerek kaplama sistemi ile ürettikleri çalışmadır. Ag katkı miktarı %0-17,13 aralığında değişmiştir. Bant aralığı bu katkılama işlemi sonucunda 3,28 eV dan 2,65 eV'a kadar düşmüştür. XRD analizine göre üretilen yapılar polikristal formdadır.

Güney (2015), Ag katkılı ZnO ince filmlerin özelliklerini incelediği çalışmasında SILAR tekniği ile filmleri üretmiştir. Katkılama işleminde %3 ve %5 aralığında gümüş katkılamaı başarmıştır. Ag katkılama ile 3,27 eV'lik yasak enerji aralığı değeri elde edilmiştir. Ag katkı miktarı yasak enerji aralığı değeriı düşürmüştür.

Hulloli ve Shivaraj (2015) çalışmasında ise %2 ve %4 aralığında katkılama işlemini başarmış ve filmleri Si altlık üzerine üretebilmiştir. Elde edilen yapıların kristal yapısı wurtzite yapıdadır.

Sutanto vd. (2016) çalışmasında ZnO yarı iletkenine Ag elementleri katkılamış ve bunları foto ayrışma reaksiyonlarında kullanılmışlardır. Üretilen yapılar XRD analizlerine göre polikristal yapıdadır. Ag elementi eklendikçe (002) ZnO düzlem yansımasının 2θ değeriı bir miktar yüksek değere doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Ortalama tanecik boyutları ise 34 nm'dir. Geçirgenlik değeri %40 ile %100 aralığında değışmiştir. Ag katkılama oranı %0-25 aralığında değışmektedir.

Bir diğeri çalışma ise Liu vd. (2017)'nin yapmış olduğı ve Radyo Frekans sıçratma tekniği kullanılarak üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin özelliklerinin incelenmesidir. Ag katkılama oranı %1-8 arasında değışmektedir ve geçirgenlik değeri katkılama oranına bağılı olarak değışmektedir. %1 katkılı Ag geçirgenlik değeri %90 civarında iken, %8 katkılama oranında %30 civarında geçirgenlik değeri elde edilmiştir. Yasak enerji aralığı değeri ise 3,21-3,28 eV aralığında değışmektedir. Kristal boyutları ise 15-20 nm aralığında değışmektedir.

Riaz vd. (2019) çalışmasında ise Ag katkılı ZnO ince filmlerin Metilen mavisi ve Rodamin B' deki fotokatalitik özellikleri ve foto kararlılıkları incelenmiştir. Bu çalışmada ise Ag katkılama miktarı %0,5-1,5 aralığında kullanılmıştır. Katkı miktarı arttıkça da yasak enerji aralığı değeri 3,26' dan 3,21 eV değeriıne kadar azaltılabilmiştir. Geçirgenlik değeriı ise %92'den fazladır.

ZnO n-tipi bir yarı iletken iken, Ag katkılı ZnO ince filmler ile p-tipi yarı iletken üretilmektedir. Kim vd. (2007)'nin yayınlarında ise ince filmleri atmalı laser depolama yöntemi ile üretebilmişlerdir.

2.2.2 Cu Katkılı ZnO İnce Filmler

Ali vd. (2019) yayınlarında ZnO ince filmlere Cu atomu katkılanmıştır. Cu atomu ZnO yarı iletkenine katkılanması yapılabilen bir atomdur ve oda sıcaklığında çalışan ferromanyetik yapılar oluşur. Bu oluşan yapılar oldukça popüler yapılardır. Cu atomunun sahip olabileceği değerlikler nedeniyle oda sıcaklığının üzerinde süper iletken geçişe rastlanmaktadır.

Cu atomu katkılanması manyetik özelliklerinin yanında yapısal ve optik özellikler için de oldukça önemlidir. Sajjad vd. (2018) çalışmalarında ZnO bileşiği içerisine Cu atomu katkılanmıştır. Bu çalışmada Cu katkılama miktarı %1-7 aralığında değişmiştir. Elde edilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin XRD desenleri incelendiğinde literatüre göre bi-metalik oksitli bir yapı olduğu yani $Cu_xZn_{1-x}O$ şeklinde yapıların olduğu görülmüştür, bu durum da kaynaklar ile uyumludur. Bu yapılara wurtzite benzeri $Cu_xZn_{1-x}O$ ve tenorite benzeri $Zn_xCu_{1-x}O$ yapıların oluşabileceğinden bahs edilmektedir. Ortalama tanecik boyutu ise 20 nm civarındadır. Yasak enerji aralığı ise 2,94 eV olarak en düşük değer elde edildiği görülmüştür.

Thaweesaeng vd. (2013), ZnO yarı iletkenine %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında Cu atomu katkılarak ince filmleri elde etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Cu katkılı ZnO ince filmlerin kristal yapısının hegzagonal wurtzite yapıda olduğunu bulmuşlardır.

Ma vd. (2019), Cu katkılı ZnO yarı iletkenlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır. $Zn_{1-x}Cu_xO$ ($x=0$, $x=0,0278$, $x=0,0417$) şeklinde elde edilen ince filmlerde Cu atomu konsantrasyonu arttıkça yasak enerji aralığı değerinin azaldığını bulmuşlardır. Scherrer denkleminde göre parçacık boyutları 22 nm olarak hesaplanmıştır.

Pandian vd. (2018)'nin yapmış oldukları çalışmada Cu katkılı ZnO ince filmlerin fotokatalitik özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. XRD sonuçlarına Cu atomları ZnO kristallerin arasına yerleşmiştir.

2.2.3 Co Katkılı ZnO İnce Filmler

ZnO ince filmlere bir diğer önemli katkı elementi Co'dır. Özellikle spin etkileşiminin önemli olduğu yapılarda Co katkısı kullanılır. Co katkısı sonucu oluşan ZnO yarı iletkenin optik ve manyetik özellikleri incelemeye değerlidir. (Chanda vd. 2017) Co katkısı sonucunda yasak enerji aralığı artmıştır.

Co katkısı diğer katkılar gibi ZnO yapıların optik özelliklerini değiştirdiğinden dolayı önemli bir araştırma konusudur. (Chithra vd. 2014) Co katkısı ZnO'nun wurtzite kristal yapısını değiştirmemektedir. Zn ve Co kristal örgüde yer değiştirebilmektedir. Sonuçta ise bi-metalik oksitli yapılar üretilebilmektedir. Co katkısı bant aralığını mavi bölgeye doğru kaydırmaktadır. (Chithra vd. 2014)

Khantoul vd. (2018) yaptıkları çalışmada %5 ve %1 Co katkısı incelenmiştir. Özellikle bu çalışmada da optik özellikler üzerine yoğunlaşmıştır. Tanecik boyutu 30 nm civarında ve geçirgenlik değerleri oldukça yüksektir. Yasak enerji aralığı ise ZnO' in yasak enerji aralığına göre 10-20 meV kadar değiştirdiği belirlenmiştir. (Khantoul vd. 2018)

Katı (2019) tarihli çalışmada ise Co katkı oranı %1, 5, 10 gibi yüksek bir değerdir. Yasak enerji aralığı ise 3,05 eV değerine kadar %10'luk Co katkısı ile düşürülebilmektedir.

Ji vd. (2018)' nin çalışması da bir diğer Co katkılı ZnO yapılar ile ilgilidir. Bu çalışmada yasak enerji aralığının değiştiğinden ve kristal yapısında Co ve Zn atomlarının yer değişmesinden bahs edilmiş ve ikinci bir kristal fazın oluşmadığı belirtilmiştir. Yasak enerji aralığı ise 2,71 eV değerine kadar düşebileceği gösterilmiştir.

Febrianti vd. (2017) çalışmasında ise %7'lik Co katkısı sonucu kristal örgüde ikinci bir faz belirlendiği belirtilmiştir. Bu ikinci faz Co atomuna ait fazdır. Yani diğer çalışmaların aksine Co atomları Zn ile yer değiştirmeden araya girmektedir. Yasak enerji aralığı ise

farklı oranlar için hem kırmızıya kaymış hem de maviye bölgeye kaymıştır. Co katkılı ZnO ince filmler bu çalışmada hidro termal yöntemi ile sentezlenmiştir.

Swapna ve Reddy (2018) ise kobalt katkısı sonucu oluşan optik değişim d-d orbital özelliklerinden kaynaklandığı yorumu yapılmıştır.



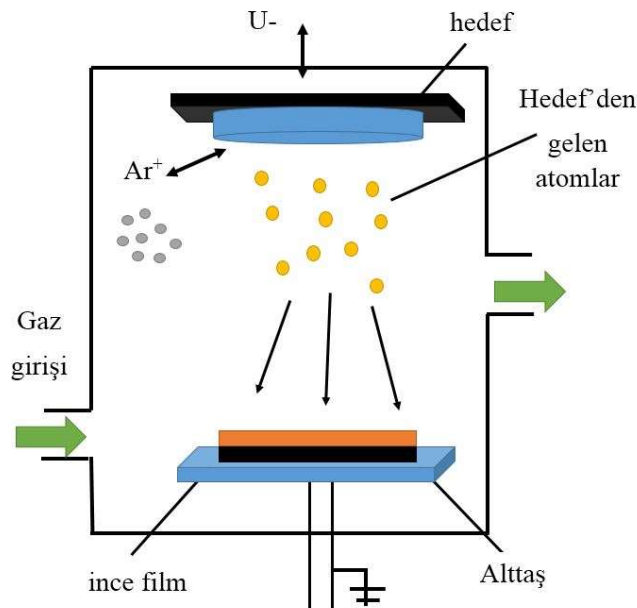
3. MATERYAL ve METOT

3.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) işlemi 100 yıldan uzun bir süredir bilinmektedir ve plazma destekli PVD teknikleri yaklaşık 80 yıl önce patentlenmiştir (Berghaus 1938). “Fiziksel buhar biriktirme” terimi sadece 60’larda ortaya çıkmıştır. Bu işlem malzemenin atomik seviyede transferini içeren bir buharlaştırma kaplama tekniğidir. Bu teknikte yapılan İşlem aşağıdaki adımlara göre tarif edilebilir;

1. Kaplamak istenen malzeme fiziksel araçlarla (yüksek sıcaklıktaki vakum veya gaz ortamındaki plazma) buhara dönüştürülür
2. Buhar kaynağından alttaşa kadar düşük basınçlı bir bölgeye taşınır ve
3. Buhar ince bir film oluşturmak için alttaş üzerinde yoğunlaşmaya maruz kalır.

Tipik olarak PVD teknikleri birkaç nanometre ile binlerce nanometre arasındaki kalınlıktaki filmleri kaplamak için kullanılır. Bununla birlikte, çok katmanlı kaplamalar, dereceli kompozisyon kaplamaları, çok kalın kaplamalar ve bağlantısız yapılar oluşturmak için de kullanılabilirler (Chi 2010). Tipik bir PVD sistemi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

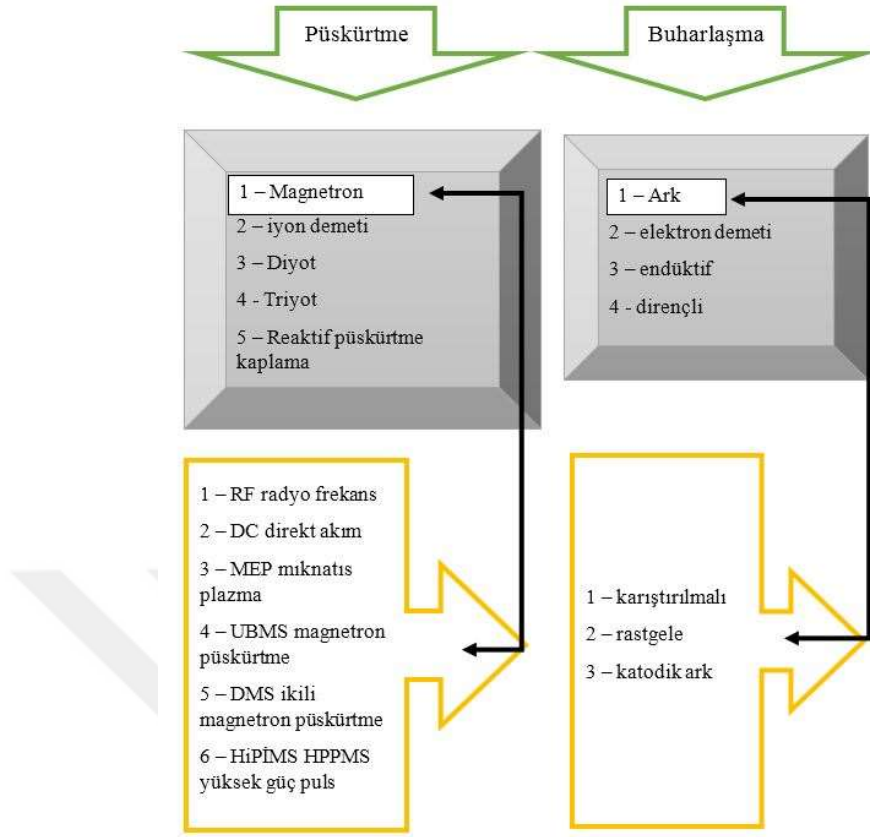


Şekil 3.1 Fiziksel buhar biriktirme işleminin şematik gösterimi

Bu işlem yüzeyin özelliklerinde ve alttaş ile kaplanmış istediğimiz malzeme arasındaki geçiş bölgesinde bir değişikliğe neden olur. Öte yandan, filmlerin özellikleri de alttaşın özelliklerinden etkilenebilir. PVD ince film teknolojisi elektron ışını veya sıcak pota buharlaşması, reaktif buharlaşma ve iyon kaplaması dahil olmak üzere oldukça geniş bir kaplama tekniklerini kapsar. PVD teknikleri ayrıca ister plazma ister bir iyon ışını ile püskürtme işlemine dayanan işlemleri içerir. Bu teknik buna ek olarak filtrelenebilecek veya ark kaynaklarından biriktirmeyi tarif etmek için kullanılır. Genel olarak, bu işlem iki gruba ayrılabilir: buharlaşma ve püskürtme. Bu teknikler parçacıkların hedeften çok düşük basınçta çıkarılmasını ve alttaş üzerine biriktirilmesini sağlar. Buharlaşma, termal yollarla kaplanan ince filmlere atıfta bulunurken, püskürtme tipinde atomlar veya moleküller gaz iyonlarının (plazma) etkisiyle katı hedeften çıkar. Her iki yöntem de birkaç spesifik teknikte geliştirilmiştir (Chi 2010, Mubarak vd. 2005).

PVD, aşınma ve korozyon direncinin iyileştirilmesi için mükemmel bir vakum kaplama işlemidir. Aletler, dekoratif parçalar, optik donanım, kalıplar ve bıçaklar gibi fonksiyonel uygulamalar için çok gereklidir. Bunlar ise halihazırda iyi bilinen uygulamaların sadece birkaçıdır (Fox-Rabinovich vd. 2016, Korhonen vd. 2018). Bu teknikte kullanılan ekipman az bakım gerektirir ve yapılan işlem süreç çevre dostudur. Bu teknik ürünlere dayanıklılık ve değer katan gerçek ve benzersiz avantajlar sağlayabilir. Kaplama teknikleri talaşlı işlemlerinde önemli bir role sahiptir. Talaşlı aletleri muhtemelen yüksek sıcaklıklarda sertlik, yüksek aşınma direnci, kimyasal stabilite, tokluk ve sertlik gibi özellikler gerektiren en açık uygulamalardan biridir (Baptista vd. 2018, Fernandes vd. 2017). Ek olarak PVD mükemmel yapılaşma, homojen katmanlar, tasarlanmış yapılar, dereceli özellikler, kontrollü morfoloji, yüksek çeşitlilikte malzeme ve özelliklere sahip kaplamalar üretebilir (Silva vd. 2017, Silva vd. 2012).

Bu sistem yardımı ile tek katmanlı, çok katmanlı ve çok dereceli kaplama filmler ve ayrıca özel alaşımlı bileşim ve yapılarda biriktirme sağlanabilir. Bu işlemin diğer avantajları arasında ise işlem boyunca sürekli kaplama özelliklerinin değişimi şüphesiz en önemlilerinden biridir. Gelişmiş kaplamalar için mevcut fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniklerinin grafiği Şekil 3.2 verilmiştir.



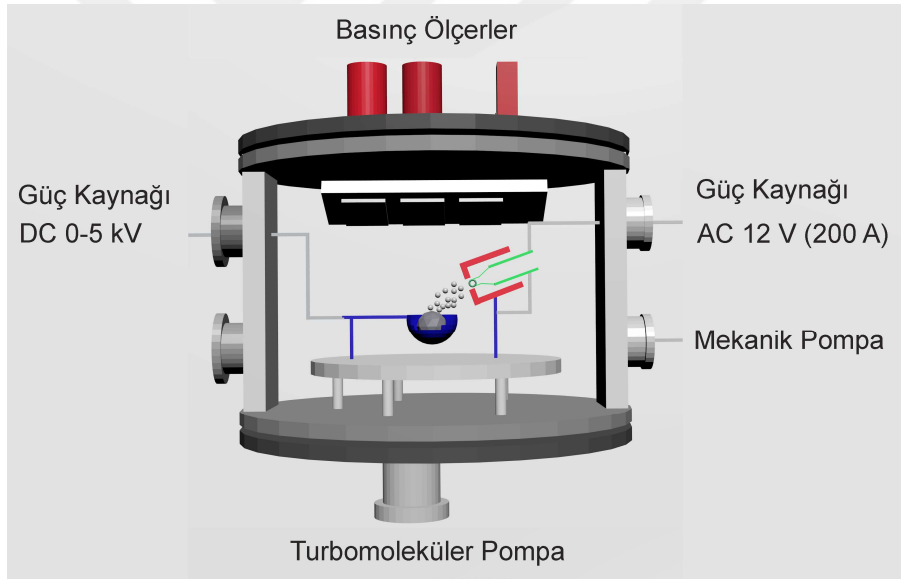
Şekil 3.2 Gelişmiş kaplamalar için mevcut fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniklerinin bölümlenmesi

3.2 Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği

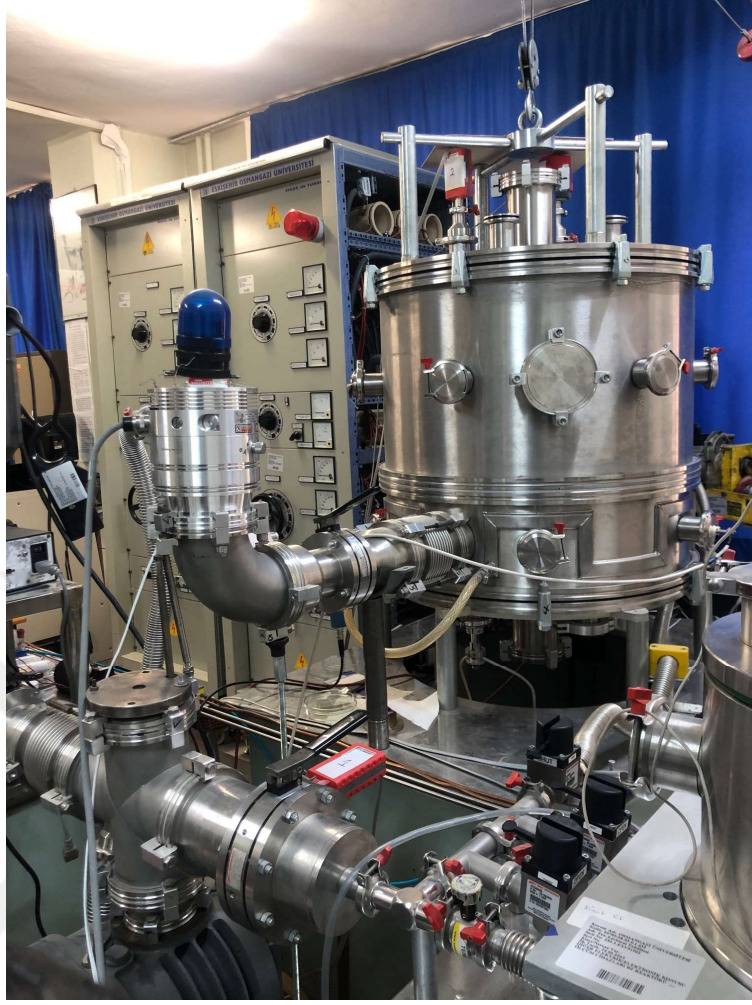
Bu tez çalışmasında gümüş, bakır ve kobalt katkılı ZnO ince filmler Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi ile üretilmiştir. TVA sistemi bir fiziksel buhar depolama sistemidir. TVA sistemi yüksek vakum altında (10^{-6} Torr) anot malzemesinden plazma üreten bir sistemdir. Metal buhar plazması üreten bir sistem olarak 1983 yılında INFLPR (National Institute For Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest, Romania; Ulusal Lazer Plazma ve Radyasyon Fiziği Enstitüsü, Bükreş, Romanya)'ın alt grubu olan Düşük Sıcaklık Plazma Fiziği Grubu çalışanlarından Prof. Dr. Geavit MUSA ve arkadaşları tarafından ilk defa geliştirilmiş bir vakum ark tekniğidir (Balbag vd. 2010). Günümüzde fiziksel buhar depolama sistemi olarak birçok farklı uygulamalar için TVA sistemi plazma destekli kaplamalar yapılabilen teknikler arasında yerini almıştır. Geleneksel bir TVA sistemi aşağıdaki bölüm ve parçalardan meydana gelmektedir.

- I. Vakum Odası,
- II. Katot sistemi olarak elektron tabancası,
- III. Anot materyali potası,
- IV. Katot akımı güç kaynağı,
- V. Anot potansiyeli güç kaynağı,
- VI. Mekanik ve turbomoleküler pompa sistemi,
- VIII. Vakum ölçüm sistemleri,
- IX. Amperetreler ve Voltmetreler sistemi,
- X. İnce film kalınlık ölçüm sistemleridir.

Kullanmış olduğumuz TVA sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.3'deki gibidir. Şekil 3.4'de bu sistemin bir fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 TVA sisteminin şematik çizimi



Şekil 3.4 TVA sisteminin fotoğrafı

3.2.1 Vakum Odası

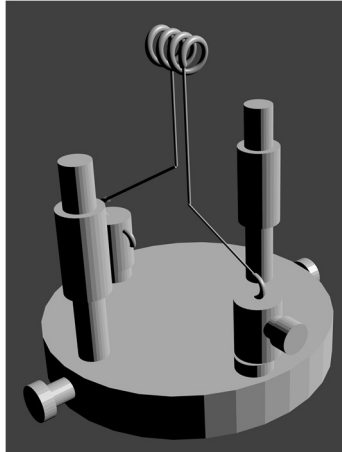
TVA sisteminin vakum odası, 600 mm çapında ve 600 mm yüksekliğinde, yaklaşık 10^{-7} torr'luk yüksek vakum değerlerinde çalışabilecek şekilde paslanmaz çelikten özel olarak imal edilmiştir. Vakum odası üzerinde birçok farklı bağlantı için giriş flanşları yer almaktadır. Birçok kaplama sisteminde vakum odası kritik bileşenlerden birisi sayılmaktadır. Özellikle vakum odası sistemi üzerindeki elemanların birleşimi yüksek kalitede ve sızdırmaz nitelikteki kaynaklar kullanılarak birleştirilmiştir. Kullanılan vakum odası şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 TVA sisteminde kullanılan vakum odası

3.2.2 Katot

TVA sisteminde katot olarak standart elektron tabancası kullanılmaktadır. Elektron tabancasının filamanı 300-500 μm çaplarında sinterlenmiş tungstenden yapılmaktadır. Genellikle 4 ya da 5 sarımdan oluşmaktadır. Şekil 3.6’de standart bir tungsten filamanın fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.6 TVA tekniğinde kullanılan katot

Tungsten filaman elektron tabancası içerisine yerleştirilir. Deney esnasında bu filaman üzerinden yüksek akım 0-100 A aralığında akım geçirilerek ısıtılır. Bu ısıma esnasında tungsten filaman bize elektron üretir. Bu olaya termoiyonik emisyon denir. Geçen akımın değerine bağlı olarak yayınlanan elektron miktarı da artar. TVA sisteminde yüksek güce ihtiyaç duyulduğundan oldukça yüksek akım değerleri elektron tabancasında kullanılır. Elde edilen elektronlar bir hızlandırma potansiyeli ve elektro mercek (Wehnelt silindiri) sayesinde kaplaması yapılacak olan malzeme üzerine hızlandırılarak gönderilir. Şekil 3.7’de elektron tabancasının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.7 Kullanılan katot fotoğrafı

3.2.3 Anot Materyali Potası

Anot materyali potası, yüksek erime sıcaklığına sahip malzemelerden yapılmış bir potadır. Genellikle molibden, tungsten ya da tantalyumdan yapılır. Malzemeye göre titanyum potalarda kullanılır. Çalışma esnasında alaşım yapma olasılığına karşı çeşitli elementler için uygun potalar kullanılması gerekir. Pota seçimi Çizelge 3.1’dek değerlere göre yapılır.

Çizelge 3.1 Çeşitli elementler ve bileşikler için erime sıcaklıkları ve uygun pota materyali

Buharlaştırılacak Materyal	Erime Noktası (°C)	Kullanılan Potanın Yapıldığı Malzemeler
Alüminyum (Al)	660	W, Ta
Altın (Au)	1062	W, Mo
Bor (B)	2100	C
Bakır (Cu)	1083	W, Mo
Çinko (Zn)	419	W, Mo
Germanyum (Ge)	937	W, Mo
Gümüş (Ag)	961	W, Mo
Kadmiyum (Cd)	321	W, Mo
Kurşun (Pb)	328	W, Mo
Magnezyum (Mg)	651	W, Mo
Nikel (Ni)	1453	W
Silisyum (Si)	1410	W, Ta
Titanyum (Ti)	1657	W, Ta
Vanadyum (V)	1890	Mo
Çinko oksit (ZnO)	1975	W
Çinko sülfür (ZnS)	1827	W
Çinko selenayt (ZnSe)	1525	W

3.2.4 Katot Akımı Güç Kaynağı

TVA'daki deneysel çalışmalarda, 12 V'luk ve 0-100 A AC ayarlanabilir çıkış voltajlı (varyaklı) güç kaynağı kullanılmıştır. Bu güç kaynağı ile tungsten filaman ısıtılır ve bir ampermetre yardımı ile geçen akı değeri okunur. Bu değer TVA sistemi için önemli bir parametredir. Plazma voltajı değerini doğrudan etkilemektedir.

3.2.5 Anot Potansiyeli Güç Kaynağı

Anot potansiyeli güç kaynağı olarak, 0-5 kV ve 10 kW kapasiteli ayarlanabilir DC (varyaklı) yüksek voltaj güç kaynağıdır. Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç

kaynağı Şekil 3.8'deki fotoğrafta görüldüğü gibi TVA sistemi için aynı güç kaynağı panoları üzerinden kontrol edilmektedir.

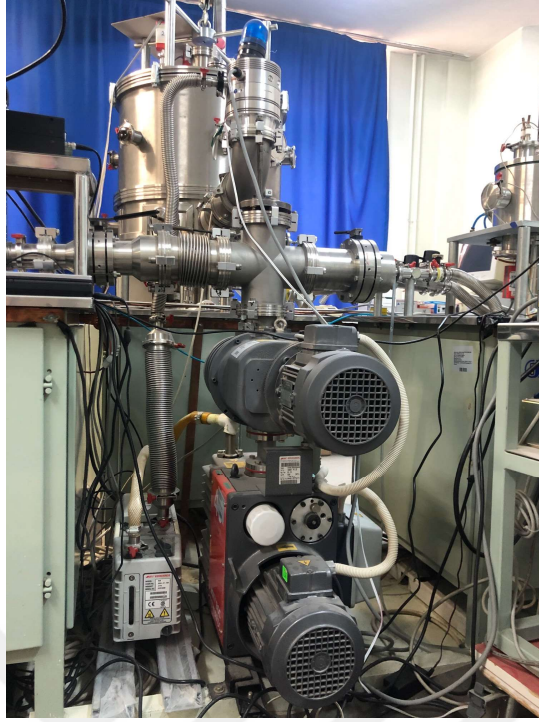


Şekil 3.8 TVA sisteminde deney sırasında kullanılan güç kaynakları panoları

3.2.6 Pompa Sistemleri

Pompa sistemleri, Edwards EM40EH250 marka bir adet mekanik pompa ve Agilent marka turbomoleküler pompadan oluşur. Bu iki pompanın çalışması sonucunda vakum odasının basıncı 10^{-6} torr'a düşmektedir. Yaklaşık 30 dakikada sistem 10^{-6} torr seviyesine ulaşabilmektedir.

Mekanik pompa ile vakum odasının basıncı 10^{-1} torr'a kadar inmekte, daha sonra turbomoleküler pompasının devreye girmesiyle de vakum odasının basıncı 10^{-6} torr'a ulaşmaktadır. Deneyler bu vakumda gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pompalama sistemi Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Deney sırasında kullanılan mekanik ve turbomoleküler pompa düzeneği

3.2.7 Vakum Ölçüm Sistemleri

Vakum ölçüm sistemleri, Edwards marka 10^{-3} torr' a kadar hassas olarak ölçebilen düşük basınç ölçer cihazı ve 10^{-6} torr'a kadar hassas olarak ölçen daha düşük basınç ölçer cihazı olmak üzere iki çeşittir.

3.2.8 Ampermetre ve Voltmetre Sistemleri

Özel olarak tasarlanmış olan bu ampermetre ve voltmetreler yardımı ile kaplanacak malzemelerin termiyonik vakum arklarının oluşturulduğu anot ve katot arasındaki iyon akımı ve ateşleme potansiyelleri ölçülebilmektedir.

3.2.9 İnce Film Kalınlık Ölçüm Sistemleri

İnce film kalınlık ölçüm cihazı olarak kuartz kristalli Cressington MTM10 cihazı kullanılmaktadır. Bu cihaz ile 0,1 nm hassasiyetinde ölçüm yapabilmek mümkündür.

3.3 Kullanılan Analiz Cihazları

3.3.1 X-Işını Kırınım (XRD) Cihazı

X-ışını kırınımı doğru x-ışını difraksiyon verilerinin toplanması için tasarlanmış ve bilimsel bir cihazdır. Bir XRD cihazı tipik olarak bir X-ışını kaynağından, bir numunenin doğru şekilde yerleştirilmesi ve yönlendirilmesi için bir gonyometreden ve bilinen bir saçılma açısında saçılmış X-ışını fotonlarının toplanması ve sayılması için bir detektörden oluşur. Tek kristalli deneyler için, difraktometre genellikle belirli bir röntgen dalga boyunu seçmek için bir monokromatör kristali ve dar bir olaydaki X-ışını numuneye yönlendiren kolimatör adı verilen metal bir tüp içerir. Tek kristalli numuneyi yönlendirmek için bir gonyometre, numunenin bilgisayar kontrolü altında yaklaşık 2 veya 3 bağımsız eksen döndürmesini sağlar. Dedektör ayrıca bilgisayar kontrolünde toplam saçılma açısının (2θ) değişmesine izin veren bir eksen üzerine monte edilmiştir (Guinier 1994).

Cihaz genellikle, atomların termal hareketini azaltan ve deneyin çözünürlüğünü artıran kristal numuneyi soğutmak için düşük sıcaklıklı bir sistem içerir.

Toz kırınım ölçümleri için tasarlanan bir difraktometre daha az karmaşıktır, çünkü numunenin rastgele yönlendirilmiş mikro kristalli doğası, numuneyi olay ışınına göre belirli bir oryantasyona yerleştirme ihtiyacını ortadan kaldırır. Difraktometre genellikle numunenin (θ) ve dedektörün (2θ) ortak bir eksen etrafında dönmesine izin verir. Fiber kırınım ölçümleri için kırınım modeli 2 boyutludur ve saçılma yoğunluğu, tek kristal veya toz kırınım yoğunluklarından daha zayıftır. Verimli ölçüm, dönen bir anot veya senkrotron X-ışını kaynağı ve iki boyutlu bir alan detektörünün kullanılmasını gerektirir.

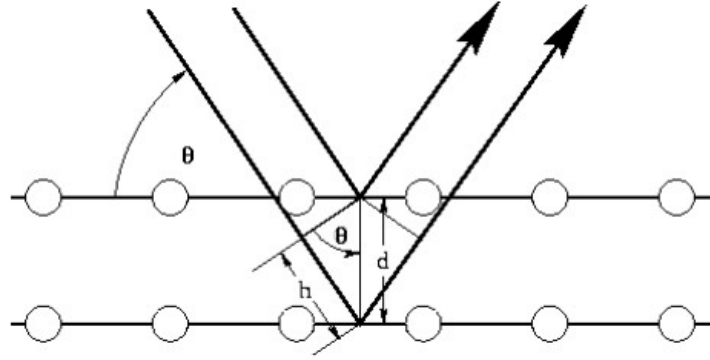
3.3.2 X-Işını Kırınımı Geometrisi ve Bragg Yasası

Bir kristalin malzemenin X-ışını kırınım modeli, bir tanımlama aracı olarak işlev görür ve bazı durumlarda yapısının tamamen açıklanmasına izin verir. Klug ve Alexander basitçe X-ışını kırınımını (burada etkileşimin X-ışını ışınımının elektrik vektörü ile

kristalin maddenin elektronları arasında gerçekleştiği) birbirlerini zıplayan bilardo topları olarak tanımlandılar.

X-ışınları, dalga boyunda bir değişiklik olmadan atomların elektronları tarafından “dağılır”. Elektronların, etkileyici X-ışınlarını absorbe ettiği ve yattığı, yani elektromanyetik dalgalar varlığındaki elektronun daha yüksek kararsız enerji seviyelerine heyecanlanacağı düşünülmektedir. Gevşetme sonrasında, elektronlar aynı frekans ve dalga boyunda elektromanyetik enerji yayarlar. X-ışını fotonları elektronlarla çarpıştığında, gelen ışıdan gelen bazı fotonlar başlangıçta hareket ettikleri yönden uzağa yönlendirilecektir.

Bu saçılmış röntgenlerin dalga boyu değişmediyse (yani, X-ışını fotonlarının herhangi bir enerji kaybetmediği anlamına gelir), işleme saçılma işleminde sadece momentumun transfer edildiği anlamına gelen elastik saçılma (Thompson Saçılma) denir. Bazı yönlerde, dağınık röntgenler birleşerek (tepeden tepeye), bu da yapıda girişim ile sonuçlanan genlikte bir artış ve kırınım yoğunluğunda bir artış meydana getirir. Bunlar, dağınık deneylerde ölçtüğümüz röntgenlerdir, çünkü dağınık röntgenler malzemelerdeki elektron dağılımı hakkında bilgi taşır. Diğer yönlerde, dağınık X-ışınlarının faz dışı kombinasyonu yıkıcı girişim ve sıfır kırınımlı yoğunluk ile sonuçlanır. Ayrıca, elastik olmayan bir saçılma işleminde (Compton Saçılma), X-ışınları enerjilerinin bir kısmını elektronlara aktarır ve saçılan X-ışınları olayın X-ışınlarından farklı bir dalga boyuna sahip olacaktır. Bu ışınları deneyde yavaşça değişen bir arka plan ışıması yaratacaktır. Düzlem içi d mesafesi olan belirli bir kafes düzlemi kümesi için, bir kırınım (tepe) oluşumu koşulu basitçe şöyle yazılabilir:



Şekil 3.10 Bragg yasasının görüntüsü

$$n \lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (3.1)$$

İngiliz fizikçiler Sir W. Bragg ve oğlu Sir W.L. Bragg, (James vd. 1948) kristallerin ayrılma yüzlerinin neden belli açılardaki x-ışını ışınlarını yansıttığını açıklamak için denklemi 1913 yılında çıkardı (theta, θ). Kırınımın sıradan yansıma ile benzerliğini fark ettiler ve kırınımı kafesdeki düzlemlerden gelen yansıma olarak gördüler. Bu denklemde, d değişkeni bir kristalde atomik katmanlar arasındaki mesafedir, λ , ortaya çıkan x-ışını ışınının dalga boyudur ve n , kırınım zirvesinin sırasını temsil eden bir tamsayıdır. Basit yapılarda, bir X-ışını kırınım modelindeki tepe noktaları denklem 3.1 yoluyla atomik mesafelerle doğrudan ilgilidir. Şekil 3.10'da periyodik bir şekilde düzenlenmiş atomlarla etkileşime giren bir olaydaki x-ışını ışınını göstermektedir. Aşağıdaki diyagramda küre olarak temsil edilen atomlar, kristalde farklı düzlem kümeleri oluşturuyor olarak görülebilir. Burada, Bragg'ın Yasası, hkl indeksli ve interlanar aralıklı d_{hkl} içeren bir paralel düzlem dizisinin, dalga boyu λ 'nın X-ışınları düzlemde ve açıda inçe açıldığı ve aynı açıda yansıdığı zaman kırınım bir ışın ürettiğini göstermektedir.

Üretilen numunelerin ortalama tane boyutları, D (nm), Scherrer'in formülünü kullanarak pik noktasının maksimum şiddetinin yarısında tam genişlik (FWHM) değeri kullanılarak XRD desenlerinden hesaplanır:

$$D = \frac{k \lambda}{(\text{FWHM}) \cos \theta} \quad (3.2)$$

bu denklemde $k=0,94$ ve Scherrer faktörüdür. λ ise kullanılan XRD cihazından çıkan X-ışınının dalga boyudur (Cu için $1,54 \text{ \AA}$) ve θ ise kırınım pikinin Bragg açısıdır.

Elde edilen katkılı ZnO ince filmlerdeki mikro-gerilme (ξ), biriktirme işlemi sırasında oluşturulan ve hesaplanan örgü düzensizliği olarak tanımlanmaktadır ve bu şekilde hesaplanır:

$$\xi = \frac{\text{FWHM}}{4 \tan \theta} \quad (3.3)$$

kristaldeki kusurlar, yer değiştirme olarak bilinir ve birim hacim başına yer değiştirme yerinin uzunluğu, dislokasyon yoğunluğu (δ) olarak tanımlanır. Bu değer Williamson-Smallman ilişkisini kullanılarak hesaplanır:

$$\delta = \frac{n}{D^2} \quad (3.4)$$

burada n , minimum yer değiştirme yoğunluğu veren bire eşit olan bir faktördür ve D ise tane büyüklüğüdür. Birim yüzey alanı başına düşen kristalitlerin sayısı (N) aşağıdaki denklemi kullanarak hesaplanır.

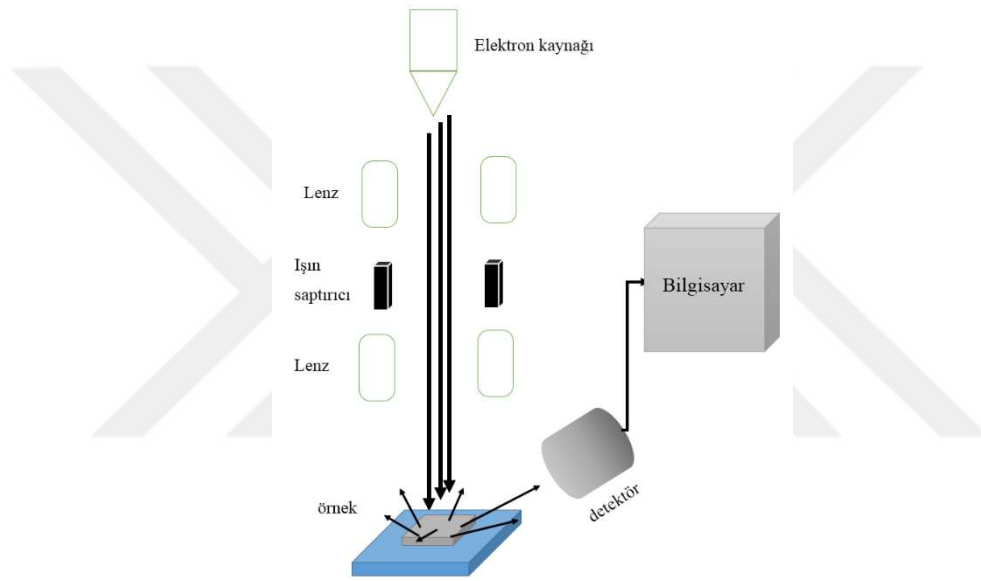
$$N = \frac{d}{D^3} \quad (3.5)$$

bu denklemde d ise üretilen ince filmin kalınlığıdır.

3.3.3 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM)

Bir alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) sistemi numunelerin yüzey morfolojilerini incelemek için kullanılır. Bu cihazda oda basıncı yaklaşık 10^{-8} Pa 'dır. Kullanılan tabanca voltaj aralığı 1 ila 30 kV arasında ve yaklaşık $1,5 \text{ nm}$ 'lik bir maksimum çözünürlük elde edilebilir (Wang 2012).

SEM, ZnO nanoyapılarının çapını, uzunluğunu, şeklini ve yoğunluğunu incelememizi sağlayarak numunelerin topografik özelliklerini ortaya koymaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), katı örneklerin yüzeyinde çeşitli sinyaller üretmek için yüksek enerjili elektronlardan oluşan odaklanmış bir ışın kullanır. Elektron-örnek etkileşimlerinden türetilen sinyaller, dış morfoloji, kimyasal bileşim, kristal yapı ve malzemelerin oryantasyonu ile ilgili bilgi verir. Bu sinyaller ise ikincil elektronları, geri saçılmış elektronları, kırınımına uğramış ve geri saçılmış elektronları, fotonları (karakteristik X-ışınları), görünür ışığı (katodüminesans) ve ısıyı içerir.



Şekil 3.11 FESEM cihazının düzeneği

SEM'in şematik diyagramı Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Monokromatik bir elektron akışı filamenti ısıtmak suretiyle mikroskobun tepe noktasındedir. FESEM'de ise tungsten (W) filamanı yaklaşık 2800°C'lik bir sıcaklıkta ısıtılarak elektron yaymakta olup ve elektron kaynağı olarak kullanılır. Bazı durumlarda e^- Lantanum hexaboride (LaB_6) kristal kullanarak elde edilir. LaB_6 genel olarak tungsten filamanının üzerinde monte edilir. Bu sayede daha yüksek odaklama mümkün olmaktadır. Elektron akışı, ilk kondansatör merceği tarafından yoğunlaştırılır (Wang 2012). Bu lens, hem demeti oluşturmak hem de demet içindeki akım miktarını sınırlamak için kullanılır. Yüksek açılı elektronları ışın demetinden çıkarmak için yoğunlama açıklığı ile birlikte çalışır. Işın demeti daha sonra bazı yüksek açılı elektronları elimine ederek yoğunlama açıklığı tarafından daralır. İkinci

yoğunlaştırıcı merceği elektronları ince, sıkı ve uyumlu bir ışın haline getirir. Son aşama olarak, ışın örneğe çarpar; geri saçılmış veya ikincil sinyaller numuneden çıkarılır. Bu cihaz elektron etkileşimlerinin sayısını sayar ve yoğunluğu bu sayı ile belirlenen ekrana SEM görüntüsünü olarak verir.

FESEM biyoloji, kimya ve fizik gibi farklı araştırmacıları tarafından yaklaşık olarak 1 nanometre kadar küçük olan yapıları gösterilmesi amacı ile kullanılabilir.

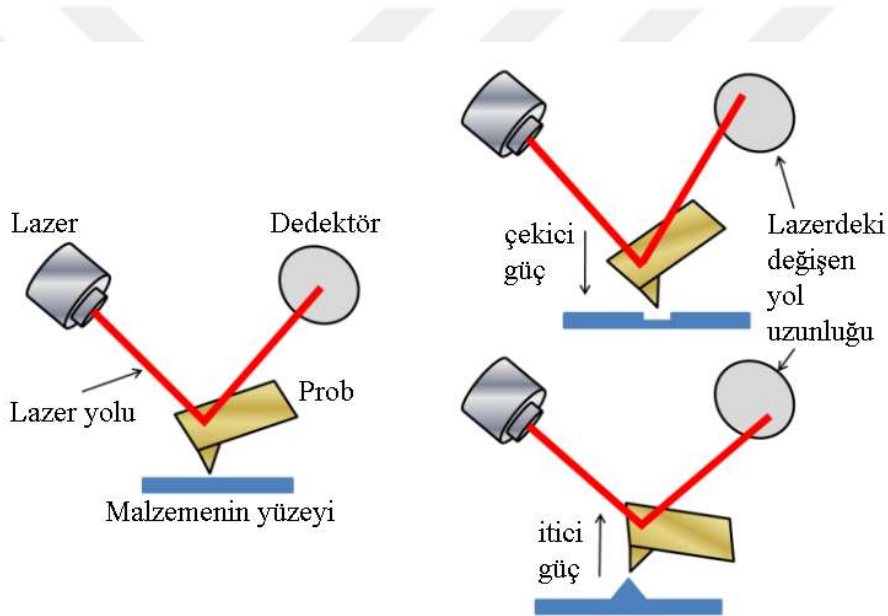
3.3.4 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu, modifiye yüzey araştırmalarında kullanılan temel analiz araçlardan birisidir. Bu araç, iki ve üç boyutlu görüntülemeyle birlikte yüzey pürüzlülüğünün analizi ve yüzey topolojisinin doğru ve anında ayrıştırılmasını sağlar. AFM (Binnig vd. 1986), iletken olmayan yüzeyleri görüntüleyemeyen yüzey tünelleme mikroskop'tan (STM) kaynaklanan temel bir kusurun üstesinden gelmek için geliştirilmiştir (Blanchard 1996, Microscopy 2004). AFM analizi ile, seramik, cam, kompozitler, seramikler ve biyolojik örnekler dahil olmak üzere herhangi bir yüzey tipi görüntülenebilir. Yüzey karakterizasyonu, mikroskobik seviyede yaklaşık 1 µm'den alt nanometreye kadar bir çözünürlükte doğrulukla alınır (Haugstad 2012). Bu cihaz, numune yüzeyini temas halinde veya çok yakınında (0,2-10 nm) izleyen inanılmaz derecede ince keskin uçların kullanılmasıyla çalışır (Morita vd. 2015). Bu uçlar, yaklaşık 100-200 µm uzunluğundaki esnek bir konsolun serbest ucunda bulunan ve çapı 100 Å'dan daha az olan birkaç mikrondan oluşur. Uç ile yüzey arasındaki çekme veya itme etkileşimli kuvvetler yani sonuçta meydana gelen sapmalar bir bilgisayar görüntüsü olarak kaydedilir ve işlenir (Kaupp 2006). Uç konsol üzerine yer almaktadır. Bu durumda, numune ve uç arasında uygulanan kuvvet miktarı konsolun yay sabitine ve uç ile numune ayırmasına bağlıdır. Bu kuvvet denklemi Hooke Yasası kullanılarak tanımlanmıştır (Blanchard 1996):

$$F = -k x \quad (3.6)$$

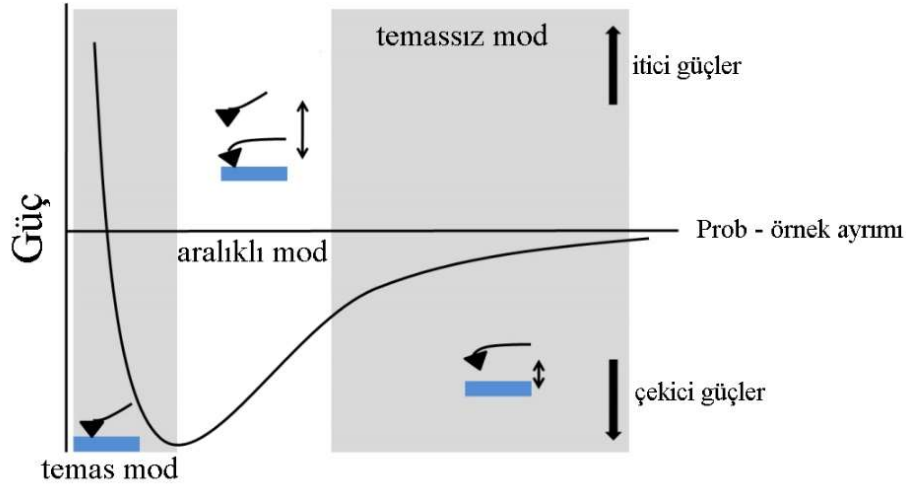
bu denklemde F , k ve x sırasıyla kuvvet, yay sabiti ve konsolun sapması olarak tanımlanmıştır. Bir konsol için yay sabiti genellikle 0,1-1 N/m arasındadır. Yay sabiti,

numunenin atomları arasındaki eşdeğer yaydan daha azsa, konsol, elde edilen sapma elektronik olarak izlenecek şekilde bükülecektir (normal hava ortamındaki sapma değer 10^{-6} ila 10^{-9}). Modern AFM tasarımı, Şekil 3.12’te gösterildiği gibi konsol ucunun hassas ölçümü için bir lazer ışını yardımı ile sapma sisteminden yararlanır. Lazer, hareketli ucun arka yüzeyine bir ışın yayar, pozisyona duyarlı bir detektör malzeme yüzeyinde tararken hareketlerini izler. Bu özel konfigürasyon, uçtaki çok hafif sapmasını, lazer yolu uzunluğundaki kayda değer ölçüde büyük sapmalar olarak kaydedildiğinden, çözünürlük açısından faydalı olduğunu kanıtlar. Uç bileşimi ve tasarımındaki ilerlemeler, standart konsolun bir uç yarıçapının 10 nm altında, Si veya Si_3N_4 ’den üretilmiş hale getirilmesiyle AFM’nin elde ettiği çözünürlüğe yardımcı olur.



Şekil 3.12 Uç sapması nedeniyle lazer yol uzunluğu değişikliklerinde AFM temel tespit yöntemi

Prob hareketi, prob yüksekliğini veya yüzeye karşı teması korumak için pizoelektrik tarayıcılara sahip bir geri besleme döngü sistemi ile izlenir. Van der Waals etkileşimleri, küçük probu yüzey kuvvet etkileşimi için domine eder. Numuneyle temas sırasında, prob, ucu eğen Van der Waals itici güçleri yaşar ve buna temas modu denir. Prob yüzeyden uzaklaştığında (temasını kaybettiğinde) temassız mod olarak bilinen çekici Van der Waals kuvvetleri ile karşılaşır. Şekil 3.13 prob-numune ayırımı ve kuvvet eğrisini göstermektedir.



Şekil 3.13 Bir güç ve prob – örnek ayrımı fonksiyonunun diyagramı

AFM görüntüleme temaslı, dokunma ve temassız olarak üç ana çalışma modu vardır:

1- Temas modu, temelde itici Van der Waal kuvvetleri kullanarak çalışır. Yay sabiti, numune yüzeyindeki atomlardan daha az olduğu için, konsol, uçtan kaynaklanan itici bir kuvvetle bükülür. Sabit konsol sapması bir dizi geri besleme halkası tarafından sağlanır ve söz konusu sapmayı korumak için gereken kuvvetler bir görüntünün elde edilmesine yol açar. Bu mod, pürüzlü yüzeyleri hızlı bir şekilde taramak için iyidir ve sürtünme özellikleri için iyi analiz sağlar ancak temas yumuşak örnek hasarına neden olabilir.

2- Aralıklı modu temas modundaki işlemine benzer; bununla birlikte, uç rezonans frekansında salınır. Probdaki hareket nedeniyle, uç tarama sırasında yüzeye dokunur. Sabit salınım genliğinin korunması, yüzeyin görüntülenmesine olanak tanıyan sabit bir uç-örnek etkileşimi sağlar. Bu mod, kolayca zarar görebilecek veya yumuşak yüzey yapışması (özellikle hücre biyolojik) örnekler için yüksek çözünürlükte görüntüler verir. Yüzeyin aralıklı olarak kesilmesinin doğası nedeniyle, daha yavaş tarama oranları gereklidir.

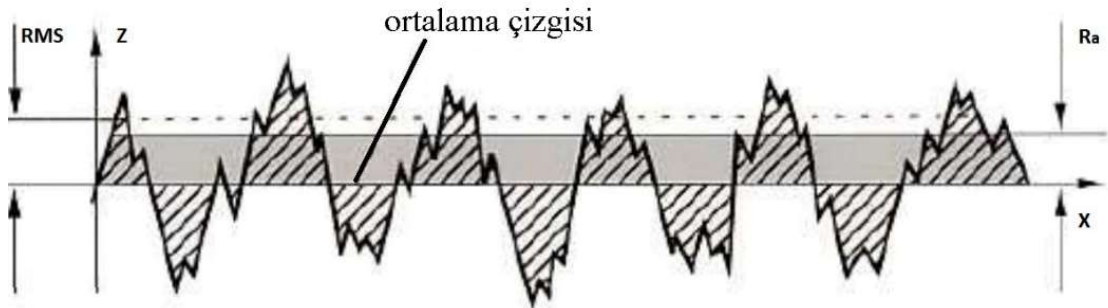
3- Temassız mod, uç ile örnek arasında yaşanan çekici Van der Waals kuvvetlerini kullanır. Numuneler, tarama için yüzeyde emilen veya ultra yüksek vakum koşulları altında gerçekleştirilebilecek şekilde belirlenmiş bir sıvıya sahiptir. Prob tarama sırasında sıvı tabakasının üzerinde salınır ve bir geri besleme döngüsü kullanır, çekici kuvvetlerden

kaynaklanan genlik değişikliklerini izler. Kuvvetlerdeki nihai değişim, yüzey topolojisinin görüntülenmesine neden olur. Bu yöntemle numuneye uygulanan çok düşük bir kuvvet vardır, bunun bir sonucu olarak düşük çözünürlük ve yüzeyin kirlenmesidir. Genellikle bu teknik, salınım ve kirletici maddelerle yüzey etkileşimi nedeniyle en iyi görüntüleme için vakum gerektirir. AFM'nin çözünürlüğü, uç yönü ile önemli ölçüde sınırlıdır.

Pürüzlülük değerleri filmlerin karakterizasyonunu sağlayan örnek yüzeyinin kullanışlı bir ölçümüdür. Film kalınlığı tipik olarak pürüzlülüğü azalttığından ve bu nedenle özelliklerin keskinliğini azaltır. Filmin dokusu, AFM prob verilerinden pürüzlülük hesaplanarak görsel olarak değerlendirilebilir. Verilerin nasıl işlendiğine bağlı olarak AFM pürüzlülüğünü belirlemek için birçok yöntem uygulanabilir. Pürüzlülük ortalaması (R_a), AFM için en sık uygulanan ölçümdür. Şeffaf iletken oksit (TCO) malzemelerin değerlendirmesinde ortalama karekök (RMS) genel olarak kullanılmaktadır. R_a ölçülen numune yüzeyinin yüksekliğinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Bu değer aşağıdaki denklem'den hesaplanır:

$$R_a = L^{-1} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (3.7)$$

“L” ölçüm yapılan uzunluğu üzerinden örneğin yüksekliği ($Z(x)$) ve numunenin konumu (x) açısından yüzey profilini tanımlayan fonksiyondur.



Şekil 3.14 AFM ölçümü ve pürüzlülük tayini

Bu değer, sadece numunenin okurlar ve tepe noktalar arasında ayırım yapmayan mutlak profildir. Bu nedenle, çeşitli yapı/doku örnekleri aynı pürüzlülük değerleri sergileyebilir. RMS değerinin belirlenmesi, ölçümlerin karesini alarak istatistiksel bir ölçümdür. Bu fonksiyon denklem 3.7’de tanımlanmıştır (Gadelmawla vd. 2002),

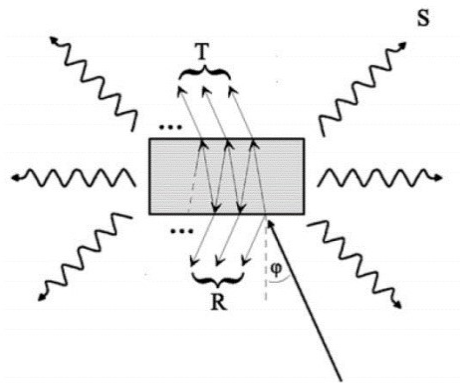
$$\text{RMS} = \left(\frac{1}{L} \int_0^L |Z^2(x)| dx \right)^{1/2} \quad (3.8)$$

Bu nedenle RMS lmleri, hesaplama sırasında genlik karesi nedeniyle pürüzlülük ortalamasına kıyasla okur ve tepe nokta bilgisine daha duyarlıdır. Bu değerlendirme türü, karşılaştırmalı değerlendirme olduğu için TCO filmleri için daha uygundur.

3.3.5 UV-Vis Spektrofotometre

Optik zelliklerin dikkate alınması, TCO’lar, güneş pilleri ve ince film teknolojileri için çok önemli bir özelliktir. Herhangi bir katmanın bir fotovoltatik istif içine uygulanması, kırılma indisi eşleşmesi, geçirgenlik, yansıma, absorbans, saçılma ve yakalanan ışığın özelliğine ilişkin diğer özellikler bakımından optik özellikleri dikkate almalıdır.

Gelen ışığın, yığın malzeme ile etkileşime girmek için bir nesnenin yüzeyine nüfuz etmesi gerekir. Bu nedenle, bir sistemin optik davranışını gözlemlerken yüzeylerin ve arayüzlerin optik özelliklerinin kritik öneme sahip olduğu açıktır (Stenzel 2005). Numune ile etkileşime giren ışık, şekil 3.15’te tarif edildiği gibi numuneden birkaç yolla çıkarılabilir;



şekil 3.15 Bir örnekteki ışık etkileşimi

Şekil 3.15'te gösterilen ışık yörüngelerinin gözlenmesi aşağıdaki ışık kategorilerini geliştirir;

- Geçen ışık: örnekten sadece kırılma indisi değişime uğrayan iyi tanımlanmış bir yöne doğru geçer.
- Yansıtıcı ışık: örnekten ansıyan ışık
- Dağınık saçılma ışığı: numune yüzeyi tarafından veya hacmi içinde dağılmış sapmış ışık
- Absorbe edilmiş ışık: yığın materyal veya yüzey tarafından absorbe edilen ışık

Sadece ışık etkileşiminin yoğunluğunu düşünerek bu dört terimi tanımlayabiliriz. Bir numunenin geçirgenliği, geçen ışığın şiddeti I_T ve numune üzerine gelen ışığın şiddeti I_E 'ye oranı olarak gösterilmiştir,

$$T = I_T/I_E \quad (3.9)$$

geçirgenliğe karşılık gelen yansıma (R), spesifik olarak yansıtılan ışığın I_R ve gelen ışığının şiddetinin oranı olarak tanımlanır,

$$R = I_R/I_E \quad (3.10)$$

gelen ışığının hiçbirisi dağınık saçılma ışığı veya numune tarafından absorbe edilmezse, enerji korunması yasalarına uygun olarak, geçirgenlik ve yansıtma bire eşit olmalıdır. Deneysel olarak bu durum tam olarak böyle değildir, çünkü ışığın bir kısmı dağılarak saçılmadan geçer veya absorbe edilir. Bu durumda ise ışığın dağılması ve toplam ışığın şiddetinin oranı olarak tanımlanan optik saçılma tanımıdır,

$$S = I_s/I_E \quad (3.11)$$

Bu denklemde S ve I_s sırasıyla saçılan ışık ve saçılan ışığın şiddetidir. Aynı şekilde, absorbans terimi, A, gelen total ışıktan yakalanan ışık şiddet oranı olarak tanımlayabiliriz,

$$A = I_A/I_E \quad (3.12)$$

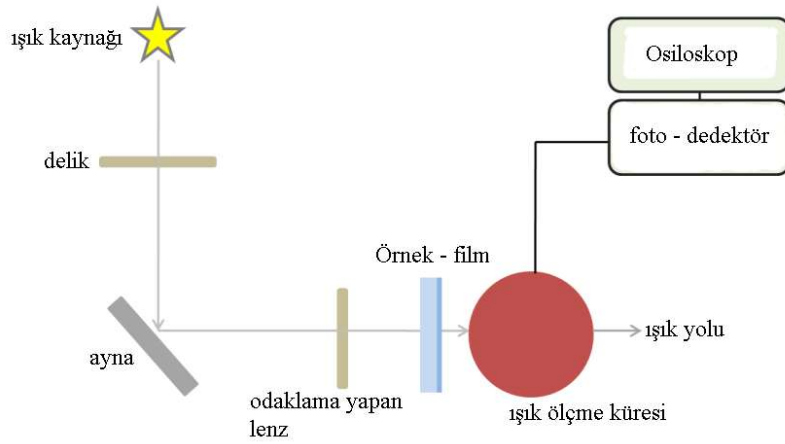
bu denklemde I_A absorbe edilmiş ışığın şiddetidir. Korunma enerji yasası, absorbans ve saçılma göz önüne alındığında, ışık etkileşiminin toplam değerinin bire eşit olduğu durumlarda kabul edilir.

$$T + R + A + S = 1 \quad (3.13)$$

her terim bağımsız olarak belirlenebilir, ancak bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Üç terimin prensipte belirlenmesi dördüncü terimin tanımlanmasına izin verecektir. Tipik olarak, absorpsiyon ve saçılmış cebirsel toplam, optik kayıp, L , olarak adlandırılır,

$$L = A + S = 1 - T - R \quad (3.14)$$

bu değerlerin tümü, özel bir deney sisteminde belirli bir numune için karakteristiktir; burada numune materyali ve geometri (deney geometrisi içeren) ölçülen sinyal tepkisini belirler. Spesifik dalga boyları ile malzeme etkileşimi değiştiğinden, ışığın dalga boyunun da bu değerler üzerinde etkisi vardır. Temel olarak TCO malzemeleriyle ilgilenen optik karakterizasyon kritiktir. Bu özelliklerin sınıflandırılması, TCO malzemesinin optiksel uygulama için performansının değerlendirilmesine izin verir. Bu düzenek şematik olarak Şekil 3.16 da verilmiştir.



Şekil 3.16 Optik sistem konfigürasyonu

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında TVA tekniği kullanarak üretilen Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optiksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada X-ışınımı kırınım (XRD) kullanarak bu filmlerin yapısal özellikleri ve faz analizleri, Filmetriks cihazı ile ince filmlerin kalınlık ölçümleri ve kırılma ve yansıma gibi önemli optiksel parametreleri elde edilmiştir. Bu filmlerin optiksel özelliklerini incelemek için UV-Vis spektrofotometre yardımı ile geçirgenlik, absorptans ve çok bilinen Tauc metodu uygulayarak yasak enerji aralık değerleri ve daha sonra ise Fotoluminesans (FL) tekniği ile yasak enerji aralığı ve kusurları hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak atomik morfolojik özellikleri incelemek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile üretilen ince filmlerin iki ve üç boyutlu görüntüleri ve yüzeylerinin pürüzlülüğü hakkında bilgi sunulmuştur.

4.1 Gümüş (Ag) Katkılı ZnO İnce Filmleri

Ag katkılı ZnO ince film kaplamalarının TVA sisteminde cam ve Si altlık üzerine yapılması düşünülmüştür. Cam altlık amorf ve üzerine yüksek kalitede kaplamaların üretilmesi birçok yöntemde oldukça zordur. Ancak birçok enerji ve savunma sanayi uygulamalarında cam üzerine kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer altlık olan Si altlıkta oldukça yaygın kullanılan bir altlık türüdür ve tek kristal olarak üretilmektedir. TVA sistemi ile cam üzerinde yaklaşık 73 nm ve Si altlık üzerinde de yaklaşık 75 nm kalınlığında kaplamalar yapılmıştır. Bu kaplamaların üretim parametreleri çizelge 4.1’de verilmektedir. Bu çizelgede verilen parametreler dışında TVA sisteminde birçok değişken parametrede vardır. Fakat bu değerler dışındaki tüm değerler sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.1 Ag katkılı ZnO ince film üretim parametreleri

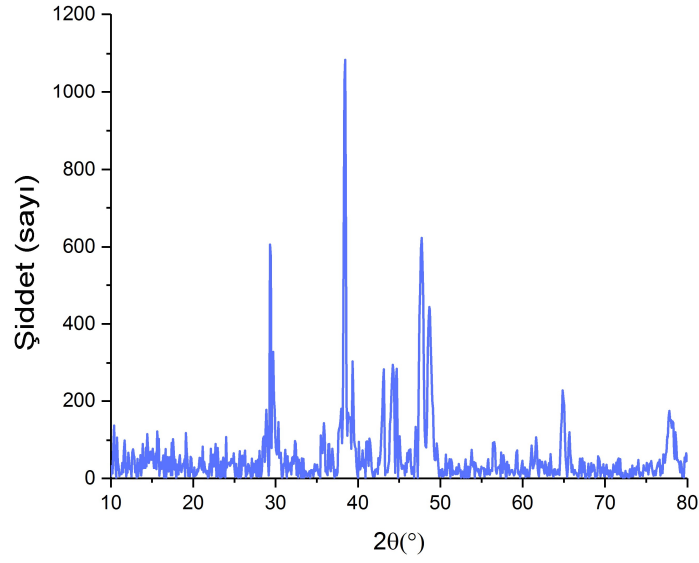
Parametre	Değer	Birim
Basınç	9×10^{-5}	torr
Filaman akımı	19	amper
Hızlandırma voltajı	250	volt
Deşarj akımı	0,5	amper

4.1.1 Mikro Yapısal Özellikler

Silisyum (Si) ve cam alttaşlar üzerinde Termiyonik Vakum Ark metodu ile üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin X-ışını kırımın desenleri 10° - 80° aralığında ve oda sıcaklığında elde edilmiştir.

Şekil 4.1 ve 4.2’de cam ve Si alttaşlar üzerinde üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin XRD desenleri gösterilmiştir. Çizilen her iki desende, üretilen Ag katkılı ZnO ince filmler polikristaldir.

Şekil 4.1’deki desene göre cam alttaş üzerine üretilen filmlerin $29,7^{\circ}$, $47,73^{\circ}$, $48,65^{\circ}$, $64,85^{\circ}$ ve $77,81^{\circ}$ belirlenen 2θ değerlerinde gözlemlenen pikleri sırası ile çinko oksit (1 0 0), (1 0 2), (0 1 3), (2 0 0) ve (2 0 2) Bragg yansıma düzlemi olarak belirlenmiştir. Bu pik değerleri sırası ile R. Mohammadigharehbagh (Mohammadigharehbagh vd. 2017, Mohammadigharehbagh vd. 2017, Mohammadigharehbagh vd. 2018, Mohammadigharehbagh vd. 2018), S. Pat (Pat vd. 2018) vd. yaptığı çalışmadaki değerler ile uyum içerisinde. Bu desende $38,44^{\circ}$, $44,23^{\circ}$, $64,84^{\circ}$ ve $77,81^{\circ}$ 2θ değerlerinde gösterilen pikleri ise sırası ile gümüşün (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0) ve (3 1 1) yansıma düzlemlerine ait olduğu bulunmuştur. Gümüş piklerinin değerleri ve yansıma düzlemleri JCPDS kart No. 5-2872 ve O. M. Kyu vd.’nin rapor ettiği değer ile uyum içerisinde. Ayrıca, $39,36^{\circ}$, $43,13^{\circ}$, $44,69^{\circ}$ ve $77,81^{\circ}$ değerlerinde gösterilen pikler ise sırası ile çinkonun (1 0 0), (1 0 1) ve (0 0 4) yansıma düzlemlerini işaret etmektedir. Zn pik değerleri ve yansıma düzlemleri R. Vasireddi ve arkadaşlarının (Vasireddi vd. 2017) yaptığı araştırma ile uyum içerisinde. XRD desenlerinde gözlenen farklı ZnO pik noktaları, üretilen filmin rastgele bir yönelime sahip olduğunu göstermektedir (Davoodi vd. 2016). Elde edilen piklerin 2θ değerlerinde katılanmamış ZnO ince filmlere karşın kayması söz konusudur. Pik noktalarının pozisyonlarındaki kaymaları, üretilen filmlerde katkı elementinden kaynaklanan stres ve bu katkı elementinin ZnO matrisi arasına yerleşmesi gibi farklı mekanizmalara bağlı olduğu öngörülmüştür. Bu durum aynı şekilde farklı araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Sandeep vd. 2017).



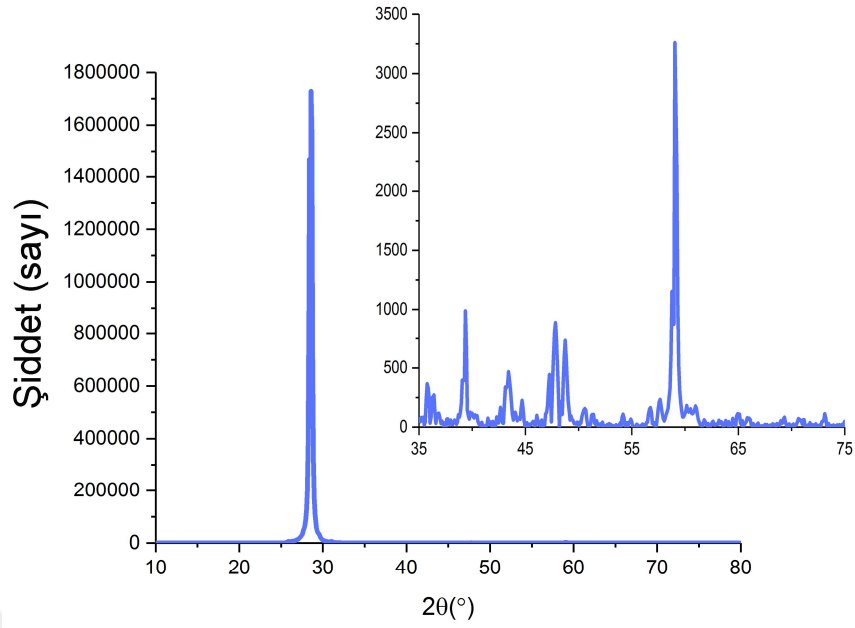
Şekil 4.1 Cam üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin XRD deseni

Denklem 3.2’den cam üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO filmlerin hesaplanan tanecik boyutu, D , Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu denklem kullanılarak hesaplama yapıldığında tanecik boyut değerlerinin 12,14 ile 59,15 nm arasında değiştiği görülmüştür. Bu hesaplamalara göre ortalama tanecik boyutu bu filmler için 35,65 nm olarak belirlenmiştir. XRD cihazından elde edilen piklerin genişliğinin dar olması cam üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin kristal kalitesini göstermektedir. Denklem 3.4 kullanarak hesaplanan dislokasyon yoğunluğu, δ , $2,86 \times 10^{14}$ ve $6,79 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ arasında değişmektedir. Bu sonuca göre dislokasyon yoğunluğunun ortalama değeri ise $35,38 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Bu değer tanecik boyutu ile ters orantılıdır. Bu değer üretilen ince filmlerin direncini etkileyen bir başka önemli faktör olarak kabul edilmiştir (Rafaja vd. 2013). Dislokasyon üzerinden elektron saçılımı dislokasyon çekirdek çevresinde lokal gerilme alanları esas olarak kontrol edildiğinden, ince filmlerin ölçülen direnç, ortalama mikrogerilme karesi ile doğrudan ilişkili olduğu rapor edilmiştir (Rafaja vd. 2013). Ayrıca, mikro-gerilme, ξ , değerleri ise $8,79 \times 10^{-4}$ ve $1,01 \times 10^{-3}$ arasında değişim göstermiştir. Cam üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO filmde ortalama mikro-gerilme değeri ise $9,45 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir. Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanan hacimdeki bulunan kristal sayısı, N , değerli ise $3,53 \times 10^{14}$ ve $4,08 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ arasındadır. Burada ortalama hacimdeki bulunan kristal sayısı değeri $2,05 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2 Cam üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri

2 Theta	Tanecik boyutu	Dislokasyon yoğunluğu	Mikro-gerilme	Hacimde bulunan kristal sayısı
(derece)	D (nm)	δ (m⁻²)	ξ	N (m⁻²)
28,87	30,74	1,06 E+15	1,15 E-03	2,51 E+15
29,33	59,15	2,86 E+14	5,98 E-04	3,53 E+14
29,70	23,84	1,76 E+15	1,48 E-03	5,39 E+15
37,98	21,78	2,11 E+15	1,62 E-03	7,07 E+15
38,44	28,73	1,21 E+15	1,23 E-03	3,08 E+15
39,36	34,88	8,22 E+14	1,01 E-03	1,72 E+15
43,13	27,63	1,31 E+15	1,28 E-03	3,46 E+15
44,23	16,84	3,53 E+15	2,10 E-03	1,53 E+16
44,69	40,20	6,19 E+14	8,79 E-04	1,12 E+15
47,73	15,34	4,25 E+15	2,30 E-03	2,02 E+16
48,65	15,29	4,28 E+15	2,31 E-03	2,04 E+16
64,84	19,02	2,77 E+15	1,86 E-03	1,06 E+16
77,81	12,14	6,79 E+15	2,91 E-03	4,08 E+16

Şekil 4.2'deki desene göre Si alttaş üzerine üretilen filmin 28,41° ve 28,59° 2 θ değerlerinde gözlemlenen pikler Si alttaştan kaynaklanmıştır (Shashikala vd. 2007). Bu desende 47,82° ve 48,74° 2 θ değerlerinde gösterilen pikleri ise sırası ile çinko oksitin (1 0 2) ve (0 1 3) yansıma düzlemlerine ait olduğu bulunmuştur (Mohammadigharehbagh vd. 2018, Mohammadigharehbagh vd. 2018). Ek olarak bu piklerinin değerleri ve yansıma düzlemleri JCPDS kart No. 36-1451 ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Ayrıca, 39,36° ve 43,21° değerlerinde gösterilen pikler ise sırası ile çinkonun (1 0 0) ve (1 0 1) yansıma düzlemlerini işaret etmiştir (Mohammadigharehbagh vd. 2018, Vasireddi vd. 2017).



Şekil 4.2 Si üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin XRD deseni

Denklem 3.2'den Si üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO filmlerin hesaplanan tanecik boyutu, D , Çizelge 4.3'de verilmiştir. Bu denklem kullanılarak tanecik boyut değerleri 14,5 ve 46,55 nm olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre ortalama tanecik boyutu bu filmler için 30,53 nm olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre ortalama tanecik boyutu Ag katkılı ZnO ince filmlerde Si alttaş üzerinde cam alttaşa karşın daha büyüktür. XRD cihazından elde edilen piklerin genişliğinin dar olması ve şiddetinin çok yüksek olması Si üzerine üretilen Ag katkılı ZnO filmlerin kristal kalitesinin çok daha iyi olması anlamına gelmiştir. Denklem 3.4 kullanarak dislokasyon yoğunluğu, δ , değerleri $4,62 \times 10^{14}$ ve $4,76 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre dislokasyon yoğunluğunun ortalama değeri ise $2,61 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Bu filmlerdeki ortalama dislokasyon yoğunluğu değeri Si alttaş üzerinde cam alttaşa karşın daha küçüktür. Ayrıca, mikro-gerilme, ξ , değerleri ise $8,3 \times 10^{-4}$ ve $1,03 \times 10^{-3}$ olarak bulunmuştur. Ortalama mikro-gerilme değeri ise $9,3 \times 10^{-3}$ olarak elde edilmiştir. Hesaplama sonucunda Si üzerine üretilen filmin mikro-gerilme değeri daha büyüktür. Denklem 3.5'den hesaplanan hacimdeki bulunan kristal sayısı, N , değerli ise $1,6 \times 10^{13}$ ve $1,7 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Hesaplanan hacimdeki bulunan kristal sayısının ortalaması ise $8,55 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak verilmiştir. Cam alttaş üzerine biriktirilen filme karşın Si üzerinde üretilen filmin hacimdeki bulunan kristal sayısının daha düşük olması

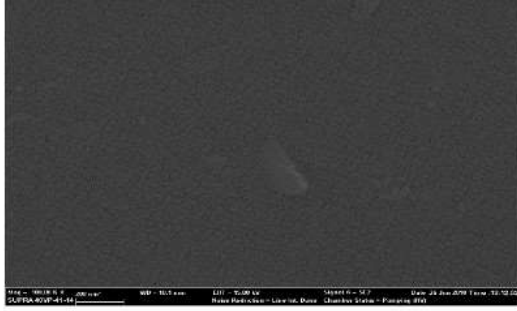
ortalama tanecik boyutunun büyük olmasından kaynaklanmıştır. Her iki alttaş üzerinde kaplanan Ag katkılı ZnO filmlerde belirlenen en şiddeti yansıma piklerinin keskinliğinin ve yoğunluğunun film kalınlığı ile arttığı ve bu ise yapıdaki düzensizliğin azalması nedeniyle kristalleşmede bir iyileşme ortaya çıkardığı görülmüştür.

Çizelge 4.3 Si üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri

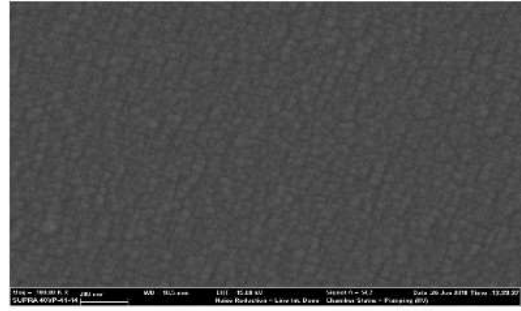
2 Theta	Tanecik boyutu	Dislokasyon yoğunluğu	Mikro-gerilme	Hacimde bulunan kristal sayısı
(derece)	D (nm)	δ (m⁻²)	ξ	N (m⁻²)
28,41	46,55	4,62 E+14	7,59 E-04	1,60 E+13
28,59	34,16	8,57 E+14	1,03 E-03	5,51 E+13
39,36	42,57	5,52 E+14	8,30 E-04	2,28 E+13
43,21	14,50	4,76 E+15	2,44 E-03	1,70 E+15
47,82	18,95	2,78 E+15	1,86 E-03	5,81 E+14
48,74	22,76	1,93 E+15	1,55 E-03	2,79 E+14

4.1.2 Yüzey Özellikleri

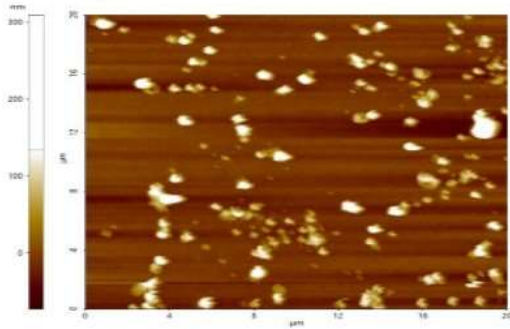
Cam ve Si alttaşlar üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO ince filmlerin AFM ölçümünden elde edilen iki ve üç boyutlu görüntüleri Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Bu görüntülerde koyu ve daha açık renkler gözükmemektedir. Açık renkteki alanlar tepeleri gösterirken koyu renkler ise çukurları göstermiştir. Seçilen bölgedeki renklerin açıklığı o bölgedeki noktanın daha çok büyümesini temsil etmiştir. Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO filmin AFM görüntüleri 20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ ’de ölçeğinde yapılmıştır. Cam ve Si alttaş üzerine üretilen filmlerin ortalama yüzey pürüzlülük (RMS) değerleri sırası ile 34 nm ve 13 nm, ortalama yüksekliği ise 19 ve 8 nm, skewness değerleri ise -3,306 ve -0,724, kurtosis değerleri ise 17,09 ve 19,28, tepe noktası ise 309 nm ve 157 nm, çukur noktası ise -73 nm ve -154 nm ve tepe ile çukur arasındaki fark ise 118 nm ve 1,4 nm olarak bulunmuştur.



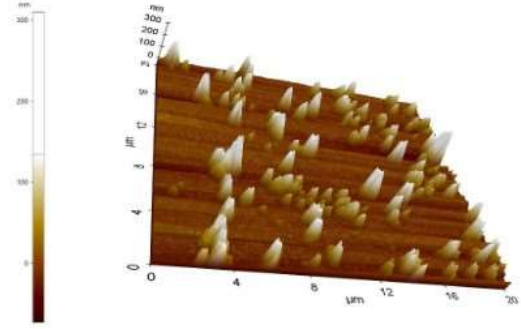
(a) Cam Görüntüsü



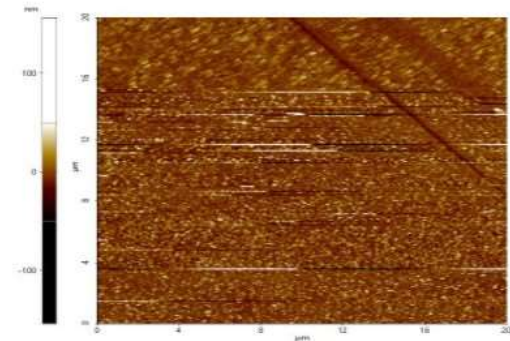
(b) Si Görüntüsü



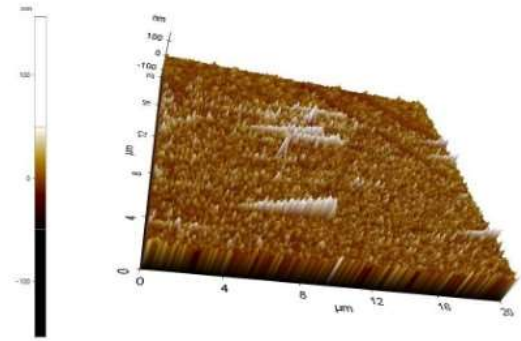
(c) 2 boyutlu Cam Görüntüsü



(d) 3 boyutlu Cam Görüntüsü



(e) 2 boyutlu Si Görüntüsü



(f) 3 boyutlu Si Görüntüsü

Şekil 4.3 a, c ve d) Cam ve b, e ve f) Si alttaş üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM ve FESEM görüntüleri

Bu parametrelerde ise skewness değerinin sıfıra yakın olması üretilen filmlerin düzgün simetrisini göstermektedir. Bu değer pozitif olması ise filmlerin yüzeyindeki tepelerin çukura göre daha fazlası olmasını belirlemektedir. Tam tersine bu değer negatif olması çukurların tepelere göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca kurtosis değeri ise yüzeyin düzlüğünü belirlemektedir. Bu değer sıfıra yaklaştığı ise üretilen filmlerin normal yüzey dağılımına sahip olduğunun bir göstergesidir.

FESEM’den elde edilen yüzey görüntülerinden görülebileceği gibi üretilen ince filmlerdeki tanecik boyutları nanometre boyutundadır. Cam altlık için tanecik boyutlarının, Si üzerine üretilen ince filmlere göre bir miktar daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, üretilen filmler altlık üzerine homojen ve boşluk gözükmeyen kaplanmıştır. Bu sonuç AFM sonucu ile tamamen uyum içerisindedir. Cam ve Si alttaş üzerine üretilen filmlerin RMS değerlerinin farklı olması FESEM analizinde daha büyük tanelere neden olmuştur. Ayrıca, bu değer cam alttaş üzerinde hazırlanan filmde büyük olması elde edilen XRD hesaplarına da yansımıştır.

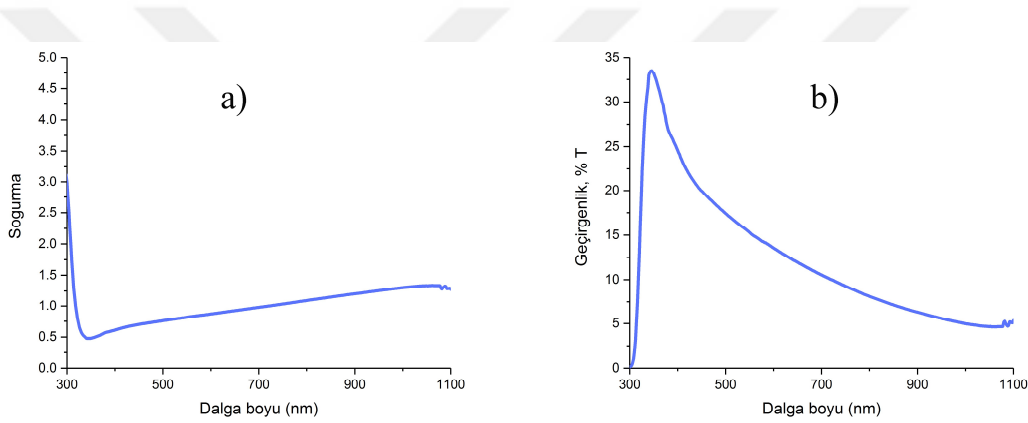
Görüntülere göre cam alttaş üzerindeki filmde diğer alttaşa karşı daha büyük taneler belirgindir ve bu da XRD analizinde ortalama tanecik boyutunun ve AFM’de pürüzlülük değerinin artmasına neden olmuştur. RMS değerinin değişiminin katkı elementine bağlı olduğu farklı araştırmacılar tarafından açıklanmıştır (Davoodi vd. 2016, Mahmood ve Park 2012). AFM ve FESEM ölçümlerinde cam üzerine hazırlanan filmin yüzeyinde, taneciklerin agregasyonu ve daha büyük kristal oluşması net bir şekilde gösterilmiştir. Bu büyük kristallerin elde edilmesi, aynı malzemede, XRD sonucunda farklı fazlara, daha büyük tanecikler boyutlarına ve FWHM’de genişlemeye neden olmuştur. Aslında, AFM tarafından Ag konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak elde edilen tane boyutlarının azalması, bu kristalitlerin topaklanmasındaki azalma ile açıklanabilir (Chebil vd. 2017).

Bu açıklamaya göre Si alttaş üzerine hazırlanan filmler cam alttaşa karşı daha simetrik ve daha normal yüzey dağılımına sahiptir.

4.1.3 Optik Özellikler

Cam altlık üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin absorptans ve geçirgenlik grafikleri verilmiştir. Bu filmlerin absorptans ve geçirgenlik değerlerinin dalga boyuna karşı değişimleri sırasıyla 300-1100 nm ve 350-1100 nm aralığında yapılmıştır. Bu eğriler ise Şekil 4.4 a ve b’de gösterilmiştir. Absorptans grafiğine göre, absorptans değeri yaklaşık olarak 330 nm dalga boyuna kadar bir azalma gösterirken, 330-1100 nm aralığında bir artış göstermiştir. Amma geçirgenlik grafiğinde ise ölçülen dalga boyu arasında bu değer sürekli azalmıştır. Cam üzerine üretilen filmin verilen dalga boyu

aralığında ortalama absorbans ve geçirgenlik değerleri sırası ile 1 ve 11,85% olarak hesaplanmıştır. Aynı filmler için ortalama absorbans ve geçirgenlik değerleri görünür bölgede (400-700 nm) 0,81 ve 15,89% olarak hesaplanmıştır. Malzemelerin optik sabitleri bilgisi, optoelektronikte kullanılacak malzemelerin tasarımı ve analizinde sıklıkla büyük ilgi çekmektedir. Bununla birlikte, filmlerin kalınlığı gözlenen geçirgenlik spektrumunda önemli bir rol oynar. Genel olarak, bu teknik ile biriktirilen filmlerin geçirgenliği, kalınlıktaki bir artışın eşlik ettiği konsantrasyonların artmasıyla birlikte bir düşüş göstermiştir. Film kalınlığının alttaş yüzey üzerine artışı, parçacıklar arasındaki elektrostatik etkileşimin artması nedeniyle partikül aglomerasyonlarının oluşması ile ilişkilendirilebilir (Xu vd. 2011).

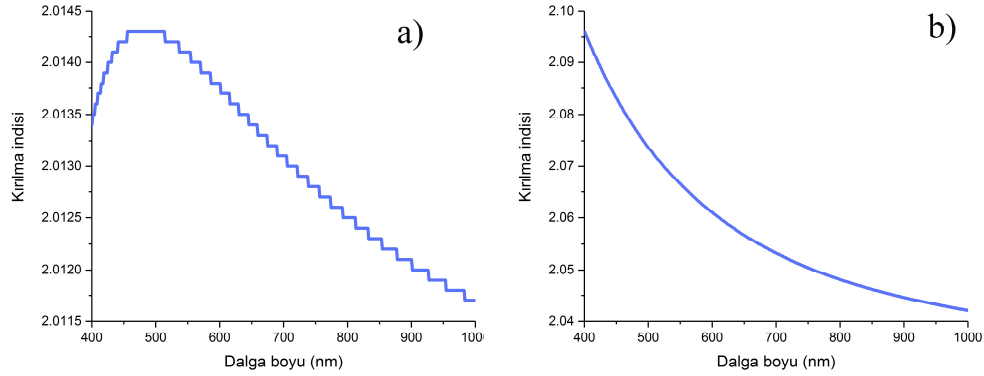


Şekil 4.4 Cam alttaş üzerine kaplanan Ag katkılı ZnO ince filmlerin absorbans ve geçirgenlik eğrileri

Bu filmin kırılma indisi ve yansıma gibi diğer optiksel parametreleri dalga boyuna göre Şekil 4.5 ve 4.6’de verilmiştir. Bu ölçümler 400 ila 1000 nm dalga boyu aralığında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi Si üzerine kaplanan filmde dalga boyu artınca kırılma indisi azalmaktadır. Cam alttaş üzerindeki filmde ise yaklaşık 500 nm dalga boyuna kadar bir artış gösterdikten sonra kırılma indisi değeri düşmüştür.

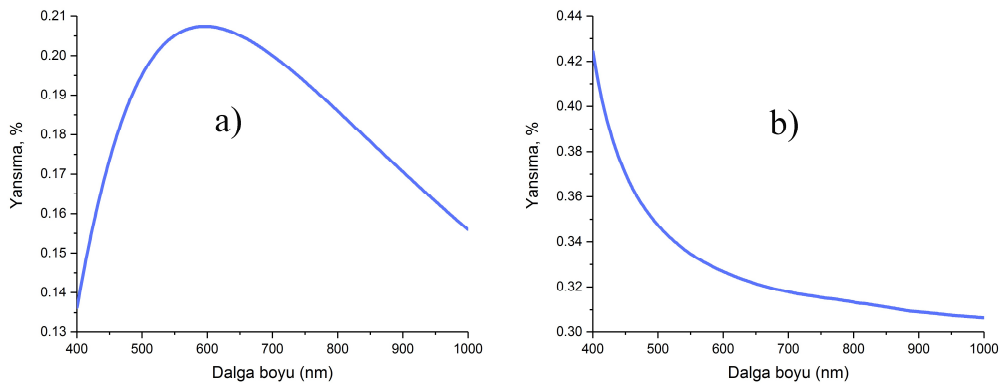
Cam ve Si alttaşlar üzerine kaplanan filmde 400-1000 nm dalga boyu aralığında ortalama kırılma indisi değerleri sırası ile 2,013 ve 2,058 olarak hesaplanmıştır. Aynı alttaşlar için görünür bölgede ortalama kırılma indisi 2,014 ve 2,069 olarak elde edilmiştir. Seçilen her iki alttaş üzerine kırılma indisleri görünür bölgede daha yüksektir. Kırılma indisi, optik

malzeme tasarımı için en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilir, çünkü iyonların elektronik polarizasyonu ve malzeme içindeki yerel alanla yakından ilişkilidir.



Şekil 4.5 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin kırılma indis grafikleri

Cam ve Si alttaş üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO ince filmlerin yansımaya grafikleri şekil 4.6'de verilmiştir. Şekil'e göre Si üzerine kaplanan filmde dalga boyu artınca yansımaya değerleri azalmaktadır. Ancak diğer alttaştaki filmde yaklaşık 580 nm dalga boyuna kadar hızlı bir artış gösterdikten sonra 580-1000 nm arasında yansımaya değerleri aynı hız ile düşmüştür.



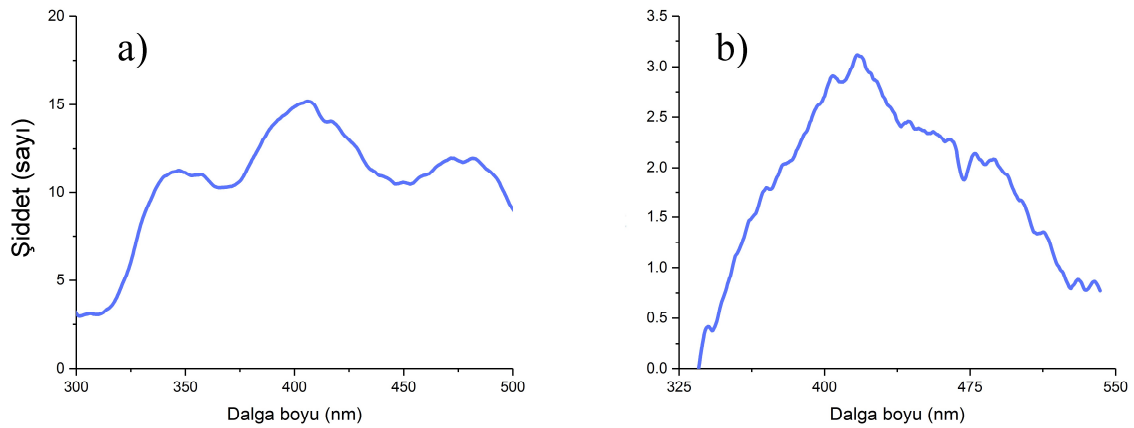
Şekil 4.6 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO ince filmlerin yansımaya grafikleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine biriktirilen filmde 400-1000 nm dalga boyu aralığında ortalama yansımaya değerleri sırası ile 0,18 ve 0,33 olarak hesaplanmıştır. Aynı alttaşlar için 400-700 nm arasında ortalama yansımaya değeri 0,19 ve 0,34 olarak belirlenmiştir. Her

iki alttaş üzerine kaplanan gümüş katkılı ZnO ince filmde yansıma değerleri görünür bölgede daha yüksektir. Filmetriks F20 cihazı kullanarak, cam ve Si alttaşlar üzerinde hazırlanan filmlerin kalınlık değerleri sırasıyla 73 ve 75 nm olarak elde edilmiştir. Bu ölçümde her iki alttaş için goodness of fit (GOF) değeri 0,999 olarak belirlenmiştir. Yansıtma (R) özelliği optik malzemelerdeki absorbands ve geçirgenlik ile olan ilişkisi nedeniyle önemli bir parametredir. S. Sharma (Sharma vd. 2014) ve arkadaşlarının yaptığı araştırmanın sonucuna göre, her iki alttaş üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin düşük yansıma değerleri değerlendirildiğinde yansımaya karşı bu tip kaplamaların uygun bir seçim olduğu bulunmuştur.

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin fotolüminesans (FL) ölçümleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan FL ölçümleri cam ve Si alttaşlar üzerindeki filmler için sırası ile 290 ve 280 nm dalga boyundadır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7 a ve b’de gösterilmiştir. Cam üzerinde kaplanan filmde ise toplamda 7 dalga boylarında pik noktası belirlenmiştir. Bu pik noktaları enerji olarak 2,58, 2,63, 2,76, 2,98, 3,05, 3,47 ve 3,57 eV’dir. Bu pik noktalara denk gelen dalga boyları ise 481,5, 472, 450, 416,5, 406, 357 ve 347 nm’dir. Fotolüminesanstan elde edilen 2,58, 2,63 ve 2,76 eV pik merkezleri ise P. K. Kannan (Kannan vd. 2014), V. Ghafouri (Ghafouri vd. 2012), B. Khalfallah (Khalfallah vd. 2017) ve arkadaşlarının yaptığı araştırmaya göre sırası ile görünür bölgedeki derin seviyeli emisyonla ilgili geniş bir kusur, mavi-mor spektrumu aralığında ve sadece mavi pik göstergesi ve elektronun sığ donör seviyesinden valans bandının üstüne geçişini belirtmiştir. Bu aralıkta 2,98 eV meydana gelen pik merkezi ise Zn arayere ilişkin seviyelerden valans bandına geçiş olarak tanımlanmıştır. Bu tanım T. Coman ve arkadaşlarının yayınladığı araştırma ile tamamen uyum içerisindedir (Coman vd. 2017). Bu ince filmlerde 3,05, 3,47 ve 3,57 eV olarak bulunan pik merkezleri ise sırasıyla yakın bant kenarı emisyonu (Hammad vd. 2013), UV bölgesinde bant kenarına yakınında serbest salınımlı eksiton rekombinasyonu (Coman vd. 2017) ve diğer pike benzer şekilde yakın bant kenarına (Mickan vd. 2017) karşılık gelmiştir. Genellikle, yakın bant kenarı fotolüminesansı pik değeri 3,26 eV civarında yani daha yüksek dalga boylarında bulunur (Chamorro vd. 2013). Düşük dalga boyuna geçişi yüksek yük taşıyıcı konsantrasyonu ile ilişkilidir (Makino vd. 2004). Yüksek yük taşıyıcı konsantrasyonlarının emisyon pik genişleme ve kaymasına neden olduğu bilinmektedir.

Dejenere yarı iletkenlerde safsızlık destekli rekombinasyon prosesleri daha yüksek enerjili fotonların emisyonuna yol açabilir (Lyo ve Jones 1988). Ancak Si alttaşı üzerinde kaplanan Ag katkılı ZnO filmde ise 9 pik merkezi bulunmuştur. Bu pikler sırası ile 2,54, 2,59, 2,67, 2,72, 2,76, 2,8, 2,97, 3,06, 3,35 eV olarak tespit edilmiştir. Bu değerler aynı sıra ile 487, 477,5, 464,5, 456, 448,5, 443, 417, 404,5 ve 370 nm dalga boylarına denk gelmiştir. Cam alttaşa karşın Si alttaşı üzerinde ise belirlenen piklerin 5'i çok az kayma ile bulunmuştur. Bu kayma değerleri 0,01 ve 0,04 eV arasında değişmektedir. Ancak bu alttaşa 2,54 ve 2,72 eV enerji değerine sahip pik merkezleri sırasıyla araştırmalarda çok iyi bilinen yeşil lüminesans bant olarak tanımlanarak genellikle FL spektrumunun kusurlarla ilgili bölümüne hakimdir (Özgür vd. 2005) ve diğer pik ise valans banttaki hollerle iki kat iyonize Zn boşluğu seviyelerinden elektronların radyasyon rekombinasyonunu (Coman vd. 2017) ifade etmiştir. Son olarak, 3,35 eV'ta (Heo vd. 2005) bulunan değer yakın bant kenarı emisyonu ve aslında donör sınırlı eksitonlar olarak açıklanmıştır. YW. Heo (Heo vd. 2005) ve arkadaşlarının rapor ettiği çalışmada bağlı eksitonlar sıcaklıktaki bir artış ile ayrışır ve serbest eksitondan gelen emisyon 3,30 eV'e doğru kayma gösterir.



Şekil 4.7 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO ince filmlerin fotolüminesans grafikleri

4.2 Bakır (Cu) Katkılı Çinko Oksit (ZnO)

Cu katkılı ZnO ince filmler TVA sisteminde iki farklı altlık üzerine kaplamaların yapılması düşünülmüştür. Cam altlık amorf ve üzerine yüksek kalitede kaplamaların üretilmesi bir çok yöntemde oldukça zordur. Fakat, bir çok enerji ve savunma sanayi uygulamalarında cam üzerine kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu altaşa ek olarak Si altlık da oldukça yaygın kullanılan bir altlık türüdür ve tek kristal olarak üretilmektedir. TVA sistemi ile cam üzerinde yaklaşık 84 nm ve Si altlık üzerinde de yaklaşık 80 nm kalınlığında kaplamalar yapılmıştır. Bu kaplamaların üretim parametreleri çizelge 4.4’de verilmektedir. Çizelge 4.4’de verilen parametreler dışında TVA sisteminde bir çok değişken parametrede vardır. Fakat bu değerler dışındaki tüm değerler sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.4 Cu katkılı ZnO ince film üretim parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Basınç	9×10^{-5}	torr
Filaman akımı	19	amper
Hızlandırma voltajı	250	volt
Deşarj akımı	0,5	amper

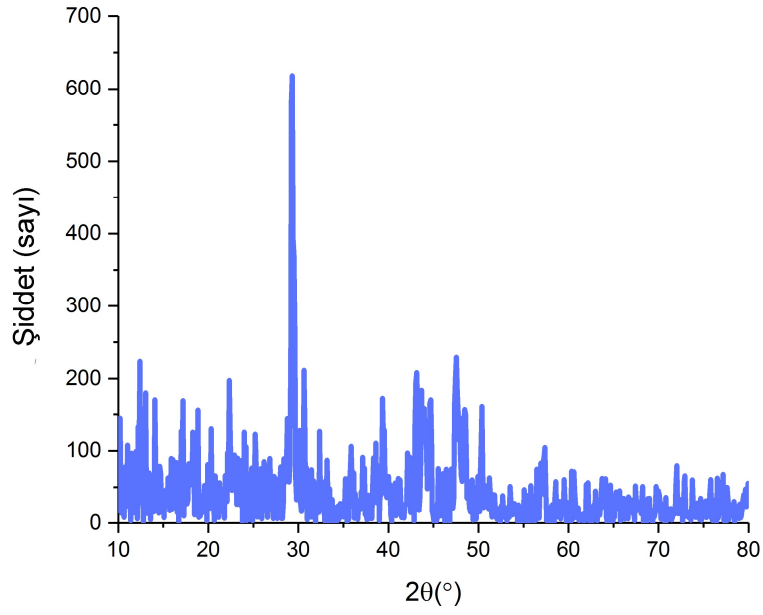
Çizelge 4.4’de elde edilen değerlerde başarılı bir şekilde TVA plazması kararlı bir şekilde üretilenmiştir.

4.2.1 Mikro Yapısal Özellikler

Şekil 4.8 ve 4.9’de cam ve Si altaşlar üzerinde üretilen Cu katkılı ZnO filmlerin XRD desenleri verilmiştir. Bu ince filmlerin X-ışını kırımın desenleri 10° - 80° aralığında ve oda sıcaklığında elde edilmiştir. Çizilen her iki desende ise üretilen ince filmlerin yapısı polikristaldir.

Şekil 4.8’deki desene göre cam altaş üzerine üretilen filmlerin $28,78^{\circ}$, $30,62^{\circ}$, $47,55^{\circ}$ ve $48,47^{\circ}$ derecede indekslenen pikler sırası ile ZnO’nin (1 0 0), (1 0 2) ve (0 1 2) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir. Bu piklerin 2θ derece ve düzlemleri ise R. M.

Gharehbagh (Mohammadigharehbagh vd. 2017, Mohammadigharehbagh vd. 2017), S. Elmas (Elmas vd. 2019), M. Özgür (Özgür vd. 2019), Z. A. Khan (Khan ve Ghosh 2011) vd.'nin yaptığı çalışma değerlerine benzerdir. Bu desende $32,37^\circ$, $39,36^\circ$ ve $48,47^\circ$ derece değerlerinde gösterilen pikleri ise sırasıyla CuO'nin (1 1 0), (2 0 0) ve (-2 0 2) yansıma düzlemleri olduğu bulunmuştur. Bakır oksitin piklerinin değerleri ve yansıma düzlemleri JCPDS kart No. 65-2309 ve PDF kart No. 892531 ve S. Suresh (Suresh vd. 2016), J. E. Jeronsia (Jeronsia vd. 2016), S. Elzey (Elzey vd. 2011) ile uyum içerisindedir. Ayrıca, $43,13^\circ$, $43,68^\circ$ ve $50,40^\circ$ derece olarak bulunan pikler ise sırası ile bakır fazının (1 1 1) ve (2 0 0) yansıma düzlemleri olarak indekslenmiştir. Bakır fazının pik değerleri ve yansıma düzlemlerin JCPDS kart No. 85-1326, T. Narushima (Narushima vd. 2012), T. M. D. Dang (Dang vd. 2011) ve S. M. Badawy (Badawy vd. 2015) ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Cu katkılı ZnO filmlerin XRD deseninde ise $39,36^\circ$ ve $43,68^\circ$ derece değerlerinde bulunan pik Zn fazının (1 0 0) ve (1 0 1) Bragg yansıma düzlemleri olarak elde edilmiştir (Özgür vd. 2019). Literatür inceleme sonucunda bu desende $29,33^\circ$ derece olarak gözüken pik ise Cu₂O fazının (1 1 0) yansıma düzlemleri olarak bulunmuştur (Chakraborti vd. 2007). Daha sonra ise $30,16^\circ$ ve $44,69^\circ$ 2θ dereceye sahip pik noktaları CuZn fazının (1 1 2) ve (1 1 1) düzlemleri ile eşleşmiştir. Bu dataalar ise JCPDS 65-9061 ve literatürde yayınlanan T. Narushima (Narushima vd. 2012), T. M. D. Dang (Dang vd. 2011) ile uyuşmuştur. Normal ZnO ince film ile karşılaştırdığımızda, gözlenen pik değerlerinde kayma meydana gelmiştir. Bu kayma aynı A. Sreedhar ve ise bakır katkısından kaynaklandığı önerilmiştir (Sreedhar vd. 2016). Bu tür kaymalar ve XRD pikinin yoğunluğundaki azalma, biriktirme tekniği, katkı prosedürü ve oksijen basıncı gibi büyüme koşullarına bağlıdır (Ma vd. 2011, Wang vd. 2005).



Şekil 4.8 Cam üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin XRD deseni

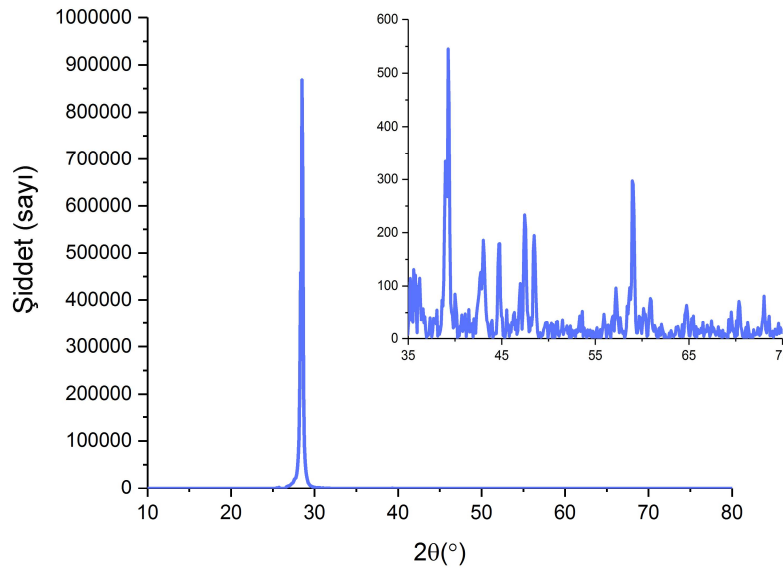
Scherrer denkleminde cam üzerine biriktirilen bakır katkılı ZnO filmlerin tanecik boyutu, D , Çizelge 4.5’de verilmiştir. Bu denklemden elde edilen tanecik boyut değerleri 17,88 ile 136,38 nm arasındadır. Bu hesaplamalara göre ortalama tanecik boyutu Cu katkılı ZnO filmler için 78,37 nm olarak belirlenmiştir. Bu filmlerin dislokasyon yoğunluğu, δ , ise $5,38 \times 10^{13}$ ile $3,13 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ arasında değişmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun verilen minimum ve maksimum değerine göre ortalama değer ise $1,59 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Ayrıca, mikro-gerilme, ξ , değerleri $9,95 \times 10^{-4}$ ve $1,01 \times 10^{-3}$ arasındadır. Cam üzerine üretilen Cu katkılı ZnO filmde ortalama mikro-gerilme değeri ise $9,95 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Bu ince filmlerde denklem 3.5’den yararlanarak hacimdeki bulunan kristal sayısı, N , değerli $2,43 \times 10^{11}$ ve $8,22 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak bulunmuştur. Cam üzerine biriktirilen filmin ortalama hacimdeki bulunan kristal sayısı değeri $4,11 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak verilmiştir.

Çizelge 4.5 Cam üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri

2 Theta	Tanecik boyutu	Dislokasyon yoğunluğu	Mikro-gerilme	Hacimde bulunan kristal sayısı
(derece)	D (nm)	δ (m⁻²)	ξ	N (m⁻²)
20,31	136,38	5,38 E+13	2,59 E-04	2,43 E+11
22,34	40,48	6,10 E+14	8,73 E-04	3,13 E+13
23,99	35,52	7,93 E+14	9,95 E-04	5,28 E+13
28,78	40,19	6,19 E+14	8,80 E-04	3,22 E+13
29,33	20,58	2,36 E+15	1,72 E-03	4,68 E+14
30,16	55,71	3,22 E+14	6,34 E-04	8,72 E+12
30,62	45,51	4,83 E+14	7,77 E-04	1,96 E+13
32,37	72,64	1,90 E+14	4,87 E-04	3,02 E+12
39,36	25,59	1,53 E+15	1,38 E-03	1,96 E+14
43,13	22,31	2,01 E+15	1,58 E-03	3,39 E+14
43,68	50,44	3,93 E+14	7,01 E-04	1,30 E+13
43,96	23,74	1,77 E+15	1,49 E-03	2,65 E+14
44,69	35,06	8,14 E+14	1,01 E-03	5,56 E+13
47,55	17,88	3,13 E+15	1,98 E-03	8,22 E+14
48,47	23,08	1,88 E+15	1,53 E-03	2,96 E+14
50,40	36,43	7,53 E+14	9,70 E-04	4,77 E+13

Şekil 4.9'deki Si üzerine biriktirilen bakır katkılı çinko oksit deseni gösterilmiştir. Bu desene göre filmin 28,32° ve 28,5° derecedeki pikler ise sırası ile silikon waferin (1 1 1) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi Si alttaş üzerine üretilen filmlerin 36,23°, 47,45°, 48,47°, 57,21° ve 70,36° derecede indekslenen pikler sırası ile ZnO'nin (1 0 1), (1 0 2), (0 1 2), (1 1 0) ve (1 0 3) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir. Bu pik değerleri ve yansıma düzlemleri ise JCPDS kart No. 36-1451 ve diğer araştırmacılar (Khan ve Ghosh 2011, Mohammadigharehbagh vd. 2017, Mohammadigharehbagh vd. 2018, Özgür vd. 2019) tarafından yayınlanan değerler ile eşleşmektedir. Ayrıca, üretilen filmlerin 35,59°, 38,99°, 48,47°, 58,95°, 60,89° ve 73,03° derecede indekslenen pikler sırası ile CuO'nin (0 0 2), (2 0 0), (-2 0 2), (0 2 0) ve (-1 1 3) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir. Raporlanan CuO pikler ise PDF kart No. 89-2531 ve diğer çalışmalarda (Elzey vd. 2011, Jeronsia vd. 2016, Suresh vd. 2016)

belirlenen pik noktaları ile eşleşmiştir. Bu filmlerin $36,6^\circ$ ve $39,27^\circ$ derecede gerçekleşen pikler sırası ile Zn'nun (0 0 2) ve (1 0 0) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir. Bu pik açıları ve düzlemler ise literatürde belirlenen pikler ile tamamen uyum içerisindedir (Vasireddi vd. 2017). Daha sonra ise filmlerin 40° ve $58,95^\circ$ derecedeki pikler sırası ile CuZn_5 fazının (1 0 2) ve $43,04^\circ$ bulunan pik ise Cu_5Zn_8 fazının (3 3 0) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir (Juskensas vd. 2007, Juskensas vd. 2012). Son olarak ise $41,47^\circ$ derecede gözükten pik ise ZnSiO_3 fazını yapıda bulunmasını göstermiştir (Heng vd. 2017).



Şekil 4.9 Si üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin XRD deseni

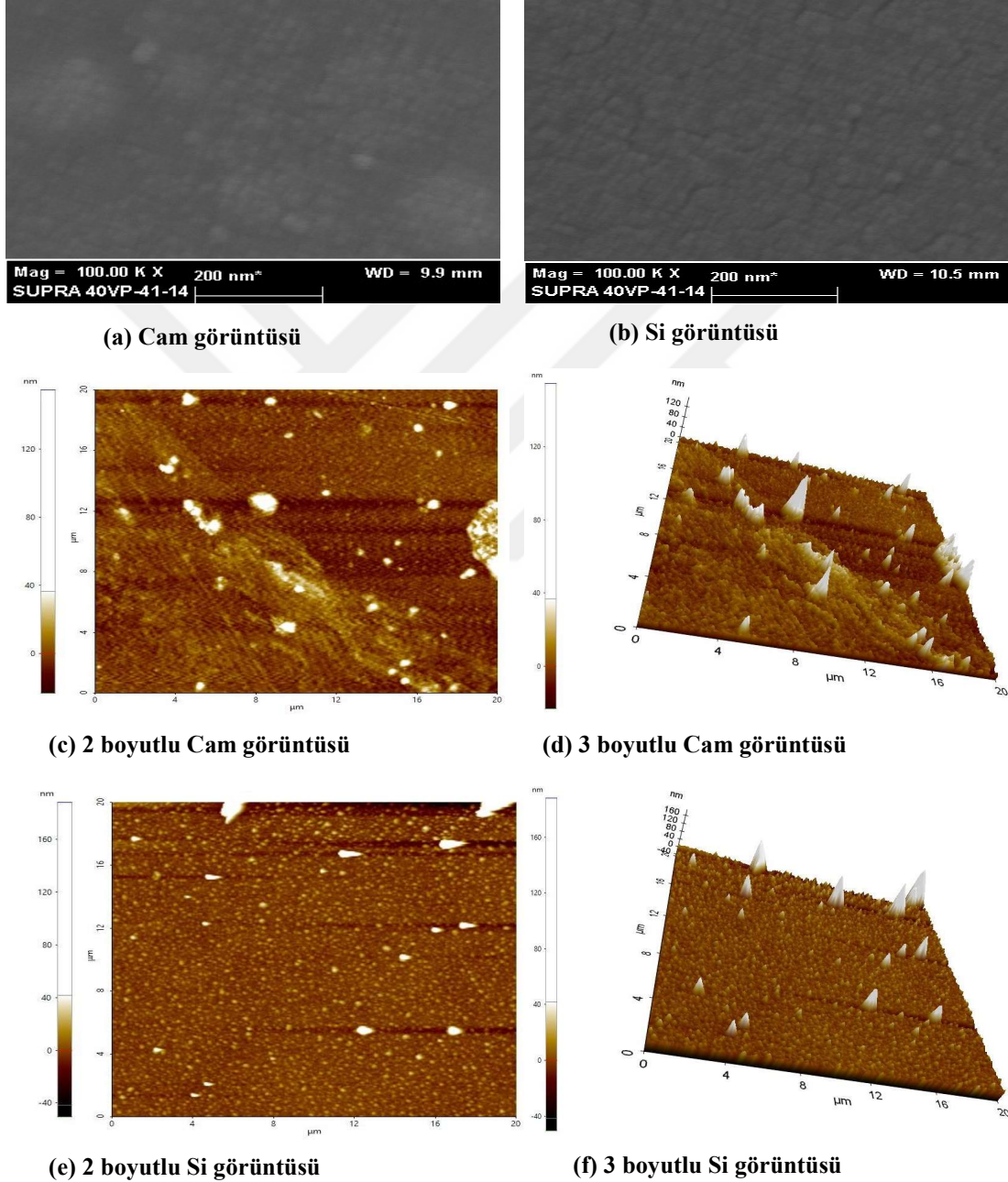
Scherrer denkleminde Si alttaş üzerine biriktirilen Cu katkılı ZnO filmlerin tanecik boyutu, D , Çizelge 4.6'de verilmiştir. Bu denklemden yola çıkarak tanecik boyutu değerleri 13,62 ve 46,81 nm olarak elde edilmiştir. Bu hesaplamalardan ise ortalama tanecik boyutu bu filmler için 30,22 nm olarak belirlenmiştir. Cu katkılı ZnO ince filmlerin dislokasyon yoğunluğu, δ , ise $4,56 \times 10^{14}$ ve $5,39 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ dir. Dislokasyon yoğunluğunun verilen minimum ve maksimum değerine göre ortalama değer ise $2,92 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, mikro-gerilme, ξ , değerleri $9,53 \times 10^{-4}$ ve $1,01 \times 10^{-3}$ dir. Bu filmde ortalama mikro-gerilme değeri ise $9,82 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.5'den hacimdeki bulunan kristal sayısı değerli bu filmler için $1,67 \times 10^{13}$ ve $2,32 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak verilmiştir. Si üzerine biriktirilen filmin ortalama hacimdeki bulunan kristal sayısı değeri ise $1,17 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.6 Si üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri

2 Theta	Tanecik boyutu	Dislokasyon yoğunluğu	Mikro-gerilme	Hacimde bulunan kristal sayısı
(derece)	D (nm)	δ (m⁻²)	ξ	N (m⁻²)
28,32	18,34	2,97 E+15	1,93 E-03	7,07 E+14
28,50	40,79	6,01 E+14	8,66 E-04	2,89 E+13
35,59	26,82	1,39 E+15	1,32 E-03	1,55 E+14
36,23	26,64	1,41 E+15	1,33 E-03	1,59 E+14
36,60	23,18	1,86 E+15	1,52 E-03	2,77 E+14
38,99	37,10	7,27 E+14	9,53 E-04	4,22 E+13
39,27	34,88	8,22 E+14	1,01 E-03	5,41 E+13
43,04	13,62	5,39 E+15	2,59 E-03	2,32 E+15
47,45	28,41	1,24 E+15	1,24 E-03	1,23 E+14
48,47	28,23	1,25 E+15	1,25 E-03	1,26 E+14
57,21	32,41	9,52 E+14	1,09 E-03	7,25 E+13
58,95	29,09	1,18 E+15	1,22 E-03	1,12 E+14
60,15	24,92	1,61 E+15	1,42 E-03	2,07 E+14
60,89	27,24	1,35 E+15	1,30 E-03	1,45 E+14
64,75	30,51	1,07 E+15	1,16 E-03	9,23 E+13
70,36	45,37	4,86 E+14	7,79 E-04	1,89 E+13
73,03	46,81	4,56 E+14	7,55 E-04	1,67 E+13

4.2.2 Yüzey Özellikleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin AFM ölçümünden elde edilen iki ve üç boyutlu görüntüler Şekil 4.10'de verilmiştir. Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO filmlerin analizleri $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ aralığında ölçülmüştür.



Şekil 4.10 a, c ve d) Cam ve b, e ve f) Si alttaş üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM ve FESEM görüntüleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen filmlerin ortalama yüzey pürüzlülük (RMS) değerleri sırasıyla 9,35 nm ve 10,62 nm, ortalama yüksekliği ise 5,59 ve 5,25 nm, skewness değerleri ise -4,034 ve -6,627, kurtosis değerleri ise 35,08 ve 78,53, tepe noktası ise 155 nm ve 188 nm, çukur noktası ise -23 nm ve -50 nm ve tepe ile çukur arasındaki fark ise 66 nm ve 69 nm olarak bulunmuştur. Filmlerin pürüzlülüğünün azaltması gelen ışığın saçılmasının azalması ve optik geçirgenliğin artmasına neden olur (Thirumoorthi vd. 2016). Cam ve Si alttaş üzerine biriktirilen bakır katkılı ZnO filmlerin RMS değerler arasında çok az bir fark gözükmemektedir. Bunun nedeni ise Cu (1,35) ve Zn (1,35)'nin iyon yarıçapının birbirine eşit olduğundan kaynaklanmaktadır.

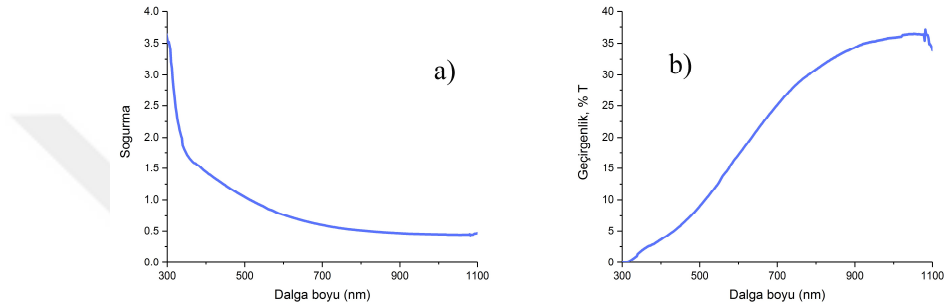
FESEM'den elde edilen yüzey görüntülerinden görülebileceği gibi üretilen ince filmlerdeki tanecik boyutları nanometre boyutundadır. Cam altlık için tanecik boyutları Si alttaşa üzerine üretilen ince filmlere göre çok büyük olduğu açıktır. Ayrıca, üretilen filmler homojen ve boşluk gözükmeden altlık üzerine kaplanmıştır. Görüntülere göre cam alttaş üzerindeki filmde diğer alttaşa karşı çok büyük taneler belirgindir ve bu da XRD analizinde ortalama tanecik boyutunun ve AFM'de pürüzlülük değerinin artmasına neden olmuştur. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi kaplanan filmlerin yüzeyinde çatlak ve boşluk gözükmemiştir. AFM ve FESEM'den belirlendiği gibi, cam alttaş üzerine hazırlanan Cu katkılı ZnO film yüzeyde daha çok aglomerasyon gözükmemektedir. Bu sonuç XRD ölçümünde datalara göre daha büyük tane boyutların büyümesine neden olmuştur.

Bu sonuçlara göre Si üzerine kaplanan bakır katkılı ince filmler cam alttaşa kıyasla daha simetrik olduğu belirgin şekilde gözükmemektedir. Bu değerdeki fark ise filmlerde ortaya çıkan tepe ve çukurlar farkından kaynaklanmıştır. Ancak cam üzerine üretilen filmin yüzeyde daha normal dağılımlı olduğu kurtosis değerinden açıklanmıştır.

4.2.3 Optik Özellikler

Cam alttaş üzerine hazırlanan Cu katkılı ZnO ince filmlerin absorptans ve geçirgenlik grafikleri verilmiştir. Bu filmlerin absorptans ve geçirgenlik-dalga boyu değişimleri 300-1100 nm aralıkta çizilmiştir. Elde edilen ölçümden değerler ise şekil 4.11 a ve b'de verilmiştir. Absorptans grafiğinden belirlendiği gibi absorptans değeri yaklaşık olarak 330

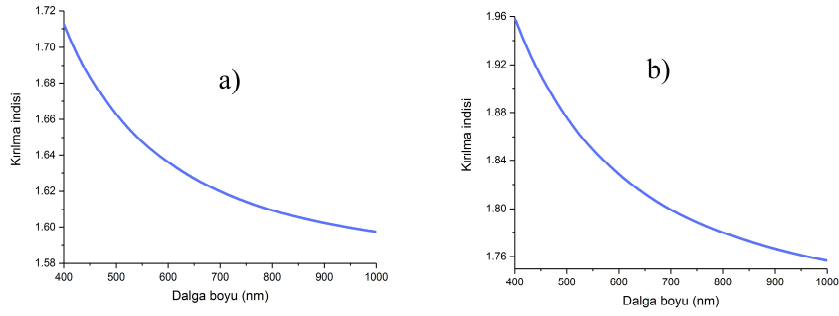
nm dalga boyuna kadar hızlı bir azalma gösterirken, 330-1100 nm aralığında daha farklı eğim ile düşmeye devam etmiştir. Ancak geçirgenlik grafiğinde ise 300 ila 330 nm dalga boyu aralığında normal hız ile artış gösterirken 330-1000 nm dalga boyu arasında daha fazla eğim ile ve sürekli artmaya devam etmiştir. Cam üzerine üretilen filmin ölçülen dalga boyu aralığında ortalama absorban ve geçirgenlik değerleri sırası ile 0,85 ve 21,78% olarak hesaplanmıştır. Bu filmler için ortalama absorban ve geçirgenlik değerleri görünür aralıkta (400-700 nm) 0,94 ve 13,42% olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara dayanarak geçirgenlik görünür aralıkta daha düşük miktar olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Cam alttaş üzerine kaplanan Cu katkılı ZnO ince filmlerin absorban ve geçirgenlik eğrileri

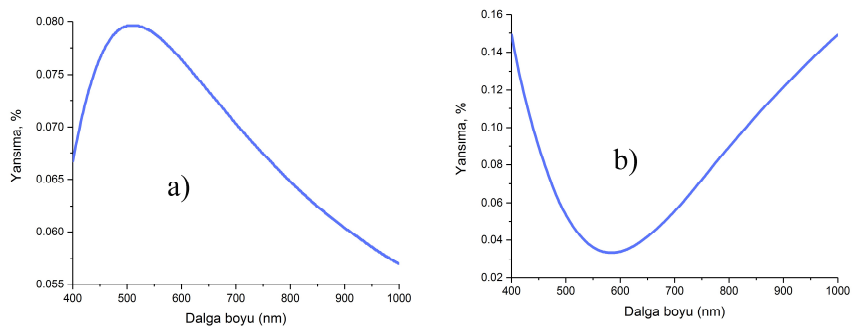
Hazırlanan bakır katkılı ZnO filmlerin kırılma indisi ve yansıma-dalga boyu gibi diğer optiksel parametreleri Şekil 4.12 ve 4.13’de verilmiştir. Bu ölçümler oda sıcaklığında ve 400-1000 nm dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen filmin dalga boyuna karşın davranışı artınca kırılma indisleri ise sabit bir hız ile azalmaktadır. Bu sabit azalma hızı her iki örnekte benzer şekildedir. İki alttaşın kırılma indisleri grafiği birbirlerini yaklaşık olarak 700 nm dalga boyunda kesişmiştir.

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen film’de 400-1000 nm dalga boyu aralığında ortalama kırılma indisi değerleri sırası ile 1,63 ve 1,82 olarak hesaplanmıştır. Aynı alttaşlar için görünür bolgede ortalama kırılma indisi 1,65 ve 1,86 olarak verilmiştir. Her iki alttaş üzerine biriktirilen bakır katkılı ZnO ince filmlerin ortalama kırılma indisleri 400-700 nm dalga boyu aralığındaki değer 400-1000 nm dalga boyu aralığına kıyasla artış göstermiştir.



Şekil 4.12 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin kırılma indislerinin grafikleri

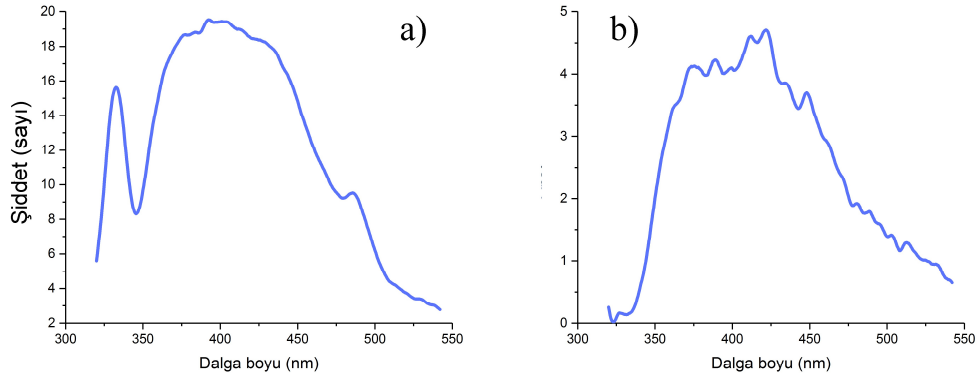
Cam ve Si alttaşlar üzerine kaplanan Cu katkılı ZnO ince filmlerin yansıtma grafikleri ise Şekil 4.13’de görülmüştür. Bu şekilde Si üzerine üretilen filmde ise ilk olarak 520 nm dalga boyuna kadar yansıtma değeri hızlı artmışken, 520 nm’den sonra ise tam tersine bu değer benzer şekilde düşmüştür. Ancak cam alttaş üzerindeki filmde Si alttaşa karşı tam ters bir davranış izlenmiştir. Cam alttaş üzerinde ise yaklaşık 580 nm dalga boyuna kadar hızlı bir azalma meydana geldikten sonra 580-1000 nm boyunca yansıtma değerleri benzer hızla artmıştır. Cam ve Si alttaşlar üzerine biriktirilen film’de 400-1000 nm dalga boyu aralığında ortalama yansıtma değerleri sırası ile 0,069 ve 0,082 olarak hesaplanmıştır. Aynı alttaşlar için bu değer görünür aralıkta 0,076 ve 0,058 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçları göz önünde bulundurarak cam alttaş üzerine kaplanan bakır katkılı ZnO ince filmin ortalama yansıtma değeri görünür bolgede daha yüksektir. Bu sonuçlar Si alttaş için tam ters bir ilişki göstermiştir. Filmtriaks F20 cihazı ölçümler sonucunda cam ve Si alttaşlar üzerinde üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin kalınlık değerleri sırası ile 84 ve 80 nm olarak belirlenmiştir. Bu ölçümlerde cam ve Si alttaşlar için goodness of fit (GOF) değeri 0,97 ve 0,96 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin yansıtma grafikleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen bakır katkılı ZnO ince filmlerin fotolüminesans (FL) lmleri oda sıcaklığında ve sırası ile 320 ve 300 nm uyarma dalga boyunda gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.14 a ve b’de gösterilmiştir. Cam üzerinde kaplanan filmde ise toplamda 7 dalga boylarında pik noktası belirlenmiştir. Bu pik noktaları enerji olarak 2,55, 3,01, 3,08, 3,09, 3,16, 3,23 ve 3,28 eV’dır. Bu pik noktalara denk gelen dalga boyları ise 485,5, 412, 403, 401, 392,5, 383,5 ve 377,5 nm’dir. Bu ölçümden elde edilen 2,55 ve 3,08 eV enerjide gerçeklesen pik merkezleri Ag katkılı ZnO ince filmlere benzer değerlerde ve sırayla çok iyi bilinen yeşil lüminesans bant olarak ve genellikle FL spektrumunun kusurlarla ilgili bölümüne ve yakın bant kenarı emisyonu olarak tanımlanmiştir. Bu filmde 3,16, 3,23 ve 3,28 eV noktasında bulunan pikler ise Co katkılı ZnO ince filmdeki piklere çok benzerdir. Yeni bulunan ve 3,01 eV enerji değerinde olan ise iletim bandı ve çinko boşlukları alıcı seviyeleri arasındaki geçişleri açıklamaktadır (Coman vd. 2017). P. Ariyakhani (Ariyakkani vd. 2017) ve arakadaşlarının yaptığı araştırmada bu enerji değerinde meydana gelen pik merkezi arayer Zn seviyesinden iletim bandına ve Zn boşluğu seviyesine geçiş olarak belirlenmiştir.

Si alttaş üzerinde kaplanan bakır katkılı ZnO filmde ise toplam 11 pik merkezi belirlenmiştir. Bu pikler sırası ile 2,42, 2,47, 2,54, 2,58, 2,77, 2,86, 2,94, 3,01, 3,19, 3,28 ve 3,3 eV olarak tespit edilmiştir. Bu değerler aynı sırası ile 512,5, 503, 488,5, 480,5, 448, 434, 421,5, 412, 388, 378 ve 375 nm dalga boylarına denk gelmiştir. Si alttaş üzerinde gerçekleşen ince filmde 2,54, 3,01, 3,19 ve 3,28 eV’ta belirlenen piklerin çok az kayma ile cam alttaştaki filmin değerli bulunduğu gösterilmiştir. Bu kayma değerinin maksimumu 0,03 eV olarak bulunmuştur. Diğer piklerde ise, 2,42, 2,58, 2,77 ve 2,94 eV olarak bulunan değerler ise Ag katkılı ZnO ince filmlerin değerlerine çok yakındır. Son olarak 2,86, 3,19, 3,28 ve 3,3 eV olarak bilinen pik merkezleri ise Co katkılı ZnO filmdeki değerleri gibidir.



Şekil 4.14 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Cu katkılı ZnO ince filmlerin fotoluminesans grafikleri

4.3 Kobalt (Co) Katkılı Çinko Oksit (ZnO)

Co katkılı ZnO ince filmler TVA sisteminde iki farklı altlık üzerine kaplamaların yapılması düşünülmüştür. Cam altlık amorfdir ve üzerine yüksek kalitede kaplamaların üretilmesi bir çok yöntemde oldukça zordur. Fakat, bir çok enerji ve savunma sanayi uygulamalarında cam üzerine kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alttaşa ek olarak Si altlık’da oldukça yaygın kullanılan bir altlık türüdür ve tek kristal olarak üretilmektedir. TVA sistemi ile cam üzerinde yaklaşık 88 nm ve Si altlık üzerinde de yaklaşık 90 nm kalınlığında kaplamalar yapılmıştır. Bu kaplamaların üretim parametreleri çizelge 4.7’de verilmektedir. Bu çizelgede verilen parametreler dışında TVA sisteminde bir çok değişken parametrede vardır. Fakat bu değerler dışındaki tüm değerler sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.7 Co katkılı ZnO ince film üretim parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Basınç	9×10^{-5}	torr
Filaman akımı	19	amper
Hızlandırma voltajı	250	volt
Deşarj akımı	0,5	amper

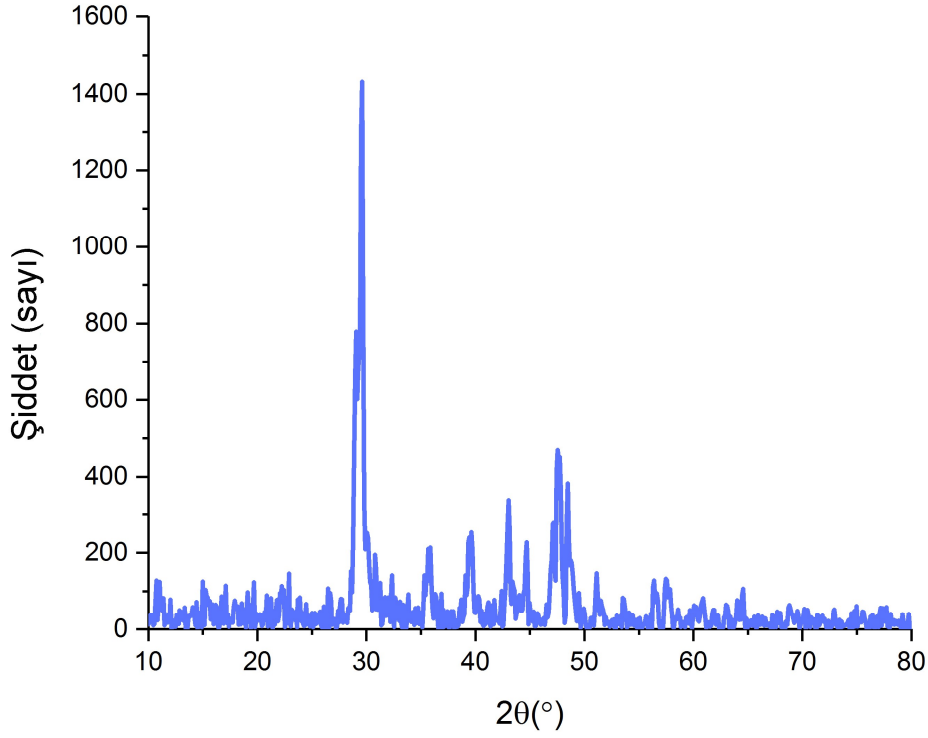
Çizelge 4.7’de elde edilen değerlerde başarılı bir şekilde TVA plazması kararlı bir şekilde üretilmiştir.

4.3.1 Mikro Yapısal Özellikler

XRD analizleri ile İnce filmlerin mikro yapıları belirlenmeye çalışılmıştır. Cam ve Si altlık üzerine üretilen ince filmler 5 mm × 5mm boyutlarında kesilerek ölçümler alınmıştır.

Si ve cam alttaşlar üzerinde TVA tekniği ile üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri 10°-80° derece aralığında ve oda sıcaklığında elde edilmiştir. Şekil 4.15 ve 4.16'de cam ve Si alttaşlar üzerinde üretilen Co katkılı ZnO filmlerin XRD desenleri verilmiştir. Çizilen her iki desende ise üretilen ince filmler yapısı polikristaldir.

Şekil 4.15'deki desene göre cam alttaş üzerine üretilen filmlerin 29,05°, 29,61°, 30,8°, 31,26°, 32,37°, 35,86°, 47,18°, 47,55°, 56,38° ve 57,48° derece değerlerinde verilen pikleri sırası ile ZnO'nin (1 0 0), (2 0 0), (1 0 1), (0 1 2), (1 0 2) ve (1 1 0) Bragg yansıma düzlemleri olarak belirlenmiştir. Bu pik değerlerin sırası ile R. Mohammadigharehbagh (Mohammadigharehbagh vd. 2017, Mohammadigharehbagh vd. 2017), S. Elmas (Elmas vd. 2019), S. Pat ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki değerler ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu desende 44,69°, 47,55° ve 51,13° derece değerlerinde gösterilen pikleri ise sırası ile Co'nin (1 1 1) ve (2 0 0) yansıma düzlemleri olduğu bulunmuştur. Bu ölçümlerden Kobalt piklerinin değerleri ve yansıma düzlemleri JCPDS kart No. 5-2872, V. D. Jovic (Jovic vd. 2006), N. A. M. Barakat (Barakat vd. 2013) ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar ile uyum içerisindedir. Ayrıca, 22,89° ve 43,41° derece değerlerinde gösterilen pikler ise sırası ile kobalt oksitin fazının yansıma düzlemlerini işaret etmektedir. Co katkılı ZnO XRD deseninde ise 22,89°, 31,26°, 35,86° ve 44,69° derece değerlerinde bulunan pikler sırasıyla Co₃O₄ fazının (2 2 0) ve (4 0 0) Bragg yansıma düzlemleri olarak elde edilmiştir. İndekslenen pik değerlerin G. Allaedini (Allaedini ve Muhammad 2013), J. Yang (Yang vd. 2009), M. Smyrnioti (Smyrnioti ve Ioannides 2017), M. Kang (Kang ve Zhou 2015) rapor ettiği değerler ise uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra ise 22,89°, 44,69° ve 48,47° derece olarak belirlenen pikler sırasıyla Co₂O₄ fazının (1 1 1), (2 2 2) ve (4 2 2) düzlemleri olarak tespit edilmiştir (Raza vd. 2016). Son olarak 39,63° ve 43,41° derece değerlerinde bulunan pikler ise sırası ile çinkonun (1 0 0) ve (1 0 1) (Raza vd. 2016) yansıma düzleminin işaretidir.



Şekil 4.15 Cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin XRD deseni

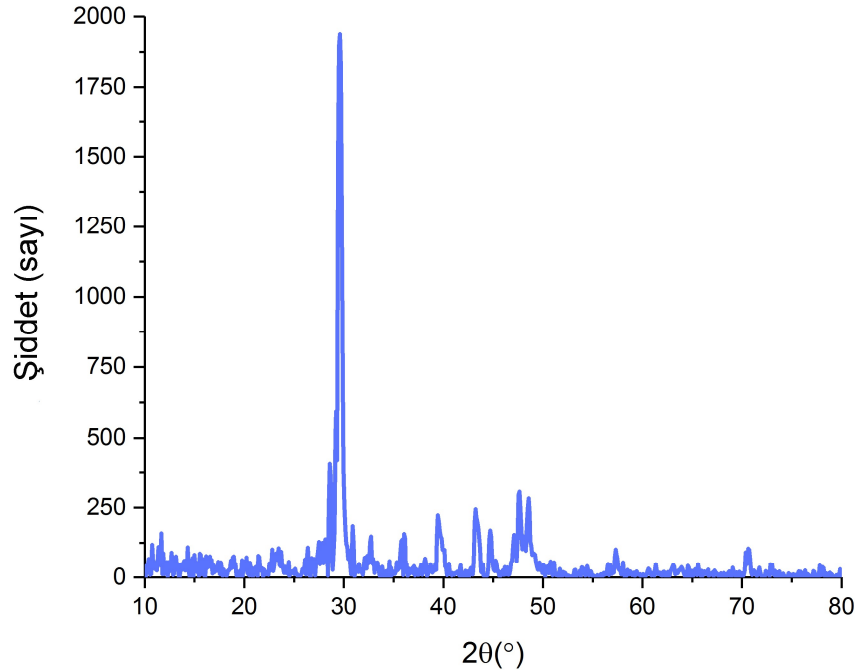
Scherrer denkleminden cam üzerine biriktirilen kobalt katkılı ZnO filmlerin hesaplanan tanecik boyutu, D , çizelge 4.8’de gösterilmiştir. Bu denklemi kullanarak tanecik boyut değerleri 14,8 ile 141,93 nm arasında değişmektedir. Bu hesaplamalara göre ortalama tanecik boyutu bu filmler için 78,37 nm olarak belirlenmiştir. XRD cihazından elde edilen piklerin genişliğini dar olması cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin kristal kalitesini ispat etmiştir. Bu filmlerin dislokasyon yoğunluğu, δ , ise $4,96 \times 10^{13}$ ile $4,57 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ arasında değişmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun verilen minimum ve maksimum değerine göre ortalama değer ise $2,31 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. Ayrıca, mikro-gerilme, ξ , değerleri $8,97 \times 10^{-4}$ ve $1,07 \times 10^{-3}$ arasındadır. Cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO filmde ortalama mikro-gerilme değeri ise $9,49 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.5 kullanarak hacimdeki bulunan kristal sayısı değerli bu filmler için $2,17 \times 10^{11}$ ve $1,84 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ arasında bulunmuştur. Cam üzerine biriktirilen filmin ortalama hacimdeki bulunan kristal sayısı değeri $9,2 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak verilmiştir.

Çizelge 4.8 Cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri

2 Theta	Tanecik boyutu	Dislokasyon yoğunluğu	Mikro-gerilme	Hacimde bulunan kristal sayısı
(derece)	D (nm)	δ (m⁻²)	ξ	m⁻²
22,89	141,93	4,96 E+13	2,49 E-04	2,17 E+11
29,05	39,41	6,44 E+14	8,97 E-04	3,65 E+13
29,61	21,79	2,11 E+15	1,62 E-03	3,90 E+14
30,07	18,41	2,95 E+15	1,92 E-03	7,67 E+14
30,80	52,37	3,65 E+14	6,75 E-04	1,17 E+13
31,26	30,73	1,06 E+15	1,15 E-03	9,87 E+13
32,37	63,93	2,45 E+14	5,53 E-04	5,27 E+12
35,31	107,07	8,72 E+13	3,30 E-04	6,69 E+11
35,86	16,07	3,87 E+15	2,20 E-03	1,32 E+15
39,08	134,11	5,56 E+13	2,64 E-04	2,72 E+11
39,63	16,60	3,63 E+15	2,13 E-03	1,16 E+15
43,04	25,25	1,57 E+15	1,40 E-03	2,17 E+14
43,41	31,59	1,00 E+15	1,12 E-03	8,84 E+13
44,69	32,93	9,22 E+14	1,07 E-03	7,48 E+13
47,18	22,33	2,01 E+15	1,58 E-03	3,54 E+14
47,55	17,83	3,15 E+15	1,98 E-03	8,71 E+14
48,47	31,75	9,92 E+14	1,11 E-03	8,66 E+13
51,13	30,64	1,07 E+15	1,15 E-03	9,98 E+13
56,38	18,41	2,95 E+15	1,92 E-03	7,67 E+14
57,48	14,80	4,57 E+15	2,39 E-03	1,84 E+15

Şekil 4.16'deki desene göre Si alttaş üzerine üretilen filmlerin 29,61°, 30,89°, 36,05, 47,09° ve 47,64° derece değerlerinde belirlenen pikler ise sırasıyla ZnO'nin (1 0 0), (0 1 0), (0 1 2) ve (1 0 2) Bragg yansıma düzlemleri olarak bulunmuştur (Çorlu vd. 2017, Elmas vd. 2019, Mohammadigharehbagh vd. 2017, Mohammadigharehbagh vd. 2018, Özgür vd. 2019). Bu desende 36,05° ve 43,22° derece olarak bulunan pikleri ise sırası ile CoO'nin yansıma düzlemleri olduğu bulunmuştur. Kobalt oksit fazı olarak bulunan piklerinin değerleri ve yansıma düzlemleri S. Chattopadhyay (Chattopadhyay vd. 2012) ve arkadaşlarının yaptığı araştırma sonucunda raporlanan makale ile uyum içerisinde

olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, $44,69^\circ$ ve $48,56^\circ$ derece değerlerinde gösterilen pikler ise sırası ile Co_3O_4 , Co_2O_4 (4 0 0) (Kang ve Zhou 2015) ve (2 2 2) (Raza vd. 2016) ve Co_2O_4 'un (4 2 2) (Raza vd. 2016) yansıma düzlemlerini göstermiştir. Co_3O_4 ve Co_2O_4 fazlarının pik değerleri ve yansıma düzlemlerin JCPDS kart No. 42-1467 ve 9-418 ile uyum içerisinde. Bu filmlerdeki $44,69^\circ$ ve $47,64^\circ$ derecede belirlenen pikler sırasıyla Co'nun fazının (1 1 1) Bragg yansıma düzlemleri olarak elde edilmiştir. Kobaltın fazının elde edilen pik değerleri V. D. Jovic (Jovic vd. 2006), N. A. M. Barakat (Barakat vd. 2013) ve arkadaşlarının yayınladığı araştırmaya çok yakındır. Kobalt katkılı ZnO filmlerden elde XRD desenine göre elde edilen en şiddetli piklerin FWHM genişlik değeri çok azdır. Bu ise kaplanan filmlerin daha iyi kristalleşmesini ispat etmektedir. Yapıda bulunan diğer safsızlık piklerin şiddet olarak bozulmaya neden olsa bile tanecik boyut hesaplamaları bu kaplamaların nano-derece olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuca göre kullanılan tekniğin nano-boyutta ince film kaplamaları için uygun olmasını işaret etmektedir.



Şekil 4.16 Si üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin XRD deseni

Scherrer denkleminde Si alttaş üzerine biriktirilen Co katkılı ZnO filmlerin tanecik boyutu, D , çizelge 4.9'de verilmiştir. Bu denklemden yola çıkarak tanecik boyut değerleri

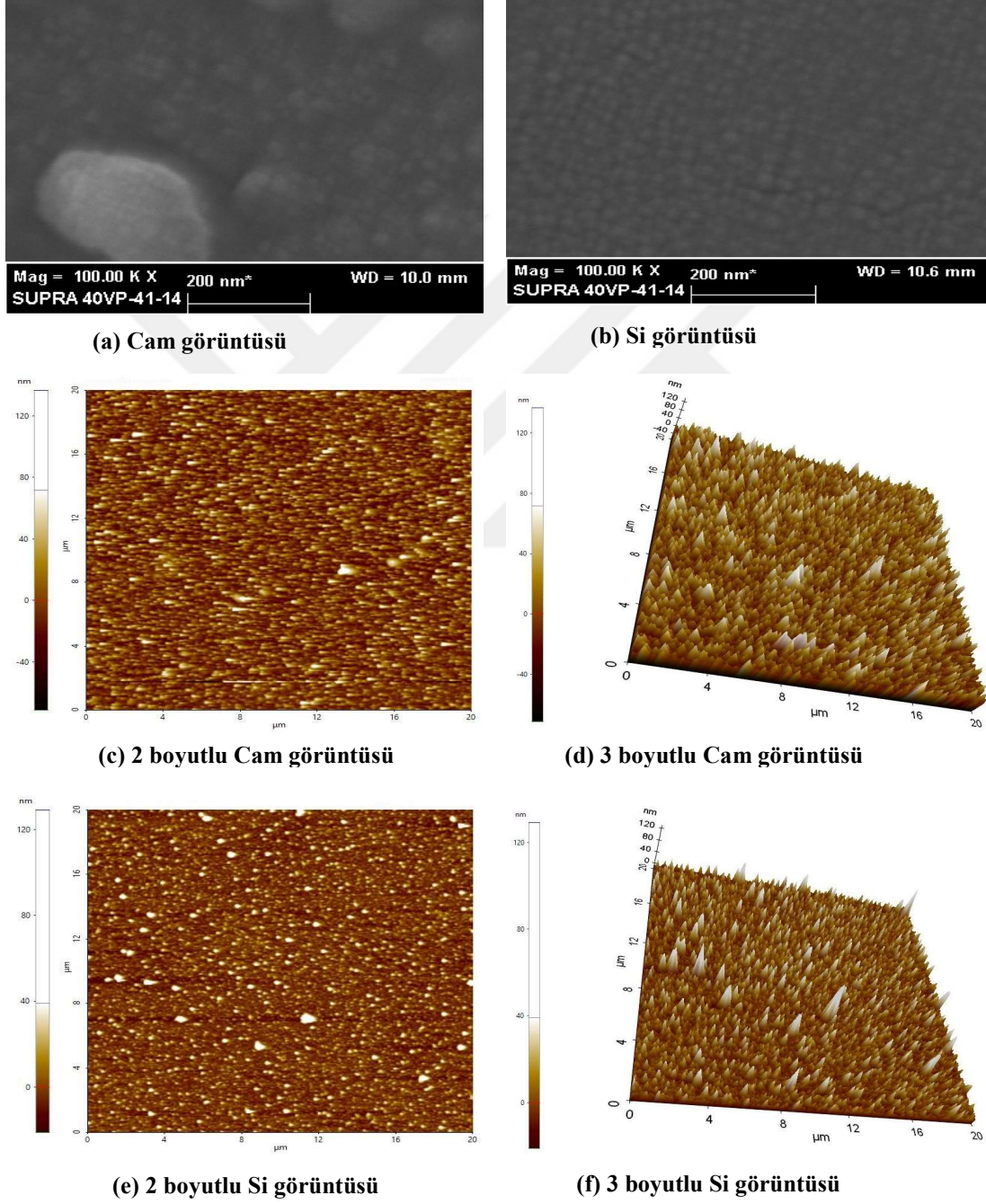
15,56 ile 60,62 nm arasında değişim göstermiştir. Bu hesaplamalardan elde edilen ortalama tanecik boyutu bu filmler için 38,09 nm olarak belirlenmiştir. XRD cihazından elde edilen piklerin genişliğini dar olması ve şiddet değerinin yüksek olması cam üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin kristal kalitesini ispat etmiştir. Co katkılı ZnO ince filmlerin dislokasyon yoğunluğu, δ , ise $2,72 \times 10^{14}$ ile $4,13 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ arasında değişmiştir. Dislokasyon yoğunluğunun verilen minimum ve maksimum değerine göre ortalama değer ise $2,2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, mikro-gerilme, ξ , değerleri $9,65 \times 10^{-4}$ ve $1,08 \times 10^{-3}$ arasındadır. Si üzerine üretilen Co katkılı ZnO filmde ortalama mikro-gerilme değeri ise $1,02 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.5 kullanarak hacimdeki bulunan kristal sayısı değerli bu filmler için $6,67 \times 10^{12}$ ile $1,54 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ arasındadır. Si üzerine biriktirilen filmin ortalama hacimdeki bulunan kristal sayısı değeri $7,7 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak verilmiştir.

Çizelge 4.9 Si üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmin hesaplanan yapısal parametreleri

2 Theta	Tanecik boyutu	Dislokasyon yoğunluğu	Mikro-gerilme	Hacimde bulunan kristal sayısı
(derece)	D (nm)	$\delta (\text{m}^{-2})$	ξ	m^{-2}
28,59	32,77	9,31 E+14	1,08 E-03	7,80 E+13
29,61	18,15	3,03 E+15	1,95 E-03	8,28 E+14
30,89	51,71	3,74 E+14	6,84 E-04	1,26 E+13
32,73	36,64	7,45 E+14	9,65 E-04	4,99 E+13
36,05	60,62	2,72 E+14	5,83 E-04	6,67 E+12
39,45	15,57	4,13 E+15	2,27 E-03	1,53 E+15
43,22	15,56	4,13 E+15	2,27 E-03	1,54 E+15
44,69	26,20	1,46 E+15	1,35 E-03	1,91 E+14
47,09	25,92	1,49 E+15	1,36 E-03	1,99 E+14
47,64	24,88	1,62 E+15	1,42 E-03	2,35 E+14
48,10	32,14	9,68 E+14	1,10 E-03	8,44 E+13
48,56	22,17	2,03 E+15	1,59 E-03	3,72 E+14

4.3.2 Yüzey Özellikleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin AFM ölçümünden elde edilen iki ve üç boyutlu görüntüler Şekil 4.17’de verilmiştir. Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO filmin ölçümleri $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ aralığında yapılmıştır.



Şekil 4.17 a, c ve d) Cam ve b, e ve f) Si alttaş üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin iki ve üç boyutlu AFM ve FESEM görüntüleri

Cam ve Si alttaş üzerine üretilen filmlerin ortalama yüzey pürüzlülük (RMS) değerleri sırası ile 18,3 nm ve 9,95 nm, ortalama yüksekliği ise 14,28 ve 6,85 nm, skewness değerleri ise -1,1 ve -2,47, kurtosis değerleri ise 4,81 ve 14,43, tepe noktası ise 137 nm ve 129 nm, çukur noktası ise -71 nm ve -21 nm ve tepe ile çukur arasındaki fark ise 33 nm ve 54 nm olarak bulunmuştur. RMS pürüzlülüğü değeri yüzey yüksekliğinin dağılımının kareköküdür ve ortalama pürüzlülüğünden daha hassas ölçüm olarak düşünülmektedir (Thirumoorthi vd. 2016). Bu yüzey görüntülerinden görülebileceği gibi üretilen ince filmlerdeki tanecik boyutları nanometre boyutundadır. Si altlık için tanecik boyutlarının cam üzerine üretilen ince filmlere göre bir miktar daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Kobalt (1,35 ) ve çinko (1,35 )'nun iyon yarıçapı arasındaki ve aynı deneysel koşullar altında eşitliğe rağmen elde edilen RMS değerlerinin arasındaki fark cam alttaş üzerine kaplanan filmin yüzeyinde diğer alttaşa göre daha fazla aglomerasyonun olduğu açıktır. Bu fark ise XRD lmnden elde edilen tanecik boyutlarının cam alttaş üzerindeki filmde çok daha fazla olduğunu göstermiştir.

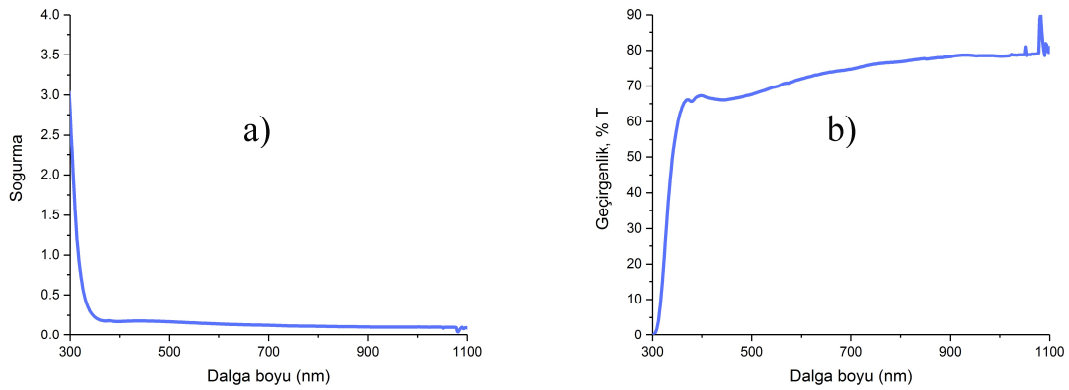
FESEM lmnden elde edilen yüzey görüntülerinden görülebileceği gibi bu filmlerde tanecik boyutları nanometre boyutundadır. Benzer şekilde cam altlık için tanecik boyutları Si altlığa kıyasla daha büyüktür. Üretilen filmlerin yüzeyi tamamen homojen, boşluksuz ve atlaksızdır. Görüntülere göre cam alttaş üzerindeki filmde diğer alttaşa karşın daha çok büyük tanelerin büyümesi gerçekleşmiştir. Bu sonuç, XRD analizinde hesaplanan ortalama tanecik boyutu, AFM'den elde edilen pürüzlülük, tepe ve çukur arasındaki fark değerinin artması ile tamamen uyumludur.

Bu sonuçlara göre Si zerine hazırlanan filmlerin, cam alttaşa kıyasla daha simetrik ve daha normal yüzey dağılımına sahip olduğu belirgin şekilde gözükmektedir. Skewness değerindeki açık fark ise filmlerde ortaya çıkan tepe sayısının çukura göre çok fazla olduğundan kaynaklanmıştır.

4.3.3 Optik zellikler

Cam altlık üzerine kaplanan Co katkılı ZnO ince filmlerin absorbands ve geçirgenlik grafikleri verilmiştir. Bu filmlerin absorbands ve geçirgenlik-dalga boyu değişimleri

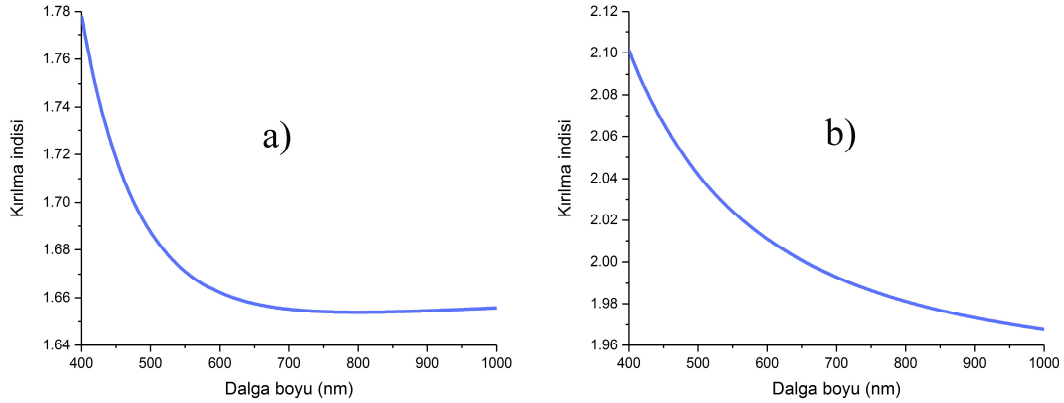
400-1100 nm aralığında yapılmıştır. Her iki eğri Şekil 4.18 a ve b’de gösterilmiştir. Absorbans grafiğinden anlaşıldığı gibi absorbans değeri yaklaşık olarak 330 nm dalga boyuna kadar hızlı bir azalma gösterirken, 330-1100 nm aralığında yaklaşık olarak sabit ve çok az bir eğimle düşmeye devam etmiştir. Ancak geçirgenlik grafiğinde ise 330 nm dalga boyuna kadar hızlı ve ani artarken geri kalan dalga boyunda sürekli ve çok az eğimle artmıştır. Cam üzerine üretilen filmin verilen dalga boyu aralığında ortalama absorbans ve geçirgenlik değerleri sırası ile 0,18 ve 70,85% olarak hesaplanmıştır. Bu filmler için ortalama absorbans ve geçirgenlik değerleri görünür aralıkta (400-700 nm) 0,16 ve 70% olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara dayanarak geçirgenlik görünür aralıkta daha düşüktür. Filmlerin yakın kızılötesi bölgede yüksek geçirgenlik gösterdiği ve geçirgenlik spektrumunun serbest elektronların yoğunluğundan dolayı yakın kızılötesi bölgede belirgin bir sönümlenme gösterdiği açıktır. Bu optik absorbans çizgileri, katlanmamış ZnO filmlerde bulunmamaktadır (Saha vd. 2015).



Şekil 4.18 Cam alttaş üzerine kaplanan Co katkılı ZnO ince filmlerin absorbans ve geçirgenlik eğrileri

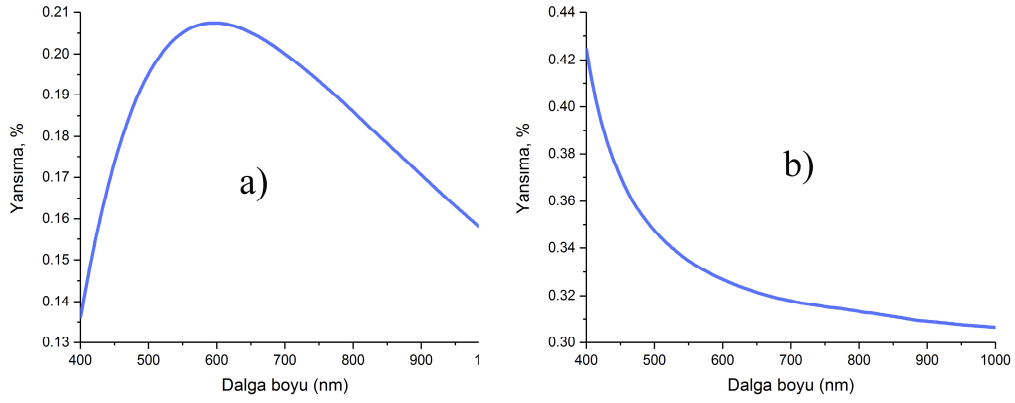
Hazırlanan kobalt katkılı ZnO filmlerin kırılma indisi ve yansıma-dalga boyu gibi diğer optiksel parametreleri Şekil 4.19 ve 4.20’de verilmiştir. Bu ölçümler 400-1000 nm dalga boyu aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Grafikten belirlendiği gibi Si üzerine kaplanan filmde dalga boyu artınca kırılma indisi ise aynı hız ile azalmaktadır. Cam alttaş üzerindeki filmde ise yaklaşık 700 nm dalga boyuna kadar hızlı bir artış gözlenirken 700-1000 nm arasında kırılma indisi sabit şekilde devam ediyor. Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen film’de 400-1000 nm dalga boyu aralığında ortalama kırılma indisi değerleri sırası ile 1,669 ve 2 olarak hesaplanmıştır. Aynı alttaşlar için görünür bolgede

ortalama kırılma indisi 1,684 ve 2,031 olarak elde edilmiştir. Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin ortalama kırılma indisleri görünür bölgede ölçülen bölgeye göre daha yüksektir. Kırılma indisi (n), iyi optik özelliklere sahip cihazları imal etmek için önemli bir faktördür, çünkü dispersiyon enerjisi, optik geçiş ve optik iletkenliğe bağlıdır (Ali vd. 2015).



Şekil 4.19 a) Cam ve b) Si alttaş üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin kırılma indislerinin grafikleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine biriktirilen Co katkılı ZnO ince filmlerin yansımaya grafikleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu şekilde Si üzerine kaplanan filmde dalga boyu artınca yansımaya değerleri normal hız ile düşüş göstermiştir. Ancak cam alttaş üzerindeki filmde ise yaklaşık 480 nm dalga boyuna kadar hızlı bir artış gösterdikten 480-1000 nm arasında yansımaya grafiği aynı hız ile düşmeye başlamıştır. Cam ve Si alttaşlar üzerine biriktirilen film’de 400-1000 nm dalga boyu aralığında ortalama yansımaya değerleri sırası ile 0,079 ve 0,31 olarak hesaplanmıştır. Aynı alttaşlar için 400-700 nm arasında ortalama yansımaya değeri 0,085 ve 0,32 olarak belirlenmiştir. Her iki alttaş üzerine kaplanan gümüş katkılı ZnO ince filmde yansımaya değerleri görünür bölgede daha yüksektir. Filmetriks F20 cihazı ölçümü sonucunda cam ve Si alttaşlar üzerinde üretilen filmlerin kalınlık değerleri sırası ile 88 ve 90 nm olarak belirlenmiştir. Bu ölçümde cam ve Si alttaşlar için goodness of fit (GOF) değeri 0,9 ve 0,96 olarak verilmiştir. Cam alttaş üzerine hazırlanan filmin elde edilen yansımaya değerleri dalga boyu aralığında bu malzemenin yansımaya karşı kaplama ve optoelektronik uygulamalarda uygun seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

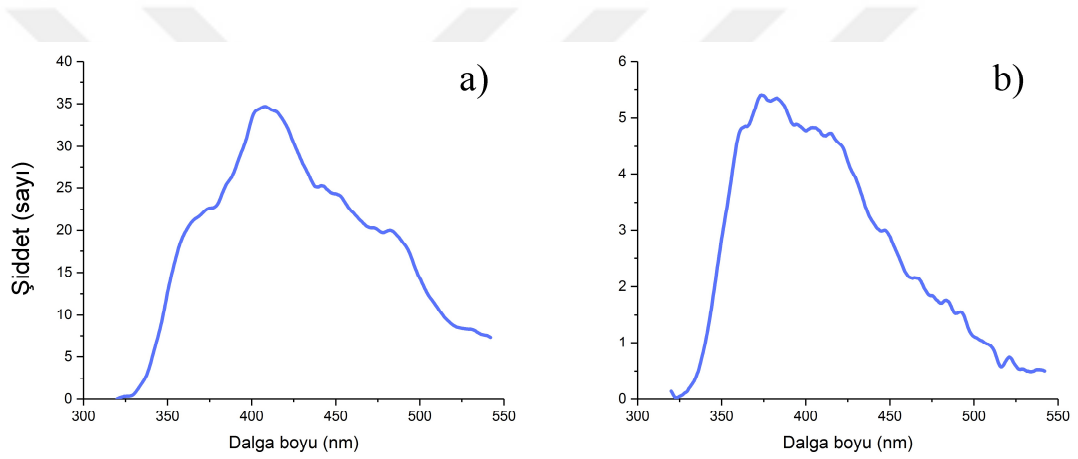


Şekil 4.20 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin yansım grafiikleri

Cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin FL ölçümleri sırası ile 280 ve 300 nm uyarma dalga boyundadır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.21 a ve b’de verilmiştir. Cam üzerinde üretilen filmde ise toplamda 4 dalga boylarında farklı pik noktası bulunmuştur. Bu pik noktaları enerji bazında 2,57, 2,63, 2,81 ve 3,04 eV’dir. Bu pik noktalara denk gelen dalga boyları ise 482,5, 472, 442 ve 408 nm’dir. FL ölçümünden elde edilen 2,57, 2,63 ve 3,04 eV pik merkezleri ise aynı alttaş üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO ince filmlerine benzer P. K. Kannan (Kannan vd. 2014), V. Ghafouri (Ghafouri vd. 2012), T. M. Hammad (Hammad vd. 2013) ve arkadaşlarının yaptığı araştırmaya göre sırası ile görünür bölgedeki derin seviyeli emisyonla ilgili geniş bir kusur, mavi-mor spektrumu aralığı ve yakın bant kenarı emisyonu olarak belirlenmiştir. 3,04 eV olarak bulunan mor emisyon bandı valans bandının tabanından çinko boşluğu seviyesine elektron geçişini açıklamaktadır (Sreedhar vd. 2016). Yeni pik olarak ve 2,81 eV meydana gelen pik nokta ise derin seviye emisyonu olarak tanımlanmıştır. Belirlenen enerji değeri elektronların sıg donör seviyesinden oksijen boşluğundan valans bandına geçişidir. Mavi emisyon yoğunluğundaki azalma, oksijen boşluklarının azaldığını gösterir (Lv vd. 2012).

Si alttaş üzerine kaplanan Co katkılı ZnO filmde ise 10 pik merkezi bulunmuştur. Bu pikler sırası ile 2,52, 2,56, 2,67, 2,77, 2,99, 3,07, 3,14, 3,24, 3,32 ve 3,41 eV olarak tespit edilmiştir. Bu değerler benzer sırasıyla 492, 483,5, 464,5, 447, 415, 404, 394,5, 383, 373,5 ve 364 nm dalga boylarına denk gelmiştir. Cam alttaş karşı Si alttaş üzerinde ise

belirlenen piklerin 2'ı çok az kayma ile bulunmuştur. Bu enerji kayma değeri en fazla 0,03 eV'dur. Bu alttaşa belirlenen ve 2,56, 2,67, 2,77, 2,99, 3,07, 3,32 ve 3,41 eV enerji değerinde pikler ise Ag katkılı ZnO ince filmler ile çok benzer noktalardadır. Bu ince filmde elde edilen 3,14 ve 3,24 eV yeni iki pik merkezi ise nötr donör'a bağlı eksitonlar (Loan ve Long 2009) ve yakın bant kenarı ve sözde ultraviyole lüminesans emisyonu (Lin vd. 2006) olarak bilinir. Bu üretilen filmin 3,24 eV'da gerçekleşen pik noktası Ong ve Du'nun yayınladığı çalışmaya göre kusurların yüksek konsantrasyonlarda olduğunu belirtmiştir (Ong ve Du 2004). Ancak E. Przeździecka ve arkadaşlarının sonucuna göre bu pik donör-alıcı rekombinasyonu ve fonon replikası olarak açıklanmıştır (Przeździecka vd. 2009).



Şekil 4.21 a) Cam ve b) Si alttaşlar üzerine üretilen Co katkılı ZnO ince filmlerin fotolüminesans grafikleri

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, yarı iletken teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ve bilinen ZnO yarı iletken ince filmlerin, cam ve Si alttaş üzerine, Termiyonik Vakum Ark (TVA) yöntemi ile Ag, Cu ve Co katkılanarak optik, yüzey ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Termiyonik vakum ark sistemi, Ag, Cu ve Co katkılması ile literatürde ilk defa kullanılan bir tekniktir. Tüm ince filmler yüksek vakum altında plazması üretilerek elde edilmiştir. Termiyonik vakum ark sisteminde üretilen ince filmler oldukça yüksek kalitelidir. İnce filmlerin kalitesi denildiğinde, homojenlik, yüksek yüzey tutunmaları, saf ve sıkı yapılı olmaları değerlendirilebilir.

ZnO yarı iletken bileşikler özellikle saydam iletken oksit üretmek için yaygın bir şekilde kullanılırlar. Son zamanlarda çıkan yayınlar incelendiğinde ise katkı miktarı ve katkı türüne göre yarı iletken bileşiklerin birçok özelliği değişmektedir. Saydam iletken oksitlerde ilk tercih edilen özellikle şeffaf olmasıdır. Bu yüzden katkılama işlemleri sonunda üretilen ince filmlerin optik geçirgenlikleri analiz edilmiştir. Bir diğer özellik ise yine optik özelliklerden kaynaklanan yasak enerji aralığı değeridir. Yasak enerji aralığının katkılama işlemi ve kullanılan yöntem ile doğrudan ilişkisi bulunmaktadır.

ZnO ince filmlerin Ag, Cu ve Co atomları ile katkılanmaları sonucunda çeşitli özellikleri bu tez çalışmasında ayrıntılı olarak ele alınmış olup, özellikle katkılama sonucunda optik özellikleri etkileyen faktörlerden bazıları tez çalışması kapsamında incelenmiştir.

Genel olarak incelendiğinde, Termiyonik Vakum Ark (TVA) yöntemi ile yapılan katkılama işlemlerinin oldukça başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Yine önemli bir etki olan katkılı ince filmlerin mikroyapı özelliklerinden de faydalanılmıştır. X-ışını analizleri sonucunda, tek oksitli ve bi-metalik oksitli kristallerin üretilen ince filmlerde elde edildiği sonucuna varılmıştır. Scherrer denklemi ile tane boyutları da hesaplanmış ve nano-boyutlu oldukları bulunmuştur. UV-Vis ölçümleri sonucunda ise geçirgenlik değerleri incelenmiştir. Optiksel yasak enerji aralığı ve yapıdaki kusurlar hakkında bilgi ise fotoluminesans cihazı ile ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu çalışmada, katkılanan tüm ince filmler cam ve silisyum altlık üzerine üretilmiştir. Dolayısıyla incelenen özelliklerin alttaşa bağımlı olarak değişimleri de ortaya konulmaya çalışılmıştır. Literatür incelendiğinde tez kapsamında üretilen ince filmlerin başarılı bir şekilde üretildiği sonucuna varılmıştır.

Mikroyapısal ölçüm sonucunda, her iki alttaş üzerine biriktirilen üç farklı katkılı ZnO ince filmlerin kristal yapısı polikristal ve hegzagonal (vürtzit) olarak bulunmuştur. Scherrer formülü kullanılarak ortalama tanecik büyüklüğü Ag, Cu ve Co katkılı ZnO filmler için cam alttaş üzerine sırasıyla 35,65, 78,38 ve 78,37 nm olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde bu değer Si alttaş üzerine aynı sıra ile 30,53, 30,22 ve 38 nm olarak hesaplanmıştır. Cam üzerine üretilen her üç filmin ortalama tanecik büyüklüğünün diğer kullanılan alttaşa göre daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerin yüksek olmasının nedeni olarak her iki alttaş üzerine hazırlanan filmlerin aynı deney şartları altında büyüdüğü de göz önünde bulundurulduğunda alttaş özelliklerinin farklı olmasından kaynaklandığı öngörülmüştür. Ortalama tanecik boyutu sonuçlarına bakıldığında her iki alttaş üzerinde üretilen katkılı ZnO ince filmlerin nano-boyutta oldukları belirgindir.

XRD analiz sonuçlarından elde edilen yarı pik genişliği değerleri kullanılarak cam ve Si alttaşlar üzerine üretilen Ag katkılı ZnO filmler için ortalama dislokasyon yoğunluğu (δ), mikro-gerilme (ξ) ve hacimde bulunan kristal sayısı değerleri sırası ile $3,54 \times 10^{14}$, $2,61 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ve $9,45 \times 10^{-4}$, $9,3 \times 10^{-3}$ ve $2,05 \times 10^{16}$, $8,55 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Benzer alttaşlarda Cu katkılı ZnO filmler için aynı değerler sırası ile $1,59 \times 10^{15}$, $2,92 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ve $9,95 \times 10^{-4}$, $9,82 \times 10^{-4}$ ve $4,11 \times 10^{14}$, $1,17 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Co katkılı ZnO ince filmlerde ise $2,31 \times 10^{15}$, $2,2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ve $9,49 \times 10^{-4}$, $1,2 \times 10^{-4}$ ve $9,2 \times 10^{14}$, $7,7 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama mikro-gerilme (ξ) sonuçları Si altlık üzerindeki her üç katkılı filmde daha büyüktür. Hesaplanan mikroyapısal parametreler, bu analizden elde edilen piklerinin yarı pik genişliği ile ilişkilidir. Ayrıca XRD desenlerinde gözlenen pik şiddetlerinin büyük ve genişliklerinin dar olması üretilen filmlerin kristal kalitesinin iyi ve kullanılan tekniğin nano yapıda ince film üretiminde başarılı olduğu sonucunu ortaya koymuştur.

Morfolojik ölçümler sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (RMS) ve tepe ile çukur arasındaki fark parametreleri cam ve Si altlık üzerine kaplanan Ag katkılı ZnO için sırası ile 34, 13 nm ve 118 ve 1,4 nm olarak bulunmuştur. Bu değerler Cu katkılı ZnO filmlerde aynı altlıklar için aynı sırayla 9,35, 10,62 nm ve 66, 69 nm olarak belirlenmiştir. Bu değerler Co katkılı ZnO ince filmler cam ve Si altlıklar için 18,3, 9,95 nm ve 33, 54 nm olarak belirlenmiştir. Verilen RMS değerleri her Ag ve Co katkılı ZnO ince filmlerde ise cam altlık üzerinde diğer kullanılan altlığa kıyasla daha büyük iken Cu katkılı ZnO'de küçüktür. Bu durumun nedeninin ortalama tanecik büyüklüğünden kaynaklandığı öngörülmüştür. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu sonuçları ise AFM sonuçlarını desteklemektedir. XRD analizinden elde edilen ortalama tanecik büyüklüğünün büyük olması FESEM'den görülen büyük tanelerin gösterilmesi ile kanıtlanmıştır. Bu görüntüler, AFM sonuçları ve görüntüleri ile desteklenmiştir. FESEM görüntüleri açıkça kaplanan her üç katkılı ZnO ince film yüzeyinde nano-boyutta taneciklerin büyümesini ve bu tanelerin homojen, boşluksuz ve çatlaksız dağılımını göstermiştir.

Optiksel analiz sonuçlara göre 300-1100 nm dalga boyu aralığında sadece cam altlık üzerine Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerde ortalama geçirgenlik değerleri 11,85%, 21,78% ve 70,85% olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar Ag, Cu ve Co katkılı ZnO filmlerde görünür dalga boyu aralığında aynı altlık için 15,89%, 13,42% ve 70% olarak verilmiştir. Bu değere göre görünür bölgedeki ortalama geçirgenlik değeri bakır ve kobalt katkılı ZnO filmlerde azalırken diğer katkılı ZnO filmde artış göstermiştir.

Cam altlık üzerinde üretilen Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerin ortalama kırılma indisi 400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında sırası ile 2,013, 1,630 ve 1,669 olarak hesaplanmıştır. Aynı altlık üzerindeki katkılı ince filmlerin ortalama kırılma indisleri 400-700 nm dalga boyu aralığında 2,014, 1,650 ve 1,684 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan anlaşıldığı gibi ortalama kırılma indislerin bu araştırmada kaplanan filmlerde görünür bölgede 400 ila 1000 nm aralığına göre artması tespit edilmiştir.

Si alttaş üzerinde üretilen Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerin ortalama kırılma indisi 400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında sırası ile 2,058, 1,820 ve 2,000 olarak hesaplanmıştır. Bu alttaş üzerindeki aynı üç katkılı ince filmlerin ortalama kırılma

indisleri görünür dalga boyu aralığında 2,069, 1,860 ve 2,031 olarak bulunmuştur. Cam ve Si altlık üzerine üretilen ince filmlerin kırılma indislerinin dalga boyu artınca azaldığı görülmüştür.

Filmetriks cihazından elde edilen sonuçlar ise cam altlık üzerinde üretilen Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerin ortalama yansıma 400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında sırası ile 0,180, 0,069 ve 0,079 iken bu parametre 400-700 nm dalga boyu aralığında 0,190, 0,076 ve 0,085 artışı bulunmuştur.

Si alttaş üzerinde üretilen Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerin ortalama yansıma 400 nm ile 1000 nm dalga boyu aralığında 0,330, 0,082 ve 0,310 olarak verilmiştir. Bu alttaş üzerindeki aynı üç katkılı ince filmlerin ortalama kırılma indisleri görünür (400-700 nm) dalga boyu aralığında ise değerler 0,340, 0,058 ve 0,320'dir. Bu sonuçlardan belirlendiği kadarı ile ortalama yansımanın katkılı ZnO ince filmlerde görünür bölgede 400 ila 1000 nm aralığına göre arttığı tespit edilmiştir.

Optiksel analiz sonucunda elde edilen kalınlık değerleri cam ve Si altlık üzerinde üretilen Ag, Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerde sırasıyla 73,75 ve 84,80 ve 88,90 nm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda belirlenen Cu ve Co katkılı ZnO ince filmlerin kalınlığını belirlemek için yapılan çalışmada ölçülen kalınlık değerlerin goodness of fit (GOF) miktarı cam ve Si altlıklar için 0,97, 0,96 ve 0,90, 0,96 olarak kayıt edilmiştir. Bu değer hem cam ve hem Si altlıklar üzerine hazırlanan Ag katkılı ZnO filmler için 0,999'dir.

6. KAYNAKLAR

- Ahmed Khan Z, Ghosh S, 2011, Robust room temperature ferromagnetism in Cu doped ZnO thin films, *Applied Physics Letters*, 99, 42504-42508.
- Ali N, Singh B, Khan Z A, Vijaya A, Tarafder K, Ghosh S, 2019, Origin of ferromagnetism in Cu-doped ZnO, *Scientific reports*, 9, 1-7.
- Ali S M, Farooq W, Baig M, Shar M, Atif M, Alghamdi S, vd., 2015, Structural and optical properties of pure and Ag doped ZnO thin films obtained by sol gel spin coating technique, *Materials Science-Poland*, 33, 601-605.
- Alivisatos A P, 1996, Perspectives on the physical chemistry of semiconductor nanocrystals, *The Journal of Physical Chemistry*, 100,13226-13239.
- Allaedini G, Muhammad A, 2013, Study of influential factors in synthesis and characterization of cobalt oxide nanoparticles, *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3, 77-93.
- Ariyakkani P, Suganya L, Sundaresan B, 2017, Investigation of the structural, optical and magnetic properties of Fe doped ZnO thin films coated on glass by sol-gel spin coating method, *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 3467-3475.
- Badawy S M, El Khashab R, Nayl A, 2015, Synthesis, characterization and catalytic activity of Cu/Cu₂O nanoparticles prepared in aqueous medium, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 10, 169-174.
- Bagnall D, Chen Y, Zhu Z, Yao T, Koyama S, Shen M Y, vd., 1997, Optically pumped lasing of ZnO at room temperature, *Applied Physics Letters*, 70, 2230-2232.
- Balbag M, Pat S, Ozkan M, Ekem N, Musa G, 2010, Thermionic vacuum arc (TVA) technique for magnesium thin film deposition, *Physica B: Condensed Matter*, 405, 3276-3278.
- Baptista A, Silva F, Porteiro J, Míguez J, Pinto G, Fernandes L, 2018, On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications, *Procedia Manufacturing*, 17, 746-757.

- Barakat N A, Abdelkareem M A, Yousef A, Al-Deyab S S, El-Newehy M, Kim H Y, 2013, Cadmium-doped cobalt/carbon nanoparticles as novel nonprecious electrocatalyst for methanol oxidation, *International journal of hydrogen energy*, 38, 3387-3394.
- Berghaus B, 1938, Improvements in and Related to the Coating of Articles by Means of Thermally Vapourized Material, UK Patent, 510992.
- Binnig G, Quate C F, Gerber C, 1986, Atomic force microscope, *Physical review letters*, 56, 930-933.
- Blanchard C R, 1996, Atomic force microscopy, *The chemical educator*, 1, 1-8.
- Chakraborti D, Narayan J, Prater J, 2007, Room temperature ferromagnetism in $\text{Zn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}$ thin films, *Applied Physics Letters*, 90, 1-3.
- Chamorro W, Horwat D, Pigeat P, Miska P, Migot S, Soldera F, vd., 2013, Near-room temperature single-domain epitaxy of reactively sputtered ZnO films, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46, 235107.
- Chanda A, Gupta S, Vasundhara M, Joshi S R, Mutta G R, Singh J, 2017, Study of structural, optical and magnetic properties of cobalt doped ZnO nanorods, *RSC Advances*, 7, 50527-50536.
- Chattopadhyay S, Chakraborty S, Laha D, Baral R, Pramanik P, Roy S, 2012, Surface-modified cobalt oxide nanoparticles: new opportunities for anti-cancer drug development, *Cancer nanotechnology*, 3, 1, 13-23.
- Chebil W, Boukadhaba M, Madhi I, Fouzri A, Lusson A, Vilar C, vd., 2017, Structural, optical and NO_2 gas sensing properties of ZnMgO thin films prepared by the sol gel method, *Physica B: Condensed Matter*, 505, 9-16.
- Chi L, 2010, *Nanotechnology: volume 8: nanostructured surfaces*, John Wiley & Sons, 439p, Germany.
- Chithra M J, Pushpanathan K, Loganathan M, 2014, Structural and optical properties of Co-doped ZnO nanoparticles synthesized by precipitation method, *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 771-779.

- Cohen-Tannoudji C, Diu B, Laloë F, 1977, Quantum mechanics, John Wiley & Sons, 240p, New York.
- Coman T, Timpu D, Nica V, Vitelaru C, Rambu A P, Stoian G, vd., 2017, Sequential PLD in oxygen/argon gas mixture of Al-doped ZnO thin films with improved electrical and optical properties, *Applied Surface Science*, 418, 456-462.
- Çorlu T, Karaduman I, Yıldırım M A, Ateş A, Acar S, 2017, NH₃ sensing properties of nanostructure ZnO thin film prepared by SILAR method, *High Temperatures-High Pressures*, 46, 155-165.
- Dang T M D, Le T T T, Fribourg-Blanc E, Dang M C, 2011, The influence of solvents and surfactants on the preparation of copper nanoparticles by a chemical reduction method, *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2, 025004.
- Davoodi A, Tajally M, Mirzaee O, Eshaghi A, 2016, Fabrication and characterization of optical and electrical properties of Al–Ti Co-doped ZnO nano-structured thin film, *Journal of Alloys and Compounds*, 657, 296-301.
- Dias H B, Bernardi M I B, Marangoni V S, de Abreu Bernardi A C, de Souza Rastelli A N, Hernandes A C, 2019, Synthesis, characterization and application of Ag doped ZnO nanoparticles in a composite resin, *Materials Science and Engineering: C*, 96, 391-401.
- Elmas S, Pat S, Mohammadigharehbagh R, Musaoğlu C, Özgür M, Demirkol U, vd., 2019, Determination of physical properties of graphene doped ZnO (ZnO: Gr) nanocomposite thin films deposited by a thermionic vacuum arc technique, *Physica B: Condensed Matter*, 557, 27-33.
- Elzey S, Baltrusaitis J, Bian S, Grassian V H, 2011, Formation of paratacamite nanomaterials via the conversion of aged and oxidized copper nanoparticles in hydrochloric acidic media, *Journal of Materials Chemistry*, 21, 3162-3169.
- Fasol G, Nakamura S, 2013, The blue laser diode: GaN based blue light emitters and lasers, Springer Science & Business Media, 342p, Berlin.

- Febrianti Y, Putri N, Sugihartono I, Fauzia V, Handoko D, AIP Conference Proceedings, 2017, Synthesis and characterization of Co-doped zinc oxide nanorods prepared by ultrasonic spray pyrolysis and hydrothermal methods, International symposium on current progress in mathematics and sciences (ISCPMS): Proceedings of the 2nd International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences 2016, Jawa Barat.
- Fernandes L, Silva F, Andrade M, Alexandre R, Baptista A, Rodrigues C, 2017, Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B₄C PVD coatings, Surface and Coatings Technology, 325, 107-119.
- Fox-Rabinovich G, Paiva J, Gershman I, Aramesh M, Cavelli D, Yamamoto K, vd., 2016, Control of self-organized criticality through adaptive behavior of nano-structured thin film coatings, Entropy, 18, 8, 290-306.
- Gadelmawla E, Koura M, Maksoud T, Elewa I, Soliman H, 2002, Roughness parameters, Journal of materials processing Technology, 123, 133-145.
- Ghafouri V, Shariati M, Ebrahimzad A, 2012, Photoluminescence investigation of crystalline undoped ZnO nanostructures constructed by RF sputtering, Scientia Iranica, 19, 934-942.
- Guinier A, 1994, X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals, and amorphous bodies, Dover publications, 388p, New York.
- Güney H, 2015, The effect of different annealing conditions in undoped and Ag-doped ZnO thin films grown by SILAR method, Eastern Anatolian Journal of Science, 1, 77-81.
- Gutowski J, Michler P, Rückmann H, Breunig H, Röwe M, Sebald K, vd., 2002, Excitons in Wide-Gap Semiconductors: Coherence, Dynamics, and Lasing, physica status solidi (b), 234, 70-83.
- Hammad T M, Salem J K, Harrison R, 2013, Structure, optical properties and synthesis of Co-doped ZnO superstructures, Applied Nanoscience, 3, 133-139.
- Haugstad G, 2012, Atomic force microscopy: understanding basic modes and advanced applications, John Wiley & Sons, 473p, New Jersey.

- Heng C, Wang T, Su W, Wu H, Yang M, Deng L, vd., 2017, Intense ultraviolet photoluminescent emission from Yb doped ZnO thin films on Si after high temperature annealing, *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 2232-2237.
- Heo Y, Norton D, Pearton S, 2005, Origin of green luminescence in ZnO thin film grown by molecular-beam epitaxy, *Journal of Applied Physics*, 98, 073502.
- Hulloli S K, Shivaraj B, 2015, Synthesis and Characterization of Ag doped ZnO Thin Films, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2, 1586-1595.
- James R W, Bragg S L, Bragg W L, 1954, *The Optical Principles of the Diffraction of X-rays*, G.Bell and Sons, 642p, London.
- Jeronsia J E, Raj D V, Joseph L A, Rubini K, Das S J, 2016, In vitro antibacterial and anticancer activity of copper oxide nanostructures in human breast cancer Michigan Cancer Foundation-7 cells, *Journal of Medical Sciences*, 36, 145-151.
- Ji H, Cai C, Zhou S, Liu W, 2018, Structure, photoluminescence, and magnetic properties of Co-doped ZnO nanoparticles, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 12917-12926.
- Jović V, Maksimović V, Pavlović M G, Popov K I, 2006, Morphology, internal structure and growth mechanism of electrodeposited Ni and Co powders, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 10, 373-379.
- Juškenas R, Kanapeckaitė S, Karpavičienė V, Mockus Z, Pakštas V, Selskienė A, vd., 2012, A two-step approach for electrochemical deposition of Cu–Zn–Sn and Se precursors for CZTSe solar cells, *Solar energy materials and solar cells*, 101, 277-282.
- Juškenas R, Karpavičienė V, Pakštas V, Selskis A, Kapočius V, 2007, Electrochemical and XRD studies of Cu–Zn coatings electrodeposited in solution with D-mannitol, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 602, 237-244.
- Kang M, Zhou H, 2015, Facile synthesis and structural characterization of Co₃O₄ nanocubes, *AIMS Mater. Sci*, 2, 16-27.

- Kannan P K, Saraswathi R, Rayappan J B B, 2014, CO₂ gas sensing properties of DC reactive magnetron sputtered ZnO thin film, *Ceramics International*, 40, 13115-13122.
- Kaupp G, 2006, Atomic force microscopy, scanning nearfield optical microscopy and nanoscratching: application to rough and natural surfaces, Springer Science & Business Media, 291p, New York.
- Khalfallah B, Chaabouni F, Schmerber G, Dinia A, Abaab M, 2017, Investigation of physico-chemical properties of conductive Ga-doped ZnO thin films deposited on glass and silicon wafers by RF magnetron sputtering, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 75-85.
- Khantoul A, Sebais M, Rahal B, Boudine B, Halimi O, 2018, Structural and optical properties of ZnO and Co Doped ZnO thin films prepared by sol-gel, *Acta Phys. Polonica*, 133, 114-117.
- Kim G, Ahn B, Kim D, Jung K, Lee S Y, 2007, Characterization of Ag doped p-type ZnO films, *Zinc Oxide Materials and Devices II*, 21-24 January 2007, California.
- Klimov V I, 2003, Semiconductor and metal nanocrystals: synthesis and electronic and optical properties, CRC Press, 148p, New York.
- Korhonen H, Syväluoto A, Leskinen J T, Lappalainen R, 2018, Optically transparent and durable Al₂O₃ coatings for harsh environments by ultra short pulsed laser deposition, *Optics & Laser Technology*, 98, 373-384.
- Lanjewar M, Gohel J V, 2017, Enhanced performance of Ag-doped ZnO and pure ZnO thin films DSSCs prepared by sol-gel spin coating, *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 47, 1090-1096.
- Li Z, Gao W, 2004, ZnO thin films with DC and RF reactive sputtering, *Materials Letters*, 58, 1363-1370.
- Lin Y-J, Tsai C-L, Lu Y-M, Liu C-J, 2006, Optical and electrical properties of undoped ZnO films, *Journal of applied physics*, 99, 93501-93504.

- Liu F-C, Li J-Y, Chen T-H, Chang C-H, Lee C-T, Hsiao W-H, vd., 2017, Effect of silver dopants on the ZnO thin films prepared by a radio frequency magnetron co-sputtering system, *Materials*, 10, 797-810.
- Loan T T, Long N N, 2009, Photoluminescence properties of Co-doped ZnO nanorods synthesized by hydrothermal method, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 65412-65419.
- Lv J, Liu C, Gong W, Zi Z, Chen X, Huang K, vd., 2012, Effect of solution concentrations on crystal structure, surface topographies and photoluminescence properties of ZnO thin films, *Superlattices and Microstructures*, 51, 886-892.
- Lyo S, Jones E, 1988, Photoluminescence line shape in degenerate semiconductor quantum wells, *Physical Review B*, 38, 4113-4119.
- Ma L, Ma S, Chen H, Ai X, Huang X, 2011, Microstructures and optical properties of Cu-doped ZnO films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering, *Applied Surface Science*, 257, 10036-10041.
- Ma Z, Ren F, Ming X, Long Y, Volinsky A A, 2019, Cu-Doped ZnO Electronic Structure and Optical Properties Studied by First-Principles Calculations and Experiments, *Materials*, 12, 196-208.
- Mahmood K, Park S B, 2012, Conductivity enhancement by fluorine doping in boron-doped ZnO thin films deposited by the electrospraying method, *Journal of Crystal Growth*, 361, 30-37.
- Makino T, Segawa Y, Yoshida S, Tsukazaki A, Ohtomo A, Kawasaki M, 2004, Gallium concentration dependence of room-temperature near-band-edge luminescence in n-type ZnO: Ga, *Applied Physics Letters*, 85, 759-761.
- Marrese, M, Guarino, V, Ambrosio, L, 2017, Atomic force microscopy: a powerful tool to address scaffold design in tissue engineering, *Journal of functional biomaterials*, 8, 7-37.
- Matsubara K, Fons P, Iwata K, Yamada A, Sakurai K, Tampo H, vd., 2003, ZnO transparent conducting films deposited by pulsed laser deposition for solar cell applications, *Thin Solid Films*, 431, 369-372.

- Mickan M, Stoffel M, Rinnert H, Helmersson U, Horwat D, 2017, Restoring the Properties of Transparent Al-Doped ZnO Thin Film Electrodes Exposed to Ambient Air, *The Journal of Physical Chemistry C*, 121, 14426-14433.
- Mohammadigharehbagh R, Özen S, Yudar H H, Pat S, Korkmaz Ş, 2017, The electrical, elemental, optical, and surface properties of Si-doped ZnO thin films prepared by thermionic vacuum arc, *Materials Research Express*, 4, 96404-96412.
- Mohammadigharehbagh R, Özen S, Yudar H H, Pat S, Korkmaz Ş, 2017, Investigation of the some physical properties of Ge-doped ZnO thin films deposited by thermionic vacuum arc technique, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 14131-14137.
- Mohammadigharehbagh R, Pat S, Musaoglu C, Korkmaz Ş, Özen S, 2018, The investigation of the Cr doped ZnO thin films deposited by thermionic vacuum arc technique, *Materials Research Express*, 5, 2, 26403-26420.
- Mohammadigharehbagh R, Pat S, Özen S, Yudar H H, Korkmaz Ş, 2018, Investigation of the optical properties of the indium-doped ZnO thin films deposited by a thermionic vacuum arc, *Optik*, 157, 667-674.
- Morita S, Giessibl F J, Meyer E, Wiesendanger R, 2015, *Noncontact atomic force microscopy*, 3, Springer, 526p, New York.
- Mubarak A M A, Hamzah E H E, Tofr M T M, 2005, Review of physical vapour deposition (PVD) techniques for hard coating, *Jurnal Mekanikal*, 20, 42-51.
- Narushima T, Tsukamoto H, Yonezawa T, 2012, High temperature oxidation event of gelatin nanoskin-coated copper fine particles observed by in situ TEM, *AIP Advances*, 2, 42113-42122.
- Neumark G F, 1997, Defects in wide band gap II-VI crystals, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 21, 1-46.
- Nıda K, Investigation of Optical and Morphological Properties of Co Doped ZnO Nanomaterials, *Firat University Turkish Journal of Science & Technology*, 14, 41-48.

- Oh M-K, Shin Y-S, Lee C-L, De R, Kang H, Yu N E, vd., 2015, Morphological and SERS properties of silver nanorod array films fabricated by oblique thermal evaporation at various substrate temperatures, *Nanoscale research letters*, 10, 259-268.
- Ong H, Du G, 2004, The evolution of defect emissions in oxygen-deficient and-surplus ZnO thin films: the implication of different growth modes, *Journal of crystal growth*, 265, 471-475.
- Özgür M, Pat S, Mohammadigharehbagh R, Musaoğlu C, Demirkol U, Elmas S, vd., 2019, Sn doped ZnO thin film deposition using thermionic vacuum arc technique, *Journal of Alloys and Compounds*, 774, 1017-1023.
- Özgür Ü, Alivov Y I, Liu C, Teke A, Reshchikov M, Doğan S, vd., 2005, A comprehensive review of ZnO materials and devices, *Journal of applied physics*, 98, 41301-41404.
- Pandian L, Rajasekaran R, Govindan P, 2018, Synthesis, characterization and application of Cu doped ZnO nanocatalyst for photocatalytic ozonation of textile dye and study of its reusability, *Materials Research Express*, 5, 115505-115517.
- Pat S, Mohammadigharehbagh R, Musaoglu C, Özen S, Korkmaz Ş, 2018, Investigation of the surface, morphological and optical properties of boron-doped ZnO thin films deposited by thermionic vacuum arc technique, *Materials Research Express*, 5, 66419-66440.
- Poole Jr C P, Owens F J, 2003, *Introduction to nanotechnology*, John Wiley & Sons, 373p, New Jersey.
- Przeździecka E, Paszkowicz W, Łusakowska E, Krajewski T, Łuka G, Guziejewicz E, vd., 2009, Photoluminescence, electrical and structural properties of ZnO films, grown by ALD at low temperature, *Semiconductor Science and Technology*, 24, 105014-105023.
- Rafaja D, Köstenbauer H, Mühle U, Löffler C, Schreiber G, Kathrein M, vd., 2013, Effect of the deposition process and substrate temperature on the microstructure defects and electrical conductivity of molybdenum thin films, *Thin Solid Films*, 528, 42-48.

- Raza M A, Kanwal Z, Riaz S, Naseem S, 2016, Synthesis, characterization and antibacterial properties of nano-sized cobalt particles, World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research (ACEM'16), 28-1 September, Jeju Island.
- Razavi-Khosroshahi H, Edalati K, Wu J, Nakashima Y, Arita M, Ikoma Y, vd., 2017, High-pressure zinc oxide phase as visible-light-active photocatalyst with narrow band gap, Journal of Materials Chemistry A, 5, 20298-20303.
- Riaz A, Ashraf A, Taimoor H, Javed S, Akram M A, Islam M, vd., 2019, Photocatalytic and Photostability Behavior of Ag-and/or Al-Doped ZnO Films in Methylene Blue and Rhodamine B under UV-C Irradiation, Coatings, 9, 202-217.
- Saha S K, Rahman M A, Sarkar M, Shahjahan M, Khan M, 2015, Effect of Co doping on structural, optical, electrical and thermal properties of nanostructured ZnO thin films, Journal of Semiconductors, 36, 33004-33010.
- Sajjad M, Ullah I, Khan M, Khan J, Khan M Y, Qureshi M T, 2018, Structural and optical properties of pure and copper doped zinc oxide nanoparticles, Results in Physics, 9, 1301-1309.
- Sandeep K, Bhat S, Dharmaprakash S, 2017, Structural, optical, and LED characteristics of ZnO and Al doped ZnO thin films, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 104, 36-44.
- Sharma S, Vyas S, Periasamy C, Chakrabarti P, 2014, Structural and optical characterization of ZnO thin films for optoelectronic device applications by RF sputtering technique, Superlattices and Microstructures, 75, 378-389.
- Shashikala A, Sharma A, Bhandari D, 2007, Solar selective black nickel–cobalt coatings on aluminum alloys, Solar energy materials and solar cells, 91, 629-635.
- Silva F, Martinho R, Andrade M, Baptista A, Alexandre R, 2017, Improving the wear resistance of moulds for the injection of glass fibre–reinforced plastics using PVD coatings: A comparative study, Coatings, 7, 28-39.
- Silva F J, Casais R, Martinho R, Baptista A, 2012, Mechanical and tribological characterization of TiB₂ thin films, Journal of nanoscience and nanotechnology, 12, 9187-9194.

- Smyrnioti M, Ioannides T, 2017, Cobalt, InTech, 156p, Rijeka.
- Sreedhar A, Kwon J H, Yi J, Kim J S, Gwag J S, 2016, Enhanced photoluminescence properties of Cu-doped ZnO thin films deposited by simultaneous RF and DC magnetron sputtering, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 49, 8-14.
- Srikant V, Clarke D R, 1998, On the optical band gap of zinc oxide, *Journal of Applied Physics*, 83, 5447-5451.
- Stenzel O, 2005, *The Physics of Thin Film Optical Spectra*, Springer, 352p, New York.
- Suresh S, Karthikeyan S, Jayamoorthy K, 2016, FTIR and multivariate analysis to study the effect of bulk and nano copper oxide on peanut plant leaves, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1, 343-350.
- Sutanto H, Wibowo S, Nurhasanah I, Hidayanto E, AIP Conference Proceedings, 2016, Optical and microstructure of thin film of Ag-doped ZnO synthesized by sol-gel, 1755, 150001-150004.
- Sutanto H, Wibowo S, Nurhasanah I, Hidayanto E, Hadiyanto H, 2016, Ag doped ZnO thin films synthesized by spray coating technique for methylene blue photodegradation under UV irradiation, *International Journal of Chemical Engineering*, Article ID 6195326.
- Swapna P, Reddy S V, 2018, Synthesis Structural and Optical Properties Of (Co, Al) co-doped ZnO Nano Particles, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 17-19 August, Tamil Nadu.
- Thaweesaeng N, Supankit S, Techidheera W, Pecharapa W, 2013, Structure properties of as-synthesized Cu-doped ZnO nanopowder synthesized by co-precipitation method, *Energy Procedia*, 34, 682-688.
- Thirumoorthi M, Thomas Joseph Prakash J, 2016, Structure, optical and electrical properties of indium tin oxide ultra thin films prepared by jet nebulizer spray pyrolysis technique, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4, 124-132.
- Vasireddi R, Javvaji B, Vardhan H, Mahapatra D, Hegde G, 2017, Growth of zinc oxide nanorod structures: pressure controlled hydrothermal process and growth mechanism, *Journal of materials science*, 52, 2007-2020.

- Wang D, 2012, Fabrication and Characterization of ZnO Related Materials Thin Films for Optical Device Application, Kochi University of Technology, Graduate School of Engineering, Doktora Tezi, 125p, Kochi.
- Wang X, Li D, Zeng F, Pan F, 2005, Microstructure and properties of Cu-doped ZnO films prepared by dc reactive magnetron sputtering, Journal of Physics D: Applied Physics, 38, 4104-4108.
- Xu L, Li X, Chen Y, Xu F, 2011, Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method with different thickness, Applied Surface Science, 257, 4031-4037.
- Xu L, Miao J, Chen Y, Su J, Yang M, Zhang L, vd., 2018, Characterization of Ag-doped ZnO thin film for its potential applications in optoelectronic devices, Optik, 170, 484-491.
- Yang J, Liu H, Martens W N, Frost R L, 2009, Synthesis and characterization of cobalt hydroxide, cobalt oxyhydroxide, and cobalt oxide nanodiscs, The Journal of Physical Chemistry C, 114, 111-119.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sercan Sadık ERDEM
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir, 02.05.1981
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0505 903 2642 / erdem.sercans@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Süleyman Çakır Lisesi, (1998)
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Edebiyat
Fakültesi, Fizik Bölümü, (2000-2005)

Çalıştığı Kuruluş ve Yıl

- : Proje Mühendisi, Sistem Entegrasyon Grubu, SAVRONİK Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2007-2008)
- : Proje Yöneticisi, Savunma Sistem Programları, SAVRONİK Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2009-2011)
- : Grup Lideri, Ürün Projeleri Yönetimi, SAVRONİK Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2012-2014)
- : Program Yöneticisi, Güç ve Kontrol Sistemleri Programı, SAVRONİK Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2015-2017)
- : Direktör, İleri Mühimmat ve Malzeme Teknolojileri, SAVRONİK Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2018-devam ediyor)

Diğer konular

International Detonation Symposium, Cambridge/Maryland/Amerika Birleşik Devletleri, 15-20 Temmuz 2018

ESOGÜ IEEE Öğrenci Topluluğu, 2 Günde Şirket-i Alem Konferans Etkinliği, Proje Yönetimi Sunumu, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 09-11 Mart 2018

International Symposium on Energetic Materials and Their Applications, Sendai/JAPONYA 6-10 Kasım 2017

PMI-TR Proje Yönetim Zirvesi, Katılımcı, ODTÜ Kültür Kongre Merkezi, ANKARA, 23 - 24 Mayıs 2017

IDEF'17, 13'üncü Uluslararası Savunma Sanayii Fuarı, Görevli, İstanbul, 09-12 Mayıs 2017

Ar-Ge İşbirlikleri Zirvesi, Kalkınma Bakanlığı, Ar-Ge Yönetimi Toplantıları (Chief Research Officer-CRO), Konuşmacı, İstanbul, 03-05 Mayıs 2017

ESOGÜ IEEE Öğrenci Topluluğu, 2 Günde Şirket-i Alem Konferans Etkinliği, Proje Yönetimi Sunumu, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 11-12 Mart 2017

“Project Management with PMI Standarts and PMP Certification Exam Preparation Training Programme”, Eğitim/Sertifikasyon, 09-18 Aralık 2016

ASELSAN SST Tasarım Çözüm Ortakları, Proje Yönetim Çalıştayı, Güç Sistemleri Sunumu, Ankara, 01 Mart 2016

Organizasyonlarda Sistem Dinamikleri Düşüncesi ve Stratejik Analiz Semineri, Savunma Sanayi ve Teknoloji Eğitim Merkezi Komutanlığı (SATEM Komutanlığı), ANKARA, 22 Mayıs 2015

Aviyonik Elektrik Güç Sistemleri Ve Sertifikaşyon Yaklaşımı Bildirisi, V. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı, Anadolu Üniversitesi, 22-23 Mayıs 2009

“Proje Yönetimi”, Savunma Sanayi ve Teknoloji Eğitim Merkezi Komutanlığı (SATEM Komutanlığı), ANKARA, 13-14 Nisan 2009

“JCI Akreditasyon Standartları Eğitimi”, İl Sağlık Müdürlüğü Eskişehir, 05-07 Mart 2007

“TS-EN-ISO 9001:2000 Kalite Yönetim Sistemi İç Tetkikçi Eğitimi”, 4-5 Mart 2006, ESTER Eskişehir

“TS-EN-ISO 9001:2000 Kalite Yönetim Sistemleri Temel Eğitimi”, 1-3 Mart 2006, ESTER Eskişehir

“Değişim, Verimlilik ve Rekabet Üstünlüğü”, 4-5 Haziran 2004, Kalite Şöleni, Eskişehir

“Proseslerin Yönetimi, Etkileşimi ve İyileştirme Teknikleri”, EOQ (Avrupa Kalite Teşkilatı), 24-25 Aralık 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

“TS-EN-ISO 9000:2000 Kalite Yönetim Sistemi Temel Eğitimi”, 17-19 Aralık 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara