ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Saliha Elmas

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran 2013

Investigation of Some Physical Properties of ITO, IZO and AZO Thin Films

Saliha Elmas

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

June-2013

ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Saliha Elmas

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şadan Korkmaz

Haziran-2013

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Saliha Elmas' ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman **:** Yrd. Doç. Dr. Şadan Korkmaz

İkinci Danışman **: __**

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şadan Korkmaz

Üye : Prof. Dr. Naci Ekem

Üye : Doç. Dr. A. Şenol Aybek

Üye : Doç. Dr. Suat Pat

Üye : Doç. Dr. Metin Kul

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yapısında iki element bulunan çeşitli saydam iletken oksit (SİO) ince filmler: SnO_2, In_2O_3, ZnO, safsızlık katkılanmış In_2O_3 (In_2O_3:SnO_2, veya ITO) ve safsızlık katkılanmış ZnO (ZnO:Al ve ZnO:In) optoelektronik aletlerde, güneş enerji sisteminde geçiş elementi, OLED' lerde, LCD ekranlarda geçiş elektrodu gibi pratikte kullanılan malzemelerdir. Bu tez çalışmasında n-tipi saydam iletken grubuna ait olan indiyum kalay oksit (ITO), indiyum çinko oksit (IZO) ve alüminyum çinko oksit (AZO) ince filmler Termiyonik Vakum Ark (TVA) yöntemi ve RF magnetron sıçratma yöntemi kullanılarak farklı kalınlıklarda cam, polyethylene terephthalate (PET) ve silisyum (Si) alttaşlar üzerine büyütüldü. Film kalınlığının, alttaş farklılığının ve üretim tekniğinin (TVA ve RF) elektriksel, optiksel ve yüzeysel özellikleri ve filmlerin kristallenmesi üzerine etkisi araştırıldı. Üretilen filmlerinin spektroskopik elipsometre ve interferometrik ölçümleri ile kalınlıkları ve bazı optik parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan alttaş farklılığının, kullanılan yöntemin ve filmin kalınlığının özellikle optik ve özdirenç olmak üzere filmin özelliklerini büyük oranda etkilediği belirlenmiştir. Elde edilen bütün ITO, IZO ve AZO ince filmleri amorf yapıya sahiptir. ITO ince filmleri için film kalınlığındaki artışın band aralığının artışına neden olduğu gözlendi. Elektriksel ölçümler dört uç yöntemi kullanılarak yapıldı. Oda sıcaklığında ölçülen elektriksel ölçümler sonucunda özdirenç değerlerinin ve tabaka dirençlerinin 10^{-5} Ω-cm ve 10^{-5} Ω/□ mertebelerinde olduğu hesaplandı. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ince filmlerin iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey topografileri ve yüzey pürüzlülükleri incelendi. Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile ince filmlerin yüzey özellikleri incelendi. Enerji dağılımlı X-ışınları spektrometresi (EDS) ile ince filmlerin elemental analizleri yapıldı.

Anahtar Kelimeler: ITO; IZO; AZO İnce Filmleri; TVA; RF Magnetron Sıçratma Tekniği; Optik Özellikler; Elektriksel Özellikler; Yüzey Özellikleri.

SUMMARY

Two elements of the structure of the various transparent conducting oxide (TCO) thin films: SnO_2, In_2O_3, ZnO, impurity doped In_2O_3 (In_2O_3: SnO_2, or ITO) and impurity doped ZnO (ZnO: Al and ZnO: In) are used materials in practice such as in the optoelectronic devices, transition element in the solar energy system, transition electrode in the OLED, LCD screens. In this thesis study, indium tin oxide (ITO), indium zinc oxide (IZO), and aluminum zinc oxide (AZO) thin films which belong to the group of n-type transparent conducting were growth with different thicknesses on glass, polyethylene terephthalate (PET) and silicon (Si) substrates by using Thermionic Vacuum Arc (TVA) method and RF magnetron sputtering method. The effects of the film thickness, substrate diversity and production technique (TVA and RF) on the electrical, optical, surface properties and crystallization of the film were studied. Thicknesses and some of the optical parameters of produced films were determined by spectroscopic ellipsometer and interferometric measurements. Differences of substrate, the use of methods and the film thickness greatly affect especially resistivity and optical properties of the film were determined from the results. All the produced ITO, IZO and AZO thin films have amorphous structure. While increase in film thickness was observed to cause an increase in the range of band gap for ITO thin films. Electrical measurements were done by using the four probe method. In the results of electrical measurements, resistivity and the sheet resistance values of 10^{-5} Ω-cm and 10^{-5} Ω/□ were calculated at room temperature. Two-dimensional and three-dimensional surface topographies and surface roughness of thin films were investigated by Atomic Force Microscopy (AFM). Surface properties of the thin films were examined by Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS) elemental analysis was performed.

Keywords: ITO; IZO; AZO Thin Films; TVA; RF Magnetron Sputtering Technique; optical properties; electrical properties; surface properties.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamım gerçekleşmesi süresince beni yönlendiren, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şadan KORKMAZ' a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında bilgi birikimi ve bilimsel deneyimleri ile yardım ve desteklerini esirgemeyerek değerli vakitlerini ayıran değerli hocam Sayın Prof. Dr. Naci EKEM, Sayın Doç. Dr. Suat PAT, Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Zafer BALBAĞ, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZKAN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK' e teşekkürlerimi sunarım.

Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği laboratuarında FESEM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Sayın Doç. Dr. A. Şenol AYBEK ve Sayın Arş. Gör. Turan TAŞKÖPRÜ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında her zaman bana yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım, Sinan TEMEL, N. Emre ÇETİN, Murat ÖZMUMCU, Murat NEBİ ve Tuna AYDOĞMUŞ' a çok teşekkür ederim. Tez çalışmam esnasında bana her türlü manevi destekte bulunan can dostum Elvan SAYIN' a teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi çalışmam boyunca beni yalnız bırakmayan, maddi manevi her konuda destekleyen ve bu zamana kadar gösterdikleri sabırdan dolayı sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Spektroskopik Elipsometre ölçüm çalışmalarını TÜBİTAK 108M608 numaralı proje kapsamında temin edilen TT90 Spektroskopik Elipsometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Saliha ELMAS

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **v**
SUMMARY ..... **vi**
TEŞEKKÜR ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xv**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xvi**

1. YARIİLETKENLER **1**
1.1 Giriş 1
1.2 Yarıiletken Materyaller 4
1.3 Has Yarıiletkenler 6
1.4 Katkılı Yarıiletkenler 10

2. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ **18**
2.1 İnce Film Elde Etme Metotları 18
2.2 Yarıiletken İnce Filmler 19
2.3 Saydam İletken Oksit Filmler ve Uygulama Alanları 21
2.4 ITO İnce Filmler ve Kullanım Alanları 25
2.5 IZO İnce Filmler ve Kullanım Alanları 30
2.6 AZO İnce Filmler ve Kullanım Alanları 35

3. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) TEKNİĞİ **38**
3.1 TVA Sistemi 39
3.2 TVA Deşarj 44
3.3 TVA Tekniği ile Üretilen İnce Filmlerin Özellikleri 46

4. SIÇRATMA TEKNİĞİ **49**
4.1 Radyo Frekansı (RF) ve Doğru Akım (DC) Sıçratma Tekniği 51

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.2 Radyo Frekansı (RF) ve Doğru Akım (DC) Magnetron Sıçratma Tekniği 53

5. YARIİLETKEN MALZEME ANALİZİ 56

5.1 Yapısal Özellikler 56

5.2 Optik Özellikler 60

5.2.1 Temel absorpsiyon olayı 61

5.2.1.1 Direkt band geçişi 62

5.2.1.2 İndirekt band geçişi 65

5.3 Spektroskopik Elipsometre Tekniği 69

5.4 İnterferometrik Ölçüm 74

5.5 Yüzey Özellikleri 75

5.6 Elektriksel Özellikler 80

5.6.1 Yarıiletken malzemelerde özdirenç ölçümü 81

5.6.2 Prob yöntemleri ile özdirenç ölçülmesi 82

5.6.2.1 Dört uç tekniği 82

5.6.2.2 Sıcak uç tekniği 83

6. TVA TEKNİĞİ İLE ITO İNCE FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ 85

6.1 Giriş 85

6.2 Alttaş Olarak Kullanılan Malzemeler 86

6.3 ITO İnce Filmlerinin Üretimi ve Üretim Parametreleri 87

7. RF MAGNETRON SIÇRATMA TEKNİĞİ İLE ITO, IZO ve AZO İNCE FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ 90

7.1 Giriş 90

7.2 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Üretimi ve Üretim Parametreleri 90

8. ITO, IZO ve AZO İNCE FİLMLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ 92

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8.1 Giriş 92
8.2 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Kalınlıkları 93
8.2.1 TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin interferometrik metot ve spektroskopik elipsometre ile kalınlık ölçümlerinin belirlenmesi 94
8.3 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Yapısal Özellikleri 98
8.3.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin XRD analizleri 98
8.3.2 RF magnetron Sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin XRD analizleri 101
8.4 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Optik Özellikleri 103
8.4.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin optik özelliklerinin belirlenmesi 104
8.4.2 RF magnetron Sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin optik özelliklerinin belirlenmesi 116
8.5 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Yüzeysel Özellikleri 126
8.5.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi 127
8.5.1.1 FESEM ve EDS analizleri 128
8.5.1.2 AFM analizleri 132
8.5.2 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi 137
8.5.2.1 FESEM ve EDS analizleri 138
8.5.2.2 AFM analizleri 142
8.6 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Elektriksel Özellikleri 147
8.6.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi 148

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8.6.2 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi 150

9. TARTIŞMA VE SONUÇ 152

9.1 Sonuçlar 152

9.2 Tartışma ve Öneriler 160

10. KAYNAKLAR DİZİNİ 162

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

1.1 a) iletken, b) yarıiletken, c) yalıtkan için enerji band diyagramları. 2

1.2 Bir yarıiletkenin a) T=0 K ’ de, b) T>0 K’ de şematik enerji-band diyagramı. 5

1.3 a) T=0 K sıcaklığında has yarıiletkenlerin enerji band yapısı, b) T>0 K’den yüksek sıcaklıklarda has yarıiletkenlerin enerji band yapısı 7

1.4 Has yarıiletkenler için termal dengede enerji-band diyagramı 8

1.5 a) Has yarıiletkende Fermi seviyesinin sıcaklıkla değişimi, b) yarıiletkenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi 9

1.6 Silisyumdaki a) donör ve b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü. . 11

1.7 a) Donör ve b) akseptör tipli yarıiletkenlerin enerji band diyagramları. 11

1.8 a) n-tipi yarıiletken ve b) p-tipi yarıiletken 12

1.9 Donör yarıiletkende a) Fermi seviyesinin ve b) elektron konsantrasyonunun sıcaklıkla değişimi. 15

1.10 Donör ve akseptör konsantrasyonlarının fonksiyonu olarak Fermi seviyesi. 17

2.1 SnO_2 ve In_2O_3 kristal yapıları. 26

2.2 Hegzagonal wurtzite kristal yapısındaki ZnO. 30

2.3 ZnO filmler. Soldan sağa doğru c-ekseni alttaşa dik, c-ekseni alttaşa paralel ve granüler yapı. 31

2.4 Si alttaş üzerine üretilen IZO tabanlı TFT a) şematik diyagramı, b) yapısı ve c) PET alttaş üzerine büyütülen saydam ince film transistörü (TFT) 34

3.1 TVA sisteminin şematik çizimi 39

3.2 TVA sisteminin fotoğrafı 40

3.3 Doğrudan ısıtmalı katodun şematik gösterimi. 41

3.4 Doğrudan ısıtmalı katodun (elektron tabancası) fotoğrafı. 41

3.5 Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç kaynağı panosu. 42

3.6 Ampermetre ve voltmetre sistemleri a) Anot katot arası iyon akımı ve ateşleme potansiyeli ölçümü için ampermetre ve voltmetre, b) Flaman akımını kontrol etmek için kullanılan askı ampermetre. 43

3.7 TVA’ da gaz haline geçen materyalin elektron bombardımanın devam etmesiyle plazma haline geçmesi 45

4.1 Sıçratma olayının gelişimi 49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

4.2 RF magnetron sıçratma sisteminde film oluşumu 54

4.3 Magnetron sıçratma prensibi 55

5.1 a)Bir kristal düzleminde X-ışını kırınımının meydana gelişi ve b) kırınım olayında X-ışınlarının aldığı yolların uzunlukları arasındaki farkların ayrıntılı bir şekilde gösterimi..... 59

5.2 Bir yarıiletkende direkt band geçişinin şematik gösterimi 63

5.3 Bir yarıiletkende indirekt band geçişinin şematik gösterimi 65

5.4 UNICO UV-Vis 4802 spektrofotometresi. 69

5.5 Sınır yüzeyinden yansıyan polarize ışın. 72

5.6 İnterferometre cihazın (F20 cihazı) basit gösterimi..... 74

5.7 AFM çalışma prensibi..... 77

5.8 Taramalı Elektron Mikroskobunun şematik diyagramı. 78

5.9 Dört Prob yöntemi için şematik gösterim ve dört prob test sistemi..... 83

5.10 Sıcak uç tekniği..... 84

8.1 ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin deneysel ve teorik Ψ spektrumları. 95

8.2 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin deneysel ve teorik Ψ spektrumları..... 96

8.3 TVA tekniği ile farklı alttaşlar üzerine üretilen ITO ince filmlerinin XRD analizleri..... 99

8.4 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam ince filminin XRD analizi..... 101

8.5 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen IZO/cam ince filminin XRD analizi..... 102

8.6 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin XRD analizi..... 102

8.7 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları. .. 104

8.8 TVA tekniği ile üretilen ITO/PET ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları.. 105

8.9 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ince filmlerinin soğurma spektrumları..... 107

8.10 TVA tekniği ile üretilen ITO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları. 107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

8.11 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin a) ve b) Filmetrics F20 ile ölçülen yansıma ve kırılma indisi spektrumları, c) SE ile ölçülen kırılma indisi spektrumları. ……109

8.12 TVA tekniği ile üretilen ITO/Si ince filmlerinin yansıma spektrumları. 110

8.13 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri. 115

8.14 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları. 117

8.15 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları. 119

8.16 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen a)ITO/cam, b)IZO/cam, c) AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin Filmetrics F20 ile ölçülen yansıma ve kırılma indisi spektrumları,d) ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin SE ile ölçülen kırılma indisi spektrumları. 120

8.17 RF magnetron tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve 125

8.18 Yüzey analizinde kullanılan mikroskop çeşitleri. 127

8.19 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin FESEM görüntüleri. 129

8.20 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin üç boyutlu AFM görüntüleri. 133

8.21 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin iki boyutlu AFM görüntüleri. 135

8.22 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin FESEM görüntüleri. 139

8.23 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin üç boyutlu AFM görüntüleri. 143

8.24 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin iki boyutlu AFM görüntüleri. 145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1 Yaygın olarak kullanılan n-tipi polikristal SİO filmlerin band aralıkları ve özdirenç değerleri 23

7.1 Deneysel parametreler. 91

8.1 ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin kalınlıkları (d) ve ITO/cam ve ITO/PET için modelleme parametreleri..... 97

8.2 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin kalınlıkları (d) ve ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET modelleme parametreleri 98

8.3 ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin kırılma indisi ve porozite değerleri... 113

8.4 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin yasak enerji aralıkları..... 116

8.5 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin kırılma indisi ve porozite değerleri. 124

8.6 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin yasak enerji aralıkları..... 125

8.7 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin EDS sonuçları. 131

8.8 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin R_q ve R_a pürüzlülük değerleri. 136

8.9 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin EDS sonuçları..... 141

8.10 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin R_q ve R_a pürüzlülük değerleri. 146

8.11 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerine ait elektriksel özdirenç değerleri ve iletkenlik tipleri. 149

8.12 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerine ait elektriksel özdirenç değerleri ve iletkenlik tipleri. 150

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
A	Soğurma
Å	Angström
An, Bn, Cn	Cauchy parametreleri
° C	Santigrad derece
K	Kelvin derece
d	Kalınlık, elektrotlar arası mesafe
E_c	İletim bandı
E_a	Akseptör enerji seviyesi veya aktivasyon Enerjisi
E_d	Donör enerji seviyesi
E_F	Fermi Enerji Seviyesi
E_{Fi}	Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_v	Valans bandı
eV	Elektron volt
g	Akseptör veya Donör seviyelerinin yozlaşma katsayısı
h	Planck sabiti
k	Boltzman sabiti
m_n	Elektronun kütlesi
m_n*	Elektronun etkin kütlesi
m_p	Hol kütlesi
m_p*	Holün etkin kütlesi
n	Kırılma indisi
N_A	Akseptör konsantrasyonu
N_a^-	İyonize olmuş akseptör konsantrasyonu
N_D	Donör konsantrasyonu
N_d^-	İyonize olmuş donör konsantrasyonu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
n_n	n- tipi elektron taşıyıcı yoğunluğu
n_p	p- tipi elektron taşıyıcı yoğunluğu
p_n	n- tipi hol taşıyıcı yoğunluğu
p_p	p- tipi hol taşıyıcı yoğunluğu
N_c	İletim bandındaki elektronların konsantrasyonu
N_v	Valans bandındaki hollerin konsantrasyonu
T	Geçirgenlik yüzdesi
R	Yansıma
ρ	özdirenç
α	Lineer soğurma katsayısı
θ	Bragg açısı
2θ	Kırınım açısı
λ	Dalgaboyu
Ψ	Psi
ϕ	Elektron tabancasının açısı
mm	Milimetre
nm	Nanometre
μA	Mikroamper
μm	Mikrometre
I_f	Filament Akımı
Wt %	Yüzde Ağırlık

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

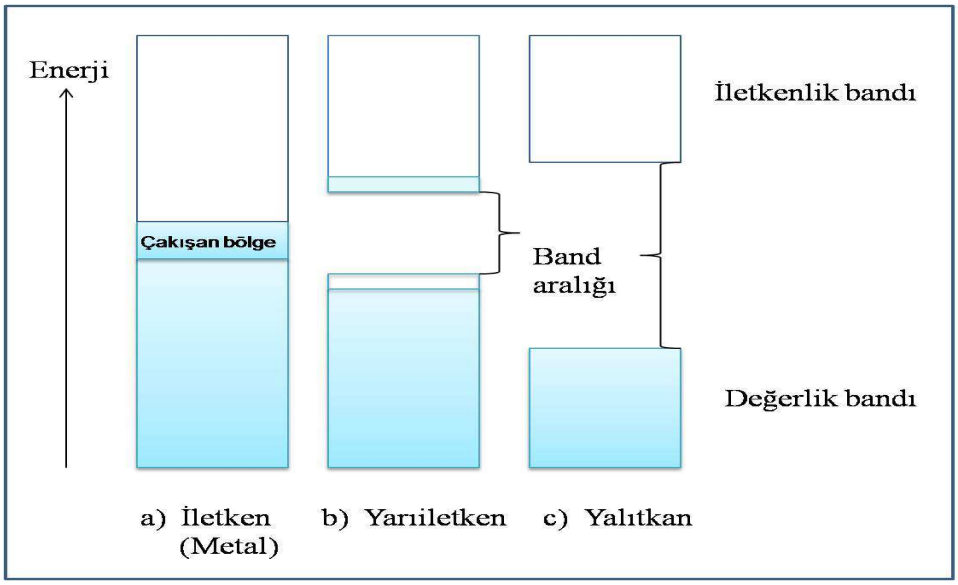
Kısaltmalar	Açıklama
AC	Alternatif akım
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
ASTM	American Society for Testing Materials
AZO	Alüminyum çinko oksit
CVD	Kimyasal buhar depolama
DC	Doğru akım
EDS	Enerji dispersiv spektrometre
et al.	Ve diğerleri
FESEM	Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu
HV	Yüksek Voltaj
INFLPR	Natioanal Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics
ITO	İndiyum kalay oksit
IZO	İndiyum çinko oksit
LCD	Liquid-Crystal Display
MBE	Moleküler beam epitaxy
MSE	Mean Square Error
OLED	Organic Light Emitting Diode
PET	Polietilen tereftalat
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
RF	Radyo Frekansı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiO	Saydam iletken oksit
TFT	Thin Film Transistor
TVA	Termiyonik Vakum Ark
Uv-Vis	Ultraviyole - Visible
vd.	Ve diğerleri
XRD	X-Ray Diffraction

1. YARIİLETKENLER

1.1 Giriş

Gündelik hayatta kullandığımız materyallerin çoğu katı yapıdadır. Bir katı; sıkı sıkıya paketlenmiş olan atomlar, iyonlar veya moleküllerden oluşur. Bu nedenle doğada bulunan katıları, atomlarının dizilişlerine ve elektriksel özelliklerine göre sınıflandırmak mümkündür. İlk olarak, katıları atom dizilişlerine göre amorf yapı ve kristal yapı olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Belirli bir düzene sahip olmayan bazı katıların atomları rastgele dizilmiştir. Bunlara amorf katılar denir ve oluşturdukları yapıya da amorf yapı adı verilir. Diğer taraftan, bazı katılar ise, katıyı oluşturan atom, atom grupları ve moleküllerin, o katıya özgü düzenli bir şekilde istiflenmesiyle oluşurlar. Bu katılara da kristal denir ve oluşturdukları yapıya da kristal yapı adı verilir. Bir kristal kararlı bir ortamda büyümeye başladığında meydana gelen yapı birbirine özdeş yapıtaşlarının art arda eklenmesi ile oluşur. Bu yapıtaşları tek atomlar veya atom grupları olabilir. O halde kristal, atom gruplarından oluşan üç boyutlu bir örgüdür. Tüm kristallerin yapısı bir örgü ile tanımlanabilir. Örgü, uzayda periyodik olarak sıralanmış noktalar dizisidir. Kristal yapı statik durumdan oldukça uzaktır ve mükemmel yapıya sahip katılar nadiren bulunur (Kittel, 1996).

İkinci olarakta, katıları elektriksel ve optik özelliklerine göre sınıflandırmak mümkündür. Elektronların her madde içerisindeki hareketi aynı olmadığı için maddeleri elektronların hareketine göre sınıflandırabiliriz. Bilindiği üzere maddeler iletkenliklerine göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üçe ayrılırlar (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 a) iletken, b) yarıiletken, c) yalıtkan için enerji band diyagramları.

Elektrik iletimi elektron hareketi ile olmaktadır. Metallerin, elektrik iletimleri çok iyi olduğu için iletken sınıfına girerler. Metallere metal özelliklerini veren, metal kristalini oluşturan atomları birbirine bağlayan metalik bağdır. Metallerin değerlik elektronlarının az olması ya da boş yörüngelerinin çok olması, birbiriyle etkileşime giren atom sayısının çok olmasına imkan verir. Böylece her bir atomun değerlik elektronu komşu atomların çevresinde boş yörüngeler bulur ve oralarda dolaşarak bu atomları birbirine bağlar. Bu bağa metalik bağ denmektedir. Metalik bağa göre metal atomları birbiriyle etkileştiğinde aynı sayıda düşük enerjili bağlayıcı moleküler yörüngeler (değerlik bandı) ve yüksek enerjili anti bağlayıcı moleküler yörüngeler (iletkenlik bandı) oluşur. Elektronlar her ne kadar düşük enerjili yörüngeye girmeyi tercih etseler de yan yana gelebilen atomlar çok sayıda olacağı için söz konusu bandlar birbirine girer ve kesiksiz, sürekli bir band ortaya çıkar (Şekil 1.1a). Böyle bir band enerji bakımından süreklilik göstereceği için, atomlardaki herhangi bir değerlik elektronunun çok düşük sıcaklıklarda bile bir enerji düzeyinden öbürüne rahatlıkla geçebileceği aşikârdır. Değerlik bandı ile iletkenlik bandının üst üste binmesiyle oluşan katı maddeler iletkenler olarak adlandırılırlar ve tüm metaller bu gruba girerler. İletkenlerde değerlik bandı ile iletkenlik bandı iç içe geçmiş durumda olduğundan

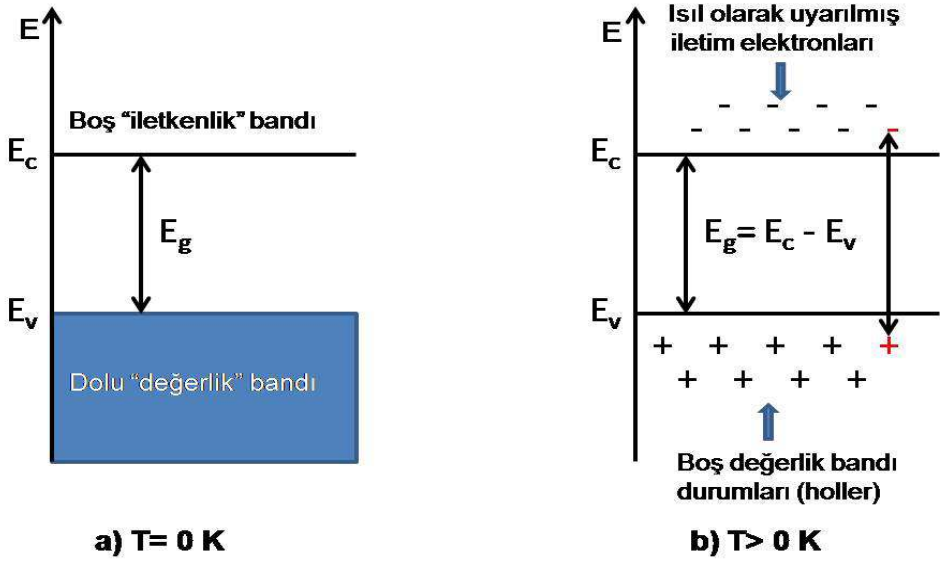
dolayı bir band aralığı (band gap, E_g) bulunmamaktadır (Sze, 2002). İletkenlerde, atomların dış yörüngesindeki elektronlar atoma zayıf olarak bağlıdır. Isı, ışık ve elektriksel etki altında kolaylıkla atomdan ayrılırlar. Metallerdeki değerlik elektronları bandın boş bölgelerinde rahatça dolaşabildikleri için elektrik iletkenliğini çok iyi sağlayabilmektedirler ve elektrik iletkenlikleri oldukça yüksek olup 10^{-6}–10^{-4} $(\Omega\text{-cm})^{-1}$ aralığındadır. Bir metalin bir ucundan elektronlar gönderildiğinde, giriş noktasındaki elektronların bir kısmı yeni gelen elektronlarla yer değiştirir. Yer değiştiren elektronlar komşu elektronları ileriye iterek yeni konumlar alır ve bu etki metal boyunca iletilerek elektronlar diğer uçtan dışarı atılıncaya kadar devam eder. Böylece akım iletilmiş olur. Ancak metallerin iletkenliği sıcaklıkla azalır. Çünkü artan sıcaklıkla kristalin örgü noktalarında daha büyük genliklerle titreşen iyonlar, aralarından geçmeye çalışan elektronların hareketini engeller. İletkenlerde, Fermi enerji düzeyi çakışan bandların üzerindedir ve de enerji durumları elektronlarla doludur. Bundan dolayı, iletkenlerde, enerji bandlarından çok; Fermi enerji düzeyi önemlidir. Metallerin aksine ametaller yalıtkandır (Şekil 1.1c). İletken maddelerde çakışan bandlar yalıtkan maddelerde çakışmaz. Yalıtkan özellik gösteren malzemelerde enerji düzeyleri elektronlarla hemen hemen dolu durumdadır ve elektronlar atomlarına sıkı olarak bağlıdır. Dolayısıyla, elektronların değerlik bandı içinde serbestçe hareket edebilme imkanı olmadığı gibi, bir üst düzeydeki band ile bir örtüşme de olamayacağından, iletkenlik bandına geçemezler (Şişman, 2006). Kısaca yalıtkanlarda, değerlik bandı ile iletkenlik bandı birbirinden bir band aralığı (band gap, E_g) ile ayrılmış durumdadır ve geniş band aralığı ile karakterize edilirler (eV). Yalıtkanlarda, valans elektronlarının komşu atomlarla yaptığı güçlü bağları kırmak çok zordur ve sonuç olarak oda sıcaklığında ya da oda sıcaklığı civarındaki sıcaklıklarda, akım iletkenliğine katılacak serbest elektronlar yoktur. Çünkü yalıtkanlarda değerlik bandındaki tüm enerji seviyeleri elektronlar tarafından doldurulmuştur ve iletkenlik bandındaki tüm enerji seviyeleri boştur. Bu nedenle elektron hareketi mümkün değildir. Termal enerji ya da uygulanan elektrik alan (elektrik alan şiddetinin elektron yapısını bozacak kadar büyük olmadığı varsayılır) (Kittel, 1996) nedeniyle kazanılan enerji, valans bandının en tepesinde bulunan elektronları iletkenlik bandına göndermek için yeterli değildir. Böylece, çok az sayıdaki elektron iletkenlik bandı seviyelerini işgal eder (Kittel, 1996). Elektrik akımını iletmeyen yalıtkanların iletkenlikleri çok düşüktür ve 10^{-18}–10^{-8} $(\Omega\text{-cm})^{-1}$ aralığındadır.

Yarıiletkenler iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar. Değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki band aralığı ne metallerde görüldüğü kadar dar ne de yalıtkanlarda olduğu kadar geniştir (Şekil 1.1b). Ancak, bu enerji aralığı elektronların ısı enerjisi alarak geçebilecekleri kadardır.

1.2 Yarıiletken Materyaller

Yarıiletkenlerde valans bandı tamamen, iletkenlik bandı ise kısmen doludur ve band aralığı $E_g < 4$ eV ile karakterize edilir. Kristal örgünün periyodikliği nedeniyle yarıiletkenlerde band aralığı yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. Yarıiletkenlerin çoğu 0 K' de yalıtkan gibi davranır ve bu sıcaklıkta yarıiletkenin bütün elektronları değerlik bandında bulunduğu için iletim gözlenmez (Şekil 1.2a). Sıcaklık T=0 K'den itibaren yükseltilirse 300 K' de (oda sıcaklığında), en az yasak enerji aralığı kadar ısıl enerji kazanan elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçerler (Şekil 1.2b). İletkenlik bandına geçen elektronlar valans bandında hol adı verilen boşluklar bırakırlar. Holler valans bandında boş kuantum durumları meydana getirirler. Bu boş kuantum durumları valans bandındaki başka elektronlar tarafından doldurulurlar ve bu elektronlar geldikleri yerlerde yeni holler oluştururlar. Holler ile elektronlar yer değiştirmiş olurlar. Böylece valans bandında holler hareket etmiş olurlar. Bu durum devam ettikçe valans bandındaki holler ile iletkenlik bandındaki elektronlar serbest taşıyıcı gibi hareket ederek iletime katkıda bulunurlar. Yani elektriksel iletkenliğe hem elektronlar hem de holler katkıda bulunmuş olurlar. Dolayısıyla metallerin aksine yarıiletkenlerin iletkenliği sıcaklıkla artar. Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır (Ulu, 2007). Yarıiletkenlerin özdirençleri (oda sıcaklığında), 10^{-2} ile 10^{9} Ω-cm arasındadır. Band aralığı yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türü ile belirlenir. Farklı yarıiletkenlerin band aralığı 0,1 eV' dan 5 eV' a kadar değişebilir (Caferov, 1998). Yarıiletkenlerin yasak band genişliği sıcaklık arttıkça değişir. Bu olayın nedenleri kristaldeki atomların ısısal titreşim genliğinin ve atomlar arası uzaklığın sıcaklıkla

değişmesine bağlıdır. Yarıiletkenlerin çoğunda sıcaklık arttıkça yasak band genişliği küçülmektedir.



Şekil 1.2 Bir yarıiletkenin a) T=0 K ' de, b) T>0 K' de şematik enerji-band diyagramı.

Yarıiletkenler element ya da bileşik halinde bulunabilirler. Yarıiletkenler, çok farklı fiziksel özellikler sergilerler ve çeşitli teknolojik uygulama alanlarına sahip malzemelerdir (Kittel, 1996).

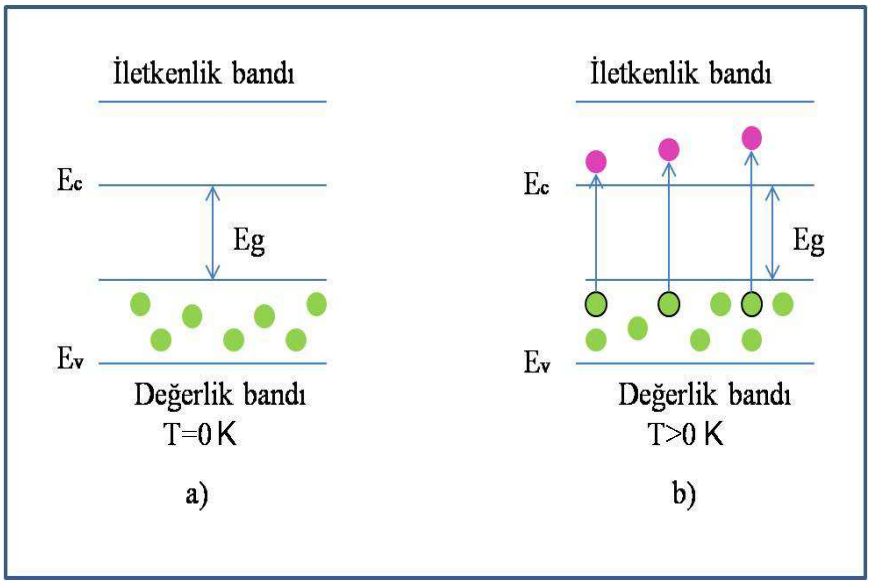
İki veya daha çok elementten meydana gelen yarıiletkenler bileşik yarıiletkenler olarak adlandılır. Periyodik tablonun IIIA-VA ve IIA-VIA gruplarında bulunan elementlerin özel kombinasyonlarından da bileşik yarıiletkenler olarak adlandırdığımız üçlü, dörtlü ve son zamanlarda da beşli bileşiklerinden oluşan yapay yarıiletkenler elde edilmektedir. Bu bileşiklerin bağlanma çeşitleri iyonik ve kovalent olup hem kübik hem de hekzagonal yapıda kristallenirler (Muller, 1993). İndiyum fosfat (InP) ve galyum arsenik (GaAs) gibi ikili, InGaAs gibi üçlü ve InGaAlAs gibi dörtlü alaşımlar da elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde temel elemanlardır (Omar, 1975; Durlu, 1996).

Yarıiletkenler uygun katkı atomları ile katkılandıkları zaman, elektriksel özelliklerinde büyük ölçüde değişiklik gözlenmektedir. Bundan dolayı, yarıiletkenlerin safsızlığı, iletim bandındaki elektronların ve valans bandındaki hollerin yoğunluklarına bakılarak belirlenir. Böylece, yarıiletkenler katkılama durumlarına göre has yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İletim bandındaki elektron yoğunluğu valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit ise; böyle yarıiletkenlere has (intrinsic) yarıiletkenler ve elektron yoğunluğu hol yoğunluğuna eşit değilse; bu yarıiletkenlere de katkılı (impurity) yarıiletkenler adı verilir.

1.3 Has Yarıiletkenler

Periyodik cetvelde IVA grubunda yer alan, tek tip atomlardan oluşan Si ve Ge gibi elementler tipik yarıiletkenler olarak bilinir. Doğada en iyi bilinen yarıiletken malzeme olan Si ve Ge, kovalent bağlı yarıiletkendirler ve elmas yapıya benzer bir kristal yapıya sahiptirler. Doğal yarıiletkenler iletim bandında çok az sayıda serbest elektron bulundurdukları için akımı çok iyi iletemezler.

Yarıiletkenler; has (katkısız) yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olarak iki gruba ayrılırlar. Safsızlık veya örgü kusuru bulunmayan bir yarıiletken malzeme, has yarıiletken olarak tanımlanır ve has yarıiletkenler temelde yalıtkandırlar. Böyle bir malzemede, mutlak sıfırda (T=0 K) valans bandı elektronlarla dolu olup iletkenlik bandında serbest elektronlar bulunmamaktadır. Sıcaklık arttıkça kırılmış valans bağların sayısı artar ve bu nedenle serbest elektronların ve hollerin konsantrasyonu artar. Dolu valans bandından boş iletkenlik bandına elektronların az bir miktarının geçebileceği termal enerjiler için komşu bandlar arasındaki enerji aralığı yeterince küçüktür. Has yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu, valans bandındaki hollerin yoğunluğuna eşittir. Çünkü bir elektron termal uyarma sonucu geride bir hol bırakarak iletkenlik bandına geçer. Bu malzemelerde elektrik alan ve termal enerji ile uyarılan elektronlar yasak enerji aralığını atlayarak iletkenlik bandına geçerler ve böylelikle iletkenliği sağlarlar. Has yarıiletkende yasak band genişliği (E_g) elektron-hol çiftlerin aktivasyon enerjisini karakterize eder.



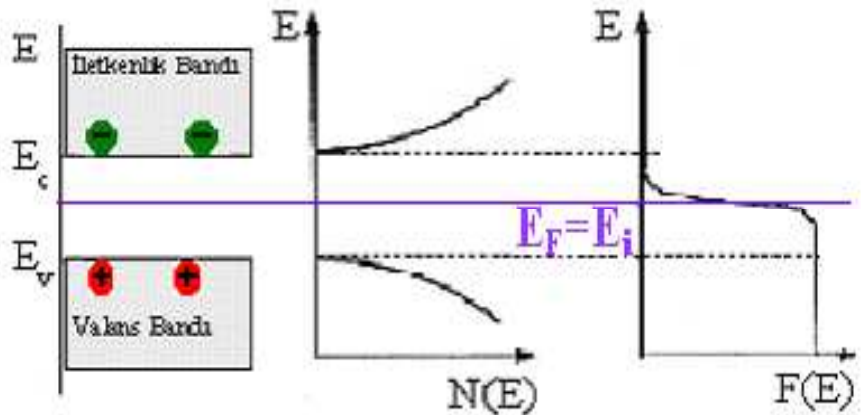
Şekil 1.3 a) T=0 K sıcaklığında has yarıiletkenlerin enerji band yapısı, b) T>0 K'den yüksek sıcaklıklarda has yarıiletkenlerin enerji band yapısı.

Has yarıiletkenlerde taşıyıcıların meydana gelmesi, kimyasal bağların kopması ve eşit sayılı elektron ve hollerin oluşumuna bağlıdır. Has yarıiletkenlerde, iletkenlik bandında birim hacimdeki elektron sayısı (n) ile valans bandında birim hacimdeki hol sayısı (p) eşittir. Yani $n = p = n_i$ olur. Burada n_i saf taşıyıcı yoğunluğudur. Fermi enerjisi (E_F), N elektronlu sistem için, mutlak sıcaklıkta dolu olan en yüksekteki yörüngenin enerjisidir. Sıcaklık arttığında, elektronların kinetik enerjileri artar. Mutlak sıfırda boş olan bazı enerji düzeyleri dolmaya, dolu olan bazı düzeylerde boşalmaya başlar. O halde, elektronların E enerjisine sahip bir elektronik seviyeyi doldurma olasılığı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu denlem 1.1 ile verilir:

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/k_B T}} \qquad (1.1)$$

Burada k_B Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık (K), ve E_F ise Fermi seviyesinin enerjisidir.

Has yarıiletkenler için Fermi seviyesi E_i, band aralığının hemen hemen ortasında yer alır (Sze, 2002). Şekil 1.4 ’te has yarıiletkenlerin termal dengedeki enerji band diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.4 Has yarıiletkenler için termal dengede enerji-band diyagramı (Ulu, 2007).

Bu nedenle has yarıiletkende Fermi seviyesi enerjisinin enerji band diyagramındaki yeri, elektronların iletkenlik bandındaki ve hollerin valans bandındaki konsantrasyonlarının eşitliğinden bulunur. Denklem 1.2’den E_F’nin yeri hesaplanabilir.

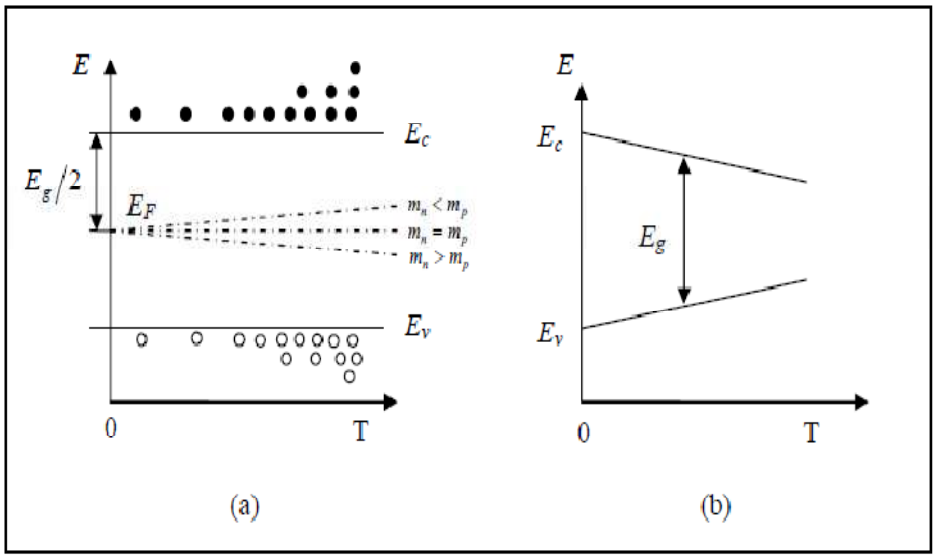
$$E_F = \frac{E_g}{2} + \frac{1}{2} kT\ell n \frac{N_v}{N_c} \qquad (1.2)$$

Burada E_g yasak band genişliğini, N_c iletim bandındaki elektronların konsantrasyonunu, N_v valans bandındaki hol konsantrasyonunu göstermektedir.

Denklem 1.2 has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla, elektronların ve hollerin ilişkisini göstermektedir. Bu değişim Şekil 1.5' de görülmektedir. Mutlak sıfırda Fermi seviyesi yasak enerji aralığının tam ortasına $E_F = E_g / 2$ yerleşmektedir. Sıcaklık arttıkça Fermi seviyesi iletkenlik bandına ($m_n^* < m_p^*$ için) veya valans bandına ($m_n^* > m_p^*$ için) yaklaşır. Eşit etkin kütle durumunda ($m_n^* = m_p^*$) Fermi seviyesi, sıcaklık arttıkça yasak enerji aralığının ortasında kalmaktadır.

Denklem 1.3' teki m_n^* elektronun etkin kütlesini, m_p^* holün etkin kütlesini göstermektedir.

$$E_F = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT\ell n \frac{m_p^*}{m_n^*} \qquad (1.3)$$

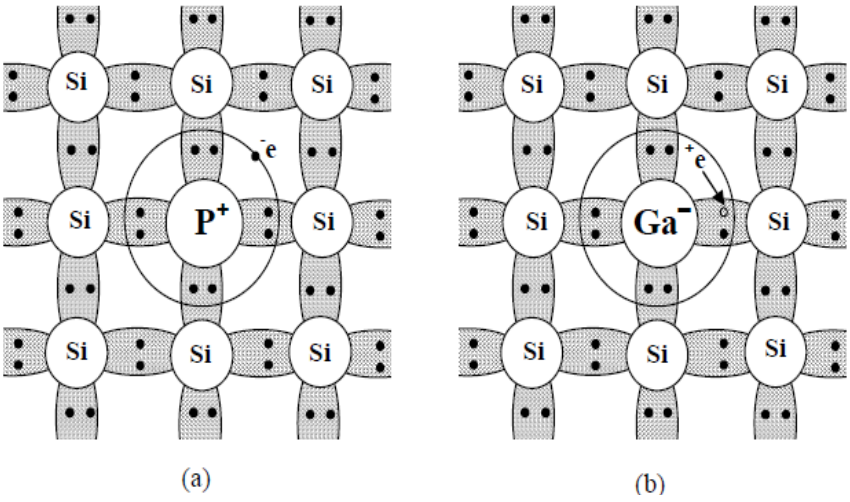


Şekil 1.5 a) Has yarıiletkende Fermi seviyesinin sıcaklıkla değişimi,
b) yarıiletkenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi.

Şekil 1.5a'da yarıiletkenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişmediği gösterilmektedir. Gerçekte, sıcaklık arttıkça yarıiletkenin örgü parametresi de büyümektedir ve bu nedenle de yasak enerji aralığı sıcaklıkla değişmektedir. Yarıiletkenlerin çoğunda, sıcaklık arttıkça yasak enerji aralığı lineer olarak küçülmektedir (Şekil 1.5b) (Caferov, 1998).

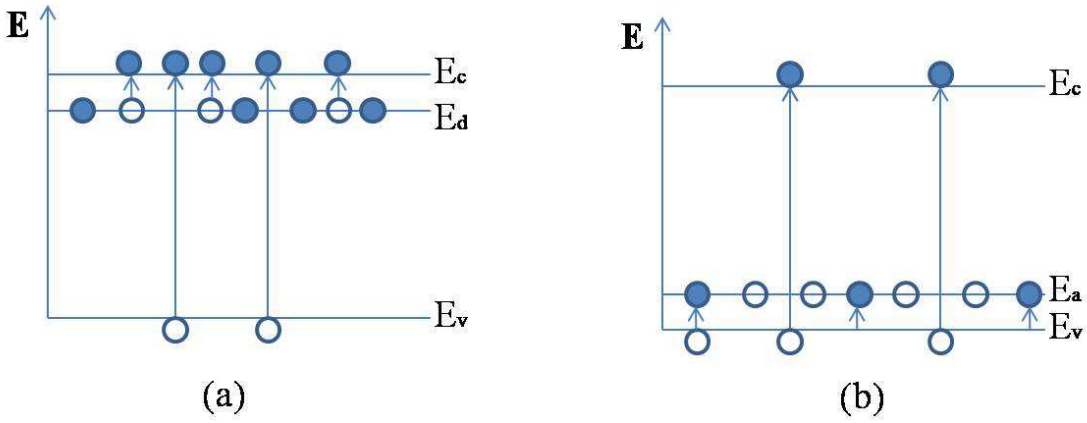
1.4 Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin çoğunluğunda oda sıcaklığında iletkenlik katkı atomlarının etkisiyle değişir. İletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenlere katkılı yarıiletken denir. Yarıiletken safsızlık atomları tarafından katkılandığı zaman, safsızlık enerji seviyeleri ortaya çıkar. Katkılı yarıiletkenlerin oluşumu iki örnek yapı ile izah edilebilir. İlk olarak, silisyum yarıiletkeninde katkılı iletkenliğin meydana gelme mekanizması göz önüne alalım. Silisyum örgüsünün bir düğümüne beşinci grup atomu olan fosfor (P) yerleştirilsin. Fosforun elektron konfigürasyonu $_{15}P\ 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^3$ şeklindedir ve dış (valans) kabuğunda beş elektron ($3s^2 3p^3$) bulunmaktadır. Fosfor atomu silisyum yarıiletkeninde bir silisyum atomunun yerini işgal ettiğinde, fosforun dört valans elektronu komşu dört silisyum atomuyla kovalent bağ oluşturur (Şekil 1.6a). Fosforun beşinci elektronunun kovalent bağ kurma imkânı yoktur. Çünkü komşu silisyum atomlarının tüm elektronları bağlara yerleşmektedir. Bu nedenle beşinci elektron fosfora zayıf bağlıdır; zira bu elektron komşu pozitif yüklü silisyum iyonlarının etkisi altındadır. Düşük sıcaklıklarda beşinci elektron fosfor atomunun etrafında bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise bu elektron fosforun etkisinden kurtulur ve serbest hareket edebilir (Caferov, 1998).



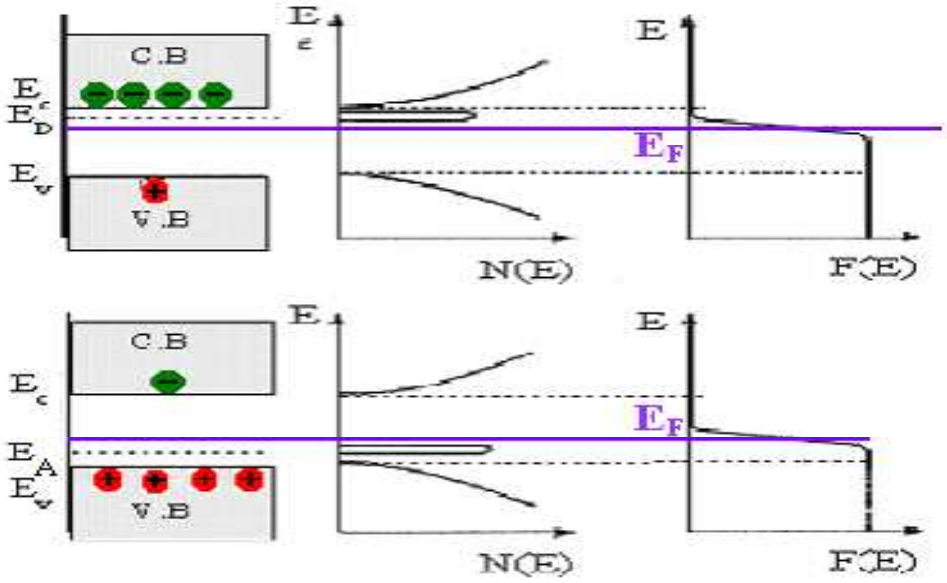
Şekil 1.6 Silisyumdaki a) donör ve b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü.

Fosfor iyonlaşma nedeniyle, fosfor atomu pozitif yüklü iyona dönüşür. Yarıiletkene elektron verebilen katkı atomları "donör (verici)" olarak adlandırılır ve çoğunluk taşıyıcılar elektronlar olduğu için, yarıiletken n-tipi yarıiletken haline gelir. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları hollerdir. Donör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin oluşmasına yol açar. Bu enerji düzeyi iletkenlik bandının biraz aşağısında yer almaktadır. Zira fosfor atomunun iyonlaşma enerjisi (ΔE_D) yarıiletkenin silisyum atomları arası kovalent bağların kopma enerjisinden (E_g) çok küçüktür.



Şekil 1.7 a) Donör ve b) akseptör tipli yarıiletkenlerin enerji band diyagramları.

İkinci olarak, periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan galyum (Ga) atomunun silisyum kristalindeki değişikliklerini göz önüne alalım. Galyumun valans kabuğunda üç elektron ($4s^2$ $4p^1$) bulunur. Dört değerlikli silisyuma üç değerlikli galyum atomu katıldığında, komşu silisyum atomlarının birinin bağı dolmamaktadır (Şekil 1.6b). Galyum atomunun dolmamış bağına komşu silisyum atomundan bir elektron geçebilir. Bunun sonucunda, negatif yüklü galyum iyonu oluşur ve silisyum bağlarıyla hareket eden serbest hol meydana gelir. Yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomlarına "(akseptör) alıcı" denir ve iletkenliği akseptör tipli katkıyla belirlenen yarıiletken, p-tipi yarıiletken olarak tanımlanır. p-tipi yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları hollerdir ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır. Akseptör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde (valans bandının maksimumunun üstünde) enerji düzeyi (E_a) oluşturur. İyonlaşma sonucunda valans bandında serbest holler oluşur (Caferov, 1998). Katkılı yarıiletkenlerde Fermi seviyesi iletkenlik bandının tabanına doğru (n-tipi) veya valans bandının tepesine doğru (p-tipi) hareket eder.



Şekil 1.8 a) n-tipi yarıiletken ve b) p-tipi yarıiletken (Ulu, 2007).

Yarıiletkenlerin çoğunluğunda oda sıcaklığında iletkenlik, katkı atomlarıyla değişir. Katkı atomları ile belirlenen iletkenlik yüksek sıcaklıklarda saf iletkenliğe geçiş yapar. Yarıiletkenlerde Fermi enerjisinin, enerji band diyagramındaki yeri, elektriksel nötrlük şartından bulunur. Bu şarta göre bir yarıiletkenin herhangi bir noktasında yüklü parçacıkların toplam yükü sıfırdır. Donör ve akseptörlerle katkılanmış bir yarıiletkende elektriksel nötrlük şartı denklem 1.4' deki gibi verilir.

$$n_0 + N_a^- = p_0 + N_d^+ \tag{1.4}$$

Burada n_0 ve p_0 sırasıyla elektronların iletim bandındaki ve hollerin valans bandındaki konsantrasyonu, N_a^- iyonize olmuş akseptörlerin konsantrasyonu ve N_d^- iyonize olmuş donörların konsantrasyonudur.

Denklem 1.4 'de terimlerin açık ifadeleri yerine yazıldıktan sonra

$$N_c \exp\eta + \frac{N_a}{g\exp(-\varepsilon_a - \eta)+1} = N_v \exp(-\eta - \varepsilon_i) + \frac{N_d}{g\exp(-\varepsilon_a - \eta)+1} \tag{1.5}$$

denklemi elde edilir. Burada N_a ve N_d akseptörlerin ve donörların konsantrasyonu, N_c ve N_v iletim ve valans bandındaki elektronların ve holerin konsantrasyonu, g akseptör veya donör seviyelerinin yozlaşma katsayısı ε_a ve ε_d indirgenmiş akseptör ve donör seviyelerinin enerjileri ve η indirgenmiş Fermi seviyesidir $(\eta = (E_F - E_c)/kT)$.

Bu denklemden Fermi enerjisini bulmak zor olduğu için özel durumlar göz önüne alınır.

Akseptör (veya p-tipi) yarıiletken $(N_a \neq,\ N_d = 0)$

Donör (veya n-tipi) yarıiletken $(N_d \neq 0,\ N_a = 0)$

n-tipi yarıiletkende akseptörlerin ve hollerin bulunmaması nedeniyle, elektriksel nötrlük şartı olan Denklem 1.4, Denklem 1.6' ya dönüşür.

$$n_0 = N_d^+ \tag{1.6}$$

Bu denklemde gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra Fermi enerji seviyesi denklem 1.7'deki gibi yazılır.

$$E_F = E_c - kT\ell n\left[\frac{N_c}{2N_d} + \sqrt{\left(\frac{N_c}{2N_d}\right)^2 + g\frac{N_c}{N_d}\exp\varepsilon_d}\right] \tag{1.7}$$

(yani $\exp\left(-\frac{E_c - E_d}{kT}\right) >> N_c / 2N_d$ şartları için)

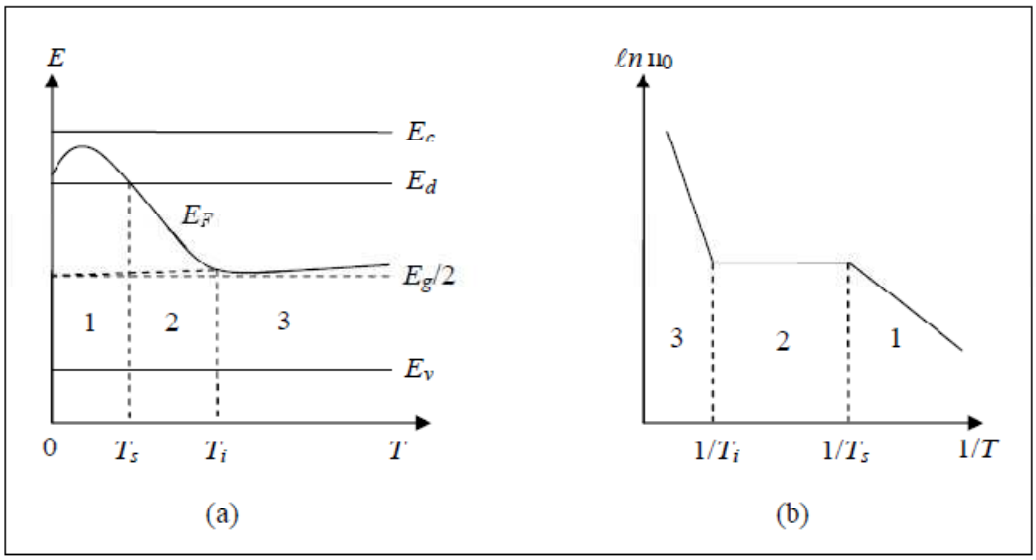
Küçük sıcaklıklar için denklem 1.7

$$E_F = \frac{E_c + E_d}{2} - \frac{kT}{2}\ell n\frac{gN_c}{N_d} \tag{1.8}$$

şeklini alır. n-tipi yarıiletkende, mutlak sıfırda (T=0) Fermi seviyesi iletkenlik bandının minimumu ve donör seviyesinin tam ortasında yer alır.

$$E_F = \frac{E_c + E_d}{2} \tag{1.9}$$

Çok düşük sıcaklıklarda ($gN_c < N_d$) sıcaklık arttıkça Fermi seviyesi önce yükselir, sonra alçalır ve $nN_c = N_d$ şartı uygulandığı halde yeniden iletkenlik bandının minimumunun ve donör seviyesinin tam ortasında yerleşir (Şekil 1.9a). Denklem 1.9 ile ifade edilen Fermi seviyesinin sıcaklıkla ilişkisi Şekil 1.9a' da (1. Bölge) gösterilmektedir. Bu bölge katkının hafif iyonlaşma bölgesi olarak tanımlanır. 1. bölgede (düşük sıcaklıklarda) elektronların konsantrasyonu sıcaklıkla eksponansiyel olarak değişir. Şekil 1.9b'de, düşük sıcaklıklarda iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonunun artışı görülmektedir (1.Bölge).



Şekil 1.9 Donör yarıiletkende a) Fermi seviyesinin ve b) elektron konsantrasyonunun sıcaklıkla değişimi.

Sıcaklık arttıkça iletkenlik bandındaki elektronların konsantrasyonu artar ve donör katkılarının konsantrasyonuna yaklaşır. Yüksek sıcaklıklarda

$(\exp\left(-\frac{E_c - E_d}{kT}\right) << \frac{N_c}{2N_d}$, Fermi seviyesini ifade eden denklem 1.7 yaklaşık denklem 1.10 şeklini alır.

$$E_F = E_c - kT\ell n\frac{N_c}{N_d} \tag{1.10}$$

1.10 denklemi kullanılarak iletkenlik bandındaki elektronların konsantrasyonu yüksek sıcaklıklarda denklem 1.11'deki gibi ifade edilir.

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\ell n\frac{N_c}{N_d}\right) = N_d \tag{1.11}$$

Bu durumda tüm donör atomları iyonlaşmıştır ve iletkenlik bandındaki elektronların konsantrasyonu sıcaklıkla değişmemektedir. Şekil 1.9b' deki (2. Bölge), yüksek sıcaklık bölgesi donör katkılarının tam iyonlaşmasını (n=N_d) göstermektedir ve bu sıcaklık bölgesi doyma bölgesi olarak tanımlanır. Fermi seviyesinin E_F, donör seviyesinden E_d yukarıdan aşağıya geçiş sıcaklığına (T_s) doyma sıcaklığı denir (Şekil 1.9a). Doyma sıcaklığı T_s, Şekil 1.9a ve b'deki 1. ve 2. bölgelerin sınırında yerleşmektedir. Doyma sıcaklığı denklem 1.12'de verilmiştir.

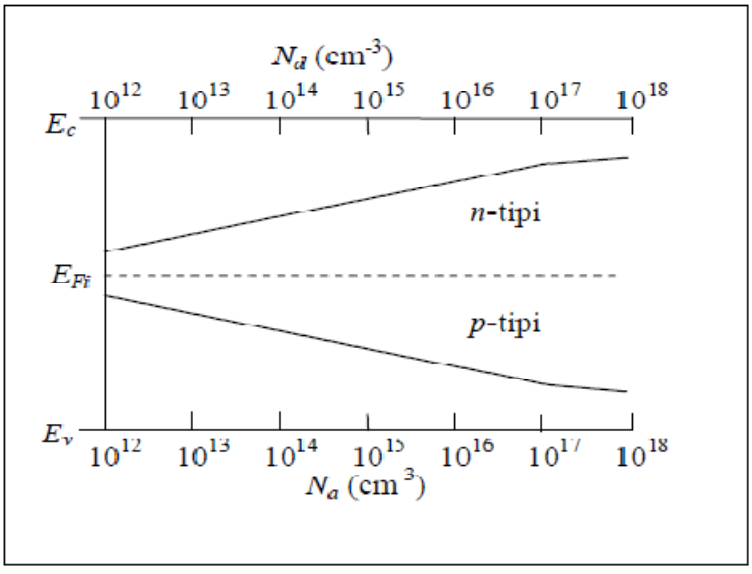
$$T_s = \frac{E_c - E_d}{k\ell n\frac{N_c}{N_d}} \tag{1.12}$$

$(E_c - E_d)$ farkı ve donörların konsantrasyonu N_d küçüldükçe, doyma sıcaklığı da küçülmektedir. T_i'den daha yüksek sıcaklıklarda, elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçebilir ve bunun sonucunda yarıiletkende katkısız iletkenlik oluşmaktadır (Şekil 1.9a, b, 3. bölge). Katkılı yarıiletkenin yüksek sıcaklıklarda (T>T_i) katkısız yarıiletkene geçiş durumunda, Fermi seviyesinin yeri katkısız yarıiletkendeki

Fermi seviyesinin pozisyonu ile üst üste gelir (E=E_F). Katkısız yarıiletkene geçiş sıcaklığı (T_i) Denklem 1.13'deki gibi ifade edilir.

$$T_i = \frac{E_g}{k\ell n\left(\frac{N_c N_v}{N_d^2}\right)} \tag{1.13}$$

1.13 denkleminden görüldüğü gibi, yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g) ve donör konsantrasyonu (N_d) küçüldükçe geçiş sıcaklığı da küçülmektedir (Caferov, 1998). Fermi seviyesi donör veya akseptör konsantrasyonlarına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 1.10, 300 K'deki silisyumun Fermi seviyesinin donör veya akseptör konsantrasyonlarının fonksiyonu olarak değişimini göstermektedir. Katkı konsantrasyonu artarken Fermi enerji seviyesi n-tipi madde için iletkenlik bandına ve p tipi madde için valans bandına yaklaşır (Neamen, 1992).



Şekil 1.10 Donör ve akseptör konsantrasyonlarının fonksiyonu olarak Fermi seviyesi.

2. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ

2.1 İnce Film Elde Etme Metotları

Materyalleri en iyi inceleme yöntemlerinden biri de ince filmlerinin oluşturulmasıdır. İnce filmler çoğu zaman kendi başlarına da önemli özellikler sergilerler. Kimi zamanda yüzey yapısını değiştirmek için ince film halinde kaplamada yaygın olarak yapılmaktadır. Biz bu çalışmada ince filmleri inceleyeceğiz.

İnce film üretim teknikleri, fiziksel buharlaştırma (PVD) ve kimyasal buharlaştırma (CVD) teknikleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenir. Film üretim tekniğinin seçiminde fiziksel, kimyasal, teknolojik, teknik ve ekonomik özellikler rol oynar. Üretilecek ince film malzemesi, alttaşa uyumu, alttaş büyüklüğü ve şekli, sıcaklığa bağımlılık ve kaplama sonrası çalışma ortamı da kaplama tekniğini belirler. Fiziksel ve kimyasal buharlaştırma tekniğinin seçiminde en belirleyici faktör molekül enerjisidir. Kimyasal buharlaştırma ile film üretimi 1000 ˚C gibi yüksek alttaş sıcaklıklarında, fiziksel buharlaştırmayla film üretiminde ise oda sıcaklığından 500 ˚C' ye kadar olan alttaş sıcaklıklarında yapılır (Ohring, 2002).

Görünür bölgede yüksek geçirgenlikli ve düşük dirençli ince film üretim ihtiyacı, farklı üretim tekniklerinin gelişmesine yol açmıştır. Bu tekniklerden her biri ince film üretim süreçlerinde kendi avantaj ve dezavantajlarına sahiptir. İnce film üretimi vakum ortamında malzemenin çeşitli tekniklerle altlık üzerinde biriktirilmesi işlemidir ve bu yüzden uygulamalarda safsızlık için vakum teknikleri önemlidir. İnce film büyütme tekniklerinden en çok kullanılan yöntemler şunlardır; termal buharlaştırma, moleküler beam epitaksi, katodik ark, kimyasal buhar biriktirme teknikleri, sıçratma teknikleri, iyon beam biriktirme, darbeli lazer biriktirme gibi teknikleridir. Termal buharlaştırma en kolay kaplama yöntemlerindendir ve ince filmi üretilecek malzemenin ya termal olarak ya da elektron bombardımanı ile ısıtılarak buharlaştırılıp altlık üzerine biriktirilmesi ile gerçekleştirilir. Moleküler beam epitaksi yönteminde knudsen kaynakları ile üretilen sürekli bir beam vardır ve beam elektron çarpışmaları sonucu

kısmen iyonize edilip elektrik alan yardımı ile hedefe doğru hızlandırılması ile ince film üretimi gerçekleştirilir. Katodik ark yönteminde yüksek akım katot ve anot sistemi ile iletken katı hedeften bir plazma oluşturularak ince film üretimi yapılır. Kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinde de bu plazma oluşturulur fakat bu yöntemde ortamdaki reaksiyonlardan dolayı altlık ısıtılmalı ve daha fazla gaz verilmelidir. İyon beam ince film üretim tekniğinde diğer plazma tekniklerine göre plazma altlıktan daha uzaktadır ve plazma içindeki iyonlar uyarılarak altlığa doğru hızlandırılıp ince film üretimi gerçekleştirilir. Darbeli lazer biriktirme tekniğinde ise lazer ince film üretimi yapılacak hedef malzemeye odaklanır ve belli atımlarla hedef yüzeyine vurarak hedef yüzeyinden altlığa doğru bir plazma oluşturarak ince film üretimi işlemi gerçekleştirilir. Sıçratma (sputtering) yönteminde temel olarak ince film üretimi, ortamdaki gazın elektronlarla çarpışması sonucu gaz iyonize edilip katı haldeki hedefe çarptırılarak hedef atomlarını kopartmasıyla oluşur. Film kaplamak için sıçratma teknikleri iki şekilde kategorize edilir: glow discharge (diyot ve magnetron) ve iyon beam. Bu sıçratma yöntemlerinin hepsinde de, enerjili parçacıklar ile yüzey atomları arasındaki momentum transferi olan aynı temel mekanizma ile parçacıklar aniden fırlatılırlar (saçılırlar). Sıçratma teknikleri yüksek kaliteli filmler üretmeye yararken, düşük üretim miktarı için bile ekipman maliyeti çok yüksektir.

2.2 Yarıiletken İnce Filmler

İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, bir taban üzerine ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları 0.5 nm ile birkaç μm arasında değişen yarı iletken malzemelerdir. İnce film üretiminde taban olarak mikroskop camı, seramik, metal ve grafit gibi malzemeler kullanılabilir (Kittel, 1996). Kullanılan malzemelerin cinsine bağlı olarak çeşitli özellikte ince filmler üretilebilir. Bunlar, şeffaf, iletken, süperiletken, amorf yarıiletken, alaşımlı, inorganik, polimerik, organik, payroelektrik, ferroelektrik ince filmler şeklinde adlandırılabilir.

Yarıiletken ince filmler elde ediliş yöntemlerine ve kullanılan materyallere göre genel olarak tek katlı (homoepitaksiyel), çok katlı (heteroepitaksiyel) ve polikristal filmler olmak üzere üç ana grupta toplanır (Koelmans, 1971). Homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel filmler genellikle 1 μm kalınlıktan daha büyük olup polikristal filmler ise genellikle 1 μm den daha az kalınlıktadır. Homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel filmler tek kristal filmlerdir. Homoepitaksiyel büyütme tek çeşit malzeme ile gerçekleştirilen büyütmedir ve bu filmler aynı malzemeden yapılmış taban ya da film üzerine büyütülerek elde edilirler. Mesela, Si üzerine Si oluşturulacak şekilde. Heteroepitaksiyel büyütme birbirinden farklı malzemelerle gerçekleştirilen büyütme işlemidir ve kristal film kendisinden farklı bir taban ya da film kristali üzerine büyütülür. Polikristal filmler geniş yüzeyli metal, cam, seramik, grafit gibi tabanlar üzerine büyütülebilen; uygun elektrik ve optik özelliklerinden dolayı güneş pili, yarıiletken foto-detektörler gibi birçok uygulama alanı olan; basit ve farklı tekniklerle elde edilebilen yarıiletken malzemelerdir (Rudden and Wilson, 1980; Kırmızıgül, 2008).

Tek kristal filmler ileri teknoloji ile beraber yüksek maliyet gerektiren tekniklerle üretilirken, polikristal yapıdaki filmler pratik ve düşük maliyetli tekniklerle elde edilmektedirler. Bundan dolayı çalışmalar polikristal yapılar üzerine yoğunlaşmıştır (Koelmas, 1971).

İnce filmlerin yeterli ölçüde tanımlanabilmesi için mikroskobik film özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Elementlerin bileşimi ve kimyasal bağlanma durumu, stokiyometri, topografi, yüzey pürüzlülüğü, kristal ve amorf yapıdaki ara yüzeyler ve kristal yapı gibi faktörler ince film özelliklerine doğrudan etki etmektedir. İnce filmlerin kalınlığı, kırılma indisi ve soğurması gibi lineer optik özelliklerle lineer elektrooptik etki, ikinci harmonik üretimi gibi nonlineer özelliklerin tespit edilmesi teknolojik uygulamalar açısından önemlidir (Ertek, 2011).

Son yıllarda yapılan çalışmalar ise ultra ince filmler denilebilecek 10 nm'nin altındaki çaplara sahip oldukça küçük nanopartiküllerin yapımı ve karakterizasyonu üzerinedir. Bu çalışmalar günümüzde yeni bir alanın, yani nanoteknolojinin doğmasını

sağlamıştır. Nanoteknoloji, nanometre ölçeğinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların anlaşılması, kontrolü ile bu boyutlarda fonksiyonel malzemelerin, araçların, ve sistemlerin geliştirilmesi ve üretimidir. Bu teknoloji sayesinde gelecekte nanocihazların minimum boyutu, basit şekli ve yüksek performansı gibi avantajlarından dolayı çok büyük ölçekli entegrasyon sistemlerinde, entegre optik sistemlerinde, otomatik sistemlerde, robotlarda, mikro hava taşıtlarında ve iletişim sistemlerinde kullanılacağı beklenmektedir (Xiang, et. al., 2004). Söz konusu nanopartiküllerin band aralıklarının, yığın (bulk) band aralığı değerlerinden büyük olması başka bir deyişle band aralığı değerlerinin partikül boyutu azaldıkça artması onların en önemli özelliğidir. Buna göre bir yarıiletkenin elektronik yapısı yani band aralığı, boyutunun değiştirilmesiyle değiştirilebilir (Brus, 1986). Yarıiletkenlerde Fermi seviyesi sınırları düşük enerjili optik ve elektriksel özelliklere sahip bandların arasındadır. Bundan dolayı on binlerce atom büyüklüğüne kadar boyutlardaki yarıiletkenlerde optik uyarılmalar materyalin boyutuna bağlıdır (Alivisatos, 1996; Şişman, 2006).

2.3 Saydam İletken Oksit Filmler ve Uygulama Alanları

Yarıiletken oksitler; işlevsel malzemeler, aygıtlar ve sistemlerin gelişmesinde temel oluştururlar. Oksitlerin, değişken katyon değerliği ve ayarlanabilir oksijen eksikliği olmak üzere kendilerine has iki yapısal özelliği vardır. Bu özellikler sayesinde yeni ve ayarlanabilir elektriksel, kimyasal, optiksel ve manyetik özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir. Bu oksit malzemelerin nano yapılarının sentezi de kontrol edilebilen bir yapı ve morfoloji ile bilimsel ve teknolojik uygulamalar için çok önemlidir (Dawar and Joshi, 1984; Hartnagel, et al., 1995).

Son zamanlarda yarıiletken saydam ince filmlerin uygulamaları ve temel özellikleri malzeme biliminde en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Saydam iletkenlere olan ilgi Badeker tarafından 1907 yılında sıçratma yöntemiyle bulunan hem saydam hem de iletken olan kadmiyum oksit (CdO) filmlere kadar dayanır. Bu tarihten itibaren saydam iletken oksit (SİO) ince filmlerin ticari değeri fark edilerek farklı malzemeler araştırılmaya başlandı. Fakat bu filmler üzerindeki asıl bilimsel ilgi ve

teknolojik ilerleme 1940' lardan sonra olmuştur. O zamandan beri teknolojik olarak eşsiz özelliğe sahip bu malzemeler yoğun bir ilgi görmüştür ve bununla birlikte bu malzemelerin üretimi için birçok teknik geliştirilmiştir. Saydam yarıiletken filmlerin teknolojik olarak ilgi çekmesinin başlıca sebebi, bu filmlerin endüstrideki potansiyel uygulamalarıdır.

SİO' ler, görünür bölgede yüksek optiksel geçirgenlik (>% 80) ve yüksek elektriksel iletkenlik (> 10^3 $(\Omega\text{-cm})^{-1}$) gibi iki fiziksel özellikleri ile dikkat çeken yarıiletkenlerdir ve SİO grubuna ait olan Zn, In, Sn ve Cd elementlerinin oksitli bileşiklerinin ince filmleri ilgi odağı olmaya başlamıştır. SİO' lerin yaklaşık olarak 3 eV geniş band aralığına sahip olmaları, özdirenç değerlerinin, 10^{-4} Ω-cm olması ve elektriksel taşıyıcılarının, yani elektron veya hol konsantrasyonu >~10^{19} cm^{-3} olması, yeteri kadar yüksek konsantrasyona sahip olmaları, yeteri kadar büyük mobiliteye sahip olmaları > ~1 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ ortaya çıkan diğer fiziksel özelliklerdendir (Wager, et al., 2008; Stadler, 2012).

SİO 'lerde, yüksek optik geçirgenlik için niye geniş band aralığının gerektiği elektron geçişleri sayesinde açıklanabilir. Işık SİO malzemesi ile etkileştiğinde, SİO malzemesinin band aralığından daha büyük enerjili fotonlar soğurulur ve fotonlar SİO malzemesinin içinden geçemez. SİO malzemesinin band aralığından daha düşük enerjili fotonlar soğurulamaz ve daha düşük enerjili fotonlara karşılık gelen dalgaboyları için SİO' leri saydam yapan SİO malzemesinden geçer. Bu yüzden, yüksek optik geçirgenlik, geniş band aralıklarını gerektirir (>3 eV). Daha düşük özdirençli ince filmler elde etmek için, ikili, üçlü ve çoklu bileşenlerden oluşan çeşitli SİO ince filmler geliştirilmektedir. Çeşitli hazırlama yöntemleriyle depolanmış ve en yaygın olarak bilinen ikili bileşenlerden oluşan kadmiyum oksit (CdO), kalay oksit (SnO_2), indiyum oksit (In_2O_3), çinko oksit (ZnO) ve bunların alaşımları saydam iletken oksit malzeme özelliğini taşıyan malzemelerdir. Bu ikili bileşenlerin depolama süresince kimyasal bileşimlerini kontrol etmek daha kolaydır. Bu yüzden ikili bileşenler üçlü ve çoklu bileşenlere göre çok daha avantaj sağlamaktadır (Minami, 2005). Bazı malzemelerin band aralıkları ve elektriksel özellikleri Çizelge 2.1' de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Yaygın olarak kullanılan n-tipi polikristal SİO filmlerin band aralıkları ve özdirenç değerleri (Wager, et al., 2008).

Materyal	Band aralığı (eV)	Özdirenç (Ω-cm)
In_2O_3	3,75	$1x10^{-4}$
ZnO	3,35	$1.25x10^{-4}$
SnO_2	3,60	$2x10^{-4}$
CdO	2,16	$3x10^{-2}$

n-tipi SİO malzemeler ticari olarak iyi bilinen malzemelerdir. p-tipi SİO' ler, yeni bir olgudur ve bu malzemelerin iletkenlik performansları n-tipi SİO' ler ile karşılaştırıldığında oldukça zayıftır (Wager, et al., 2008).

Katkılanmış oksitlerden ve bunların alaşımlarından farklı yöntemler kullanılarak elde edilen stokiyometrik olmayan filmler genelde polikristal ya da amorfturlar ve bu malzemeler elektromagnetik spektrumun görünür ve yakın IR bölgelerinde yüksek geçirgenliğe ve IR bölgesinde ise yüksek yansıtıcılığa sahiptirler. Geçirgenliği yüksek iletken malzeme elde etmenin tek yolu, yasak enerji aralığı büyük (>3 eV) bir malzemenin stokiyometrik olmayan malzeme ile katkılanarak elektron dejenereliği yaratılmasıdır. Ayrıca, bu filmlerdeki elektriksel iletkenlik temelde stokiyometrik olmayan film yapısına bağlıdır. Bu tip yapılarda metalik ara durumlar ve oksijen eksikliği gibi kusurlar bulunur (Gurumurugan, et al., 1997).

SİO malzemelerin birçok yeni uygulama alanı oluşmaya başlamıştır. Antimon katkılı kalay oksit (ATO) veya florin katkılı kalay oksit (FTO) ve kalay katkılı indiyum oksit (ITO)'in çeşitli teknikler kullanılarak biriktirilip seri üretiminin yaygın olarak yapılmaya başlanmasından sonra, bu malzemelerin birçok elektronik, optoelektronik ve mekanik uygulamaları ortaya çıkmaya başlamıştır. SnO_2, ZnO ve ITO sahip oldukları elektrooptik özellikler sebebiyle bu uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı uygulamalar için seçilecek SİO malzemesi değişebilir. Örneğin; güneş pillerinde

kullanılan SİO' ler güneş spektrumunda yüksek derecede geçirgen, düşük elektriksel dirence sahip, H-plazması altında kararlı ve özellikle a-Si güneş pilleri için uygun yapıya sahip olmalıdırlar. Cam taban üzerine kaplanmış SİO' in fonksiyonu pencere tabakasına kontak olabilecek geçirgen ve iletken bir davranış sergilemektir (Durose, et al., 1999). Diğer uygulamalar için ek kriterler de önem kazanabilir. Bunlar, fiziksel, kimyasal ve ısıl dayanıklılık, iş fonksiyonu, homojenlik, toksitlik ve maliyet gibi etkenler olabilir (Zhao, et al., 2002).

SİO malzemelerin uygulama alanlarına; daha geniş düz ekranlı televizyonları (FPD, flat panel display), taşınabilir bilgisayarlarda daha geniş ve yüksek çözünürlüklü ekranları, düşük yayınımlı ve elektro-kromik pencereleri, önemi sürekli artan ince film fotovoltaikleri ve sık göstergeli, iyi dizaynlı yeni aygıtları sayabiliriz. SİO malzemelerin artan önemi bu yeni teknolojilerle bir araya geldiğinde son yedi yılda SİO' ler bilim açısından gerekliliği daha iyi anlaşılmıştır. Bunların içinde, yeni n-tipi malzemeler, gerçek p-tipi malzemelerin sentezi ve p-tipi ZnO üretimi için katkılama yeteneğinin arttırılması için teorik ve deneysel çalışmalar yer almaktadır. Son yirmi yılda çalışmaların deneysel olduğu ve ZnO ile ITO' nun türevleri üzerinde odaklandığını düşündüğümüzde, son zamanlarda SİO teknolojisinin ne kadar hızlı bir gelişim içinde olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum sadece aygıtlarda daha yüksek performans sağlamakla ilgili değil aynı zamanda geçiş metali tabanlı oksitlerin elektro optik aygıtlardaki artan önemi ile de ilgilidir. Endüstriyel perspektifi baz alan yeni n-tipi ve p-tipi malzemeleri, yeni çöktürme tekniklerini araştıran ve malzemelerin kendilerini olduğu kadar performans sınırlarını da inceleyen çalışmaların sayısı giderek artmaktadır (Ginley and Bright, 2000).

SİO kaplamaların fiziksel özellikleri üretim parametrelerine çok duyarlıdır. Ayrıca film bileşimine, yapısına, kristalleşme seviyesine, kusur yoğunluğuna, yüzey pürüzlülüğüne ve katkı konsantrasyonuna da bağlıdır. Literatürde SİO ince filmler pek çok fiziksel (Nayar, et al., 1981; Petrou, et al., 1979) ve kimyasal (Tang, et al., 1994; Verkey, et al., 1994) üretim teknikleri ile elde edilmiş ve özellikleri incelenmiştir. Bundan başka, çoklu bileşik içeren oksit ince filmler de özel uygulamalar için oldukça

uygundur (Minami, 1984 a, 1984 b, 1989, 1999, 2000) ve SİO film biriktirme yöntemleri de gün geçtikçe gelişmektedir.

2.4 ITO İnce Filmler ve Kullanım Alanları

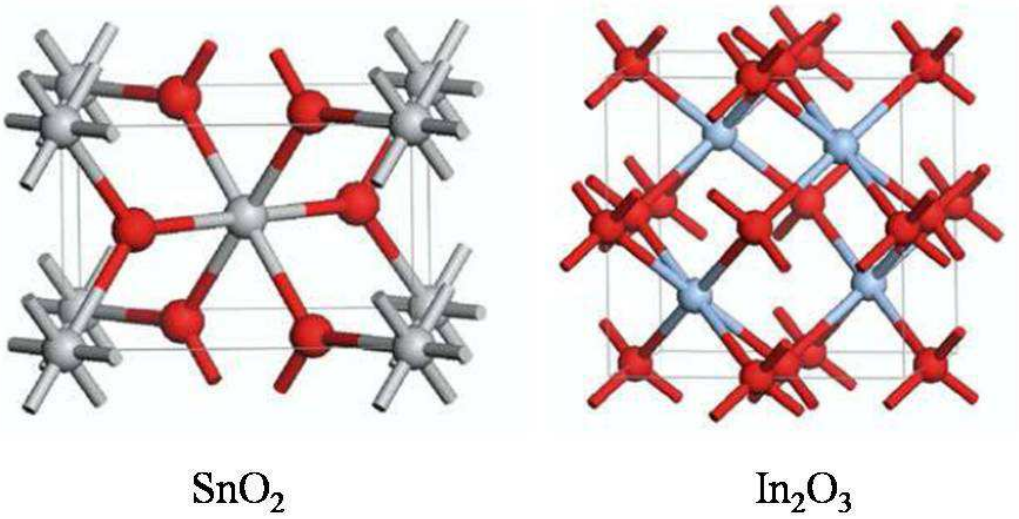
1907 yılında Badeker, Cd metalinin oksidasyonu ile hem saydam hem de iletken bir malzeme geliştirdiğini rapor etmiştir (Zhou, 2005). Bu tarihten itibaren SİO ince filmlerin ticari değeri fark edilerek farklı malzemeler araştırılmaya başlandı. Kalay katkılı indiyum oksit (indiyum tin-oxide, ITO) 1960'lardan itibaren optoelektronik aletlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şu anda belki gelecekte de, optik geçirgenlik, elektriksel iletkenlik, çevresel etkilere karşı dayanıklılık, tekrarlanabilirlik ve iyi yüzey morfolojisi açısından, ITO en iyi performansı gösteren SİO malzemedir (Löffler, 2005). Sürekli artan SİO uygulamaları ve ITO malzemelerin içindeki indiyumun doğada az bulunur ve pahalı olması, bu malzemeye artan talebin karşılanamamasına sebep olmaktadır (Kavasoğlu, 2006).

Saydam iletken malzemeler, elektriksel olarak iletken ve optik olarak geçirgen yapıya sahiptirler. Alüminyum çinko oksit, indiyum kalay oksit, kalay oksit gibi metal oksitler düşük elektrik direncine, metalik iletkenliğe yakın bir iletkenliğe, 400 ile 700 nm arası görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahip yarıiletkenlerdir. Genelde iletkenler saydam değildir, saydamlar da iletken değildir. Enerji skalasında, fotonların absorplanabileceği düşük enerji aralığına sahip olan maddelere iletken, enerji aralığı geniş olan, fotonların absorplanmadan geçtiği maddelere ise saydam denir. Saydam iletkenlerde iletkenlik ve geçirgenlik, katkılama yapıldığında yerine geçen vericilerle ya da mevcut girişler sayesinde dejenere olan, geniş band aralıklı (>3 eV) yarıiletken oksitlerin seçimiyle sağlanmaktadır.

ITO, n-tipi, geniş direkt optik band aralıklı (~3-4 eV), kırılgan, pahalı, az zehirli ve saydam iletkenler içinde oldukça iletken, dejenere bir yarıiletken oksittir (Chrisa, 1998; Xiao, et al., 2011). Bununla birlikte ITO, %95 oranında yüksek geçirgenliğe sahip ve oldukça yüksek iletkenliğe sahip bir saydam iletkendir. Aynı zamanda alttaş

yüzeyine çok iyi tutunma ve yüksek kızılaltı yansıtma özelliğini de göstermektedir. ITO filmi, benzersiz karakteristiklerinden dolayı çok dikkat çekicidir. Mevcut SİO' ler arasında ITO, pratik uygulamalarda en sık kullanılan malzemelerden birisidir. Optoelektronik alanında, ITO ince filmlere olan talep son yıllarda iyice artmıştır. Ticari optoelektronik ve diğer katı hal aletlerinde, kalay oksit (SnO_2), indiyum oksit (In_2O_3), indiyum kalay oksit (ITO) ve titanyum oksit (TiO_2) gibi yarıiletken ince film uygulamaları Delahoy ve Cherny, Lewis ve Paine, Gordan, Ginley, ve Bright ve Coutts et al. tarafından ayrıntılı bir şekilde çalışılmıştır. ITO ince filmlerinin en yaygın kullanım alanları; anti-reflect (AR) kaplamalar, foto diodlar, foto transistörler, laserler, sıvı kristal görüntülemeler (LCDs) (Matin, et al., 1994; Tang, et al., 2003; Brauer, 1999) fotovoltaik pillerdeki saydam elektrotlar (Zhou, et al., 2005), görüntü sensörleri (Comini, et al., 2001), plazma televizyonlarını içeren düz panel görüntülemeler (FPD) (Whang, et al., 2005) ve organik ışık yayan ledler (OLEDs) (Reddy, et al., 2006) oluşturmaktadır.

ITO'nun benzersiz özellikleri, onun yapısı ve bileşiminden gelir (Marezio, 1965). Kalay oksit (SnO_2) rutil yapıya sahip iken indiyum oksit (In_2O_3), kübik biksibit yapıya sahiptir. İndiyum oksit ve kalay oksidin kristal yapıları Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Ginley, 2010).



Şekil 2.1 SnO_2 ve In_2O_3 kristal yapıları.

Çok küçük bir miktarda katkı, bir yarıiletkenin iletkenliğini büyük ölçüde değiştirebilir. İndiyum kalay oksit (ITO), indiyum oksitin kalayla katkılandırılması sonucu oluşur. ITO'nun elektrik iletkenliği, indiyum oksit örgüsü içindeki indiyuma kalay katkılanmasına bağlıdır, katkılama ile indiyum oksitin iletkenliği büyük ölçüde iyileştirilir (Deng, 2000; Neamen, 1997). İndiyumun örgü yapısı üzerinde, kalayla indiyumun yerdeğiştirmesi sonucu serbest elektronlar oluşur. İndiyum oksite kalay katkılandığında kalay, normalde yasak olan iletim bandının hemen altında enerji düzeyleri oluşturur. Bu düzeylere verici düzeyler, iyonlaşmış durumdayken iletkenlik bandına bir elektron veren kalaya verici atom, katkılama sonucu oluşan ITO'ya ise n-tipi yarıiletken adı verilir. ITO içinde elektrik iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları genelde iki mekanizma sonucu oluşmaktadır.

Bunlardan birincisi, oksijen boşluklarının taşıyıcı olarak iki elektron oluşturması, diğeri ise kalay atomunun indiyumun yerine geçmesiyle ekstra bir elektron daha oluşturmasıdır.

İndiyum oksite kalay katkılandığında indiyum oksit (3)'ün kübik yapısından dolayı In^{+3} iyonlarının yerdeğiştirdiği kalay, oksijenle bağ yapar, SnO ya da SnO_2 oluşur (Bashar, 1998; Meng, et al., 1994). Kalay sırasıyla +2 ya da +4 valans elektronuna sahiptir, değerliği ITO'nun (In_2O_3:Sn) iletkenliği üzerinde doğrudan etkilidir. İletkenliği azaltan, tuzak gibi davranan bir boşluk yaratıldığı için düşük valans değeri, taşıyıcı konsantrasyonda net bir azalma meydana getirir. Diğer taraftan SnO_2 seviyesinin üstünlüğü, iletkenlik bandına elektron veren n-tipi verici gibi davranmasındandır, bu durumda kalayın dört, indiyumun üç tane valans elektronu vardır. Kristal örgüsü bozulmadan, kalayın dört elektronundan üçü, kovalent bağlanma yaparak dengeyi sağlarlar, artan bir elektron boşta kalır. Aynı şekilde kalayın çekirdek yükü, indiyumdan bir fazla olduğu için, çekirdekte de fazladan bir yük artmış olacaktır. Kristal örgü içinde bağlanma sırasında bir elektronu artan kalaya, bağlı olan Sn^{+4} iyonudur. Bu valans elektronuna hidrojen türü bir iyon gibi bakılıp bağlanma enerjisi hesaplandığında bu değerin çok küçük olduğu anlaşılmaktadır (Durlu, 1996). Bu durumda dördüncü elektron, kalay atomuna çok zayıf bağlıdır. Oda sıcaklığında bir katı içindeki atomların ısısal titreşim hareketi, bu enerjiden daha büyük bir enerjiye sahip

olduğundan zayıf bağlı elektron kolayca serbest duruma geçerek katı içinde hareket edebilmektedir (Kittel, 1996). Böylece katkı atomlarından birer elektron katının iletkenlik bandına geçer. Bir n-tipi yarıiletkende iletkenlik, saf kristalin elektron yapısına uymayan katkı bandına çıkan fazla elektronların bir vericiden diğerine atlamasıyla sağlanmaktadır. ITO'nun özgül direnci, hedef içindeki kalay miktarına bağlıdır. Düşük dirençli ITO elde etmeyi denerken, kalay katkılaması kontrollü olarak yapılmalıdır. Kalay, indiyumun yerine geçtiğinde bir iletkenlik elektronu serbest kalır, aynı zamanda kirlilik saçılma merkezlerinin oluşmasına neden olur (Meng, et al., 1994). Bu durum taşıyıcılığın azalmasından dolayı direnç artışına neden olur. Kristal içindeki düzensizlikler (kusurlar) ve yığıntılardan dolayı saçılmalar oluşur (Huang, et al., 2000). ITO içindeki oksijen boşlukları (oksijenin bulunmadığı durumlar) ile kalayın, indiyumun kristal yapısı içindeki ara bir bölgede sıkışıp kalması, kristal içinde düzensizlik yarattığından saçılmalara neden olur. Çeşitli araştırmacılar indiyum-kalayoksit (ITO) filmlerinde mobilitede hangi saçılma mekanizmasının hakim olduğunu söylemişlerdir. ITO filmlerin örgü parametreleri indiyum oksidin (In_2O_3) örgü parametrelerine çok yakındır ve a = 10,12 – 10,31 Å arasında değişmektedir (Palalı, 2005). ITO materyalinin elektriksel özelliği metalinkine benzer. Çünkü taşıyıcı konsantrasyonu tipik olarak 10^{20} ile 10^{21} cm^{-3} civarındadır (Zhou, 2005).

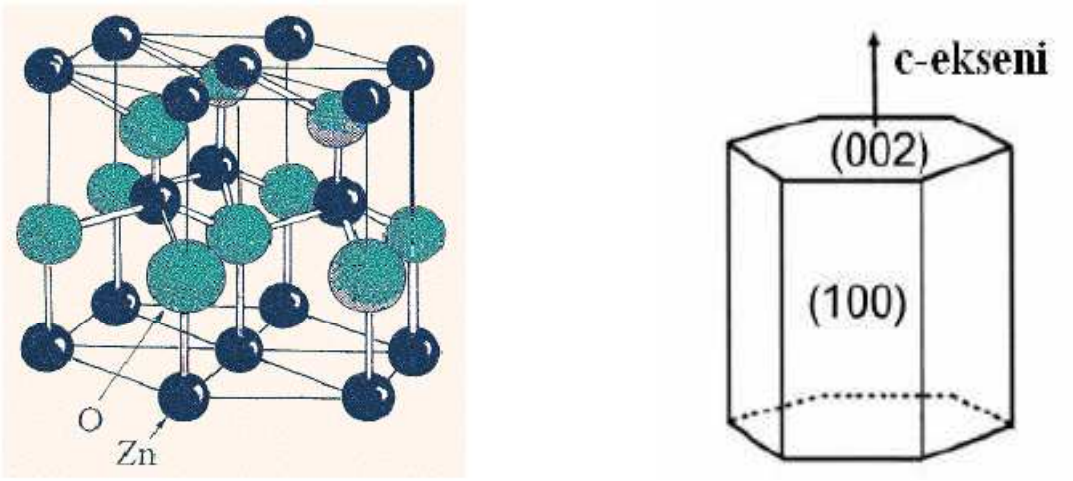
ITO filmlerin optik band aralıkları genellikle 3,75 eV' tan daha büyüktür ve literatürde 3,4 ile 4,5 eV arasında değişen farklı değerler rapor edilmiştir (Mudryi, et al., 2007). Ohhate ve diğerleri absorbsiyon katsayısının enerjiyle değişimini çalışmış ve enerji aralığı Dyer ve arkadaşları tarafından yaklaşık olarak 3,3 eV olarak bulunmuştur. Bu tür filmlerin yüksek optik geçirgenlikleri (T), geniş yasak band aralığına sahip yarıiletken özellik göstermelerinden dolayıdır. Temel soğurma bölgesi morötesinde olup, taşıyıcı konsantrasyonun artması ile kısa dalga boylu bölgelere kaymaktadır. Bunun nedeni yasak band aralığının taşıyıcı konsantrasyonu ile $N^{2/3}$ şeklinde orantılı olmasıdır. Depolama oranı ITO filmlerinin elektriksel özellikleri açısından önemlidir ve en uygun depolama oranı 90:10 In_2O_3: SnO_2' dır.

Bazı araştırmacılar ITO filmlerinin elektriksel özelliklerinin kalınlığa bağlılığını çalışmışlardır. Rauf ve diğerleri iletkenliği granüler yapıya göre açıklamaya

çalışmışlardır. Chopra ve arkadaşları ITO filmleri için film kalınlığına bağlı geçirgenlikteki değişmelerin girişim nedeniyle olabileceğini söylemişlerdir (Rauf, 1995; Chopra, 1983). Elde edilmek istenen filmin malzemesi, taban uyumu, taban büyüklüğü ve şekli, sıcaklığa bağımlılık ve daha sonraki çalışma ortamı da film elde etme metodunu belirler. ITO ince filmlerinin üretiminin hazırlanışı için uygun olan depolama teknikleri termal buhar depolama (Salehi, 1998; Mohamed, et al., 2009), magnetron sıçratma (Zhang, et al., 1999 a; Zhan, et al., 1999 b), elektron demeti buharlaştırma (Sheu, et al., 1999; Fallah, et al., 2010), spray pyrolysis (Major and Chopra, 1988), kimyasal buhar depolama (Hu and Gordon, 1992 b), dip- coating (Takahashi, et al., 1997; Nishio, et al., 1996), puls lazer kaplama metotlarını (Kwok, et al., 1998; Kim, et al., 1999) içerir. ITO filmlerinin üretimi için böyle mevcut teknikler arasında doğru akım (DC) veya radyo frekansı (RF) magnetron sıçratma metodu uygulamaların geniş bir aralığını oluşturur. RF veya DC magnetron sıçratma metodu kullanılarak üretilen ITO filmleri genellikle hem alaşım hem de oksitli hedefler kullanıldığı zaman (May and Strümpfel, 1999; Honda, et al., 1996; Wong, et al., 2004) düşük kısmi oksijen basıncını gerektirir. ITO filminin kalitesini, düzgün kalınlık, yüzey morfolojisi, optik geçirgenliği ve elektriksel geçirgenliği gibi faktörler belirler. Bunun yanında, depolama teknikleri, işlem koşulları ve tavlama işlemleri ayrıca ITO' nun bütün optiksel ve elektriksel özelliklerini etkiler. Depolama süresince argon-oksijen-hidrojen gaz karışımı kullanarak daha kaliteli filmler elde edildiğini Harding ve Window belirtmiştir. DC magnetron sıçratma deneylerinde su buharı veya hidrojen gazının kullanılması ITO filmlerinde taşıyıcı konsantrasyonunu arttırdığı Ishibashi et al. tarafından anlatılmıştır. Fakat, ITO filmlerinde neden taşıyıcı konsantrasyonunun arttığı tartışılmamıştır. Oda sıcaklığında saçtırılan ITO filmlerinin vakum ortamında hidrojen gazı ile tavlanarak elektriksel iletkenliğinin önemli derecede arttığı Bai'a et al. tarafından anlatılmıştır.

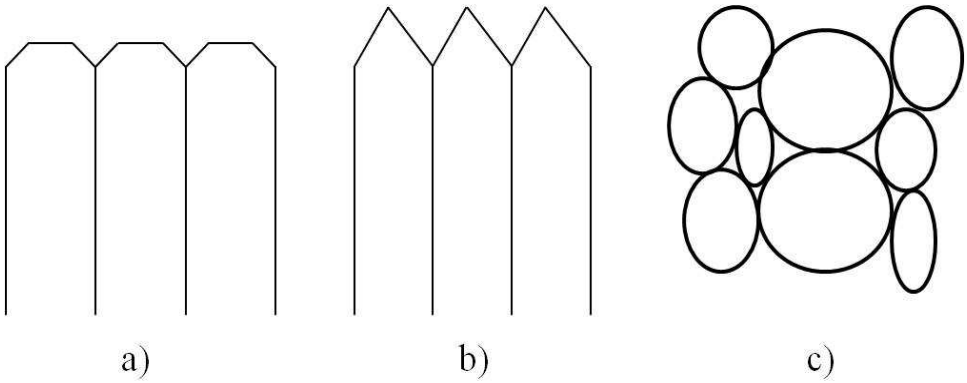
2.5 IZO İnce Filmler ve Kullanım Alanları

Çinko oksit, çeşitli bilimsel alanlarda kullanılan çok fonksiyonlu bir materyaldir. Çinko oksit bileşiğiyle hazırlanan filmler yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek geçirgenliğe sahiptir ve görünür bölgedeki yansımalarından dolayı, metal oksit yarıiletkenleri arasında en çok tercih edilen materyallerdir. ZnO, II-VI grubu bileşiği olup, oda sıcaklığında (300 K) geniş bir yasak enerji aralığına (E_g=3,1-3,4 eV) sahip, direkt band geçişli n-tipi bir yarıiletken malzemedir. ZnO bileşiğinin optiksel geçirgenliği görünür bölgede yaklaşık %80-%90 civarındadır ve elektriksel özdirenci 10^{-3}-10^{2} Ω-cm aralığındadır. Serbest taşıyıcı yoğunluğu 5×10^{17}- 3×10^{19} m^{-3}, mobilitesi 180 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ ve kırılma indisi 1,95-2,1 arasındadır (Major, et al., 1983; Gould and Rahman, 1981). Çinko oksit Şekil 2.2'den de görüldüğü gibi hegzagonal wurtzite kristal yapısına sahiptir ve örgü sabitleri a=3.249 Å ve c= 5.205 Å'dür (Hartnagel, et al., 1985). Tercihli yönelim alttaş yüzeyine dik doğrultudaki (002) doğrultusudur. Hegzagonal wurtzite kristal yapısında ve (002) tercihli yönelimine sahip filmlerin yüzeyleri genelde pürüzsüzdür. Filmin biriktirilme sürecinde (002) doğrultusundan başka doğrultularda da kristal yönelimleri oluşursa, yüzey pürüzlülüğü ortaya çıkabilir.



Şekil 2.2 Hegzagonal wurtzite kristal yapısındaki ZnO.

Şekil 2.3a ve b'de c-eksenin alttaşa dik ya da paralel olması durumları gösterilmektedir. c-ekseni alttaşa paralel olduğunda, hegzagon yüzeyler sebebiyle (110) gibi textured yüzeyler oluşabilir (Şekil 2.3b). Polikristal bir film eğer granüler kristal yapısına sahipse (Şekil 2.3c) yüzey yine pürüzlü olur. Granüler yapının sebebi, atomların filmin biriktirildiği yüzeye düşük mobilite ile gelerek, kristallerin farklı doğrultularda yönlenmesine yol açmalarıdır. Bu sebeple pürüzlü yüzey, farklı ebat ve şekilli kristaller topluluğudur.



Şekil 2.3 ZnO filmler. Soldan sağa doğru c-ekseni alttaşa dik, c-ekseni alttaşa paralel ve granüler yapı.

ZnO ince filmlerin çeşitli optoelektronik devrelerde kullanılabilmesi için yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmaları gerekmektedir. Bunun için, ZnO ince filmler ısıl işleme tabi tutularak veya içerisine daha büyük değerlik elektronuna sahip In^{+3}, Al^{+3} ve Ga^{+3} gibi üçüncü bir element katkılanarak elektriksel iletkenliğin değişmesi sağlanabilir. Katkılanmamış ve katkılanmış ZnO filmlerin toksit olmaması, düşük maliyetli, ucuz ve doğada bol miktarda bulunan elementleri içermesi, kolay işlenebilir ve düşük direnç değerlerine sahip olması, SnO_2 ve ITO gibi malzemelere alternatif gösterilmesine sebep olmaktadır.

ZnO kullanılan optoelektronik aletlerin yapımında yüksek kaliteye sahip hem n-tipi hem de p-tipi malzemeler geliştirmek gereklidir. Fakat kristal ZnO doğal olarak n-tipidir ve katkılama yapılarak p-tipi yapmak oldukça güçtür. ZnO'nun içindeki doğal kusurlar ve III. grup elementleri kullanılarak yapılan katkılamalar ile ilgili birçok araştırma vardır (Bian, et. al., 2004; Majumde, et. al., 2003; Nunes, et. al., 2000; Nunes, et. al., 2002). Fakat günümüzde hala, iyi kalitede p-tipi ZnO üretecek güvenilir bir metot yoktur (Kavasoğlu, 2006).

İndiyum; zehirli, az bulunur bir malzeme olmasından dolayı pahalıdır. Hemen hemen aynı performansı sağlayan katkılı ZnO filmleri, Zn' nin bol, ucuz ve zehirsiz olmasından dolayı uygulanabilir bir alternatiftir. IZO filmleri, indiyum katkılanmasıyla kuvvetli bir fotoiletkenlik gösterir. İnce filmler için durum yoğunluğu, tuzak konsantrasyonu ve gevşeme zamanı Laplace dönüşüm metodu ile hesaplanır ve bu parametreler, indiyumun katkılama seviyesiyle değişir. İndiyum ile katkılanan ZnO ince filmlerinin elektrik ve optik özelliklerindeki değişim katkılamanın önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

İndiyum çinko oksit (IZO), mükemmel optik geçirgenliğe, yüksek kimyasal dayanıklılığa, termal kararlılığa ve düşük sıkıştırma gerilimine sahip olduğundan büyük ilgi çekmektedir. Üçlü bileşik olan In_2O_3-ZnO (IZO) filmi, ITO filmi ile karşılaştırıldığında yüksek optik geçirgenliğe, daha pürüzsüz bir yüzeye ve yüksek aşındırma oranına sahip olduğundan umut verici bir malzeme olarak gösterilmektedir. Bu filmler, optik geçirgenliğe ek olarak, iyi elektriksel iletkenlikte sergilerler. Bu karakteristiklerin birleşmesi sonucu, çinko oksit ve indiyum çinko oksit ince filmlerini optoelektronik cihaz uygulamaları için (SIS güneş pilleri, polimerik LED gibi) önemli hale getirir. ZnO ve IZO ince filmlerinin belirgin özellikleri arasında daha yüksek saydamlıkta olmaları, elektriksel iletkenlikleri, termik kararlılıkları, dayanıklılıkları, kolaylıkla aşındırılmaları, H plazmasına en iyi direnç göstermeleri ve en düşük sıcaklıklarda depolanmaları yer almaktadır. Böyle özellikleri sergileyen IZO ince filmleri, cam veya esnek tabanlar üzerine üretilerek anahtar kanal materyali olarak saydam ince film transistörlerin gelişiminde rol almaktadır. Hemen hemen bütün ülkeler, SİO malzemeler ile ilgili yeni alternatif malzemeler geliştirmek için yeni

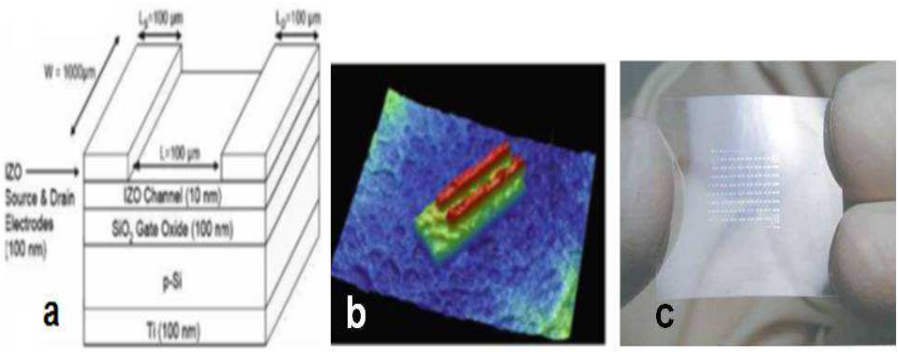
programlar başlatmışlardır. Bütünüyle ele alındığında teknolojik gelişmelerin temel hedefi, düşük özdirenç ve yüksek saydamlıkta malzemelerin geliştirilmesidir.

Son zamanlarda, yeni SİO malzemesi olan IZO filmleri üzerine yapılan araştırmalarda; elektriksel özdirenç değeri 10^{-4} Ω-cm den daha düşük olduğu, yüksek mobiliteye (50 cm^2/Vs) sahip olduğu, taşıyıcı yoğunluğunun 10^{20}-10^{21} olduğu, görünür spektrumunda % 90 dan daha yüksek geçirgenlikte olduğu ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu bulunmuştur. IZO ince filmlerinin yasak enerji aralığının 3,0 ve 3,16 aralığında değiştiği bulunmuştur. IZO ince filmlerinin kırılma indisi değeri ise 1,70-2,0 civarındadır. Ayrıca, indiyum katkılı ZnO ince filmlerinde katkılama oranı arttıkça kırılma indisi değerinin azaldığı görülmüştür. 100 ile 1400 ^0C sıcaklığında In_2O_3-ZnO kristal fazları ise Moriga et al. tarafından tanımlamıştır. Ramamoorthy et al.' un ilk hedefleri, IZO ince filmlerini pulslu lazer depolama tekniği ile elde ederek üretilen filmlerin mikroyapısını, optimum büyütme koşullarını, katkılama oranını, taban etkisini ve taban sıcaklıklarını araştırmak olmuştur. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar sonucunda IZO ince filmlerinin yapısının taban sıcaklığına ve özel depolama tekniklerine de bağlı olduğu ortaya koyulmuştur.

IZO filmlerinin kalınlığa bağlı mikroyapısı, elektriksel ve optiksel özellikleri Major et al. tarafından çalışılmıştır. Oksijen yüzünden oluşan tuzak durum yoğunluğu, film kalınlığına bağlı olan taneciklerin yönelmesine bağlı olarak bulunmuştur. Aynı zamanda, elektriksel özdirencin, oksitlenme ve tavlama ile değiştiğini öne sürmüşlerdir. Vakum ortamında yapılan tavlama işleminde, hava ve oksijen etkisi araştırılmıştır. ZnO filmleri, hava/oksijen ortamında tavlandığı zaman özdirenç büyüklüğü beş katı kadar olan en büyük değişimi sergilemiştir. Halbuki IZO filmleri, vakumda ve hava/oksijen ortamında tavlandığı zaman çok az değişim göstermiştir.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, saydam yarıiletkenler ve onların aktif cihaz uygulamaları üzerine çeşitli bilgiler verilmektedir. Özellikle saydam ince film transistörlerinin (TFTs) üretimine yönelik çalışmalar yayımlanmaktadır (Şekil 2.4). Elektronikte devrim yapan malzemelerden bir tanesi de IZO malzemesidir ve geleneksel yarıiletkenler ile karşılaştırıldığı zaman böyle malzemeler özel elektriksel özellik

gösterirler. Bu tür malzemeler sayesinde TFTs teknolojisi bir adım daha ileriye götürülebilir veya endüstriyel uygulamalarda amorf oksit teknolojisinin daha fazla gelişmesine olanak sağlanabilir. Ayrıca IZO ince filmleri, ince film transistör (TFT)-LCD veya organik LED için ve özellikle saydam elektrot için yeni bir aday olarak düşünülmektedir (Şekil 2.4). Sun and Kwok and Manifacier tarafından da belirtildiği gibi IZO ince filmleri; pencere camı elektrot kollektör tabakası olarak, yansıma önleyici (AR) kaplamalarda, düz panel monitörlerde, Hetero-birleşimde, fotoelektro kimyasal (PEC) güneş pillerinde, polimerik LED' lerde, optoelektronik heteroyapı aletlerinde, yüksek sıcaklık ve yüksek güç işlem aletlerinde, MOS, MIS, SIS aletlerinde, nano-elektroniklerde, nanoişlemci teknolojisinde kullanılmaktadır. Ayrıca, Eberspacher et al., Schroder, Loferski tarafından çalışılan enerji depolayan camlarda, dikiz aynalarında, buzlu camlarda, düşük özdirençli pencerelerde, cam dokunuşlu kontrol panellerinde, Suzuki et al. and Gordon tarafından öngörülen gelecek neslin görünmez güvenlik devreleri gibi birçok uygulama alanında IZO ince filmleri yer almaktadır (Ramamoorthy, et al., 2001).



Şekil 2.4 Si alttaş üzerine üretilen IZO tabanlı TFT a) şematik diyagramı, b) yapısı ve c) PET alttaş üzerine büyütülen saydam ince film transistörü (TFT) (Ginley, 2010).

IZO filmleri, ITO filmleri ile yer değiştirebilecek potansiyele sahip malzemelerden birisidir. Philips et al. IZO filmlerinin kristal yapısının ITO filmlerine

göre daha kolay kontrol edilebilir olduğunu, daha iyi aşındırma özelliğine sahip olduğunu ve daha büyük iş fonksiyonuna sahip olduğunu belirtmiştir. IZO filmleri için kristallenme sıcaklığı, 300 ^{0}C civarındadır. Eğer işlem sıcaklığı 300 ^{0}C nin altına düşerse IZO filminin amorf olabileceği belirtilmiştir. Düşük depolama sıcaklığı kullanılarak düşük özdirençte, yüksek geçirgenlikte, yüksek aşındırma oranı ve amorf yapıdaki IZO filmlerinin mükemmel düzgün yüzeyli olması kolaylıkla hazırlanabilir. Ayrıca, tane sınırları olmadan yani düzgün bir yüzeyin olması hem arayüz saçılmasını azaltır hem de elektron geçişlerinin artmasını sağlar. Bu yüzden, amorf IZO filmleri, yüksek kaliteli saydam iletken elektrotlar için ve OLED ve esnek görüntüleme cihazlarında uygulama alanı bulan en iyi adaydır (Jung, et al., 2003).

Malzemelerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için ince film depolama tekniklerinden kimyasal veya fiziksel tekniklerinden hangisi olursa olsun depolama teknikleri oldukça dikkat çekici olmuştur. Yüksek kaliteli filmler elde etmek için, hem depolama parametrelerini hem de üretim sonrası ince filmin özelliklerini ortaya çıkaran sonuçlar arasındaki ilişki ayrıntılı olarak çalışmak oldukça önemlidir. IZO filmlerinin üretiminde yaygın olarak elektron demetli buharlaştırma, Craciun et al. tarafından da belirtildiği gibi RF magnetron sıçratma, düşük basınçlı metal organik kimyasal buhar depolama, moleküler beam epitaxy (MBE), Ramamoorthy et al.' un vurguladığı gibi pulslu lazer depolama (PLD), lazer moleküler beam epitaxy (L-MBE), jet buhar depolama, atomik tabaka epitaxy (ALE), atomik basınç kimyasal buhar depolama (APCVD), spray pyrolysis gibi çeşitli üretim teknikleri kullanılmıştır. Bununla birlikte IZO filmlerinin elde edilmesi ve karakterizasyonu üzerine yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır (Ramamoorthy, et al., 2001).

2.6 AZO İnce Filmler ve Kullanım Alanları

Daha öncede söylendiği gibi indiyum; zehirli, az bulunur ve bu yüzden de pahalıdır. Bu ciddi problemin çözülebilmesi için, alternatif SİO malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. ITO, SnO_2 ve ZnO'ya göre daha pahalıdır ve doğada In'un 0,1 ppm, Sn'nun 40 ppm ve Zn'nun 120 ppm miktarlarında bulunduğu gözönüne

alındığında, AZO (Al katkılı ZnO) alternatif bir SİO malzeme olarak önerilmektedir. Bundan başka, Zn'nun zehirli olmaması ve AZO'nun özdirencinin son yıllarda ITO malzemeninkiyle karşılaştırılabilir düzeye ulaşması sebebiyle AZO tercih edilen bir SİO malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Safsızlık katkılı ZnO filmlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir.

Özdirenç, taşıyıcı konsantrasyonu ve Hall mobilitesi açısından en iyi sonuçları yüksek alttaş sıcaklıklarında lazer biriktirme (pulsed laser deposition, PLD) tekniği ile büyütülen filmler vermektedir. Son zamanlarda PLD tekniği ile elde edilen AZO filmlerde de 10^{-5} Ω-cm mertebelerinde özdirenç elde edildiğinin rapor edilmesiyle, safsızlık katkılı ZnO ince filmlerde ilk defa ITO ile aynı mertebelerde özdirenç değerine ulaşılmıştır. PLD tekniği ile büyütülen ITO ve AZO filmlerin özdirençleri magnetron sıçratma tekniği ile büyütülen filmlerin özdirenç değerlerinden daha düşüktür. Biriktirme boyunca oksijenin filmin yüzey ve tane sınırlarında adsorbe edilmesi sebebiyle safsızlık katkılı ZnO filmlerin hazırlanması ITO filmlerin hazırlanmasından daha zordur. İletkenliği ve optik geçirgenliği yüksek, taşıyıcı konsantrasyonu 10^{21} cm^{-3} olan AZO filmlerin elde edilebilmesi için, büyütmenin yapıldığı atmosferin oksijen içeriğinin kontrol edilebildiği bir ortama ihtiyaç vardır (Minami, 2000).

1980'lerde özdirenci 10^{-4} Ω-cm olan ZnO filmler safsızlık katkılanarak elde edildiler. Bununla beraber $2x10^{-4}$ Ω-cm ve daha düşük özdirenç değerlerine, sadece Ga katkılı ZnO (GZO) ve AZO malzemelerinde ulaşılabildi. Genelde, safsızlık katkılı ZnO filmlerin elektriksel özellikleri biriktirme yöntemine ve film hazırlama parametrelerine çok bağlıdır. Özdirenci 10^{-4} Ω-cm mertebelerinde olan safsızlık katkılı ZnO filmler vakum ark plazma buharlaştırma (vacuum arc plasma evaporation, VAPE), metal organik moleküler demet birktirme (metal organic molecular beam deposition MOMBD) ve metal organik kimyasal buhar çöktürme (metal organic chemical vapour deposition, MOCVD), magnetron sıçratma ve PLD yöntemleriyle elde edilmişlerdir. Ark plazma kaynağı olarak Uratomoto kullanılan VAPE yöntemi, aktif-reaktif buharlaştırma (activated reactive evaporation, ARE) tekniğine benzer ve geniş alanlara yüksek hızlarda biriktirme yapılmasına olanak sağlaması sebebiyle ilgi çekmektedir. Al_2O_3'ün buhar basıncının ZnO'nun buhar basıncıyla karşılaştırıldığında çok küçük

olması, Al_2O_3'ün katkı malzemesi olarak kullanıldığı AZO filmlerin vakum buharlaştırma yöntemi ile elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Özdirenci 10^{-5} Ω-cm mertebelerinde olan AZO filmler PLD hazırlanmış olmalarına rağmen, geniş alanlara yüksek hızlarda biriktirme yapmak bu yöntemle mümkün değildir.

Zn'nun oksijen ortamında Sn veya In'a göre kimyasal olarak daha aktif olması, Zn'nun oksidasyonunun kontrolünü zorlaştırmaktadır. Genelde düşük özdirençli ITO ve safsızlık katkılı SnO_2 filmlerin, oksit hedef kullanılarak magnetron saçırma yöntemi ile büyütülmesinde O_2 gazının kullanılması gerekmektedir (Hartnagel, et. al., 1995). Buna karşılık AZO ve GZO filmlerinin magnetron sıçratma yöntemi ile elde edilmesinde oksijen gazına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Günümüzde özdirenci $2x10^{-4}-3x10^{-4}$ Ω-cm, kırılma indisi 2 ve optik geçirgenliği % 85'in üzerinde olan AZO ve GZO filmler magnetron sıçratma ve VAPE teknikleri kullanılarak 200 ^{0}C'nin üstündeki sıcaklıklarda elde edilebilmektedirler. İndirgeyici atmosfer bulunan ortamlarda, yüksek sıcaklıklarda ve hidrojen plazmasında, katkılanmış ZnO filmler ITO filmlerden daha kararlıdırlar (Minami, 1989). Buna karşın yüksek sıcaklıklarda ve oksijen miktarı yüksek atmosferlerde ITO filmler daha kararlıdır (Sato, 1993). İnce film güneş pillerinde kullanılmak üzere düzgün yüzeyli ZnO filmlerin, SnO_2 filmlerden daha düşük alttaş sıcaklıklarında elde edilebilmesi AZO filmlerin kullanımını çok daha avantajlı hale getirmektedir (Nakada, 1991; Minami, 1992). İnce film güneş pillerinde pencere malzemesi olarak AZO'nun kullanılmasıyla, ışığın güneş pili içinde tuzaklanması daha etkin bir şekilde sağlanarak güneş pilinin verimliliği arttırılabilir. Birçok araştırmacı AZO, GZO ve bor katkılı ZnO (BZO)'yu magnetron sıçratma, MOCVD ve CVD yöntemleri ile elde ettiklerini rapor etmişlerdir (Minami, 2000; Hu, et. al., 1992 a).

3. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) TEKNİĞİ

Yüksek vakumda (10^{-6} Torr) anot materyalinin plazmasının üretilebilmesi için 1983 yılında INFLPR (National Institute For Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest, Romania; Ulusal Lazer Plazma ve Radyasyon Fiziği Enstitüsü, Bükreş, Romanya)in alt grubu olan Düşük Sıcaklık Plazma Fiziği Grubu çalışanlarından Prof.Dr.Geavit MUSA ve arkadaşları tarafından Termiyonik Vakum Ark (TVA) adında yeni bir vakum ark tekniği geliştirilmiştir (Musa, et al., 1983). 25 yıllık araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda TVA tekniği ile yapılan çalışmalar, plazma destekli kaplama yapan teknikler arasında yerini almıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (ESOGU) Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği ve Teknolojileri Laboratuvarlarında 1998 yılından beri TVA tekniği ile ince film üretim çalışmaları devam etmektedir. ESOGU Plazma Fiziği ve Teknolojileri Laboratuvarlarında TVA tekniği ile bugün erime noktası yüksek materyaller (Re, B, C, Al_2O_3 gibi) ve çeşitli gazların plazmaları elde edilerek bu plazmalar yardımı ile homojen, pürüzsüz, saf ince filmler üretilebilmektedir.

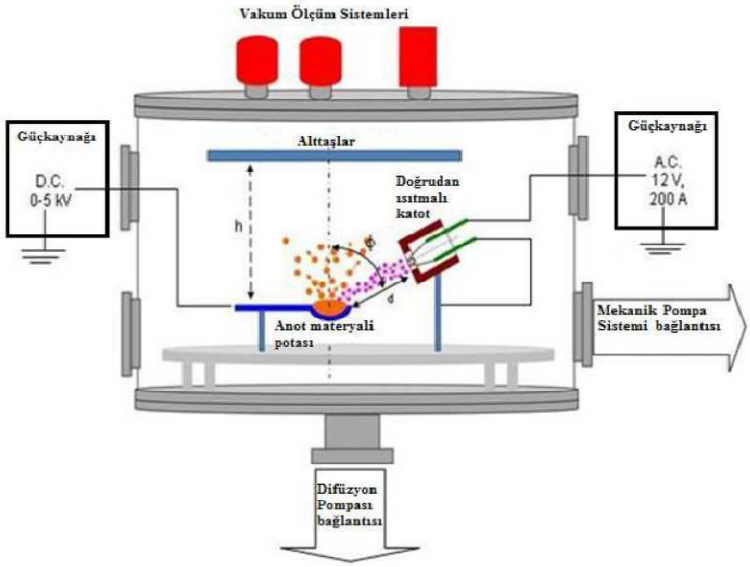
Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği; metal, seramik, yarıiletken gibi hemen hemen her materyalin plazmasını üretebilen bir tekniktir. TVA sisteminin vakum odası içinde, plazması oluşturulacak materyalin konduğu anot ve katot bulunur. Katottan yayınlanan elektronlar ve elektrotlar arasına uygulanan voltaj ile anot materyalinin saf, gaz karışımı ve makro-parçacık içermeyen, yüksek iyonlaşma dereceli plazması oluşturulur. TVA tekniği, pek çok yeni teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunlardan en önemlisi iyon-destekli kaplama tekniğidir. Anot materyali iyonları ile bombardıman edilerek üretilen kaplamalar; son derece düz, pürüzlülüğü düşük, yoğun ve yüksek tutunmalı kaplamalar olmaktadır. TVA ile yapılan karbon ve bor kaplamalarda, yapıların nano boyutta olduğu görülmüş ve bu TVA tekniğinin nano teknoloji uygulamalarında da kullanımına sebep olmuştur (Musa, et al., 2004).

TVA sistemi 10 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

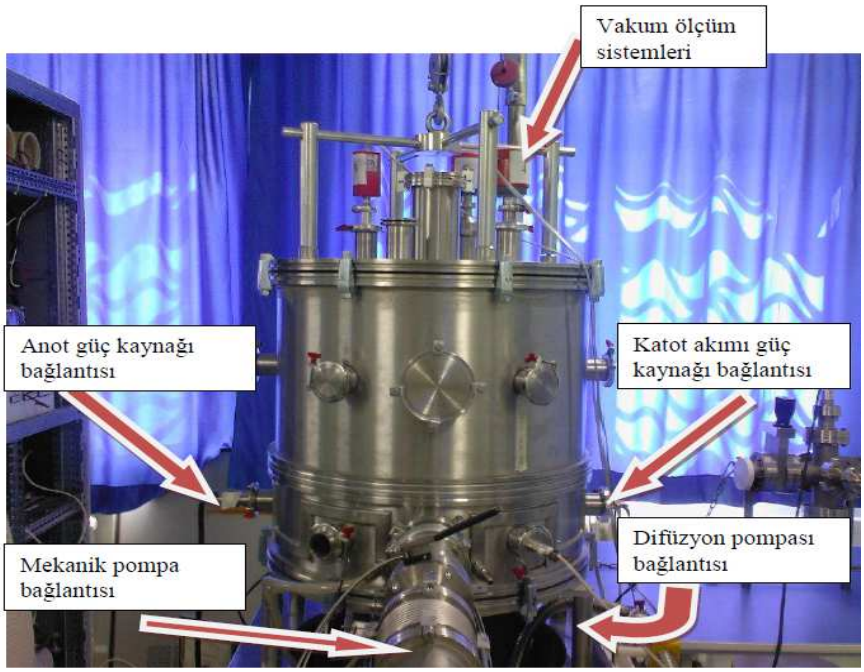
1. Vakum Odası,
2. Doğrudan ısıtmalı katot,
3. Anot materyali potası,
4. Katot akımı güç kaynağı,
5. Anot potansiyeli güç kaynağı,
6. Pompalama sistemi,
7. Vakum ölçüm sistemleri,
8. Ampermetreler ve Voltmetreler sistemi,
9. İnce film kalınlık ölçüm sistemleri,
10. Soğutma sistemleri.

3.1 TVA Sistemi

İnce film üretimi için kullandığımız TVA sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.1' de ve fotoğrafı Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 TVA sisteminin şematik çizimi (Balbağ, 2009).



Şekil 3.2 TVA sisteminin fotoğrafı (Özkan, 2010).

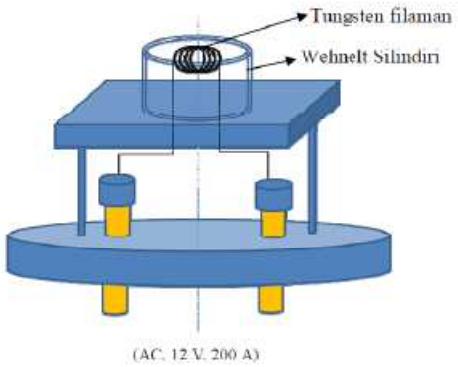
1. Vakum odası

TVA sisteminin vakum odası, 60 x 60 cm boyutlarında ve yaklaşık 10^{-9} Torr luk yüksek vakum değerlerinde de çalışabilecek şekilde paslanmaz çelikten özel olarak imal edilmiştir. Şekil 3.2' de fotoğrafı görülen sistemin ana merkezini oluşturmakla birlikte diğer bölümlerin bu sistemle bağlantıları sağlanmıştır.

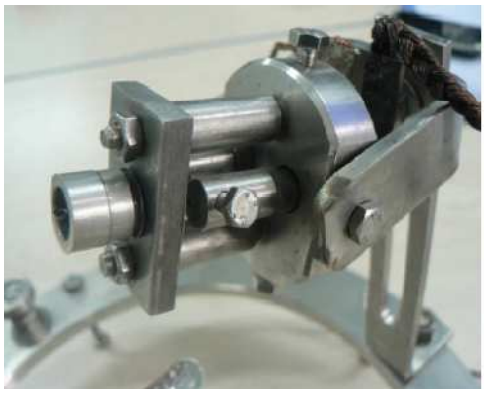
2. Doğrudan ısıtmalı katot

Doğrudan ısıtmalı katot, üzerinden akım geçirilerek elektron emisyonu sağlayan bir elektron tabancasıdır. Tungsten telden özel olarak yapılmaktadır (deneyler süresince tarafımızdan yapılmıştır). Oluşturulan bu elektron emisyonu bir Wehnelt silindiri yardımıyla plazması oluşturulacak olan malzemenin üzerinde odaklanacak şekilde gönderilir. Wehnelt silindirinin ucu ile materyal arasındaki mesafe anotla katot arasındaki uzaklığı ifade eder ve d ile simgelendirilir. Şekil 3.1' deki φ ise elektron tabancasından çıkan elektron demetinin doğrultusu ile kaplanacak malzemeden indirilen

düşey eksen arasındaki acıdır. φ ve d; TVA sisteminde önemli iki parametredir. Şekil 3.3' te doğrudan ısıtmalı katodun şematik çizimi, Şekil 3.4' te ise doğrudan ısıtmalı katodun fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Doğrudan ısıtmalı katodun şematik gösterimi.



Şekil 3.4 Doğrudan ısıtmalı katodun (elektron tabancası) fotoğrafı.

3. Anot materyali potası

Anot materyali potası, yüksek erime sıcaklığına sahip malzemelerden yapılmış bir potadır. Çalışma esnasında alaşım yapma olasılığına karşı çeşitli elementler için

uygun potalar kullanılması gerekir. Bu nedenle deneysel çalışmalarımızda erime sıcaklığı 3422 ^{0}C olan tungsten (wolfram) elementinden yapılmış potalar kullanılmıştır.

4. Katot akımı güç kaynağı

TVA daki deneysel çalışmalarda, 12 V - 200 A AC ayarlanabilir çıkış voltajlı (varyaklı) düşük voltajlı katot akımı güç kaynağı kullanılmıştır.

5. Anot potansiyeli güç kaynağı

Anot potansiyeli güç kaynağı olarak, DC, 0 – 5 kV ve 10 kW kapasiteli ayarlanabilir çıkış voltajlı (varyaklı) yüksek voltaj güç kaynağı kullanılmıştır. Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç kaynağı Şekil 3.5' teki fotoğrafta görüldüğü gibi TVA sistemi için aynı pano üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5 Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç kaynağı panosu.

6. Pompa sistemleri

Pompa sistemleri, Edwards EM40EH250 marka bir adet mekanik pompa ve yine Edwards Diffstack M100 marka bir adet difüzyon pompasından oluşmaktadır. Bu iki pompanın çalışması sonucunda vakum odasının basıncı 10^{-6} Torr' a düşmektedir. Mekanik pompa ile vakum odasının basıncı 10^{-4} Torr' a kadar inmekte, daha sonra difüzyon pompasının devreye girmesiyle de vakum odasının basıncı 10^{-6} Torr' a ulaşmaktadır. Deneyler bu vakum düzeyinde gerçekleştirilmiştir.

7. Vakum ölçüm sistemleri

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

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 (Şekil 3.6a). Şekil 3.6b'de ise flaman akımını kontrol etmek amacı ile kullanılan bir askı ampermetre fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3.6 Ampermetre ve voltmetre sistemleri a) Anot katot arası iyon akımı ve ateşleme potansiyeli ölçümü için ampermetre ve voltmetre, b) Flaman akımını kontrol etmek için kullanılan askı ampermetre.

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.

10. Soğutma sistemleri

Soğutma sistemleri, difüzyon pompasının üzerinde bulunan su soğutma ünitesi ve vakum odasının dış yüzeyinde bulunan su soğutma ünitesi, sistemlerinden oluşmaktadır.

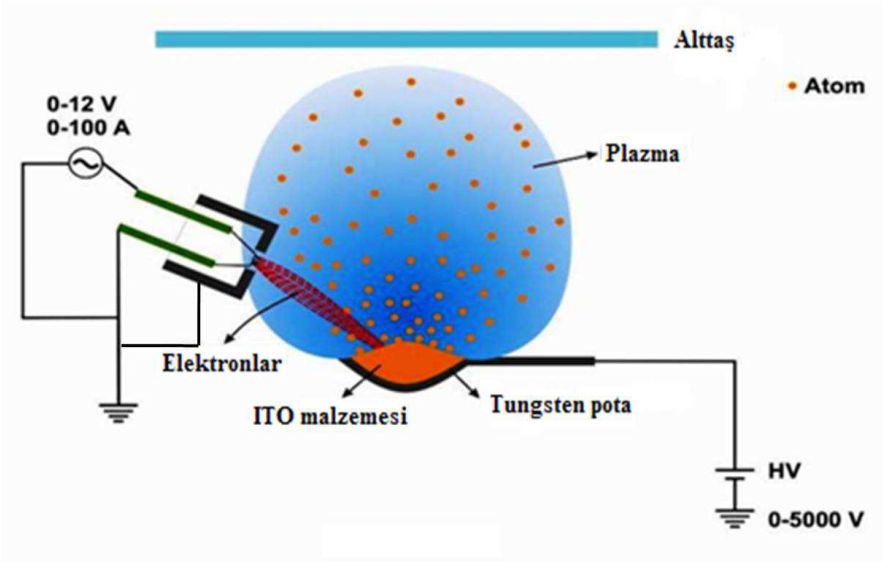
3.2 TVA Deşarj

Termiyonik Vakum Ark (TVA) tekniğinde; dışarıdan ısıtılan katottan yayınlanan elektronlar, anot içine yerleştirilen materyal üzerine yüksek voltaj yardımıyla bombardıman edilerek, anot materyalinin ısınarak eriyip buharlaştırılmasıyla deşarj oluşturulmaktadır yani anot materyalinin plazması oluşturulmaktadır.

TVA deşarj, gazlarda meydana gelen ark deşarjlardan farklıdır. Gazlarda meydana gelen deşarjlarda gaza aktarılan elektriksel enerji, yalnızca gazın iyonlaşmasını ve iyon kayıplarını korumak için harcanırken, TVA'da deşarja aktarılan elektriksel enerji, hem arkın oluşacağı gazı hem de bu gazın iyonlarını aynı anda üretmek için harcanır. Bununla birlikte TVA deşarjın oluşması için gereken koşullar, deşarj oluştuktan sonra da korunmak zorundadır. Başka bir deyişle TVA, deşarj boyunca hem deşarjın oluşacağı gazı hem de bu gazın iyonlarını oluşturmaktadır.

TVA deşarjın oluşturulması için katot filamenti, AC düşük voltaj güç kaynağı ile istenilen ısıtma akımında ısıtılır ve böylece katottan termoelektron emisyonu sağlanır. Burada katodun bir ucu, düşük voltaj güç kaynağına bağlı iken diğer ucu elektrotların monte edildiği tablaya dolayısıyla vakum odasının üzerine bağlanmıştır. Böylece vakum odasının kendisi toprak olarak kullanılmıştır. Katot filamentinden elektron emisyonu sağlandıktan sonra anot ile katot arasına yüksek voltaj uygulanılır. Anot ile katot arasına

yüksek voltajın uygulanması ile katottan yayınlanan elektronlar, anot üzerine hızlandırıldığı gibi anot üzerine odaklanmış da olmaktadır. Bu, katot filamentinin içine yerleştirildiği Wehnelt silindirinin toprak potansiyelinde tutulması nedeniyledir. Hızlandırılarak anot üzerine odaklanan elektron bombardımanı nedeniyle anot içindeki materyal üzerine enerji aktarılır ve bu enerji ile anot materyali ilk olarak ısınır. Uygulanan voltajın arttırılmaya devam edilmesi ile anot içindeki materyalinin erimesi ve daha sonra kaynayarak buharlaşması sağlanır. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse, elektrotlar arası uzayda anot metali atomlarının belirli bir yoğunluğunda ve uygulanan voltajın uygun değerinde, katottan yayınlanan elektron emisyonunun devam etmesi sebebiyle anot metali buharlarında parlak bir deşarj oluşur. Bu anda elektrotlar arasındaki gerilim aniden düşer akım ise birden yükselir. Oluşan anot materyalinin buharının plazması anot üzerinden sürekli bir şekilde vakum odası duvarlarına doğru yayılır. Bu durumda vakum içerisinde uygun bir yere yerleştirilen alttaşlar yada herhangi bir malzeme anot materyali cinsinden kaplanacaktır.



Şekil 3.7 TVA' da gaz haline geçen materyalin elektron bombardımanın devam etmesiyle plazma haline geçmesi (Elmas, 2013 a).

TVA sistemi ile şimdiye kadar birçok materyalin (bakır, gümüş, alüminyum, kalay, altın, nikel, alümina, zirkonyum oksit, bor, karbon, renyum, molibden, tantalyum, tungsten, berilyum gibi) plazması üretilmiş ve bu materyallerin ince filmleri ya da kalın kaplamaları yapılabilmiştir.

3.3 TVA Tekniği ile Üretilen İnce Filmlerin Özellikleri

TVA tekniği ile yüksek vakum ya da çok yüksek vakum şartlarında çalışmak mümkündür. Bu ise kaplamanın kalitesini arttırarak oksitlenme veya başka gazlardan filme gelebilecek etkileri en aza indirmektedir. Diğer tekniklerin bazılarında yüksek vakum şartlarına ulaşılamamaktadır. TVA tekniğinde kaplama yaparken bir tampon gaza ihtiyaç duyulmamaktadır. Böylelikle diğer tekniklere göre çok daha iyi vakum şartlarında ve kullanılan gazın safsızlıklarına rastlanmadan sadece kaplama yapılacak materyalin yüksek saflıkta kaplamasının yapılması mümkün hale gelmektedir (Özkan, 2010).

TVA tekniği ile kaplamalarda, elektrotlar arası mesafe, açı ve katot sıcaklığı, filaman akımı (I_f) ve voltaj değiştirilerek, kaplanacak malzemenin iyonlarının enerjileri kontrol edilebilmekte ve yüksek iyon enerjileri elde edilebilmektedir. İyon enerjilerinin kontrolü çok önemlidir. Bu sayede ise elde edilecek ince filmlerde, kaplanacak olan materyalin iyonlarının filme tutunmasını arttırarak filmin düşük pürüzlülükle kaplanmasını sağlamaktadır. Diğer kaplama tekniklerinde bu tutunma oranı özellikle termal buharlaştırma tekniğinde oldukça düşüktür. Dolayısıyla termal buharlaştırma ile üretilen ince filmlerin yüzey pürüzlülükleri yüksek olmaktadır. TVA tekniği ile herhangi bir materyal depolanabilmektedir. Erime noktası çok yüksek olan refraktor materyaller ya da seramikler de dahil olmak üzere materyaller TVA tekniği ile kolaylıkla depolanabilmektedir. Diğer kaplama tekniklerinde her materyali depolamak mümkün değildir. TVA tekniği ile alttaş olarak plastikte dahil herhangi bir taban kullanılabilmektedir. Bağımsız güç kaynakları ile eşzamanlı olarak birden fazla materyalin depolanması da TVA tekniği ile gerçekleştirilebilir (Balbağ, 2009).

TVA sistemi ile bugüne kadar üretilen ince film kaplamaların incelenmesi sonucunda aşağıdaki özellikler bulunmuştur;

- ✓ Üretilen ince filmlerin yüksek saflıklarda olduğu (sadece kaplaması yapılacak materyalden ince filmler üretilebilmekte ve safsızlık atomları eser miktarlardadır) (Pat, et al., 2005; Pat, et al., 2010).
- ✓ İnce filmlerin yüzey tutunmalarının oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir ve bu tutunmaların TVA sistemi ile ayarlanabilmesi söz konusudur (Pat, et al., 2005). Bugüne kadar üretilen yarı iletken ince filmlerin yasak enerji aralıklarının tavlama sıcaklıkları ile çok küçük miktarlarda (ihmal edilebilir seviyelerde) değiştiği gözlenmiştir (Vladoiu, et al., 2003; Balbag, et al., 2010; Korkmaz, et al., 2012 a; Korkmaz, et al., 2012 b).
- ✓ TVA sistemi ile üretilen ince filmlerin yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğu gözlenmiştir (amorf suni karbon ince filmlerde yüzey pürüzlülüğü 0,7nm bulunmuştur) (Ekem, et al., 2008; Pat, et al., 2012). TVA ile üretilen ince filmlerin oldukça sıkı yapıda olduğu gözlenmiştir.
- ✓ TVA ile üretilen ince filmlerin TEM analizleri sonucunda üretilen ince filmlerin nano desenler şeklinde olduğu gözlenmiştir (Balbağ, et al., 2007; Musa, et al., 2006).
- ✓ TVA sistemi ile ayrıca çok yüksek erime sıcaklığına sahip olan refraktör metallerinde ince filmleri kolaylıkla üretilebilmekte ve bu materyallerin işlenmesi de gerçekleştirilebilmektedir (Surdu, et al., 2007; Musa, et al., 2007; Vladoiu, et al., 2007; Lungu, et al., 2006; Vladoiu, et al., 2006; Lungu, et al., 2005; Musa, et al., 2005; Lungu, et al., 2004; Musa, et al., 2004).
- ✓ TVA plazmalarının iyon enerjileri kontrol edilebildiğinden dolayı ince filmin alttaş üzerine difüzyon derinliği isteğe bağlı olarak değişebilmektedir (Vladoiu, et al., 2003).
- ✓ TVA ile kaplama yapılırken ince film depolama oranı ayarlanabilmektedir (Musa, et al., 1984;).
- ✓ TVA sistemin en önemli özelliklerinden bir tanesi ise istenilen alttaşlar üzerine her türlü kaplamaların yapılabilmesidir. Örneğin; bugüne kadar çelik, silisyum, BK7 camı, mikroskop camı, krom ince filmler, NaCl kristali, bakır, alüminyum

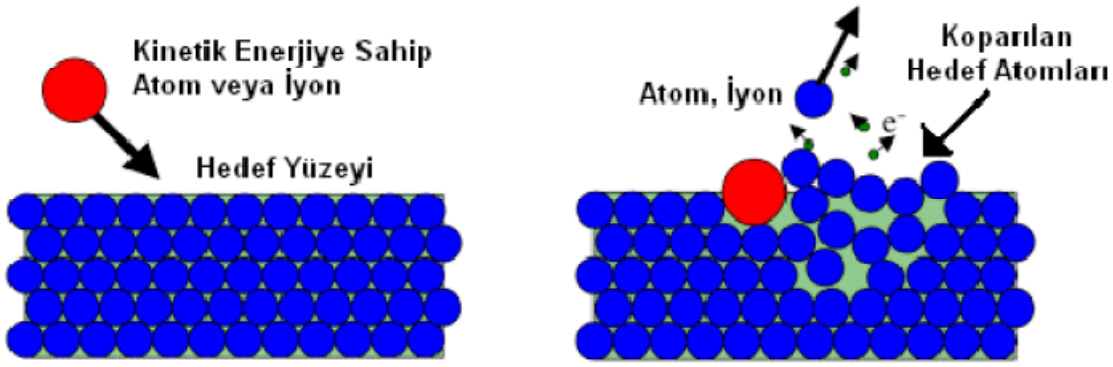
ve plastik gibi çeşitli alttaşlar üzerine de kaplamalar gerçekleştirilmiştir (Balbağ, et al., 2012; Özkan, et al., 2012; Elmas, 2012 a; Çetin, 2013).

- ✓ Kullandığımız TVA ince film üretim sistemi %80 oranında yerli yapımdır. Yerli imkânlarımızla tasarlayıp, gerçekleştirdiğimiz parçalar vakum odası, elektriksel güç kaynakları, elektrotların tasarlanması ve geometrileridir. Böylece bu sistem için yurt dışına bir bağımlılık söz konusu değildir.

4. SIÇRATMA TEKNİĞİ

Sıçratma olayı vakum altında, ince film kaplamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, ince film kaplama yöntemlerinden fiziksel kaplama yönteminin (PVD) bir alt grubu olarak bilinir.

Belirli enerjiye sahip parçacıkların bir hedef üzerine çarpması ile yüzey atomlarının ya da moleküllerinin serbest hale gelmesi olayına sıçratma (sputtering) denir (Şekil 4.1). Bombardıman pozitif iyonlarla yapılıyorsa katot sıçratması adını alır. Saçtırılan parçacıklar yüzey kaplamak üzere anoda yerleştirilen alttaş üzerinde yoğunlaşırlar.



Şekil 4.1 Sıçratma olayının gelişimi (Çalışkan, 2009).

Sıçratma olayı ilk olarak 1852 yılında Grove tarafından DC gaz yük boşalması tüpünde gözlenmiştir. Yük boşalması tüpünün katot yüzeylerinin gaz yük boşalması içinde enerjik iyonlar tarafından saçtırıldığını keşfetmiştir ve katot malzemeleri yük boşalması tüpünün iç duvarlarına kaplanmıştır (Wasa and Hayakawa, 1992). Malzeme işlemedeki yetersizlikler ve birçok gelişmenin bu yüzyılda geliştirilmesi gibi nedenler sıçratma tekniğini yeni bir teknik olarak görmemizi sağlar. Ancak ilerleyen teknoloji ve

ince film kaplama kullanım alanının gelişmesi ve değişmesi, düşük ve yüksek basınçlı sıçratmayı, hem de üretim amaçlı bir kaplama tekniği haline getirmiştir. Katot sıçratmasında hedefe çarpan parçacıklardan kristal yapıya momentum aktarımı vardır. En basit durumda, momentum, iyondan direk yayınlanan atoma aktarılır. Ancak bu tür sıçratma toplam sıçratma miktarına çok az katkıda bulunur ya da hedef malzeme içinde daha içerilere sızabilir ve momentum bir atomdan diğer atoma aktarılır. İyonun madde içinden geçişi sırasında yeri değişen atomlar ve moleküller vurulmuş atomlar olarak adlandırılır. Bunlardan bazıları yüzeye dağıtılıp kopartılan atomları oluştururlar ve başka vurulmuş atomlar oluşturacak kadar yeterli enerjiye sahip olabilirler (Rancourt, 1987).

Sıçratma işleminin etkin olabilmesi için bombardıman parçacıklarının atomik boyutlarda olması gerekmektedir. Elektron gibi parçacıklar gerekli momentumu taşıyamayacak kadar küçük oldukları gibi, büyük parçacıklar da tek bir atom ya da moleküle etkileşim yapamayacak kadar büyük olabilirler (Ohring, 2002). Bombardıman esnasında kimyasal tepkime olmaması için asal gazlar tercih edilir. Ağır bir asal gaz yüksek bir sıçratma verimine neden olur. Radon ağır, fakat radyoaktiftir. Periyodik tablo incelendiğinde asal gaz olarak, gerek düşük iyonlaşma potansiyeli, gerek ucuzluğu nedeniyle ve saf halde bulunabilirliği açısından çoğunlukla Argon gazı kullanılır. Bombardıman parçacıklarının yüklü ya da yüksüz olması aslında önemli değildir, ancak yüklü parçacıklar elektrik alan altında kolayca enerjik hale getirilip yönlendirilebilirler, yüksüz parçacıkları hızlandırmak ve yönlendirmek kolay değildir. Bu nedenle sıçratma işlemi argon iyonlarıyla yapılır. Sıçratma olayında önemli faktörlerden biri de malzemelerin sıçratma verimidir. Sıçratma verimi, iyon bombardımanından dolayı hedef yüzey atomlarının sıçratma oranıdır ve her gelen iyona karşılık saçtırılan yüzey atomu sayısıdır. Sıçratma verimi gelen parçacıkların enerjisi, hedef malzemeleri, gelen parçacıkların açıları ve hedef yüzeyinin kristal yapısı faktörlerinden etkilenir (Wasa and Hayakawa, 1992).

Hedef yüzeyine gelen iyonun hedeften atom sıçratması için bir eşik enerjisi vardır. Eşik enerjisi, iyonların düşük enerji aralığında sıçratma yapabilmesi için minimum gerekli enerjidir. Her hedef malzemesine ait eşik enerjisi vardır. Eşik enerjisi

katot yüzeyinin kirliliğine çok duyarlıdır. Ayrıca gelen iyonların açısı ve katot malzemesinin kristal yönelimi eşik değerlerini değiştirmektedir.

Sıçratma için istenen basınç ideal olarak düşük olmalıdır. Basıncın yüksek olması durumunda saçtırılan atomların ortalama serbest yolu kısalır, bu enerjilerinin azalması ve yönlerinden sapma olasılığının yüksek olması anlamına gelir. Alttaş yüzeyine çarpan atomların enerjilerinin yüksek ve yönlerinin kontrol edilebilir olması kaplama tekniğinin bir özelliğidir ve kaplama veriminin artması demektir. Sıçratma sisteminin yeterince verimli olması için çalışma odasının basıncının 1-100 mTorr arasında olması tercih edilir. Sıçratma tekniğinin getirdiği en büyük kazanç ise, diğer yöntemlere göre daha homojen ve yüzey düzgünlüğü daha iyi kaplamalar elde edilebilmesidir. Çünkü kaplanan atomlar daha enerjiktir.

4.1 Radyo Frekansı (RF) ve Doğru Akım (DC) Sıçratma Tekniği

RF sıçratma tekniği iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin kaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Hedef yüzeyindeki yük birikimi, iletken olmayan malzemelerin saçtırılmasında DC metotların kullanımını kısıtlamaktadır. Fakat RF güç kaynağının sıçratma tekniklerinde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte iletken hedef kullanma mecburiyeti ortadan kalkmıştır. Her ne kadar RF sıçratma tekniğindeki kaplama hızı, DC sıçratmaya oranla daha düşük olsa da yalıtkanların RF sıçratma yöntemiyle daha iyi bir şekilde kaplanabilmeleri bu tekniğin geniş bir alanda kullanılabilmesine olanak sağlamıştır.

DC sıçratma sisteminin iyon oluşturma olayı metalik elektrotlarla yapılır. Kaplama malzemesi olan hedef (katot) yalıtkan ise saçtırılan iyonların hedefin yüzeyinde birikmesi sonucu oluşacak yüzey yükü, bombardıman olayının devam etmesini engelleyecektir. Doğru akım yerine alternatif akım uygulanırsa hedefin kutuplanması sürekli değiştiği için iyonlarla ve elektronlarla sıralı olarak bombardıman edilecektir. Alternatif akım MHz veya daha yüksek frekanslıdır. Genelde kritik bir değer olmamasına karşın 13,56 MHz ya da katlarını üreten RF kaynakları kullanılır.

13,56 MHz (10-20 MHz) çalışma frekans aralığı, endüstriyel uygulamalar için Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından ayrılan frekans aralığıdır. Böylece hedef yüklenmesine engel olunması için hedef sırayla önce iyonlarla sonra elektronlarla bombardıman edilir. Kullanılan frekansın arttırılması hedefteki iyon akımını arttırır. RF sıçratma sisteminde, güç kaynağıyla boşalma bölgesi arasında bir empedans uyuşum (impedance-matching network) bağlantısı gereklidir. Empedans uyuşumu olmaz ise, geri yansıyan güç, kaynağa zarar verebilir. RF sıçratma sisteminde çalışma basıncı 1 mTorr' un üzerinde olmalıdır, böylece çalışma bölgesi içindeki RF elektrik alanı, gaz molekülleri ile ikincil elektronlar arasındaki çarpışma olasılığını arttırır (Wasa and Hayakawa, 1992).

RF sıçratmanın en önemli kullanım alanları SiO_2, Al_2O_3, BN, Si_3N_4 gibi yalıtkan malzemelerin kaplanmasıdır. Birçok yalıtkan bileşik formdadır. Fakat bunların hedeften alttaşa gerçek sitokiyometrelerini koruyarak taşınması nadiren gerçekleşmektedir. SiO_2 hedefi örneğinde oksijen kaybını azaltmak dolayısıyla da hedefin sitokiyometresini koruyabilmek için ortama oksijen gazının verilmesi gerekebilir. Fakat bu durum sıçratma hızının azalmasına sebep olur. Ayrıca hedefteki RF akımı dielektriği ısıtır. Eğer malzeme RF frekansına karşı dayanıksız bir malzemeyse, ısı oluşumu hedefin zarar görmesine neden olacaktır.

Sıçratma ile kaplamada en basit yöntem, alttaş-hedef ikilisini anot-katot gibi hazırlayıp doğru akım sürmektir. Doğru akım sıçratma sistemi, bir çift düzlemsel metal elektrotlardan oluşur. Elektrotlardan biri katot, diğeri ise anot olarak düzenlenmiştir. Katodun üst yüzeyine hedef malzeme yerleştirilirken, alt yüzeyine iyon bombardımanı sonucunda oluşan ısınmayı engellemek için genellikle su soğutması uygulanır. Katoda negatif yüksek DC voltaj uygulanır. Hedef genellikle metal gibi iletken malzemelerdir. Alttaşlar anot üzerine yerleştirilir. Genellikle çalışma bölgesi özel bir basınç değerine kadar (~0,01 Torr), Argon gazı ile doldurulur. Anot veya alttaş topraklanabilir, pozitif veya negatif olarak "bias" yapılabilir, ısıtılabilir, soğutulabilir veya bu işlemlerin kombinasyonları şeklinde uygulanabilir. Katoda negatif kV'luk DC voltaj uygulandığında, elektrotlar arasında oluşan elektrik alanla ortamda bulunan elektronlar ivmelenirler ve Argon atomlarıyla çarpışarak, Argon iyonları ve daha çok elektron

oluşmasına neden olur. Böylece ortamda bulunan elektronlara, iyonlaşma sonucu oluşan ikincil elektronlar da eşlik eder. Bu Argon iyonlarının artması, verimin artması anlamına gelir. Elektrik alan, aynı zamanda Argon iyonlarını katot hedefe doğru yönlendirir. Hedef hızlandırılmış Argon iyonlarıyla bombardıman edilir ve hedef atomlarının bir kısmını yüzeyden saçtırırlar. Hedeften saçtırılan atomlar çarpışmalar sonucu gelişigüzel yönlerde hareket ederek, anot üzerindeki alttaşlar üzerinde yoğunlaşarak film oluştururlar. Bu teknikte, saçtırılan atom ya da molekülleri maksimum oranda alttaşa biriktirmek ve yüksek homojenlik sağlanması için alttaş-hedef ikilisinin eksenlerinin paralel, daha iyi kristalleşme sağlanması için ise birbirine dik olması gerekir. Alttaş üzerindeki ince film kaplama oranı, hedeften kopartılan parçacık miktarına, dolayısıyla elektrotlar arasına uygulanan bir V gerilim değeri için hedefe gelen iyon akısı ve doğrusal olarak iyon akımına bağlıdır.

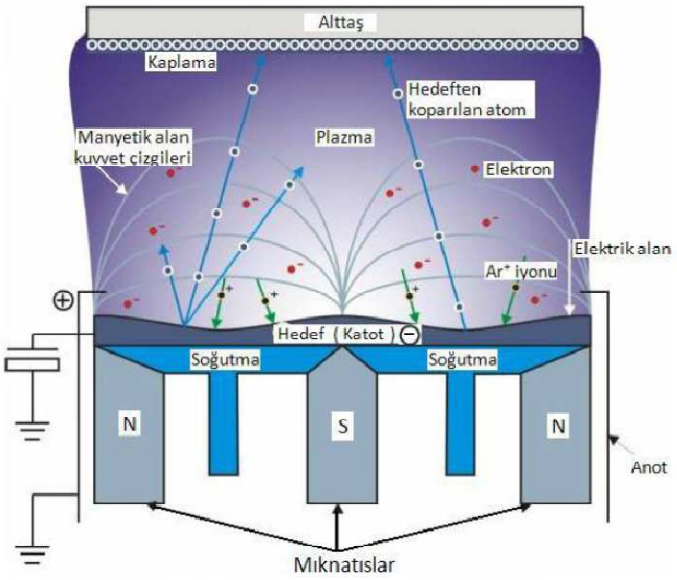
4.2 Radyo Frekansı (RF) ve Doğru Akım (DC) Magnetron Sıçratma Tekniği

Optik ve elektriksel uygulamalarda kullanılan ince filmlerin sıçratma tekniği kullanılarak büyütülmesi son yıllarda belirgin şekilde artmıştır. Bunun temel nedeni yüksek performanslı magnetron katotlarının geliştirilmesidir. DC ve RF sıçratma teknikleriyle karşılaştırıldığında, bir magnetron katot düşük çalışma basınçlarında yüksek büyütme oranına ve düşük alttaş sıcaklıklarında yüksek kaliteli filmler büyütebilme olanağına sahiptir. Buna ek olarak, buharlaştırmayla büyütme gibi diğer ince film büyütme metotlarıyla karşılaştırıldığında, daha büyük alanların kaplanmasındaki kararlılık ve filmin alttaşa daha iyi yapışması gibi avantajlara da sahiptir.

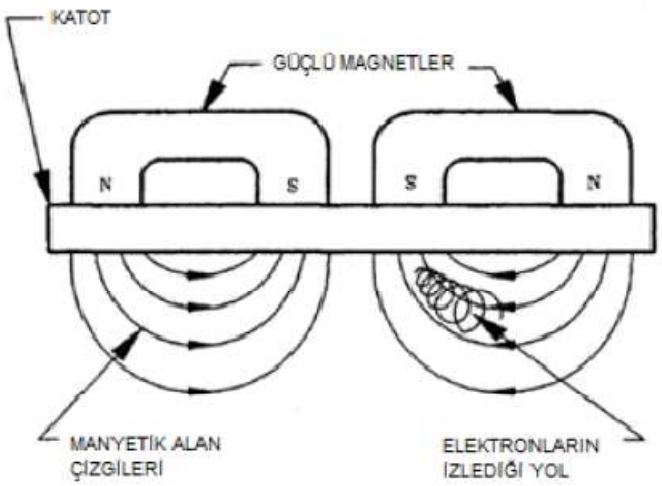
Magnetron sıçratma yöntemi, genellikle metal ve metal alaşım filmlerin büyütülmesinde kullanılmaktadır. Bu metal filmler entegre devrelerin yapımında, ısı yansıtıcı ayna pencere kaplamalarında, sert kaplamalarda, optik kaplamalarda, krom filmler gibi kozmetik kaplamalarda kullanılırlar. Bu metot ayrıca, elektronik aletlerde aktif katmanlarda kullanılan yalıtkan filmlerin ve yarıiletken filmlerin büyütülmesinde de kullanılır. Magnetron sistemleri çalışma aralığının genişlemesi, elektronların hedef

yakınında hapsedilerek alttaş yüzeyindeki elektron bombardımanı etkilerinin azaltılması ve aynı zamanda elektronların iyonizasyon etkilerinin arttırılması için kullanılır. Bu genellikle elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik düzenlenerek yapılır.

Magnetron sıçratma sistemlerinde kullanılan manyetik alanlar sabit mıknatıslardan oluşur ve tipik olarak 100 Gauss civarındadır. Bu manyetik alandan ortamdaki elektronlar ve ağır iyonlar etkilenirler. Elektronlar hedef yüzeyinde manyetik alan etkisiyle oluşan manyetik alan çizgilerinin yörüngelerine girer ve burada hapsolurlar. RF güç kaynağı ile 13,56 MHz frekansında alternatif voltaj uygulandığında ivmelenen elektronlar ortamda bulunan Argon atomlarıyla çarpışarak bu gaz atomlarını iyonlaştırır. İyonlaşan pozitif yüklü Argon atomları (Ar^{+}) ve elektronlar negatif kutuplu hedef üzerine hızla bombardıman ederek hedefe çarpar ve manyetik alan çizgileri altındaki bölgede hedef atomlarının bir kısmını saçtırırlar. Hedef kutuplanması sürekli değiştiği için bu işlem sıralı olarak devam eder. Hedef yüzeyinden saçtırılan atomlar çarpışmalarla gelişigüzel hareket ederek, alttaş üzerine yoğunlaşarak film oluştururlar (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 RF magnetron sıçratma sisteminde film oluşumu (Çalışkan, 2009).



Şekil 4.3 Magnetron sıçratma prensibi (Willey, 1996).

Magnetron sıçratma, metal ve metal alaşımlarının endüstriyel üretiminde, hızlı, ucuz ve istenilen boyutlarda kolaylıkla yapılabilmesi nedeniyle oldukça etkin bir ince film kaplama yöntemidir. Geniş alanların kaplanması ve düşük alttaş sıcaklığı gibi avantajları da vardır. Bu yöntemle hazırlanan filmler genellikle polikristal veya amorf formundadır. Mikroelektronik ve sert kaplamalar en yaygın uygulama alanlarıdır. Bundan başka plastik parçaların üzerine metal kaplama uygulaması otomotiv endüstrisinde geniş bir alanda kullanılmaktadır. Cam üzerine yansıtıcı, karartıcı ve dekoratif kaplamalar metal hedeflerin saçtırılmasıyla oluşturulmaktadır.

5. YARIİLETKEN MALZEME ANALİZİ

5.1 Yapısal Özellikler

Kristal yapı, atomların veya atom gruplarının bir hacim içerisinde belirli bir düzene sahip olarak dizilmesi sonucunda meydana gelir. Bu durum Max Von Laue'nin, bir kırınım ağının güneş ışınlarını kırınıma uğratmasına benzer şekilde, kristalin de X-ışınlarını kırınıma uğrattığını bulması ile kristal yapı içerisindeki atomların incelenebilmesinin yolunu açmıştır. Bugün, X-ışınlarına ek olarak, elektron ve nötron kırınımı ile de kristal yapı incelenebilmektedir. Böylece, yalnız kristal yapıyı oluşturan birim hücrenin özelliklerini değil, atomların kristal içerisindeki yerleşim düzenini de, kristali yapı bozukluklarını da, kristalde ortaya çıkan zorlanmaları, kristal içerisinde bulunabilecek safsızlık atomlarını ve benzeri pek çok ayrıntı incelenebilmektedir (Baz, 2008).

Katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım tekniği X-ışını kırınımıdır. X-ışınları, ivmeli yüksek enerjili elektronların metal hedefteki atomlarla çarpışarak yavaşlamasıyla veya bu çarpışmalarla atomların iç yörüngelerindeki elektronların elektronik geçişleriyle oluşan 0,1-100 Å dalgaboylarına sahip elektromanyetik ışınlardır. X-ışınlarının dalgaboyları kristal katılarda atomlar arasındaki mesafe ile kıyaslanabilir mertebede olduğu için, kristal yapıların incelenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Kristallerin atomlarının geometrik düzeni ve aralarındaki mesafe hakkındaki çoğu bilgi bu yöntemle elde edilmektedir. Bundan dolayı X-ışınları kırınımı (XRD) kristalin bileşiklerin kalitatif olarak tanınmasında pratik ve uygun bir yöntemdir. XRD tekniği, bir kristal düzleminin birim hücre boyutlarıyla birlikte kristalin atom düzlemleri arasındaki uzaklığı belirleyebilen bir tekniktir. X-ışınının içinden geçtiği madde elektronları arasındaki etkileşme neticesinde saçılma oluşur. Eğer X-ışınları bir kristaldeki düzenli ortam tarafından saçılırsa, saçılmayı yapan merkezler arasındaki

uzaklık X-ışınının dalga boyu ile aynı mertebeden olduğu için saçılan ışınlar olumlu ya da olumsuz girişim yaparlar. Bu durumda kırınım meydana gelir.

X-ışını kırınımı, basit bir ifadeyle bir kristal düzlemine gönderilen X-ışınlarının kristalin atom düzlemlerine çarparak yansıması olayıdır. Ancak buradaki yansıma ışığın bir ayna düzleminden yansıması olayından çok farklıdır. Kırınım olayında, gelen X-ışınları kristal yüzeyinin altındaki atom düzlemlerine ulaşır, yani kırınım yüzeysel bir olay değildir. Düzensiz yapıda (amorf) bir kristal düzlemine gelen X-ışını demeti kristal düzlemlerine herhangi bir açıyla çarparsa, kırınım gerçekleşmez. Çünkü, kristal düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının aldıkları yolların uzunlukları farklı olduğundan, söz konusu ışınlar arasında faz farkı oluşur ve bu ışınlar birbirlerini iptal ederler. Bunun sonucu olarak herhangi bir kırınım (difraksiyon) piki gözlenmez.

X-ışını demetinin atom düzlemlerine Bragg açısı olarak bilinen belirli bir açı ile çarpması durumunda ise yansıyan ışınlar tarafından alınan yol, dalga boyunun (λ) tam katlarına eşit olacağından, ışınlar aynı faza sahip olur. Kırınıma uğrayan, yani atom düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının aynı fazda olması durumunda difraksiyon deseni oluşur. Difraksiyon deseni elde edebilmek için; X-ışınlarının atom düzlemlerine çarpma açısı (θ), atom düzlemleri arasındaki uzaklık (d) ve gelen X-ışınlarının dalga boyu (λ) arasında belirli bir bağıntının bulunması gerekir. Bir X-ışını demetinin birbirine paralel atom düzlemlerine θ açısı altında çarpması durumunda kırınım meydana gelir. Yani kristal düzlemi, düzenli tek kristal yapısında ise, X-ışınları kristal düzleminden aynı fazda saçılır. Bunun sonucu olarak kırınım gözlenir. Kırınımın meydana gelişi Şekil 5.1a'da gösterilmektedir. Burada farklı kristal düzlemlerinden yansıyan ışınların dedektöre geldiğinde aynı faz içinde olması gerekir. Bunun gerçekleşebilmesi için de Şekil 5.1'deki MBN yol farkının λ dalga boyuna veya λ'nın tam katlarına eşit olması gerekir. Yansıyan ışınlar, ancak bu durumda aynı fazda olurlar. Kırınım olayında X-ışınlarının aldığı yolların uzunlukları arasındaki farklar Şekil 5.1b'de ayrıntılı bir biçimde görülmektedir. Buna göre, X-ışınlarının aldıkları yolların uzunlukları arasındaki fark;

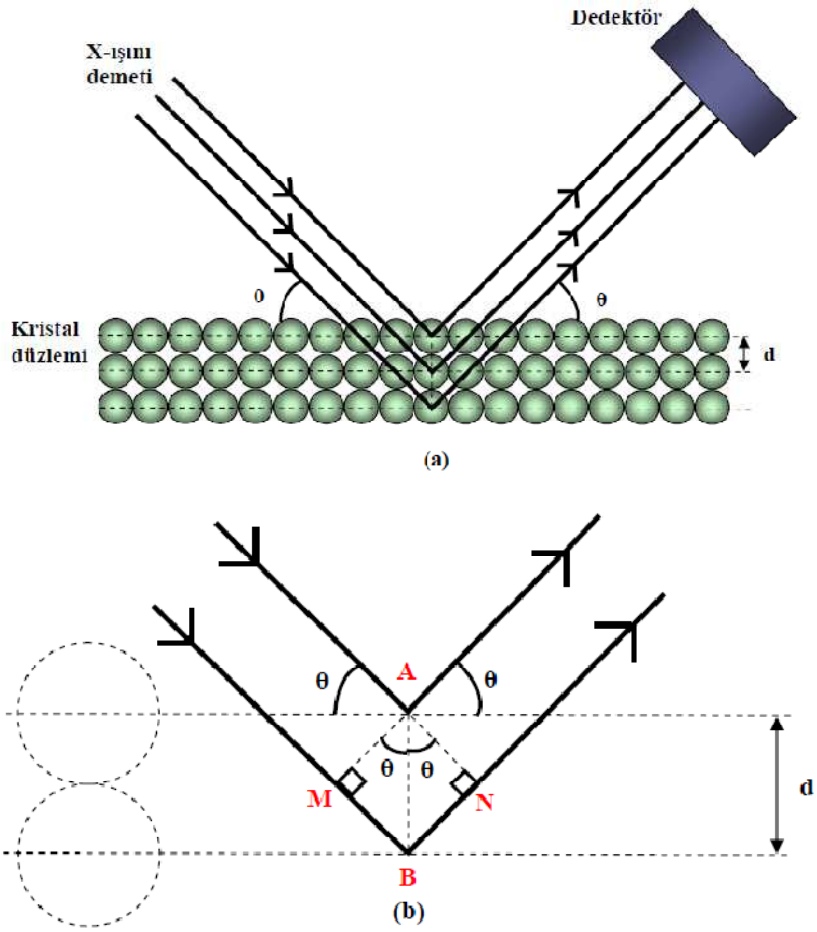
$$MBN=MB+BN \tag{5.1}$$

olarak yazılabilir. AMB ve ANB dik üçgenlerinden;

$$\sin\theta = \frac{MB}{d} = \frac{BN}{d} \tag{5.2}$$

$$MB = BN = d\sin\theta \tag{5.3}$$

şeklinde yazılır.



Şekil 5.1 a)Bir kristal düzleminde X-ışını kırınımının meydana gelişi ve b) kırınımolayında X-ışınlarının aldığı yolların uzunlukları arasındaki farkların ayrıntılı bir şekilde gösterimi.

Buradan, X-ışınlarının aldıkları yolların uzunlukları arasındaki fark,

$$MB + BN = 2d \sin\theta \qquad (5.4)$$

olarak bulunur. Kırınımın gerçekleşmesi için bu yol farkının λ veya λ'nın tam katlarına eşit olması gerekir. Bu nedenle;

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (5.5)$$

bağıntısı elde edilir. Burada; Bragg açısı (gelen ışınlarla atom düzlemlerinin yaptığı açı) ve λ (kullanılan X-ışınının dalga boyu) bilinirse d (atom düzlemleri arasındaki uzaklık) hesaplanabilir. Bragg kanunu olarak bilinen bu bağıntı X-ışını kırınımı için gerekli koşulu ifade eder (Şişman, 2006).

TVA ve RF magnetron sıçratma yöntemleriyle elde edilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin bu teknik ile karakterizasyonunda, λ = 1,5405 Å (0,154 nm) dalga boyuna sahip Cu-K_α kaynaklı Rigaku- Rint 2200 XRD cihazı kullanıldı.

5.2 Optik Özellikler

Işık bir madde ile karşılaştığında maddeyi geçebilir, madde üzerine dik gelmiyorsa kırılabilir, yansıyabilir, saçılabilir veya absorplanabilir (Skoog, et al., 1998).

Yarıiletkende absorpsiyon olayı dört şekilde olur. Birincisi, valans bandında bulunan bir elektronun bir fotonu absorplayarak iletim bandına geçmesi ile oluşan absorpsiyon olayıdır. Buna temel absorpsiyon denir. İkincisi, yasak enerji aralığında bulunan eksitonların fotonlar tarafından uyarılarak iletkenlik bandına geçmesi olayı, üçüncüsü valans bandındaki holler ile iletkenlik bandındaki serbest elektronların fotonlar tarafından uyartılarak daha yüksek enerjili durumlara yükselmesi ve dördüncüsü de katkı atomlarının fotonlar tarafından uyarılması olayıdır (Rudden and Wilson, 1980). Yarıiletkenlerin band aralıklarını belirlemek için en yaygın şekilde kullanılan metot optik absorpsiyon yöntemidir (Pankove, et al., 1971).

Bir maddenin absorpsiyon spektrumuna bakılırsa o maddenin geçirgenliği, absorbansı, absorpsiyon katsayısı, yansıtma katsayısı, kırılma indisi ve dielektrik sabiti gibi bazı optik özellikleri hakkında bilgi edinilebilinir.

Işının madde tarafından absorpsiyonu

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \tag{5.6}$$

bağıntısı ile verilir. Burada I_0, materyale gelen ışının şiddeti; I, materyalden geçen ışının şiddeti; t, materyalin kalınlığı; α, lineer absorpsiyon katsayısını ifade etmektedir (Krunks, et al., 1999). Denklem 5.6'dan da anlaşıldığı üzere lineer absorpsiyon katsayısı α, gelen elektromagnetik dalganın dalgaboyuna ve materyalin yapısına bağlıdır. Lineer absorpsiyon katsayısı büyüdükçe materyali geçen ışın şiddeti de o derece azalacaktır. Absorpsiyon, materyalin kalınlığı ve absorpsiyon katsayısı ile doğru orantılıdır.

5.2.1 Temel absorpsiyon olayı

Bir malzemeye gelen elektromagnetik dalganın malzemede bulunan elektriksel yükler ile etkileşmesi sonucunda enerji kaybına uğraması absorpsiyon olarak adlandırılır. Bu enerji kaybı malzemenin atomları tarafından kullanılır. Bir fotonun soğurulması veya geçirilmesi fotonun enerjisine, yarıiletkenin yasak enerji aralığına ve atomların veya molekül gruplarının dizilişine bağlıdır.

Ultraviyole ve görünür bölgede meydana gelen absorpsiyon, genel olarak bağ elektronlarının uyarılmasından kaynaklanır. Yarıiletkenlerdeki en önemli absorpsiyon olayı olan temel absorpsiyon olayı, bir elektronun bir foton soğurarak valans bandından iletim bandına geçmesi olayıdır (Pankove, et al., 1971). Bu olayda, yasak enerji aralığındaki enerjiye denk enerjili ışınlarda yarıiletken çok hızlı absorpsiyon yapar.

Yarıiletkenler düşük frekans ve büyük dalgaboylu ışınları absorplamazlar ve bunlar için saydamdırlar. Çünkü yüksek dalgaboylu ışınlar valans bandındaki

elektronlara iletim bandına geçmeleri için gerekli olan enerjiyi sağlayamazlar. λ_g değeri gelen ışının absorplanabilmesi için gerekli dalgaboyu sınırıdır. Gelen ışının dalgaboyu λ_g değerine ulaştığında yarıiletkenin absorpsiyonu keskin bir şekilde artmış ve absorpsiyon belli bir değere ulaştıktan sonra o değerde sabit kalmıştır. λ_g değerinden düşük dalgaboylarında yani gittikçe artan enerjili ışınlarda absorpsiyon artmaz ve sabit kalır. Çünkü bu değerden sonra absorpsiyonun artması için gelen fotonun sayısının artması gerekmektedir. Enerji artışı foton sayısını arttıramayacağı için absorpsiyon sabit kalır. Yasak enerji aralığı E_g olan bir yarıiletkene, enerjisi E_g 'ye eşit veya daha yüksek enerjili bir ışın geldiğinde ($h\nu \geq Eg$) yarıiletkenin absorplama yapması

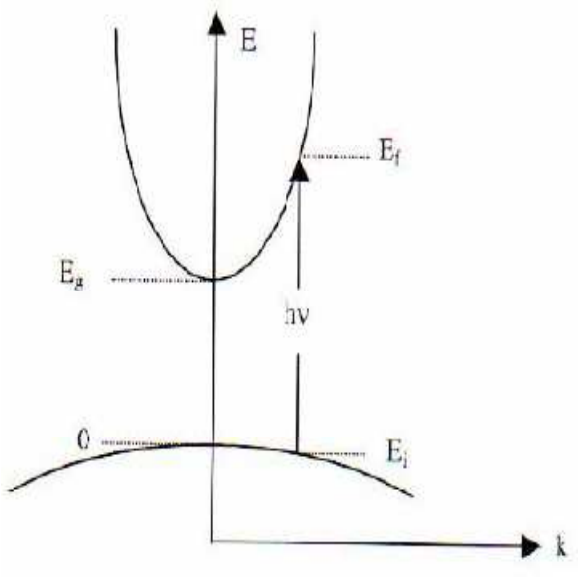
$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \tag{5.7}$$

eşitliğiyle ifade edilir. Burada λ, fotonun dalgaboyunu; E_g, yarıiletkenin yasak enerji aralığını; h, Planck sabitini; c, ışık hızını ifade etmektedir.

Yarıiletken materyal λ_g dalgaboyundan küçük dalgaboylarında kuvvetli bir soğurucu, büyük dalgaboylarında hemen hemen geçirgen özellik gösterir. Bu iki bölgeyi ayıran sınır temel absorpsiyon sınırı olarak adlandırılır. Yarıiletkenlere temel absorpsiyon sınırında direkt ve indirekt olmak üzere iki tür geçiş olayı vardır (Kittel, 1996).

5.2.1.1 Direkt band geçişi

Direkt band geçişi Şekil 5.2'de gösterildiği gibi yarıiletkenin valans bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu aynı $\vec{k}$ (dalga vektörü) değerinde ($\Delta k = 0$) ise meydana gelir. Bu durumda valans bandındaki elektron, $\vec{k}$ değerinde değişiklik olmadan bir foton soğurur ve aldığı enerjiyle iletim bandına atlar.



Şekil 5.2 Bir yarıiletkende direkt band geçişinin şematik gösterimi (Pankove, 1971).

Şekil 5.2’ de valans bandından iletim bandına olan direkt band geçişi görülmektedir. Şekle göre E_i, yarıiletkende ilk durum enerji seviyesini; E_f, yarıiletkende son durum enerji seviyesini göstermektedir. E_i ile E_f arasındaki bağıntı ise,

$$E_f = h\nu - E_i \qquad (5.8)$$

ile verilmektedir.

Parabolik bandlarda,

$$E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \tag{5.9}$$

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \tag{5.10}$$

ile verilir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesini; m_h^* holün etkin kütlesini göstermektedir.

Denklem 5.9 ve denklem 5.10'u denklem 5.8'de yerine yazarsak,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) \tag{5.11}$$

bağıntısı elde edilir. Direkt geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol etkileşimi dikkate alınmazsa absorpsiyon katsayısı α, gelen fotonun enerjisine,

$$\alpha(h\nu) = A^*(h\nu - E_g)^n \tag{5.12}$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada A* sabiti,

$$A^* \approx \frac{q^2 (2\frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*})^{3/2}}{nch^2 m_e^*} \tag{5.13}$$

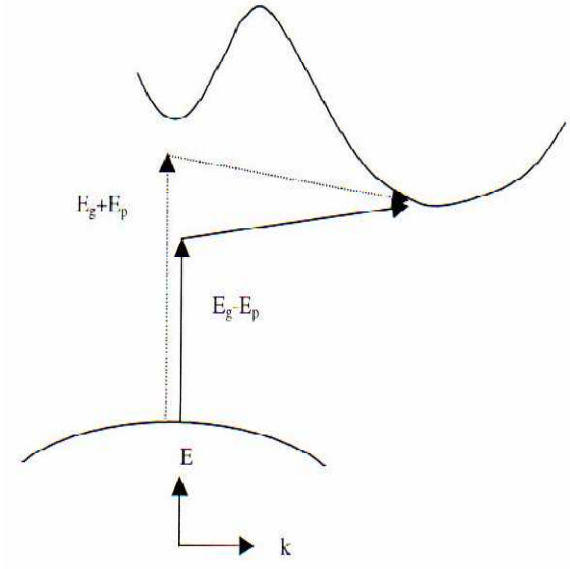
bağıntısı ile verilir. Direkt band geçişinde α ile hν arasındaki bağıntı,

$$\alpha h\nu \approx (h\nu - E_g)^n \qquad (5.14)$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada n, 1/2 (izinli geçiş) veya 3/2 (yasaklı geçiş) değerlerini alabilen bir sabittir. Ayrıca denklem 5.14' te αhν 'yü sıfır yapan değer yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir (Pankove, 1971; Mott and Davis, 1971).

5.2.1.2 İndirekt band geçişi

İndirekt band geçişi Şekil 5.3'te gösterildiği gibi yarıiletkenin iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerine karşılık gelmiyorlarsa ($\Delta k \neq 0$) geçişler indirekt olarak adlandırılır. İndirekt geçişlerde enerji korunur fakat momentum korunumunu sağlayarak geçiş yapması için ya kristale fonon verilir veya kristalden fonon soğurulur.



Şekil 5.3 Bir yarıiletkende indirekt band geçişinin şematik gösterimi (Pankove, 1971).

İndirekt geçişlerde enerji korunur fakat momentum korunumu için bir fononun emisyonu veya absorpsiyonu gereklidir. Bu iki geçiş,

$$h\nu_e = E_f - E_i + E_p \tag{5.15}$$

$$h\nu_a = E_f - E_i - E_p \tag{5.16}$$

ile verilir. Burada E_p, fonon enerjisidir.

Fonon absorpsiyonlu geçiş için absorpsiyon katsayısı $h\nu > (E_g - E_p)$ için,

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A\left(h\nu - E_g - E_p\right)^n}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]} \tag{5.17}$$

ile verilir. Hem fonon emisyonu hem de fonon absorpsiyonu olduğu zaman α ile ν arasındaki bağıntı,

$$\alpha(h\nu) \approx \frac{\left(h\nu - E_g + E_p\right)^n}{\exp\left(\frac{E_p}{kT}\right) - 1} + \frac{\left(h\nu - E_g + E_p\right)^n}{1 - \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right)} \tag{5.18}$$

ile verilir. Burada n, indirekt band geçişli bir yarıiletken için 2 (izinli geçiş) veya 3 (yasaklı geçiş) değerlerini alabilen bir sabiti göstermektedir (Pankove, 1971; Mott and Davis, 1971, Korkmaz, 1994).

Malzeme üzerine gönderilen fotonlar, bir elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine uyarmak için yeterli enerjiye sahip değillerse, soğurulma yerine geçirilirler ve malzeme saydam olarak davranır. Geçirgenlik, geçen ışık şiddetinin gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır ve *T* ile temsil edilir. Bir fotonun soğurulması veya geçirilmesi; fotonun enerjisine, yarıiletkenin yasak enerji aralığına ve atomların dizilişine bağlıdır.

Malzeme ile fotonların etkileşmesi sonucu meydana gelen diğer bir optik olay da yansımadır. Yansıma, malzeme yüzeyinden yansıyan ışık şiddetinin gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır ve R ile temsil edilir. Malzemenin yüzeyi düzgünse ve gelen fotonlar düşük bir enerjiye sahipse, fotonların bir kısmı malzeme yüzeyinden yansıtılır. Kalınlığı *d* olan bir malzemeye gelen ışıktaki yansıma ve soğurma yoluyla olan kayıplar da dikkate alınarak malzemeden geçen ışığın şiddeti (I),

$$I = (1-R)^2 \ (I_0 e^{-\alpha d}) \qquad (5.19)$$

olarak yazılabilir (Benramdane, et al., 1997). Bu ifade, malzemenin üst ve alt yüzeylerindeki yansımaların eşit olduğu durum için geçerlidir. Yansıma ve soğurmadan kaynaklanan kayıpların yanında malzeme içerisinde saçılma yoluyla da ışık kaybı olabilir.

Saçılma, ortamla etkileştikten sonra ışığın yönünün ve bazen de frekansının değişmesi olayıdır. Fotonların toplam sayısı değişmez, fakat ileri yönde gidenlerin miktarı azalır; çünkü ışık diğer yönlere doğru tekrar yönlenmiş olur. Saçılma böylece soğurma gibi aynı zayıflatıcı etkiye sahiptir.

Işık bir malzemeden geçerken enerjisinin bir kısmını kaybeder ve yön değiştirerek kırılmaya uğrar. Işığın boşluktaki hızının malzeme içindeki hızına oranı malzemenin kırılma indisi olarak tanımlanır ve yarıiletken bir malzeme için kompleks kırılma indisi;

$$\tilde{n} = n_0 - ik \tag{5.20}$$

denklemi ile ifade edilir. Denklem 5.24' in gerçel kısmı kırılma indisini verir ve

$$n_0 = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \tag{5.21}$$

şeklinde ifade edilir. Sanal kısmı ise

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \tag{5.22}$$

ile verilir ve k "sönüm (extinction) katsayısı" olarak tanımlanır. Burada λ gelen ışığın dalga boyudur. Kompleks kırılma indisinin gerçel kısmı (n_0) ışığın malzemede kırılmasını, sanal kısmı (k) ise malzemede soğurmayı karakterize eder. Malzemelerin kırılma indisi, dalga boyunun veya frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Yüksek kırılma indisine sahip malzemeler düşük kırılma indisine sahip malzemelerden daha yüksek bir yansımaya sahiptir. Malzemenin yapısında daha yüksek atom numarasına sahip atomların bulunması durumunda elektron sayısı artacağı için kırılma

indisi de artar. Aynı zamanda, malzemedeki elektronların polarizasyon kabiliyeti yüksek olduğunda, fotonlarla daha çok etkileşirler ve daha fazla kırılmaya sebep olurlar.

ITO, IZO ve AZO ince filmlerin optik özelliklerini belirlemek için oda sıcaklığında optik geçirgenlikleri ölçülmüştür. Bu ölçümler 200 – 1100 nm dalga boyu aralığına sahip UNICO UV-Vis 4802 Spektrofotometresi ile yapılmıştır. Şekil 5.4'te ITO, IZO ve AZO ince filmlerin ölçümlerinde kullanılan UV-Vis spektrofotometrenin fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 5.4 UNICO UV-Vis 4802 spektrofotometresi.

5.3 Spektroskopik Elipsometre Tekniği

Dairesel polarize ışığın elde edilmesiyle başlayan teknolojik gelişmeler, ışığın kırılması ile ilgili 19. yüzyılda Fresnel tarafından geliştirilen formüllerle ilerleyerek elipsometrenin hayata geçirilmesinde rol almıştır. Bu gelişmelerin sonucu olarak, 1960' lı yıllarda, yüzey fiziko kimyasının özelliklerinin bilinmesiyle silikon teknolojisinin

gelişmesi sağlanmış ve daha küçük elektronik sistemlerin oluşturulması için yol açılmıştır.

Elipsometre tekniği, makro-elektronikten yarıiletken endüstrisine ve biyolojiye kadar birçok farklı alanda uygulamaya sahip ve çok yönlü bir optik tekniktir. Bu duyarlı ölçüm tekniği ince filmlerin bilimsel analizinde önemli seçenekler sunar ve bir numunenin dielektrik özelliklerini incelemek için polarize ışık kullanan ilk tahrip edici olmayan teknik olarak bilinir. Ayrıca tabaka kalınlığı, optik sabitler, kimyasal bileşim, kristalleşme, anizotropi ve homojenlik gibi birçok özelliğin detaylı karakterizasyonunu mümkün kılar. Tekli veya çoklu tabakalar için birkaç angstromdan onlarca mikrona kadar kalınlık belirlenmesine imkan sağlaması da en büyük avantajlarından biridir.

Elipsometre yansıma veya geçirme sonrası polarizasyondaki değişimi ölçer. Genelde yansıma düzenekleri bu ölçüm için yeterlidir. Polarizasyondaki değişimin tam detaylı incelemesi kalınlık, kompleks kırılma indisi veya dielektrik fonksiyonu gibi numunenin özellikleri üzerinden yapılır. Elipsometre, diğer optik tekniklere göre faz bilgisi içermesi ve ışığın polarizasyon durumunu kullanması ile angstrom mertebesinde çözünürlüğe ulaşabilir.

İncelenen numune optik olarak homojen ve izotropik olan farklı ve iyi tanımlanmış tabakalardan da oluşabilir. Bu durumda belirtilen kabullenmelere uyulmadığı takdirde standart Elipsometrek modelleme işlemi geçersiz kalacağı için, teknikle ilgili daha gelişmiş değişkenlere ihtiyaç vardır. Elipsometre tekniği ile elde edilen deneysel veri genellikle Frensel katsayılarına bağlı olan Psi (Ψ) ve Delta (Δ) parametreleri ile ifade edilir. Bu iki katsayı numunenin optik özellikleri ve fiziksel boyutları hakkında bilgi içerir. Günümüzde çoğu elipsometre numune üzerinden yansıyan ışığın polarizasyonunu mekanik olarak dönen polarizör birimi ile çözümlemektedir. Bu tip elipsometrelerde, pek çok gelişmeye rağmen, bazı durumlarda düşük hassasiyet ve özellikle düşük yansıma veren numunelerde düşük sinyal/gürültü oranı ile karşılaşılabilir.

Elipsometre, genel olarak kutuplanmış bir dalga vektörünün polarizasyon durumunun ölçülmesini ve bunu modifiye eden optik sistem hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Polarize haldeki bir ışık dalgasının yüzeye gönderilmesiyle, ışığın incelenen optik sistemle etkileşmesi sağlanır. Bu etkileşme, monokromatik ve polarizasyon durumu belli olan ve istenilen gelme açısı altında gönderilen ışığın, optik bakımdan farklı olan ortamların sınır yüzeyine düşürülmesi ile polarizasyon durumunu değiştirir ve ışık belli bir açı ile sınır yüzeyinden yansır ya da geçer. Şekil 5.5' de sınır yüzeyinden yansıyan polarize ışık gösterilmektedir. Elektromagnetik dalganın polarizasyon durumu ise, Elipsometrek parametreler olarak bilinen Ψ ve Δ değerleri ile verilir. Böylece polarizasyon durumunu değiştiren malzeme hakkında bilgi edinilir. Yansıyan veya geçen ışığın polarizasyon durumunun belirlenmesi ile kullanılan malzemenin optik parametreleri belirlenebilir. Buradan yola çıkarak, kompleks kırılma indisi, sönüm katsayısı ve kalınlık belirlenir.

Gelme düzlemine paralel polarize olan yansıma genliğinin büyüklüğü R_p ve dik polarize olan yansıma genliği R_s ile gösterilir. R_p değerinin R_s değerine oranı Elipsometrek Ψ parametresinin ifadesini verir.

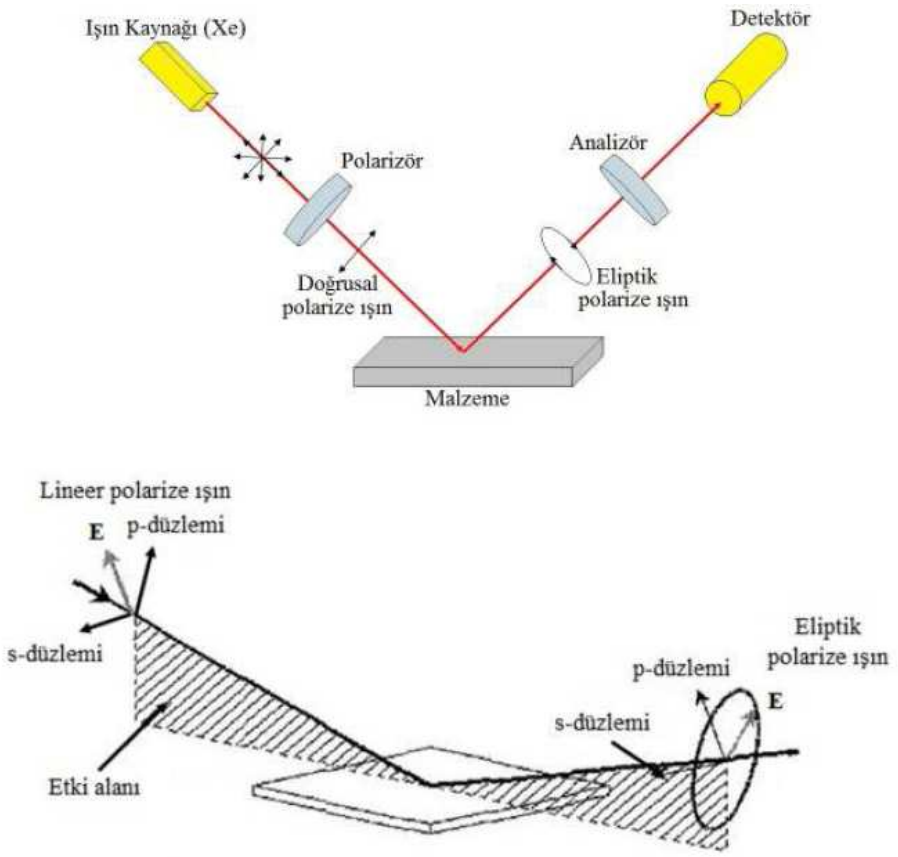
$$\tan\psi = \frac{R_p}{R_s} \tag{5.23}$$

R_p ve R_s arasındaki faz farkı ise ikinci Elipsometrek parametre olan Δ değerini verir.

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_s \tag{5.24}$$

Burada Δ_p ve Δ_s sırasıyla R_p ve R_s nin fazlarıdır. Elipsometrek parametrelerle Fresnel katsayıları arasında ilişki kurulabilir. Elipsometrek parametreler direkt olarak

elipsometreden okunan büyüklükler değildir. Elipsometre üzerinden okunan R_p ve R_s değerlerinden Elipsometrek parametreler Ψ ve Δ ya geçiş yapabilmek için kullanılan çeşitli hesap teknikleri vardır.



Şekil 5.5 Sınır yüzeyinden yansıyan polarize ışın.

Elipsometre tekniğindeki karakterizasyon metodu indirekt (dolaylı) bir doğaya sahiptir. Elipsometrek veri analizi, numunenin tabaka kalınlığı ve optik sabitlerini tanımlayan optik bir model gerektirir. Bu amaçla en çok kullanılan denklem Cauchy denklemidir. Cauchy modeli malzemenin geçirgen olduğu bölgede kullanılan bir modeldir. Kırılma indisi için Cauchy denklemi;

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \qquad (5.25)$$

şeklinde verilir. Burada A_n, B_n ve C_n modelde kullanılan Cauchy parametreleridir. Sönüm katsayısının sıfır olduğu bölgelerde Cauchy modelinin kullanımı uygundur. Ancak, spektrumda sönüm katsayısının sıfır olmadığı ve az da olsa soğurmanın olduğu bölgeler bulunabilir. Bu durumda Cauchy modeline sönüm katsayısını tanımlayan bir denklem eklemek gerekir. Bu denklem Urbach denklemi olarak bilinir. Urbach denklemi malzemenin az bir soğurmaya sahip olduğu bölgede sönüm katsayısını temsil eder ve;

$$k(\lambda) = A_k e^{B_k(E-E_b)} \tag{5.26}$$

ifadesi ile verilir. Burada A_k ve B_k Urbach parametreleridir ve

$$E \approx \frac{1240}{\lambda} \qquad \text{ve} \qquad E_b \approx \frac{1240}{\lambda_b} \tag{5.27}$$

olarak verilir. Dalgaboyu birimi nm ve enerji birimi de eV olarak alınır. Eğer bir numunede depolarizasyon etkisi varsa, elipsometrede kullanılan tamamen polarize olmuş ışık, kısmi polarize ışığa dönüşür. Bu durumda elipsometredeki ölçüm hataları artar ve deneysel sapmalar meydana gelir. Deneysel sapmalarda numune yapısı da önemli bir rol oynar (Ketenci, 2010).

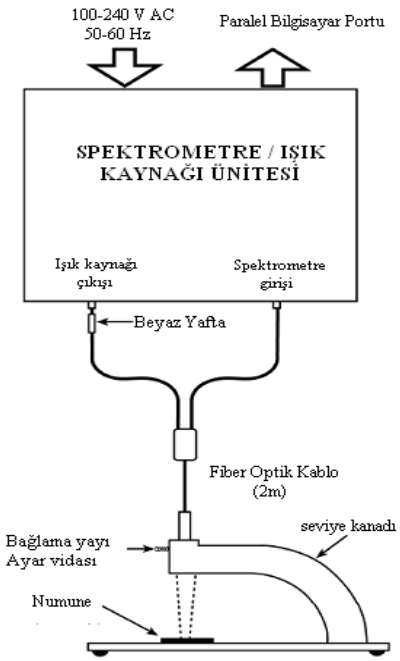
Bazı durumlarda deneysel ve teorik elipsometre verileri arasında iyi bir uyum sağlanamayabilir ve düşük MSE (mean square error) değeri elde edilemeyebilir. Bu durumun nedenleri şunlar olabilir:

a) Ölçülen Elipsometrek veriler yanlıştır
b) Veri analizinde kullanılan model uygun değildir
c) Numunede depolarizasyon etkisi olabilir.

ITO, IZO ve AZO ince filmlerin kırılma indisi değerlerini belirlemek için oda sıcaklığında 500–1000 nm dalga boyu aralığında TT90 model Spektroskopik Elipsometre cihazı kullanılmıştır.

5.4 İnterferometrik Ölçüm

Kullanılan cihazın kurulum düzeni Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 İnterferometre cihazın (F20 cihazı) basit gösterimi.

F20 cihazı, ince film özeliklerini, hem yansıtma hemde numunenin ışığı geçirgenliğini ölçer ve daha sonra bu ışığın dalgaboyu aralığı üzerinde analizini yapar. Bu dalga türü özelliklerinden dolayı, ince filmin yüzeyleri arasında ışığın yukarıdan aşağıya doru yansıması eş fazlı olabilir, böylece yansımalar eklenir yada faz dışında olabilir, bu durumda da yansımalar çıkartılır. Bu yansımalar ister eş-fazlı ister faz

dışında olsun (ikisinin arasında bir yerdede olabilir) filmin özelliklerine ve kalınlığına bağlı olduğu gibi ışığın dalga boyuna da bağlıdır.

$$L= (2 \times n \times d) \div i \qquad (5.28)$$

Yansımalar faz içinde olduğunda L dalga boyu, n kırılma indisi, d filmin kalınlığı ve i bir tamsayıdır. Sonuç olarak yansıma spektrumunda yoğun dalgalanma özelliği vardır. Genelde daha kalın filmlerde verilen bir dalgaboyu aralığında daha fazla dalga yoğunluğu olur. Dalgalanmanın titreşim genliği, kırılma indisi, filmlerin ve alttaşın sönüm katsayısı tarafından belirlenir. Bundan dolayı, peryodun analizi ve bu dalgalanmaların titreşim genliği F20 cihazı tarafından çoklu ince filmlerin optiksel özelliklerini (n ve k) ve kalınlığını belirleyebilir (Filmetrics, 2005).

5.5 Yüzey Özellikleri

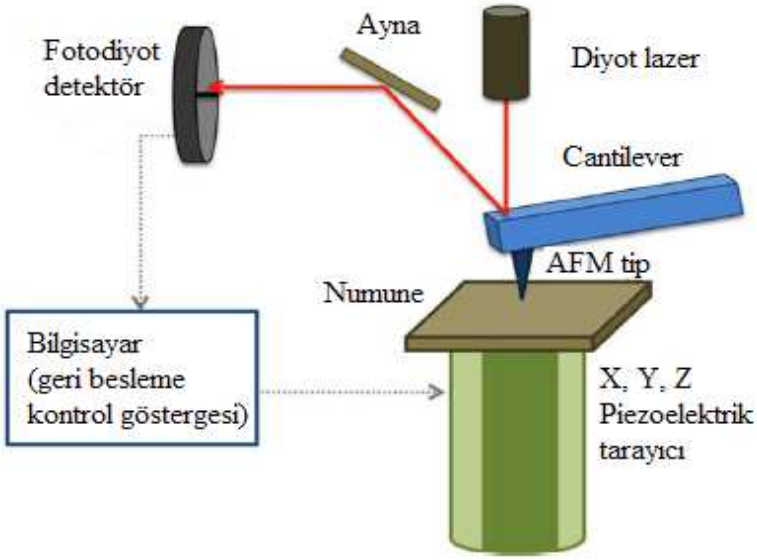
Malzemelerin yüzey özelliklerini ve pürüzlülüklerini incelemek amacıyla taramalı uç mikroskopları geliştirilmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Binning, Quate ve Gerber tarafından 1986' da icat edilmiştir (Binnig, et al., 1986). Taramalı uç mikroskopları yüzeyin topografik şeklini ve diğer fiziksel özelliklerini (elektriksel, manyetik haritası.) doğru bir şekilde belirlemede önemli rol almaktadır. Bu teknikte görüntü oluşumu uç-yüzey atomlarının arasında oluşan etkileşim kuvvetini ölçerek elde edilir. Daha açık olarak, taramalı uç mikroskoplarında yüzey görüntüsü malzemeyi tarayan fiziksel bir ucun mekanik olarak hareket ettirilmesi ile numuneyi çizgi-çizgi tarayarak ve konumun bir fonksiyonu olarak uç-yüzey etkileşmesinin kaydedilmesi ile elde edilir.

Taramalı uç mikroskopları ailesinin her üyesinde bulunması gereken önemli bileşenler vardır: atomik seviyede sivri bir uç (tip), yay (cantilever), yüzeyden gelen bilgiyi toplayacak bir detektör, taramayı yapabilmek için gerekli elektronik ve mekanik

devre. Ayrıca akustik, termal ve mekanik gürültü diye adlandırılan dış titreşimleri engellemek için yalıtım sistemi gereklidir. Yüzeyin özellikleri, z yönünde hareket edebilen tarayıcı ve örneğin x-y doğrultularında hareket edebilmesini sağlayan piezoelektrik tarayıcı sayesinde üç farklı doğrultuda belirlenir (Söyleyici, 2011).

AFM, çok yüksek çözünürlüklü bir taramalı uç mikroskop çeşidi olup, nano boyutta bir probun numune yüzeyi ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan kuvvet ilişkilerinin izlendiği bir sistem olarak ifade edilmektedir. AFM tipi ile örnek arasında akım değil, elektrostatik, van der walls, sürtünme ve magnetik kuvvet gibi güçler söz konusudur. Bundan dolayı AFM sayesinde her türlü örnek incelenebilir. AFM, genel olarak üç boyutlu yüzey görüntüleri elde etmek, nanolitografya, yüzey pürüzlülüğünün tespiti ve nano boyutta kalınlık ölçümü gibi parametreleri belirlemek için kullanılmaktadır.

Şekil 5.7'de tipik kullanılan AFM sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 5.7' den görüldüğü gibi numune yüzeyi bir-iki mikron uzunluğunda ve genelde 100 Å' dan daha az bir çapa sahip keskin bir uç yardımı ile taranarak incelenir. Uç, 100-200 μm uzunluğunda bir yayın serbest ucuna yerleştirilmiştir. Yay genelde nanometre boyutunda eğrilik yarıçapına sahip bir uç ile Silisyum, silisyumoksit veya Silisyumnitrür' den yapılır. Uç-yay sistemi, malzeme yüzeyinde piezoelektrik malzeme sayesinde tarama yapar. Tarama piezoelektrik malzemeye verilen voltaj sayesinde olur. Tarama esnasında uç-yüzey arasındaki atomlar arasında kuvvetler (10^{-11}-10^{-6} N) Hooke yasasına göre yayın eğilmesine ya da sapmasına neden olur. Tip numune üzerinde gezinirken ya da numune tip altında taranırken bir detektör yaydaki sapmayı ölçer. Ölçülen bu sapmalar bir bilgisayar vasıtasıyla yüzey topografisinin bir haritasını oluşturur. Numune ile iğne arasındaki kuvvet etkileşimi sonucu kaldıraç mekanizması nm ölçeğinde hareket eder. Bu hareketten faydalanılarak bilgisayar ortamına aktarılan veriler, yazılım aracılığı ile derlenerek ya numunenin görüntüsü elde edilir yada iğne ile numune arası etkileşmeler ölçülür. Yüzey taraması tipin sürekli olarak yüzeyle teması ile mümkündür. Ancak bu durumda yüzeyin hasar görmesi ve görüntünün bozulması kaçınılmaz olur. Bunu önlemek için tip yüzeye sadece çok kısa sürelerle periyodik olarak temas edip sonra tekrar yüzeyden uzaklaşır.

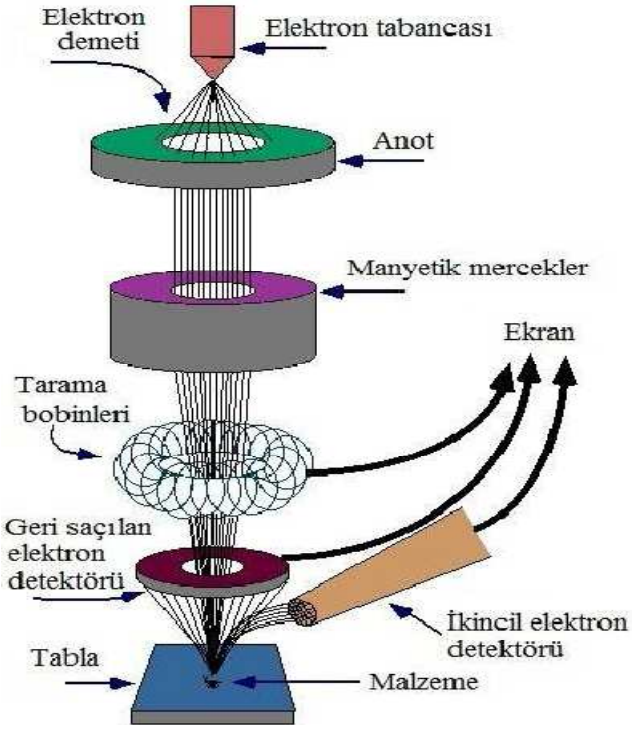


Şekil 5.7 AFM çalışma prensibi (Martin, 2009).

Mikro yapılı malzemeleri görüntülemek, yüzey durumlarını incelemek, analiz etmek ve açıklamak için kullanılan cihazlardan biri taramalı elektron mikroskobudur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile malzemelerin faz dağılımları, tanelerin varlığı, homojenlikleri, gözenekli yapıları ve tabana tutunmaları hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür.

SEM malzemeleri görüntülemek için ışık yerine elektronları kullanan bir mikroskoptur ve yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilmesini sağlar. Bu şekilde malzemelerin birçok özelliği yüksek büyütme oranı ile analiz edilebilir. SEM' de incelenecek malzemenin iletken olması gerekir ve malzemenin özdirenci yüksek ise malzemeler üzerine çok ince altın kaplanır. SEM' de görüntü, yüksek gerilim ile hızlandırılmış elektron demetinin numune üzerine odaklanarak yüzeyin taratılması sırasında, numune atomları tarafından kırınıma uğrayan elektron demetinin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne

verilmektedir. Şekil 5.8' de taramalı elektron mikroskobunun şematik diyagramı verilmektedir. Genel olarak bir SEM cihazında elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif mercek, bu merceğe bağlı çeşitli çapta aparatlar ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri bulunur. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır.



Şekil 5.8 Taramalı Elektron Mikroskobunun şematik diyagramı.

Taramalı elektron mikroskobu çeşitlerinden biri olan "alan emisyon taramalı elektron mikroskobunda" (FESEM, Field Emission Scanning Electron Microscope) alan emisyonlu bir elektron tabancasından çıkan elektronların incelenecek malzeme yüzeyi üzerine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerle yüzey görüntüsü oluşturulur. SEM mikroskoplarında elektron tabancasının rolü büyük ve kararlı bir akım sağlamaktır. Emisyon kaynaklarının termoiyonik yayınlayıcı (thermionic emitter) ve alan yayınlayıcı

(field emitter) olmak üzere iki tipi vardır. Yayınlayıcı tipleri ise SEM ve FESEM elektron mikroskopları arasındaki temel farkı oluşturur. Termoiyonik yayınlayıcılar genellikle Tungstenden yapılan flamanı ısıtmak için elektrik akımı kullanırlar ve ısı flamanın iş fonksiyonunu yenecek kadar olduğunda, flamandan elektronlar koparılır. Ancak termoiyonik kaynaklarda katot malzemenin buharlaşmaması ve termal sürüklenmenin olmaması gerekir. Alan emisyon kullanılarak bu tip sorunlar ortadan kaldırılır. Alan emisyon kaynağı flamanı ısıtmaz ve soğuk katot alan emisyon tabancası vardır. Yüksek bir negatif voltaj ısıtılmamış keskin bir metal parçasına (sivri bir Tungsten tel) uygulanır ve yüksek elektrik alandan dolayı bu metal parçadan elektronlar salınır. FESEM' de iki tip ikincil elektron detektörü vardır. Çok yüksek çözünürlük için inLens detektörü kullanılır. Ayrıca FESEM mikroskoplarında inLens geri saçılan elektron detektörü de bulunabilir.

SEM-FESEM ile elde edilen yüzey görüntülerinde seçilen bir bölge için elemental analiz veya mikroanaliz, enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) ile yapılmaktadır. SEM-EDS sistemi ile karakteristik X-ışınları analiz edilir. Bu şekilde hem malzemenin yüzey görüntüsü elde edilir hem de elemental bileşimi belirlenebilir. EDS cihazının çalışma prensibi şu şekildedir: Malzeme SEM' in elektron demeti ile bombardıman edilir ve malzemede bulunan elementlerin iç kabuklarında bulunan elektronlar koparılır. Kopan elektronun yerinde oluşan elektron boşluğu daha dış kabuklardaki bir elektron tarafından doldurulur ve X-ışını iki elektron arasındaki enerji farkını dengelemek için salınır. EDS X-ışını detektörü enerjilerine göre salınan X-ışınlarının sayısını ölçer. Böylece detekte edilen X-ışınlarının bağıl sayılarına göre bir enerji spektrumu elde edilir ve malzemede var olan elementlerin kalitatif ve kantitatif analizleri yapılır. EDS mikroanaliz sistemi karakteristik X-ışınlarını toplayan, onları enerjilerine göre sınıflandıran, grafiklerini çizen ve bu enerji dağılımındaki piklerin hangi elementlere ait olduklarını belirleyen bir sistemdir (Goldstein and Yakowitz, 1975; Söyleyici, 2011).

5.6 Elektriksel Özellikler

Katı cisimler elektriksel özdirençlerine göre metaller (10^{-6}-10^{-4} Ω-cm), yarıiletkenler (10^{-4}-10^{10} Ω-cm) ve yalıtkanlar ($\geq 10^{10}$ Ω-cm) olarak üç gruba ayrılırlar. Katılarda özdirenç kriteri açık değildir. Çünkü bir katıdan diğerine geçildiğinde özdirenç değerleri üst üste gelmektedir. Bundan dolayı metallerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların özdirenç kriterine göre ayırt edilmesi her zaman geçerli değildir. Yarıiletkenlerin özdirenci, bazı sıcaklık aralığında metallere benzer veya bazı sıcaklıklarda da (mutlak sıfıra yaklaşıldığında) yalıtkanlara benzer davranış gösterir (Caferov, 1998).

Bir malzemenin özdirenci (ρ) elektriksel iletkenliğe (σ) şu şekilde bağlıdır.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ne\mu} \tag{5.30}$$

Burada n taşıyıcı konsantrasyonu, e elektronun yükünün büyüklüğü ve μ elektronların mobilitesidir. Metallerde elektron konsantrasyonu çok yüksektir ($n \approx 10^{22}$ cm^{-3}) ve sıcaklığa bağlı değildir. Metallerde sıcaklık arttıkça elektronların konsantrasyonu sabit kalırken, mobiliteleri bir miktar azalır ve böylece metallerin özdirenci sıcaklıkla artar. Yarıiletkenlerde ise taşıyıcı konsantrasyonu sıcaklık arttıkça exponansiyel olarak artar. Bu nedenle yarıiletkenlerin özdirenci sıcaklık arttıkça azalır. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğe hem valans bandındaki holler hem de iletim bandındaki elektronlar katkıda bulunur ve bir yarıiletken malzemenin toplam iletkenliği,

$$\sigma = n\,e\,\mu_e + p\,e\,\mu_h \tag{5.31}$$

şeklinde yazılabilir. Burada n ve p elektronların ve hollerin konsantrasyonunu, μ_e ve μ_h ise elektronların ve hollerin mobilitelerini göstermektedir. Serbest elektronların ve hollerin mobiliteleri;

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} \quad \text{ve} \quad \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*} \tag{5.32}$$

olarak verilir. Burada τ_e ve τ_h sırası ile elektronların ve hollerin durulma zamanı olarak bilinir. Elektrik akım yoğunluğu ise elektronların ve hollerin akım yoğunluklarının toplamına eşittir (Hook and Hall, 1999).

$$j = (ne\mu_e + pe\mu_h)E = \left(\frac{ne^2\tau_e}{m_e^*} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h^*} \right) \mathrm{E} = \sigma \mathrm{E} \tag{5.33}$$

5.6.1 Yarıiletken malzemelerde özdirenç ölçümü

Birçok yarıiletken malzeme yüksek özdirence sahiptir. Ancak yüksek sıcaklık ortamında ya da uygun deney şartlarında yapılan özdirenç ölçümünde yarıiletkenin direnci hızla azalabileceğinden, bağlantı uçlarının direnci önemli hale gelebilir. Malzemelerin özdirenç ölçümünde malzeme ile çok iyi bağlantı temasının sağlanması, bütün malzemelerin ölçümlerinde olduğu gibi burada da önemli bir durumdur. Bu amaç için özel bağlantı uçları tasarlanmıştır. Bu bağlantı uçları tipik olarak sivri uçlu ve küçük malzemelerdir. Bağlantı uçlarının oldukça küçük olması durumunda mekanik olarak zayıf ve yüksek sıcaklığa karşı mekanik dayanımı hassas olacaktır. Pratikte bu amaç için oldukça sert olan ancak direnci yüksek olan tungsten ya da osmiyum alaşımlı metaller kullanılır. Yarıiletkenlerin özdirençlerinin belirlenmesinde dört nokta ölçüm tekniği kullanılması her zaman için en uygun durumdur. Ayrıca ince filmlerin

özdirencinin belirlenmesi sırasında kullanılacak metal bağlantıların malzeme içine girmesini engellemek, bağlantıların numune üzerine basıncının az olması ve bununla beraber yük taşıyıcı difüzyonunun zararını en aza indirmek dikkat edilmesi gereken bir uygulamadır (Huang and Ladbrooke 1978; Yılmaz, 2008).

5.6.2 Prob yöntemleri ile özdirenç ölçülmesi

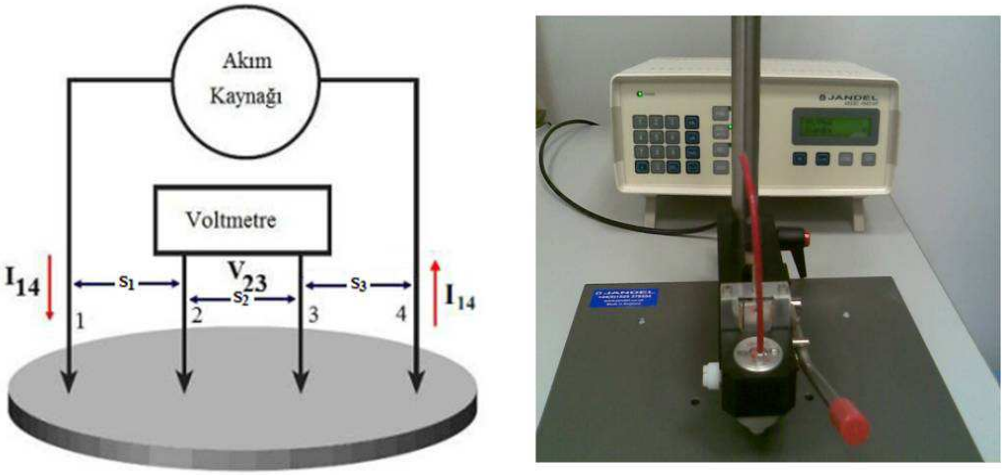
Saydam iletken oksit filmlerin iletkenliğini açıklayabilmek için elektriksel özelikler üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Film hazırlamada kullanılan metodlar ve taşıyıcının sıcaklığı ve yapısı, büyütme oranı, film kalınlığı, ilk kaplama ısıl işlem sıcaklığı, katkı türü ve konsantrasyonu gibi kaplama parametreleri iletkenliği etkileyen faktörlerdir. Bütün yarıiletken oksit filmler n-tipi iletkenliğe sahiptir. Bu filmlerin yüksek iletkenliğe sahip olmaları başlıca stokiyometrik sapmadan kaynaklanmaktadır. Bu filmlerdeki iletkenlik elektronları, oksijen boşluklarıyla veya fazla metal iyonlarıyla birlikte donör seviyelerinden sağlanır. Katkılama iletkenliği artırır. Yarıiletken malzemelerin özdirenç ölçümleri için en çok iki problu, dört problu ve Van der Pauw yöntemleri kullanılmaktadır. Örnekten akım geçerken, belirli bir bölgesinde elektrik potansiyel farkı ölçümleri bu yöntemlerin temelidir.

5.6.2.1 Dört uç tekniği

İki prop yöntemlerinin yorumlanması zor olduğundan yarıiletkenlerin özdirenç ölçümlerinde dört prop yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir. Dört prop kullanımı ikiliye göre daha önemli bir avantaja sahiptir. Dört prop yönteminde proplardan ikisi akım kaynağı olarak, diğer ikisi ise gerilimi ölçmede kullanılır. Gerilim farkını ölçmek için kullanılan tellerden akım geçmeyeceği için bu teller üzerinde ve bağlantı ara yüzeyleri üzerinde gerilim düşmesi olmayacaktır. Bu uçlardan elde edilecek gerilim farkı sadece numuneden akım geçmesi nedeniyle oluşacak gerilim farkıdır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta gerilimin ölçüldüğü bu 2 ve 3 numaralı uçlar arasındaki numune direncinin gerilim değerini ölçen cihazın iç direncine göre çok küçük olması

gerektiğidir. Aksi durumda ölçüm cihazından da akım geçeceği için cihaz ve numune paralel bağlı iki direnç gibi çalışacaktır. Bu durum, ölçümün hatalı olmasına yol açar ki yalıtkan olan numunelerde direnç çok büyük olduğundan daha dikkatli olunması gerekir.

Üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerin, kalınlığa bağlı tabaka direnci ve özdirenç ölçümleri, Jandel Marka RM3 AR güç kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı dört prob ölçüm sistemi ve şematik gösterimi Şekil 5.9' da gösterilmektedir.

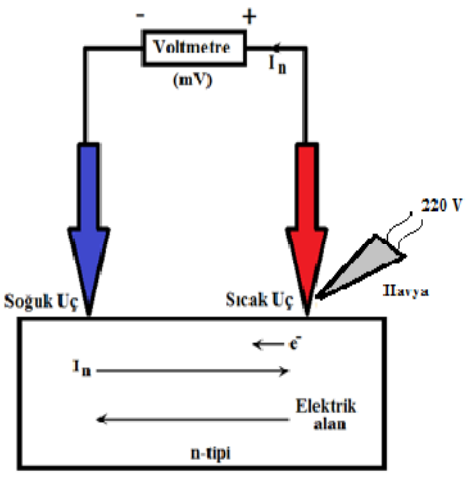


Şekil 5.9 Dört Prob yöntemi için şematik gösterim ve dört prob test sistemi.

5.6.2.2 Sıcak uç tekniği

Sıcak uç tekniği bir havya ve standart bir voltmetre kullanılarak yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik tipini belirlemede kullanılabilecek kolay bir yöntemdir. Isıtılan havya numune yüzeyine yaklaştırılarak bir sıcak uç elde edilir. Yaratılan sıcaklık değişimi sonucunda oluşturulan ısıl elektromotor kuvvetin işareti taşıyıcı tipi hakkında bilgi verir. Sıcak uç tekniğinin şematik gösterimi Şekil 5.10'da verilmiştir.

Sağdaki uç sıcak uç soldaki uç ise soğuk uçtur. Sıcaklık değişimi, $dT/dx > 0$, ve n tipi bir numune için elektron akımı soldan sağa doğru olur. Termoelektrik güç bir akım kaynağı gibi düşünülebilir ve bu akımın bir kısmı voltmetreden geçerek sıcak ucun soğuk uca göre pozitif bir potansiyele sahip olmasını sağlar. Bu durumun açıklanması için alternatif bir yaklaşım şu şekilde olabilir: elektronlar sıcak uçtan soğuk uca doğru difüzyon yoluyla ilerlerken, bu difüzyona karşı koyacak bir elektrik alan kurulmasına da sebep olurlar. Elektrik alan voltmetre tarafından algılanabilecek bir potansiyel yaratır. Benzer şekilde p tipi bir numune için zıt bir potansiyel görülecektir.



Şekil 5.10 Sıcak uç tekniği (Schroder, 1990).

Sıcak uç tekniği özdirençleri 10^{-3}-10^{3} Ωcm aralığında olan numuneler için uygun bir tekniktir. Voltmetre, zayıf p tipi özellikte ve yüksek özdirençli bir malzeme için bile n tipi gösterebilir. Çünkü teknik aslında $n\mu_e$ veya $p\mu_h$ çarpımını belirlemektedir. $\mu_e > \mu_h$ olan has ve yüksek özdirençli malzemelerde $n \cong p$ ise malzemenin iletkenlik tipi n tipi olarak gözlenecektir. Oda sıcaklığında $n_i > n$ veya $n_i > p$ olan yarıiletkenlerde (dar band aralıklı yarıiletkenler), uçlardan birinin soğutularak oda sıcaklığındaki ucun sıcak uç olmasının sağlanması gerekebilir (Schroder, 1990).

6. TVA TEKNİĞİ İLE ITO İNCE FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

6.1 Giriş

Plazma; elektriksel olarak nötral olan ve rastgele doğrultularda hareket eden, hemen hemen eşit yoğunluktaki pozitif ve negatif yüklü parçacıklar topluluğudur. Bilindiği gibi termal dengedeki katı bir madde, genelde sabit bir basınçta sıcaklığının arttırılması ile sıvı haline geçer. Sıcaklık biraz daha arttırılırsa sıvı gaz haline geçer. Yeterince yüksek bir sıcaklıkta gaz içindeki moleküller, atomlar arasındaki nadir çarpışmalar hariç, rastgele doğrultularda serbestçe hareket eden gaz atomlarını oluşturmak için ayrışırlar. Eğer sıcaklık daha fazla arttırılırsa, gaz atomlarından bir ya da birkaç elektron kopar ve gaz atomları serbestçe hareket eden yüklü parçacıklara (elektronlara ve pozitif iyonlara) ayrışmış olur. Böylece maddenin dördüncü hali olan "PLAZMA" oluşmuş olur. Buradan görüldüğü gibi plazma halinde, maddenin atomları parçalanmıştır ve sürekli hareket halinde olan, pozitif yüklü iyonların ve elektronların oluşturduğu bir sistem haline gelmiştir. Plazma içinde aynı zamanda negatif iyonlar, fotonlar, uyarılmış atomlar, ayrışmış atomlar, radikaller, metastable (yarı-kararlı) atomlar, nötral atomlarda vardır (Grill, 1993).

Günümüzde teknolojik ve bilimsel açıdan oldukça önemli bir yere sahip olan yarıiletken malzemeler ve teknolojik uygulamalarda kullanılacak olan yarıiletken ince filmlerin optik, elektrik, yapısal ve yüzey özellikleri aygıt performansını önemli derecede etkilemektedir. İnce filmlerin belirtilen özellikleri ise üretim parametrelerine ve üretim tekniklerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi, yüksek vakumda (10^{-6} Torr) anot materyalinin plazmasının üretilebilmesi için geliştirilen bir yöntemdir. Günümüzde TVA plazma kaplama yapan teknikler arasında yerini almıştır. TVA kaplama sistemleri, her türlü malzemenin plazmasının oluşturulmasına, ince filmlerin üretilmesi ve hatta yüksek erime sıcaklığına sahip materyallerin işlenmesinde dahi kullanılan bir sistemdir. TVA ile elde edilen ince filmler ile nanoteknolojik kaplamalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, TVA tekniği kullanılarak ITO ince filmleri cam, Polietilen tereftalat (PET) ve Silisyum (Si) alttaşlar üzerine büyütütülerek bazı fiziksel özellikleri araştırılmıştır.

6.2 Alttaş Olarak Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışması kapsamında TVA tekniği ile hazırlanan ince film üretiminde, alttaş malzemesi olarak; ISOLAB mikroskop camı (BK7), Polietilen tereftalat (PET) ve silisyum (Si); ince film üretim malzemesi olarak ise ITO malzemesi kullanılmıştır.

Camın özellikleri bileşiklerine ve üretilme tekniğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Bach and Krause, 1997). Bir ışık demeti cam üzerine düşürüldüğü zaman, bunun bir kısmı cam yüzeyinden yansır, bir kısmı camdan geçer ve bir kısmı cam tarafından soğrulur. Cama ait optiksel geçirgenlik %90 nın üstündedir. Bu da camın oldukça iyi bir saydam malzeme olduğunu gösterir. Optoelektronik malzeme üretiminde, yarıiletken güneş pillerinde, saydam iletken elektrot yapımında ve birçok saydam iletken kaplamalarda alttaş (substrate) olarak genellikle cam malzemeler kullanılmaktadır. Bu yüzden camın yapısına ve optiksel özelliklerine bakmak gerekir.

Polimerler monomer adı verilen birçok küçük molekülün birleşmesi ile üretilen büyük moleküllerdir. En bilinen polimer türleri C-H içeriğine ek olarak Cl, N, O ve metal içerebilen yapılardır. Bir polimerin üretimi sırasında farklı güçte, yönelimde ve uzunluktaki bağlar, atomlar ve diğer fonksiyon grupları arasında oluşur. Polimer içerisindeki bu bağlar ve kimyasal gruplar, polimerin kimyasal ortamlardaki davranışlarını IR absorplama miktarını ve foto elektron emisyon yeteneğini etkiler. Polimer üzerine üretilen ince filmlerin incelenmesi, özellikle esnek entegre devre altlıkları ile ortaya atılmış kavramdır. Söz konusu uygulama alanlarında polimer altlık üzerindeki ince filmlerin, yapısal olarak oldukça esnek davrandıkları gözlemlenmiştir. Polietilen tereftalat, (PET, PETE, PETP) polyester ailesine ait poli kondenzasyon metoduyla üretilen termoplastik bir malzemedir. Isıl işlenmesine bağlı olarak, amorf (şeffaf) ve yarı-kristal (opak ve beyaz) malzeme olarak mevcuttur (Torlakoğlu, 2008).

Silisyum (Si), 3-5 μm kırmızıaltı bölgesi için tasarlanan optik sistemlerde oldukça sık kullanılan yarıiletken bir malzemedir. Bu bölgedeki kırılma indisi yaklaşık olarak 3,4' tür. Sahip olduğu ısıl iletkenlik, düşük atomik kütle ve dayanıklılık gibi özelliklerinden ötürü silisyum, lazerler için ayna olarak, 1,2-6,7 μm bölgesi için pencere ve lens olarak kullanılmaktadır (Arığ, 2010).

6.3 ITO İnce Filmlerinin Üretimi ve Üretim Parametreleri

Deneysel aşamada, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği ve Teknolojileri Laboratuarlarında bulunan TVA sistemi kullanılmıştır. Bu tekniğin diğer yöntemlere göre olan avantajları 3.bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Çalışma kapsamında daha önce literatürde karşılaşılmayan yarıiletken üçlü bileşiklerinden olan ITO malzemesinin TVA tekniği ile plazması oluşturulmuş ve üretilen ITO ince filmlerin bazı fiziksel özellikleri araştırılıp diğer tekniklerle üretilen yarıiletken ince filmlerin özellikleriyle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bir ortamdaki gazların varlığı yapmak istediğimiz bir uygulama için önem taşımaktadır. Vakum uygulamalarına dair verilebilecek bir örnek ise ince film büyütme tekniğidir. Eğer ince film hazırlanmak isteniyorsa ortam bu gazlardan arındırılarak çalışma ortamının yüksek vakum aralığında olması sağlanmalıdır. Vakum, kapalı bir hacmin basıncının 760 mm-Hg (Torr) olarak kabul edilen açık hava basıncından kademeli pompalar yardımıyla düşürülmesi, başka bir deyişle söz konusu ortamda gaz (ya da hava) basıncını yaratan moleküllerin pompalarla emilip boşaltılması olayına verilen isimdir. Vakum, ortamdaki gaz miktarının bir ölçüsü olduğu için vakum seviyesini belirlerken ortamda bulunan gazların oluşturdukları basıncın ölçülmesi gerekmektedir. Yani, vakum seviyesi düşük basınç değerleriyle ifade edilir. Bu tür sistemlerde genellikle Pa ve Torr birimi kullanılır.

Bir vakum düzeneğinin hedeflenen basınç seviyesine inebilmesinde, en az pompalar kadar belirleyici olan bir diğer etken de düzenekte kullanılan malzemelerin

vakuma uygunluğudur. Bu nedenle de vakum teknolojisinde kullanılacak malzemelerin seçiminde malzemelerin mekanik özellikleri, gaz atma yükü, buhar basınçları, vb. gibi hususlara dikkat etmek gerekmektedir.

Çalışma odasının (chamber) vakum seviyesi ne kadar iyi olursa yani taban basıncı ne kadar düşük olursa film de o kadar saf olur. Çalışma odasında vakum oluşturulurken en önemli parametrelerden biri de sistemin malzeme içeriğidir. Yüksek buhar basınçlı malzemeler vakum sistemlerinin yapımında kullanılmazlar. Bu yüzden en çok kullanılan malzemelerden biri düşük buhar basıncına sahip olan paslanmaz çeliktir. Vakum kazanı paslanmaz çelikten yapılır. Sızdırmazlık elemanları olarak buhar basıncı düşük olan viton, saf metal (bakır, gümüş, altın), teflon o-ring, gasket ve contalar kullanılır.

İyi bir ince film kaplaması için çalışma ortamının vakuma alınması şarttır. Bunun içinde sistemin pompalanması gerekmektedir. Farklı ince film büyütme teknikleri ve farklı basınç aralıklarına göre pompalar tasarlanmıştır. En yaygın olarak kullanılan pompalar; mekanik pompa, difüzyon pompası, soğurma pompası, turbo moleküler pompa, iyon pompası ve cryo pompadır.

İnce film hazırlanmasındaki en önemli hususlardan biri temizliktir. Alttaşların temizliği, filmin kalitesine son derece önemli etkisi olan bir faktördür. Alttaşların temizlenmesindeki ilk aşamada, üzerlerinde bulunabilecek olası yağ tabakalarının atılması için önce saf su, daha sonra etil alkol ve son olarak yine saf su ile Ultrasonik Temizleme Cihazında 5'er dakika yıkanmıştır. Deney öncesinde, ince film üretiminin kaliteli olabilmesi için alttaş olarak kullanılan malzemelerin üzeri ıslaklıktan, su buharından arındırılmış ve tamamen kuru olmalıdır, bu nedenle temizlenen camlar 30 dakika kurumaya bırakılmıştır. Tamamen kuruyan cam, PET ve Si alttaşları steril bir şekilde TVA sisteminin vakum odası içine yerleştirilmiştir.

Bu çalışma süresince ITO yarıiletken bileşiğinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ITO yarıiletken bileşiği 90% In_2O_3, 10% SnO_2 %99,99 saflık oranında ve ticari olarak satılan bir malzemedir. ITO yarıiletken bileşiği belli bir geometrik yapısı

olmayan parçacık halinde bulunan vakum malzemelerindendir. Yarıiletken ince film üretimi esnasında kullanılan TVA sisteminde aşağıda listelenen deneysel parametreler dikkate alınarak ITO ince filmleri üretilmiştir.

- Çalışma basıncı (P),
- Flaman akımı (I_f),
- Uygulanan potansiyel (U),
- Elektrotlar arası mesafe (d),
- Elektron tabancası açısı (φ),
- Deşarj akımı (I_d),
- Deşarj süresi (t),
- Film kalınlığı (d),

Farklı alttaşlar üzerine büyütülen ITO materyali için deşarj süresi ve film kalınlığı haricindeki diğer tüm parametreler aynı tutulmuştur. TVA tekniği ile ITO ince filmlerin üretim aşamasında, vakum odasının basıncı $8x10^{-5}$ Torr, elektrotlar arası mesafe 5-6 mm, uygulanan filaman akımı 21 A ve anot–katot arasına uygulanan potansiyel farkı 400 V' tur. Uygulanan bu akım ve voltaja bağlı olarak, deşarj sırasında anot ve katot arasında oluşan deşarj akımı 1,8 A' dir. ITO ince filmlerinin üretimi 3 ve 7 dakikalık sürelerde ve bu parametreler sabit tutularak gerçekleştirilmiştir.

7. RF MAGNETRON SIÇRATMA TEKNİĞİ İLE ITO, IZO ve AZO İNCE FİLMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

7.1 Giriş

Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan ince film üretiminde, alttaş malzemeleri olarak; ISOLAB mikroskop camı (BK7), ticari ürün olan Polietilen tereftalat (PET) ve MTI' dan temin edilen silisyum (Si) wafer, ince film üretim hedef malzemeleri olarak ise; In-Sn, In-Zn ve Al-Zn malzemeleri kullanılmıştır.

7.2 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Üretimi ve Üretim Parametreleri

Deneysel aşamada, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği ve Teknolojileri Laboratuarlarında bulunan RF magnetron sıçratma sistemi kullanılmıştır. Bu tekniğin diğer yöntemlere göre olan avantajları 4. bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

RF magnetron sıçratma tekniği kullanılarak ITO, IZO ve AZO ince filmleri cam, PET ve Si alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Hedef olarak In-Sn, In-Zn ve Al-Zn kullanılmış ve vakum odası içine reaktif gaz olarak O_2 gönderilmiştir. %xAr + %(100-x)O_2 gaz karışımı plazması oluşturularak, işlem süresi ve uygulanan RF gücü değiştirilerek ITO, IZO ve AZO ince filmleri elde edilmiştir. x değerleri hesaplanırken ise kısmi basınç yasasından;

$$x = 100 \frac{P_{Ar}}{P_{Ar} + P_{O_2}} \tag{7.1}$$

hesaplanmıştır (Pat, 2007; Ekem, 2009). Üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin %50Ar+%50O_2 konsantrasyonundaki bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir.

RF magnetron sıçratma sistemi beş ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

1. RF güç kaynağı
2. Vakum pompası
3. Eşleştirme ünitesi
4. Gaz karıştırıcı
5. Vakum odası.

Vakum pompası; vakum odasını düşük basınç değerlerine çekmek amacıyla kullanılmaktadır. Basıncın düşürülmesinin nedeni; vakum odasını havadaki diğer gazlardan temizlemek ve iyonize olmuş parçacıkların ortalama serbest yolunu arttırarak yüksek enerjili çarpışmalar elde etmektir. Böylece plazması oluşturmak istenen materyalin saflığını ve kalitesi arttırılabilir (Grill, 1993).

Radyo frekansı güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Elektromanyetik dalga; elektrotların her yarım devirde katodun anot, anodun katot görevi yapmasıyla oluşur. Bu dalgalar eşleştirme ünitesi sayesinde vakum odası içinde titreşim frekansı oluşturarak hedef materyalin iyonize olmasını sağlar. Frekansın yüksek olması plazma deşarjını sürekli hale getirir (Grill, 1993; Johnson, 2005).

ITO, IZO ve AZO ince filmleri üretmek için kullanılan deneysel parametreler Çizelge 7.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 Deneysel parametreler.

Malzeme	%Ar(x)	%O_2(100-x)	Basınç (Torr)	Süre (dk)	Uygulanan Güç (W)
ITO	%50	%50	$1.49*10^{-1}$	60	40
IZO	%50	%50	$1.38*10^{-1}$	60	40
AZO	%50	%50	$1.56*10^{-1}$	40	100

8. ITO, IZO ve AZO İNCE FİLMLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

8.1 Giriş

Yarıiletken filmlerin teknolojik uygulamalar için uygun olup olmadıklarını belirleyen fiziksel parametreleridir. Deneysel süreç boyunca, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği ve Teknolojileri Laboratuarlarında bulunan Termiyonik vakum ark (TVA) sistemi ve Radyo Frekansı (RF) magnetron sıçratma sistemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, TVA sisteminde ilk kez yarıiletken üçlü bileşiklerinden olan indiyum kalay oksit (ITO) plazması üretilerek cam, Polietilen tereftalat (PET) silisyum (Si) alttaşlar üzerine ITO ince filmleri büyütülmüştür. Ayrıca, RF magnetron sıçratma tekniği ile ITO, indiyum çinko oksit (IZO) ve alüminyum çinko oksit (AZO) ince filmleri %xAr+%(100-x)O_2 plazma ortamında büyütülmüştür. Bu teknikler ile üretilen yarıiletken ince filmlerin bazı fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Seçilen materyaller yarıiletken teknolojisinde çeşitli alanlarda kullanımı mevcut olan en popüler malzemeler arasında yer alırlar. RF magnetron sıçratma ve TVA teknikleri kullanılarak,

- ✓ Cam alttaş üzerine ITO, IZO ve AZO
- ✓ PET alttaş üzerine ITO, AZO
- ✓ Silisyum alttaş üzerine ITO, AZO

ince filmleri büyütülmüştür.

Bu bölümde elde edilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

8.2 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Kalınlıkları

Yarıiletkenlerin elektronik endüstrisinde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte, bu malzemelerin üretilmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmış ve yüksek verimlilikle kullanılabilmesi için, bu malzemelerin uygun elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özellikleri araştırılmıştır. Üretilen yarıiletken filmlerin kalınlıkları ise malzemenin belirtilen özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Böylece kalınlık da teknolojik cihazların verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla fotovoltaik güneş pillerinde ve opto-elektronik cihazlarda kullanım potansiyeli olan yarıiletken malzemelerin kalınlıklarının hassas bir şekilde belirlenmesi gerekir. Elde edilen filmlerin kalınlıklarını belirlemek oldukça önemli ve hassas bir süreçtir.

Bu çalışmada, TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO/cam, ITO/PET, ITO/Si, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin kalınlıklarını belirlemek için Filmetrics F20 kalınlık ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihaz, 400 nm dalga boyu ile 1100 nm dalga boyu arasındaki spektrumda ince filmlerin kalınlıklarını ölçebilmektedir. Üretilen ince filmlerin kalınlık ölçümleri numune yüzeyinin on farklı yerinden ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, film kalınlıkları belirlemede TT90 model Spektroskopik Elipsometre (SE) cihazı da kullanılmıştır.

Belirli bir polarizasyona sahip ışık saydam bir dielektrik yüzeyden mükemmel şekilde geçip hiç yansımadığı geliş açısı Brewster açısı olarak bilinir. Işık kırılma indisi farklı iki ortam arasında bir sınırla karşılaştığı zaman, bir kısmı geçerken bir kısmı da genellikle yansır. Yansıyan ışığın oranı Fresnel denklemleri ile açıklanır ve gelen ışığın polarizasyonuna ve geliş açısına bağlıdır. Fresnel denklemleri "p" polarizasyonuna sahip (elektrik alan gelen ışın ve yüzey normali ile aynı düzlem üzerinde polarize olduğunda) ışıkların eğer geliş açıları şu şekilde ise yansımayacaklarını öngörür.

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{8.1}$$

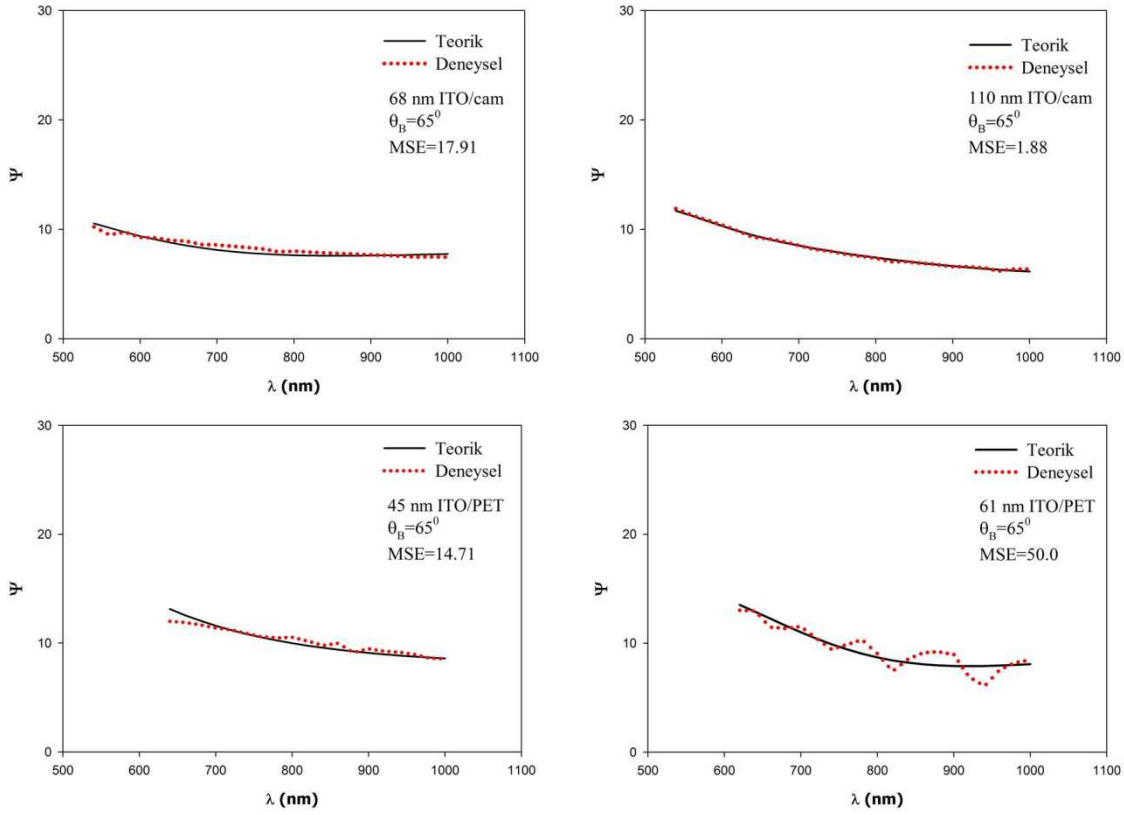
n_1 ve n_2 iki ortamın kırılma indisi iken θ_B ise Brewster açısıdır. Yani, SE verilerinin alınması aşamasında gelme açısının da önemi büyüktür. Bu durum, özellikle numune yüzeyinden yansıyan ve analizöre ulaşan ışığın şiddet ve fazını etkileyecektir. Bu iki ön koşul değerlendirilerek, tüm filmlerin kalınlıklarını yüksek duyarlıkla tayin etmek için önce malzeme üzerine farklı gelme açılarında (60°, 65° ve 70°) 500–1100 nm dalga boyu aralığında polarize ışık gönderilerek Ψ spektrumları alınmıştır. Bu spektrumlar incelenerek üretilen ITO, IZO ince filmler için en uygun gelme açısı 65°, AZO ince filmleri için 60° olarak belirlenmiştir. Daha sonra en uygun gelme açısı için deneysel olarak ölçülen spektroskopik Ψ değerlerinin, Cauchy modeli kullanılarak teorik olarak belirlenen Ψ değerleri ile en iyi uyumu sağlanarak (fitting) tüm filmlerin kalınlıkları hassas bir şekilde belirlenmiştir (Legaya, et al., 2007). Cauchy modeli daha çok geçirgen filmler için kullanılan bir metod olup eşitlik 8.2 ile gösterilir. Burada A, B, C, sabit katsayılar olup Cauchy parametreleridir (Azzam, et al., 1977; Fujiwara, 2007; Dai, et al., 2009).

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} + \ldots \tag{8.2}$$

8.2.1 TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin interferometrik metot ve spektroskopik elipsometre ile kalınlık ölçümlerinin belirlenmesi

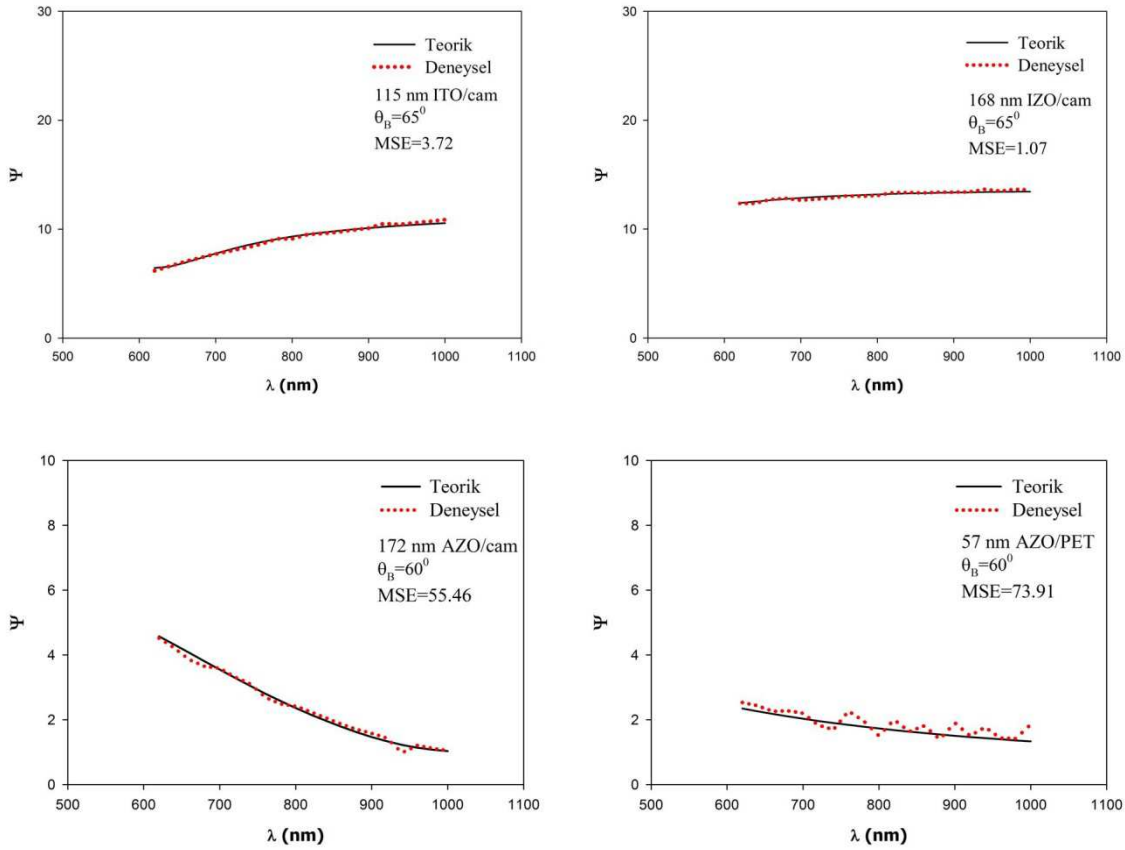
Spektroskopik Elipsometre cihazı film yüzeyinden yansıyan ışığın filmin kırılma indisine bağlı olarak ışığın polarizasyonu sonucu oluşan ışığın Ψ dalga fonksiyonunun genliğinde meydana gelecek değişimi analiz eder. TVA tekniği ile üretilen ITO/cam,

ITO/PET ince filmlerinin Ψ parametreleri SE tekniği kullanılarak 65°’ de 500-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçülmüştür. SE verileri ve Cauchy modeli kullanılarak teorik olarak belirlenen Ψ değerleri Şekil 8.1’ de verilmektedir.



Şekil 8.1 ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin deneysel ve teorik Ψ spektrumları.

RF magnetron tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin Ψ parametreleri için 60°-65°’ de 500-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçülen SE verileri ve Cauchy modeli kullanılarak teorik olarak belirlenen Ψ değerleri Şekil 8.2’ de verilmektedir.



Şekil 8.2 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin deneysel ve teorik Ψ spektrumları.

Tüm filmlerin Ψ spektrumlarından, teorik model ve deneysel veri arasındaki uyumun iyi ve ortalama hata oranı (MSE) değerlerinin küçük olduğu görülmektedir. Ancak deneysel ve teorik Ψ değerlerinde bazı sapmalar da göze çarpmaktadır. Ψ değerlerindeki sapmaların; filmlerin üretilmesinde kullanılan üretim tekniğinden, yüzeylerindeki pürüzlülükten, yüzey etkilerinden, tane sınırlarından ve yüzey morfolojilerinden kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz. Ayrıca, filmlerin band aralığının altındaki enerjilerde gelen fotonlar için, filmlerin pürüzlü yüzeyleri, tane sınırları ve morfolojileri gelen ışığın yansımasını etkilemektedir. Başka bir deyişle numuneden yansıyan ışığın polarizasyon durumunda değişikliğe sebep olmaktadırlar ve bu durum ise deneysel olarak ölçülen Ψ değerlerinde sapmalara dolayısı ile deneysel ve teorik Ψ değerlerinde uyumsuzluğa neden olmaktadır. Buna ilaveten filmlerin

üretilmesinde taban olarak kullanılan geçirgen cam ve PET alttaşlardan geri yansımalar da deneysel Ψ değerlerinde sapmalara neden olur. Deneysel ve teorik Ψ değerlerinin analizi sonucunda SE tekniği ile tüm filmlerin kalınlıkları belirlenmeye çalışılmıştır (Legaya, et al., 2007). MSE değerlerindeki bu sapmalar kalınlık ve optik sabitlerin tayinini etkilediği için tüm ince filmlerin kalınlık ölçümleri Filmetrics F20 cihazı ile de tekrarlanmıştır. Tüm ince filmlerin kalınlık değerleri belirlenirken SE yönteminde olduğu gibi Cauchy modeli kullanılarak elde edilmiştir. Tüm ince filmlerin on farklı yerinden ölçüm alınarak elde edilen deneysel değerlerin Cauchy modeli ile ne kadar uyumlu olduğunu gösteren Goodness of Fit (GOF) değerleri elde edilmiştir. TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen tüm ince filmlerin SE yöntemi ile elde edilen kalınlıkları (d) ve modelleme parametreleri ve aynı zamanda Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen kalınlık (d) ve GOF değerleri Çizelge 8.1' ve Çizelge 8.2' de verilmektedir.

Çizelge 8.1 ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin kalınlıkları (d) ve ITO/cam ve ITO/PET için modelleme parametreleri.

Materyal	**d (nm)**	**A_n**	**B_n ($x10^{-2}$) $(nm)^2$**	**C_n ($x10^{-2}$) $(nm)^4$**	**MSE**	**Filmetrics F20 d (nm)**	**Filmetrics F20 (GOF)**
ITO1/cam	68	1,90	0,11	-0,005	17,91	70	0,94
ITO2/cam	110	1,94	0,14	-0,035	1,88	105	0,93
ITO1/PET	45	2,01	0,13	0,001	14,71	50	0,99
ITO2/PET	61	1,38	0,59	-0,079	5,00	95	0,76
ITO1/Si	-	-	-	-	-	30	0,65
ITO2/ Si	-	-	-	-	-	115	0,69

Çizelge 8.2 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin kalınlıkları (d) ve ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET modelleme parametreleri.

Materyal	**d (nm)**	**A_n**	**B_n ($x10^{-2}$) $(nm)^2$**	**C_n ($x10^{-2}$) $(nm)^4$**	**MSE**	**Filmetrics F20 d (nm)**	**Filmetrics F20(GOF)**
ITO/cam	115	1,94	-0,277	0,1109	3,72	120	0,99
IZO/cam	168	1,46	0,026	-0,0013	1,07	170	0,86
AZO/cam	172	1,60	0,041	-0,0005	55,46	160	0,99
AZO/PET	57	1,67	-0,002	0,0005	73,91	130	0,53
AZO/Si	-	-	-	-	-	360	0,63

8.3 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Yapısal Özellikleri

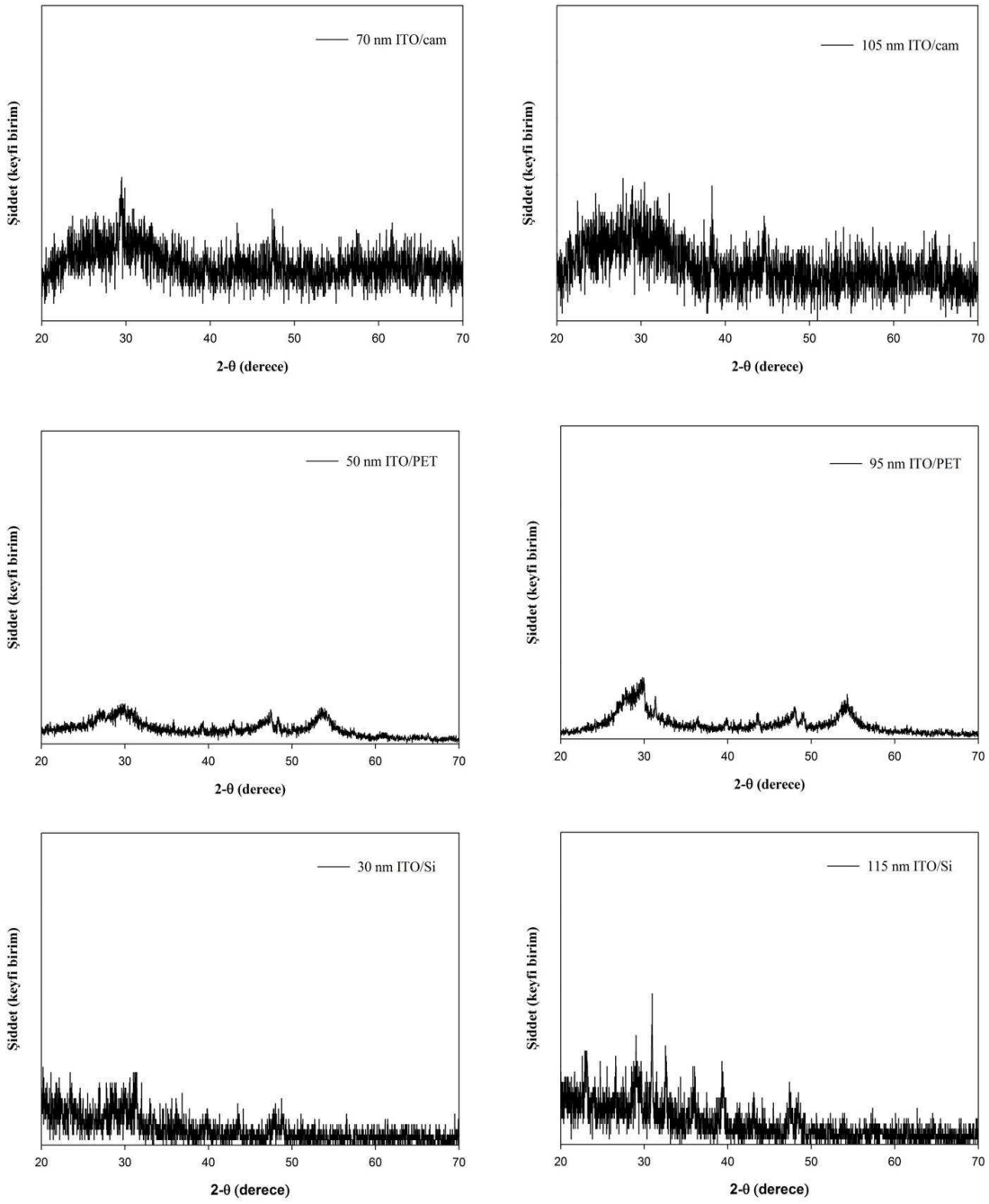
Yarıiletken malzemelerin teknolojik uygulamalarda kullanım potansiyelini araştırmada belirleyici olan özelliklerden biri de yapısal özellikleridir. Bu yüzden çeşitli üretim teknikleri ile üretilen yarıiletken malzemelerin yapılarının incelenmesi ve özelliklerinin belirlenmesi için uygun kırınım teknikleri kullanılarak yapısal analizlerinin yapılması oldukça önemlidir.

Bu bölümde ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin yapısal özelliklerini incelemek amacı ile tüm filmlerin kristalleşme seviyeleri oda sıcaklığında "Rigaku Rint 2200 X-Ray Diffractometer" cihazı ile (40 kV, 30 mA) λ=1,54059 Å dalgaboylu CuK_α ışını kullanılarak toz metodu ile $20° \leq 2\theta \leq 70°$ aralığında 0,02' lik adımlarla yapıldı. X-ışını kırınım (XRD) desenleri yardımı ile yapısal özellikleri incelenmiştir ve XRD kırınım desenlerine ait veriler aşağıda verilmiştir.

8.3.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin XRD analizleri

TVA tekniği ile 3, 7 dakika süre ve farklı kalınlıkta üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerin XRD analizleri (40 kV, 30 mA) λ=1,54059 Å dalgaboylu CuK_α

ışını kullanılarak 20°≤2θ≤70° aralığında 0,02’ lik adımlarla yapılmıştır. ITO/cam ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerine ait XRD desenleri Şekil 8.3’ te verilmektedir.



Şekil 8.3 TVA tekniği ile farklı alttaşlar üzerine üretilen ITO ince filmlerinin XRD analizleri.

Şekil 8.3’ te gösterilen 70 nm ITO/cam XRD analiz sonucuna göre 26,634 ve 39,458 2θ değerlerinde (1 1 0) ve (1 1 0) düzlemlerine ait çok düşük pikler mevcuttur (00-013-0111 ve 00-005-0642 numaralı ASTM kartları). (1 1 0) düzlemlerine ait bu düşük piklerin, ITO malzemesine ait SnO_2 ve In karakteristik pikleri olduğu söylenebilir. 70 nm ITO/cam ince filminde düşük şiddetli SnO_2 ve In pikleri görülsede bu filmin amorf bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 8.3’ te gösterilen 105 nm ITO/cam XRD analiz sonucuna göre 26,520 ve 51,808 2θ değerlerinde (1 1 0) ve (2 1 1) düzlemlerine ait çok düşük pikler mevcuttur (00-046-1088 ve 00-013-0111 numaralı ASTM kartları). (1 1 0) ve (2 1 1) düzlemlerine ait bu düşük piklerin, ITO malzemesine ait SnO_2 karakteristik pikleri olduğu söylenebilir. 105 nm ITO/cam ince filminde düşük şiddetli SnO_2 pikleri görülsede bu filmin amorf bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

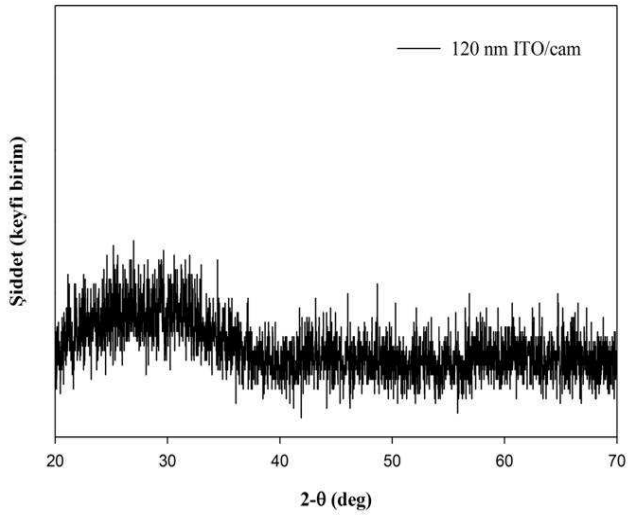
Şekil 8.3’ te 50 nm ve 95 nm kalınlıktaki ITO/PET ince filmlerinin XRD desenleri verilmiştir. Tüm ITO/PET ince filmlerinin amorf yapıda olduğu görülmektedir.

Şekil 8.3’ te gösterilen 30 nm ITO/Si XRD analiz sonucuna göre 26,798 ve 57,425 2θ değerlerinde (1 1 1) ve (2 1 1) düzlemlerine ait çok düşük pikler mevcuttur (00-020-1293 ve 00-006-0395 numaralı ASTM kartları). (1 1 1) ve (2 1 1) düzlemlerine ait bu düşük piklerin, ITO malzemesine ait Sn_3O_4ve SnO karakteristik pikleri olduğu söylenebilir. 30 nm ITO/Si ince filminde düşük şiddetli Sn_3O_4ve SnO pikleri görülse de bu filmin amorf bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

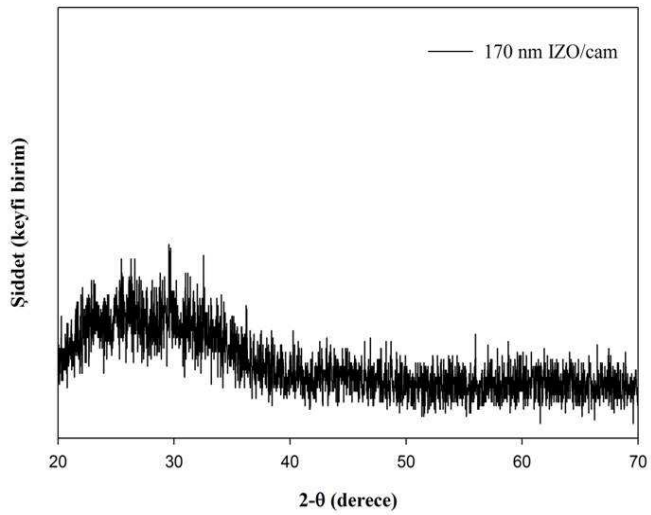
Şekil 8.3’ teki 115 nm kalıklıktaki ITO/Si ince filmlerinin XRD desenlerine bakıldığında ise üretilen ince filmin amorf yapıda olduğu görülmektedir.

8.3.2 RF magnetron Sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin XRD analizleri

RF magnetron tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerin XRD analizleri (40 kV, 30 mA) λ=1,54059 Å dalgaboylu CuK_α ışını kullanılarak $20° \leq 2\theta \leq 70°$ aralığında 0,02' lik adımlarla yapılmıştır. ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerine ait XRD desenleri Şekil 8.4', 8.5 ve 8.6' da verilmektedir.

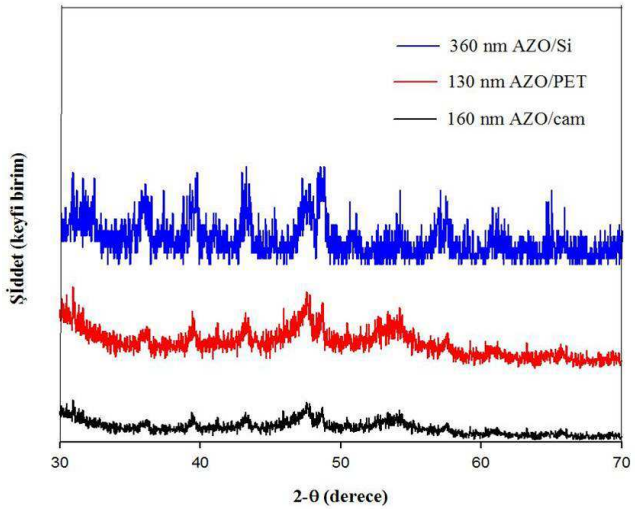


Şekil 8.4 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam ince filminin XRD analizi.



Şekil 8.5 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen IZO/cam ince filminin XRD analizi.

Şekil 8.4 ve 8.5' te RF magnetron tekniği ile üretilen 120 nm kalınlıktaki ITO/cam ve 170 nm kalınlıktaki IZO/cam ince filmlerinin XRD desenlerine bakıldığında üretilen ince filmlerin amorf yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 8.6 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin XRD analizi.

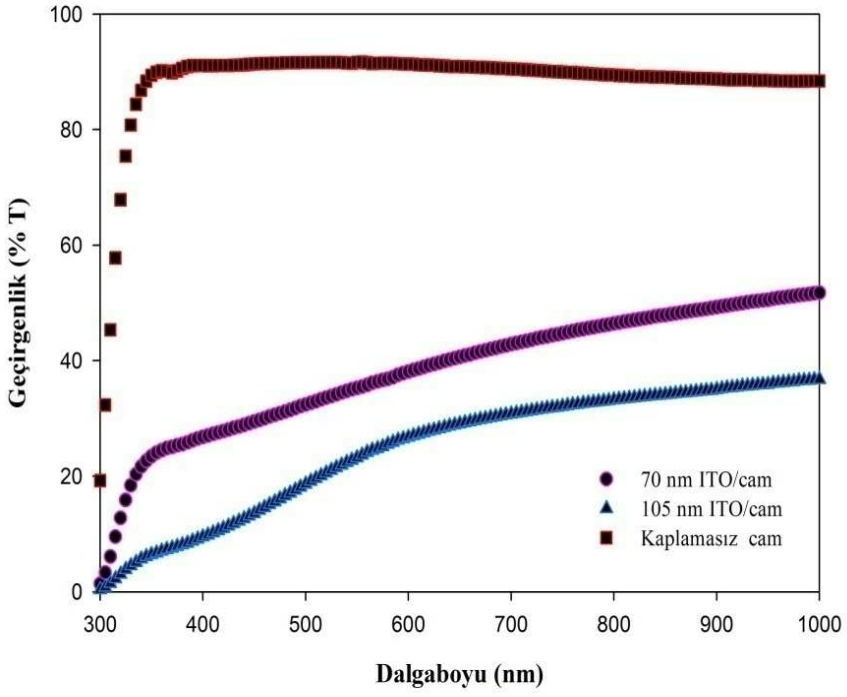
Şekil 8.6’ da RF magnetron tekniği ile üretilen 160 nm AZO/cam, 130 nm AZO/PET, 360 nm AZO/Si ince filmlerinin XRD desenlerine bakıldığında ise, özellikle 360 nm AZO/Si ince filminin zemin sinyalinin yüksek olduğu ve tüm filmlerin belirli doğrultuda tercihli yönelime sahip olmadıkları için bu filmlerin amorf yapıda olduğu görülmektedir.

8.4 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Optik Özellikleri

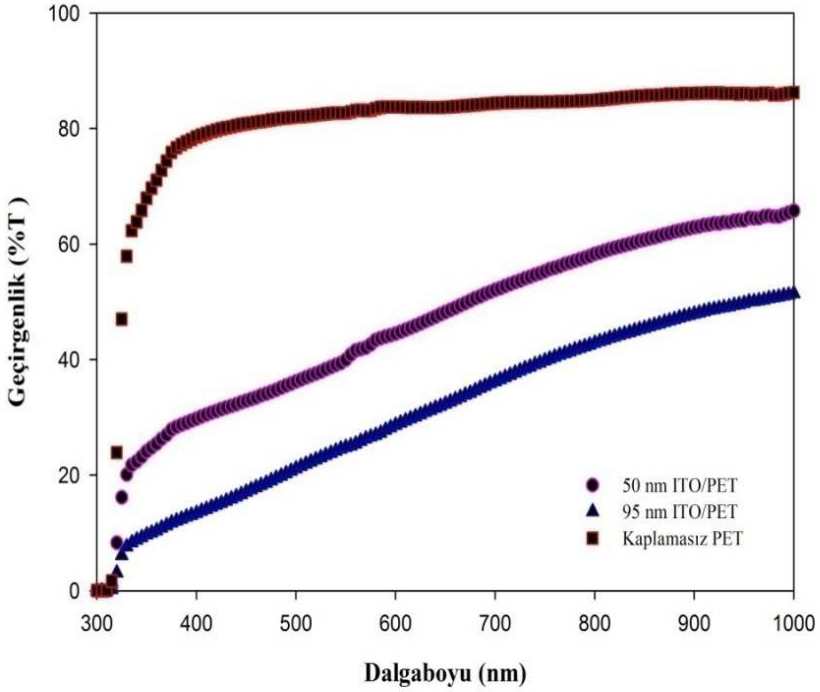
Günümüzde optoelektronik devrelerin kullanımı ve teknolojisi geliştikçe, yarıiletken malzemelerin optik özelliklerinin incelenmesi giderek önem kazanmaktadır. Optoelektronik devrelerin çalışma prensibi, yarıiletkenin elektronları ile malzeme üzerine gönderilen fotonların etkileşerek yarıiletken içerisinde serbest yük taşıyıcıları oluşturması işlemine dayanmaktadır. Bu yüzden, elektronların fotonlar ile etkileşmesini incelemek, yarıiletkenlerin pratikte uygulanması ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi açısından önem kazanmaktadır (Singh, 1995). TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile cam, PET ve Si alttaşlar üzerine büyütülen ITO, IZO ve AZO ince filmlerin optik karakterizasyonunu belirlemek için oda sıcaklığındaki (~300 K) optik geçirgenlik ve soğurma spektrum ölçümleri “UNICO UV-Vis 4802 spektrofotometresi” kullanılarak λ=200–1100 nm dalga boyu arasında alındı. Sistemin önce zemin düzeltmesi yapılarak, camdan geçen ışınım %100 olarak normalize edildi. Böylece numuneler üzerinden okunacak oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri alttaş (cam ve PET) soğurmasından bağımsız hale getirildi. Ayrıca, ince filmlerin optik karakterizasyonu, band aralığı enerjisi ve band yapısı gibi fiziksel özellikleri hakkında bilgi verir. Böylece, üretilen ince filmlerin optik band aralığı (E_g) Tauc metodu kullanılarak elde edilmiştir (Kerkache, et al. 2006). Üretilen tüm filmlerin kırılma indisleri (n) 400–1100 nm ölçüm aralıklı “Filmetrics F20” cihazı ile alınmıştır. Ayrıca, tüm filmlerin yansıma değerleri Filmetrics F20 cihazı ile belirlenmiştir.

8.4.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin optik özelliklerinin belirlenmesi

ITO filmler, cam, PET ve Si alttaşlar üzerine TVA tekniği ile 3 ve 7 dakika süre ile büyütülmüştür. TVA tekniği ile cam ve PET alttaşlar üzerine büyütülen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin ve kaplamasız cam ve kaplamasız PET' in yüzde geçirgenliklerinin dalgaboyuna göre değişim spektrumları karşılaştırmalı olarak Şekil 8.7' ve Şekil 8.8' de verilmektedir.



Şekil 8.7 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları.



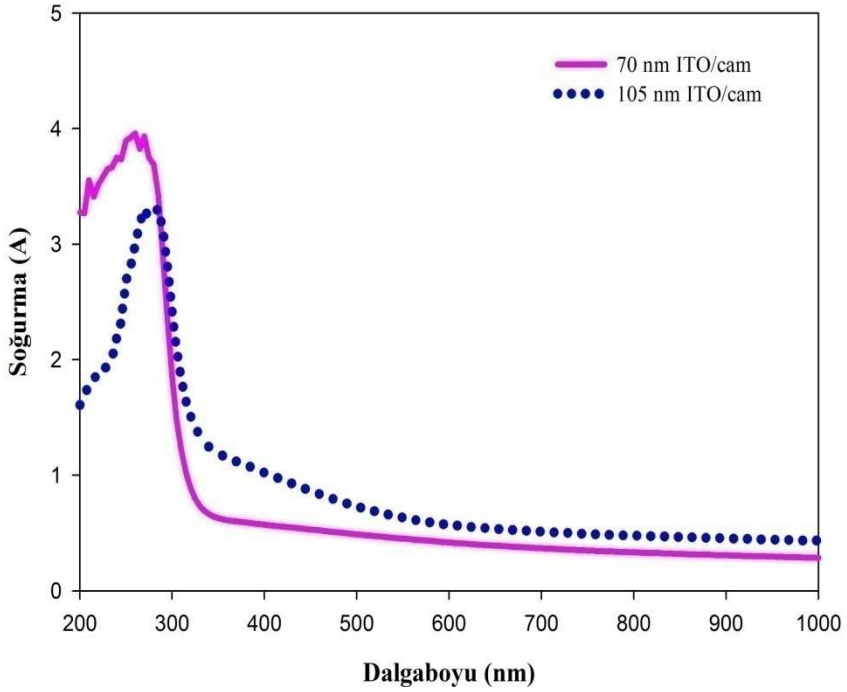
Şekil 8.8 TVA tekniği ile üretilen ITO/PET ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları.

Şekil 8.7 ve 8.8 incelendiğinde, ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin geçirgenlik değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. ITO/cam için ince filmlerinin oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri, 550 nm de %23 ile %35 arasında değişirken, ITO/PET için ise %25 ile %40 arasında değişmektedir. ITO filmlerinin görünür bölgede yüksek geçirgenliğe (%80-90) sahip bir malzeme olduğu bilinmektedir (Wong, et al., 2004; Kim, et al., 2006; Hao, et al., 2008). ITO ince filmlerinin optik özellikleri, film eldesinde kullanılan yöntemlere, film kalınlığına, alttaş ve sıcaklığına sıkı bir şekilde bağlıdır. ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin geçirgenlik değerlerinin beklenenden çok düşük çıkmasının sebebinin, elde edilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin üretim tekniğinden ve yapının opak olmasına bağlı olarak oksijen eksikliğinden kaynaklandığını düşünmekteyiz. Şekil 8.7 ve 8.8' den, ~ 700 nm den daha uzun dalgaboylarında filmlerin geçirgenliklerinin artmaya devam ettiğini, bu dalgaboyundan kısa dalgaboylarında ise azaldığı görülmektedir. Bu da fotonların

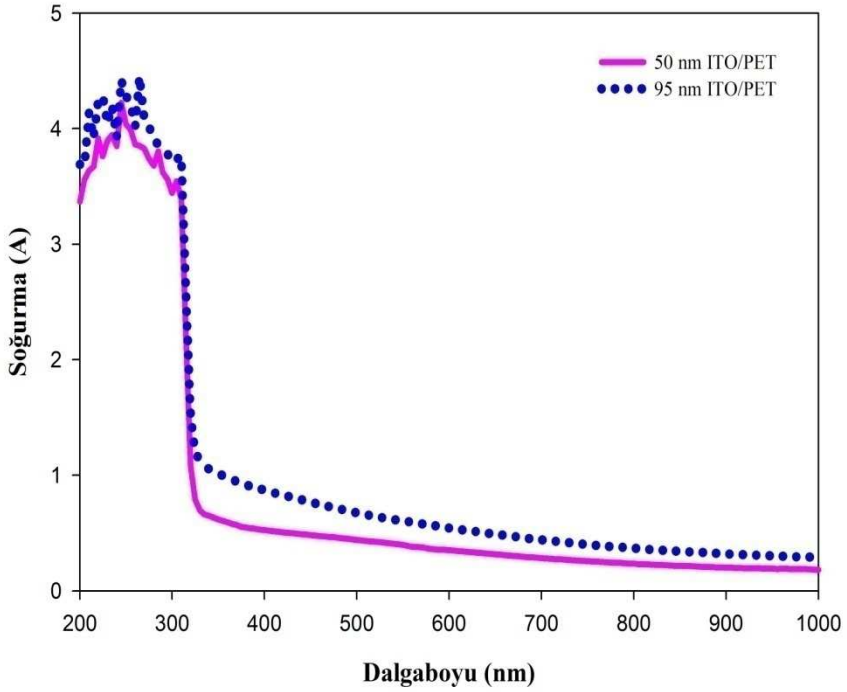
enerjilerinin yarıiletken materyalin enerji band aralığına denk veya daha fazla olduğu durumlarda materyalin daha fazla absorplama yaptığını göstermektedir. Geçirgenliğin kısa dalgaboylarında ani bir düşüş göstermesinin sebebinin bundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bölgelerdeki geçirgenlik kayıpları fotonların saçılmasına neden olabilecek elektron-foton etkileşmelerinden kaynaklanır. Kayıplarda hem yansımanın hem de soğurmanın payı vardır (Smith, et al., 1990).

Spektrumlarda ilk dikkati çeken kaplama kalınlığı 70 nm olan ITO/cam ve 50 nm ITO/PET ince filmlerinin diğer filmlere nazaran daha yüksek geçirgenlik değerine sahip olmalarıdır. Kalınlık arttığı zaman film daha çok fotonu soğurduğu için bu sonuç beklenmektedir. Ayrıca malzemenin kristal yapısından da kaynaklandığını düşünmekteyiz. Geçirgenlik değerlerinin yüksek olma sebebinin, kristalleşme seviyesindeki düşüş yani filmlerin amorf olmaları ile birlikte yüzey yapısında “pin hole” (delik) şeklinde boşlukların olmasından kaynaklanabileceği söylenebilir. Diğer filmlerde ise daha sıkı paketlenen tanelerin soğurmayı arttırdığını ve bu durumunda geçirgenliğin düşük olmasına neden olduğunu düşünmekteyiz. Ayrıca 5.6 bağıntısında geçen şiddetle film kalınlığının ters orantılı olduğu görülmektedir. Bunu da farklı kalınlıktaki ITO ince filmlerin kalınlıklarının arttıkça optiksel geçirgenliklerinin azaldığını Şekil 8.7 ve 8.8’de görmekteyiz.

TVA tekniği ile 3 ve 7 dakika süre ile cam ve PET alttaşlar üzerine büyütülen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları Şekil 8.9 ve 8.10’ da verilmektedir.



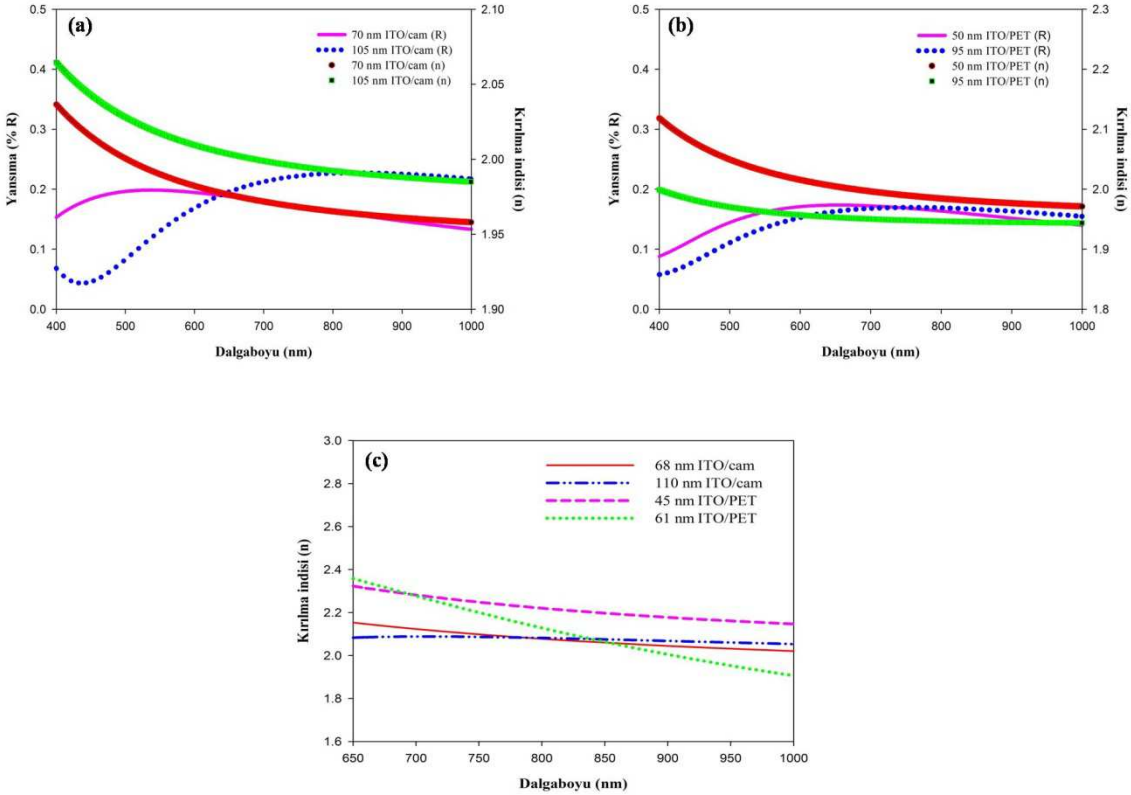
Şekil 8.9 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ince filmlerinin soğurma spektrumları.



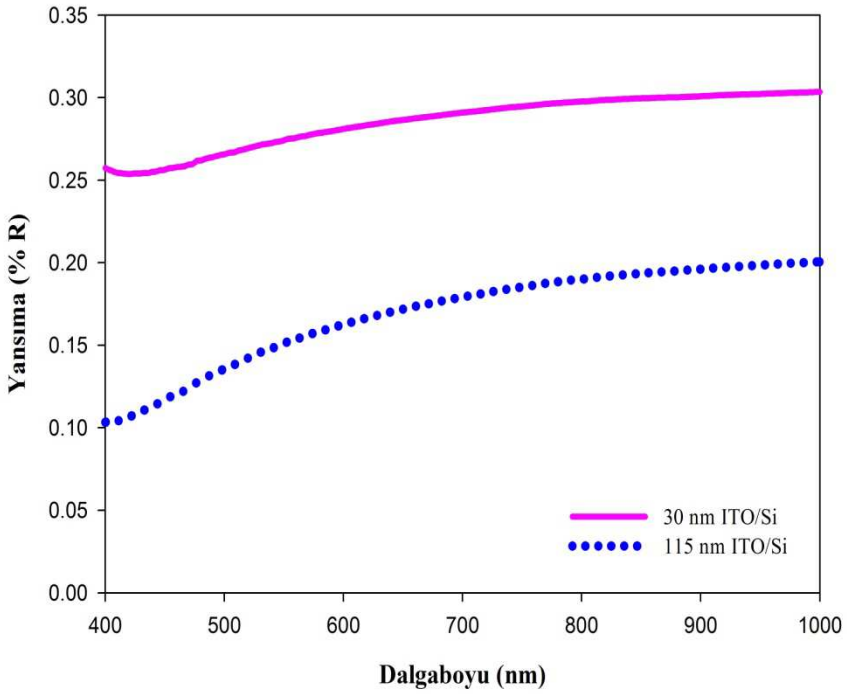
Şekil 8.10 TVA tekniği ile üretilen ITO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları.

Soğurma spektrumları incelendiğinde, tüm ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerin kısa dalga boylarında yüksek soğurma özelliklerinden dolayı opak malzemeler olarak davranırken uzun dalga boylarında saydam malzemeler olarak davranmaktadırlar. 70 nm ITO/cam ve 50 nm ITO/PET ince filmlerinde geçirgenlikteki artışın nedeninin yapının soğurma olayını azaltması ile ilgili olduğunu düşünmekteyiz. Çünkü soğurma olayı, bir malzemedeki başlangıç seviyelerindeki elektron yoğunluğu, geçiş sonrası elektronun yerleşebileceği mümkün boş durumların dağılımı ve yasak enerji aralığı ile ilgilidir. 70 nm ve 105 nm ITO/cam ince filmleri temel soğurma kenarının 300 nm civarında olduğu belirlenmiştir. 50 nm ve 95 nm ITO/PET ince filmleri için ise temel soğurma kenarının 320 nm civarında olduğu belirlenmiştir. Bu durum açık bir şekilde ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin yasak enerji aralıklarının birbirlerine yakın çıkacağının bir göstergesidir.

ITO filmler cam, PET ve Si alttaşlar üzerine TVA tekniği ile 3 ve 7 dakika süre ile büyütülmüştür. Şekil 8.11 ve 8.12' de TVA tekniği ile cam, PET ve Si alttaşlar üzerine büyütülen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin yansıma ve kırılma indisi spektrumları verilmiştir.



Şekil 8.11 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin
a) ve b) Filmetrics F20 ile ölçülen yansıma ve kırılma indisi spektrumları,
c) SE ile ölçülen kırılma indisi spektrumları.



Şekil 8.12 TVA tekniği ile üretilen ITO/Si ince filmlerinin yansıma spektrumları.

Şekil 8.11 ve 8.12 incelendiğinde, Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin yansıma değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun dejenere bir yarıiletken olan ITO ince filmlerinin serbest elektron kontrasyonunun yüksek olmasından kaynaklandığını düşünmekteyiz. 105 nm ITO/cam ince filmi 550 nm de 70 nm ince filmine göre daha düşük yansıma değerine sahiptir.

Ayrıca, Kesim 8.5.1.1 ve 8.5.1.2' deki FESEM ve AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi ITO/cam ince filmlerinin yüzeylerinin daha düzgün olması ve daha sıkı bağlı ince taneciklerin bulunmasından dolayı malzemenin yansıtıcılık özelliğinin arttığını düşünmekteyiz. ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin yüksek yansımaya alttaş olarak kullandığımız cam ve PET alttaşlarından gelen yansımaların da etkisi olabileceğini düşünmekteyiz. Yansıma uzun dalga boyuna doğru kaydıkça arttığı ve tüm filmlerin benzer davranış sergilediği görülmektedir. Bunun nedeni; uzun dalgaboylarında fotonların enerjisi azalacak, fotonların elektron, atomlar veya kristal

moleküleriyle etkileşmeleri daha az olacaktır. Bu durum kırılmanın azalmasına sebep olurken filmlerin yansıtma özelliğini artırdığını düşünmekteyiz. ITO/Si filmlerinin diğer alttaşlar üzerine büyütülen ITO filmler ile karşılaştırıldığında daha yüksek yansımaya sahip olduğu görülmektedir. Alttaş olarak kullandığımız Si alttaştan gelen yansımaların etkisinin daha fazla olduğunu düşünmekteyiz. Yüksek kızılaltı yansıtma özelliğine sahip olan ITO filmler, ısı yansıtıcı aynalarda, güneş pilleri, foto-diyotlar, imaj sensörleri, sıvı kristal ekranlar gibi opto-elektronik cihazlarda kendilerine değişik uygulamalar bulmaktadırlar (Hamberg, et al., 1986).

Yarıiletken materyallerin kırılma indisleri (n) optik ve elektriksel özelliklerini belirlemede önemlidir. Güneş pilleri uygulamalarında olduğu kadar optoelektronik devre elemanlarında da kırılma indisinin bilinmesi gerekir. TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin kırılma indisi spektrumları Şekil 8.11' de verilmiştir.

Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin elde edilen spektrumları incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı ve bu durumun tüm ITO ince filmlerde benzer formda olduğu görülmektedir. Bu durum ITO/cam ve ITO/PET ince filmleri için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Gelen fotonun dalga boyu azaldıkça (yani fotonun enerjisi arttıkça) kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, gelen fotonun enerjisinin artmasından dolayı elektronlarla daha fazla etkileşmesindendir.

Üretilen ITO ince filmlerinin kalınlıkları birbirine yakın olmalarından dolayı kırılma indisi değerleri de yakın çıkmıştır. Bununla birlikte, TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin kırılma indisi değerleri 550 nm'de 1,94 ile 2,02 arasında değişmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir (Fallah, et al., 2006; Mudryi, et al., 2007; Senthilkumar, et al., 2010).

Uygulamalar ara yüzeylerdeki çoklu yansımalardan faydalanmaya başladıkça film kalınlığı çok önemli bir dizayn ve karakterizasyon parametresi olmaya başlamıştır.

Buradan yola çıkılarak ince filmlerin optik band aralıkları, kusur seviyeleri, fonon ve plazma frekansları hakkında bilgi edinilebilir. Bundan başka kırılma indisinin bilinmesi optik parçaların ve optik kaplamaların modellenmesi ve dizaynı açısından da önem taşımaktadır.

TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin gözeneklilik (porozite) değerleri eşitlik 8.3 ile hesaplanmıştır (Oh, et al., 2003).

$$\text{Porozite} = \left(1 - \frac{n^2 - 1}{n_d^2 - 1}\right) x\,100\,(\%) \qquad (8.3)$$

Burada n_d=2,1 gözeneksiz ITO filminin kırılma indisi ve n gözenekli ITO ince filminin kırılma indisidir (Kinckerbocker, et al., 1996). Yapılan çalışmalar depolama oranı azaldıkça ITO ince filmlerinin kırılma indisi değerlerinin azaldığını gözenekliliğin ise arttığını göstermiştir (Fallah, et al., 2006).

Çizelge 8.3 incelendiğinde TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin gözeneklilik değerleri verilmiştir. Bu sonuçlar ile birlikte, ITO ince filmlerinin optik ve elektriksel özelliklerinin kontrol edilmesinde depolama oranın önemli bir rol oynadığı sonucu çıkartılabilir. Düşük depolama oranlarında depolanan filmlerin düşük özdirençleri, sırasıyla, donör atomları olarak Sn aktivasyonunu kolaylaştırmak ve taşıyıcı mobilitesini artırmak filmlerin kristal yapısına ve daha büyük tanelere bağlanır. Aynı zamanda, böyle filmler daha büyük bir gözenekliliğe sahiptir. ITO ince filmlerindeki gözeneklilik, mobiliteyi azaltarak taşıyıcıların saçılmasını arttıracağı beklenmektedir. Bunun, çelişkili bir sonuç olduğu açıktır. ITO ince filmler için güvenilir gözeneklilik değerleri elde etmek için AFM ölçümleri yapmak gereklidir (Fallah, et al., 2006).

Çizelge 8.3 ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin kırılma indisi ve porozite değerleri.

Malzeme	Kırılma indisi (n)	Porozite (%)
70 nm ITO/cam	n=1,98	P= 14,3
105 nm ITO/cam	n=1,94	P= 18,9
50 nm ITO/PET	n=2,02	P= 9,6
95 nm ITO/PET	n=1,96	P= 16,6

Yarıiletkenlerin band yapılarının araştırılmasında en yaygın olarak optiksel metod olan Tauc metodu kullanılır. Bir yarıiletkenin sahip olduğu optik geçişi ve yasak enerji aralığı hakkında doğru ve kesin bilgiyi bu yöntemle elde etmek mümkündür.

İnce filmlerin Tauc metodu ile grafiklerin oluşturulmasında absorbans katsayısı α için denklem 8.4 ve 8.5 verilmiştir.

$$\alpha = \frac{\ell n(1/T)}{d} \qquad (8.4)$$

$$\alpha = 2{,}303\left(\frac{A}{d}\right) \qquad (8.5)$$

Burada; A: Absorbans, T: Geçirgenliği ve d: film kalınlığını göstermektedir.

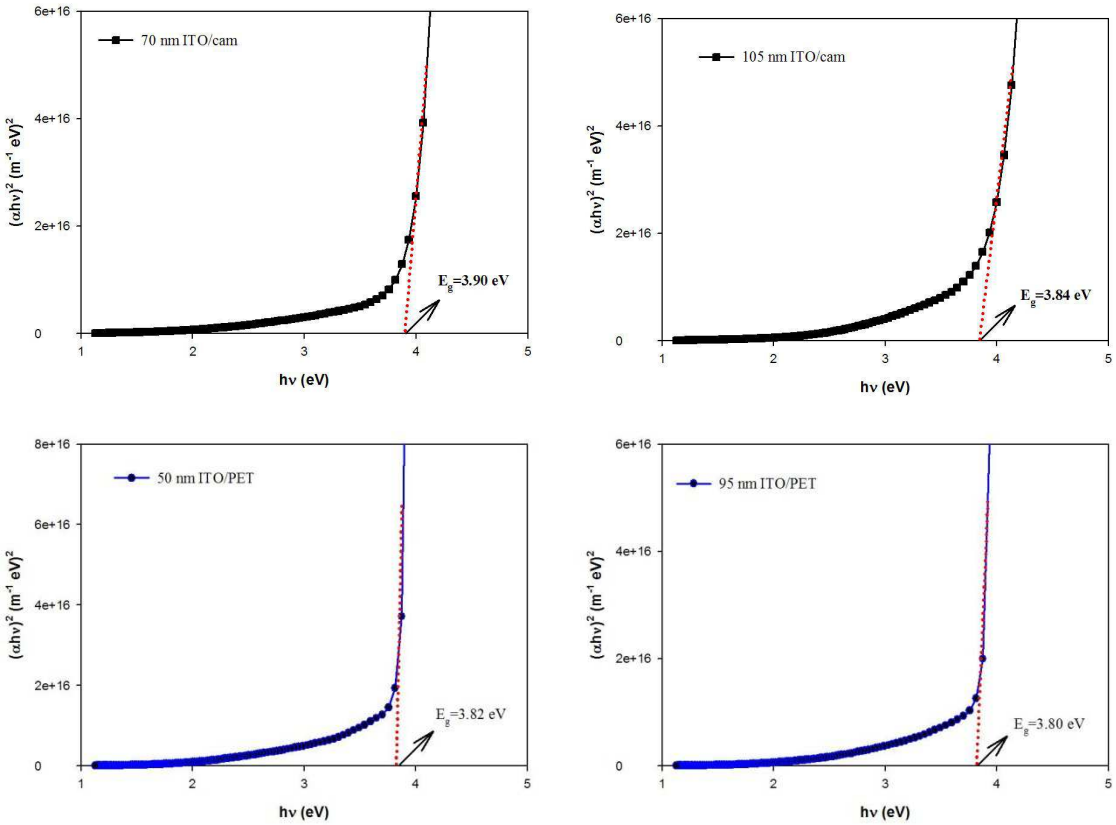
Şekil 8.9 ve 8.10' da verilen soğurma spektrumlarından faydalanılarak α=2,303(A/d) ifadesinden her bir film için lineer soğurma katsayıları hesaplanıp, TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri çizilerek, Tauc metodu ile band aralığı değerleri hesaplanmıştır. Bu grafiklerin lineer

kısımlarının doğrultularının hν eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$' da kestiği noktaların enerji değerleri filmlerin yasak enerji aralıkları olarak belirlenmiştir. Optik band aralığı değerini bulabilmek için foton enerjisiyle optik soğurma değeri arasındaki aşağıdaki 8.6 bağıntısından yararlanılmıştır.

$$(\alpha h\nu) \propto (h\nu - E_g)^n \qquad (8.6)$$

Burada E_g band enerji aralığı, α soğurma sabiti, n elektronik geçişin doğasına bağlı olarak 1/2 ve 2 değerini alan bir sabit ve h Planck sabitidir. n izinli doğrudan geçişler için 1/2 değerini alırken, izinli dolaylı geçişler için 2 değerini alır. Foton enerjisine soğurma sabitinin bağlılığı, çalışılan enerji band yapılarında ve elektronların geçiş tipinde önemlidir. Bir kristal veya polikristalde hem doğrudan hem de dolaylı optik geçişler, materyalin band yapısına bağlıdır.

Şekil 8.13' te ITO ince filmlerine ait band aralığı değerlerini gösteren spektrumu verilmiştir. Literatürde pek çok teknikle hazırlanan direkt band geçişli ITO ince filmlerinin yasak enerji aralığı değerlerinin 3,5 ile 4,3 eV arasında değiştiği bilinmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatürle uyum içerisindedir (Kerkachea, et al., 2009; Cui, et al., 2002; Khodorov, et al., 2007; Raoufi, et al., 2007).



Şekil 8.13 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2$~hν değişim grafikleri.

TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin kalınlıkları arttıkça geçirgenlik değerlerinin azaldığı Şekil 8.7 ve 8.8' den görülmüştü. Bu, üretilen filmlerin opak olduğunu ve bu opaklığın oksijen boşluklarından ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığını söyleyebiliriz. Film kalınlığı ve yoğunluğu arttıkça malzemeden geçen ışık azalacağından kırılma indisi değerlerininde azalacağı açıktır. Film kalınlığını band aralığı ile ileşkilendirecek olursak; farklı alttaşlar üzerine büyütülen ince filmleri ayrı ayrı ele alındığında film kalınlığı arttıkça band aralığı değerlerinin azaldığını Çizelge 8.4' te görmekteyiz.

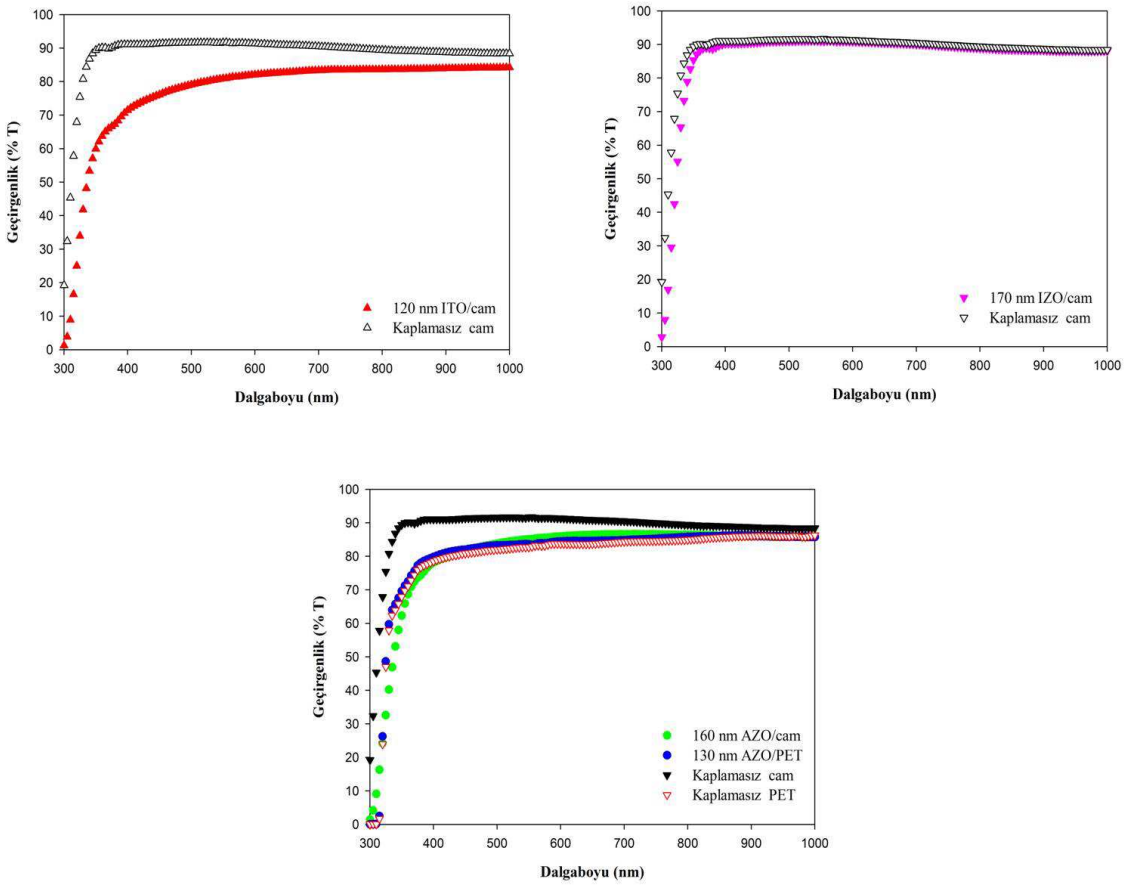
Çizelge 8.4 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin yasak enerji aralıkları.

Malzeme	E_g (eV)
70 nm ITO/cam	3,90
105 nm ITO/cam	3,84
50 nm ITO/PET	3,82
95 nm ITO/PET	3,80

8.4.2 RF magnetron Sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin optik özelliklerinin belirlenmesi

Optik ve elektriksel özellikler, SİO filmlerin mikroyapısına, stokiyometrisine ve doğal safsızlıklarına bağlı olduğundan, farklı üretim yöntemleri ile elde edilen filmler farklı özellikler sergileyebilmektedirler. Optoelektronik aletlerdeki gelişmeler, belirli özelliklere sahip SİO malzemelere ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. Yapılan çalışmalar, bu problemlerin üstesinden gelinmesine yöneliktir. Safsızlık katkılanmış ZnO, ITO'ya alternatif olarak gösterilen çok popüler bir malzemedir.

Bölüm 7.4.' te üretim parametreleri verilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmleri RF magnetron sıçratma tekniği ile büyütülmüştür. RF magnetron sıçratma tekniği ile cam ve PET alttaşlar üzerine büyütülen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin ve kaplamasız cam ve kaplamasız PET' in yüzde geçirgenliklerinin dalgaboyuna göre değişim spektrumları karşılaştırmalı olarak Şekil 8.14'de verilmektedir.



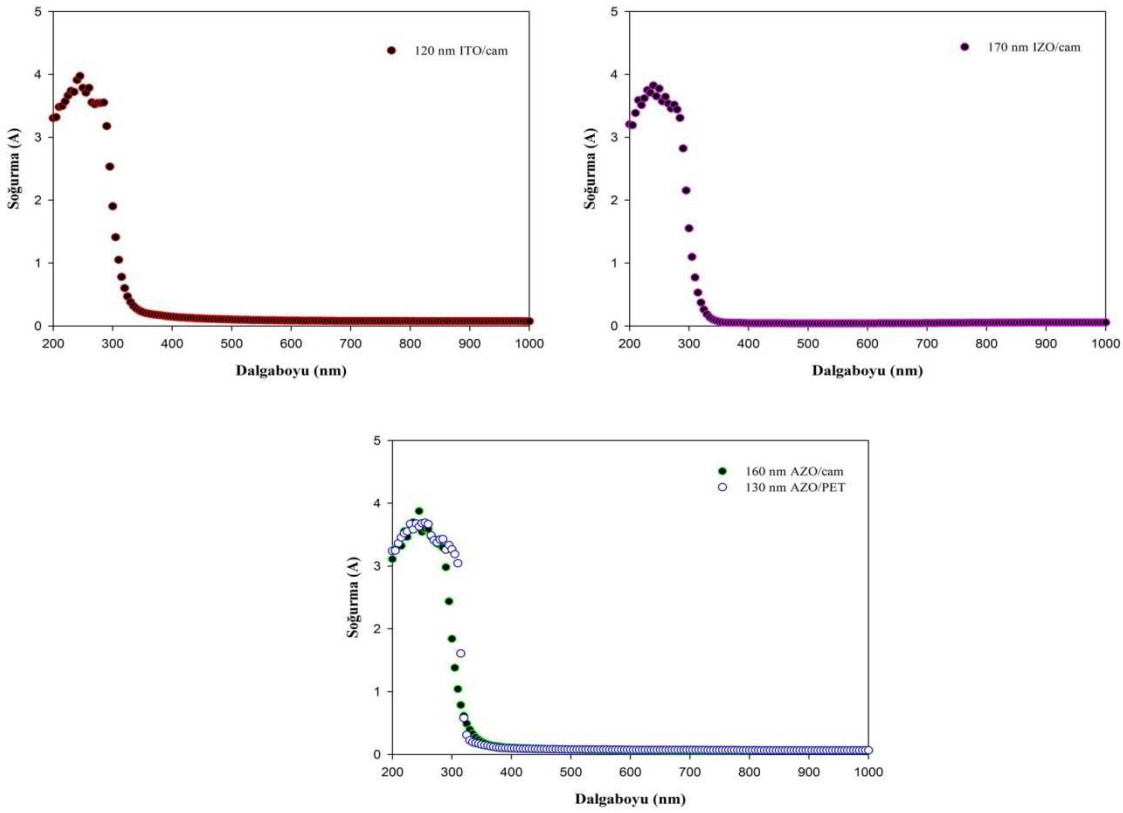
Şekil 8.14 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin geçirgenlik spektrumları.

Şekil 8.14'te verilen farklı kalınlıkta ve farklı alttaşlar üzerinde büyütülen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin spektrumları incelendiğinde tüm filmlerin λ=400 nm dalga boyunun üzerindeki görünür bölgede geçirgen oldukları gözlenmiştir. Ayrıca üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin geçirgenliklerinin 550 nm' de %80-90 arasında olduğu görülüyor. Saydam iletken oksitlerin özellikleri ile ilgili literatür araştırmalarına bakıldığında ise geçirgenlik %80-90 arasında yüksek değerlere sahip olduğunu ve yapılan bu çalışmada da aynı değerlere ulaşıldığını görmekteyiz (Hao, et al., 2008; Kim, et al., 2008; Guille´n, et al., 2010; Kim, et al., 2010; Elmas, 2013 b). Bununla birlikte, RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinden geçirgenlik değeri en iyi olan 170 nm IZO/cam ince filmi olduğu Şekil

8.14’ de görülmektedir. Yine, kaplamasız PET ve AZO/PET ince filmleri için 550 nm’ de geçirgenlik değerleri hemen hemen aynı değerlerdedir.

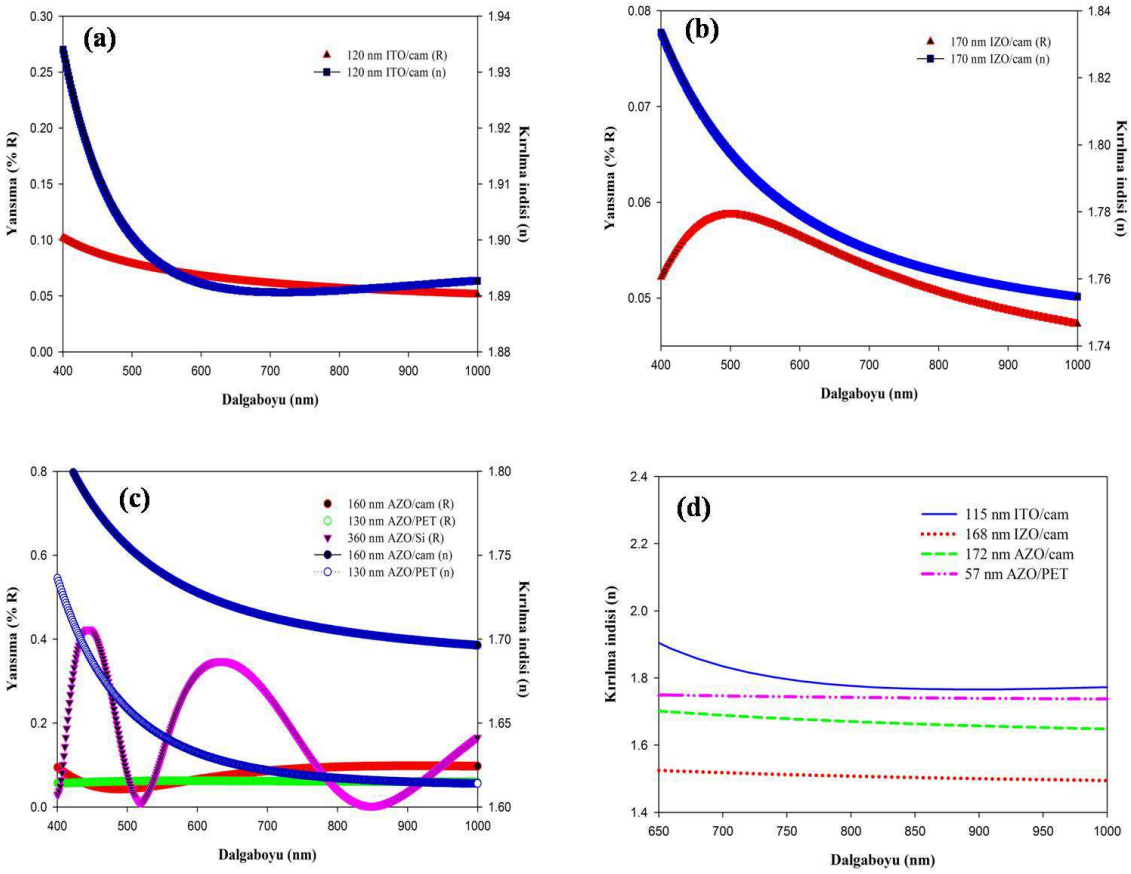
RF magnetron sıçratma tekniği ile cam ve PET alttaşlar üzerine büyütülen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları Şekil 8.15’ te verilmektedir. Soğurma spektrumları incelendiğinde, ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerin kısa dalga boylarında düşük soğurma özelliklerinden dolayı saydam malzemeler olarak davrandıkları görülmektedir. ITO, IZO ve AZO ince filmlerinde geçirgenlikteki artışın nedeninin yapının soğurma olayını azaltması ile ilgili olduğunu düşünmekteyiz. Çünkü soğurma olayı, bir malzemedeki başlangıç seviyelerindeki elektron yoğunluğu, geçiş sonrası elektronun yerleşebileceği mümkün boş durumların dağılımı ve yasak enerji aralığı ile ilgilidir.

ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin temel soğurma kenarının 320 nm civarında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, farklı malzemeler olan ITO, IZO ve AZO ince filmlerin Şekil 8.4, 8.5 ve 8.6 XRD desenlerine bakıldığında amorf yapıda yani kristalleşme seviyelerinin düşük olduğundan ve sıkı bir yapıya sahip olmadıklarından band aralıklarının yakın çıkabileceğini düşünmekteyiz.



Şekil 8.15 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları.

RF magnetron sıçratma tekniği ile cam, PET ve Si alttaşlar üzerine büyütülen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin yansıma ve kırılma indisi spektrumları Şekil 8.16’ da verilmektedir.



Şekil 8.16 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen a)ITO/cam, b)IZO/cam, c) AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin Filmetrics F20 ile ölçülen yansıma ve kırılma indisi spektrumları,d) ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin SE ile ölçülen kırılma indisi spektrumları.

Şekil 8.16(a), incelendiğinde, Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen 120 nm ITO/cam ince filminin yansıma değerlerinin uzun dalgaboylarına doğru kaydıkça azaldığı görülmektedir. Bu durumun dejenere bir yarıiletken olmasına rağmen ITO ince filminde serbest elektron kontrasyonunun düşük olmasından kaynaklandığını düşünmekteyiz. Aynı zamanda 120 nm ITO/cam ince filminin yüksek geçirgenliğe sahip olmasından ve kristal yapısından kaynaklandığını da söyleyebiliriz. Ayrıca, Kesim 8.5.2.1 ve 8.5.2.2' deki FESEM ve AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi 120 nm ITO/cam ince filmlerinin yüzeylerinin daha düzgün olması ve daha sıkı bağlı

ince taneciklerin bulunmasından dolayı malzemenin yansıtıcılık özelliğinin arttığını düşünmekteyiz. 120 nm ITO/cam filminin 550 nm' de %7 civarında yansımaya sahip olması alttaş olarak kullandığımız cam alttaştan gelen yansımaların da etkisi olabileceğini düşünmekteyiz. Bu durum kırılmanın azalmasına sebep olurken filmlerin yansıtma özelliğini artırdığını düşünmekteyiz. Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen 120 nm ITO/cam ince filminin elde edilen Şekil 8.16(a) spektrumu incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum 120 nm ITO/cam ince filmi için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Gelen fotonun dalga boyu azaldıkça (yani fotonun enerjisi arttıkça) kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, gelen fotonun enerjisinin artmasından dolayı elektronlarla daha fazla etkileşmesindendir. Kırılma indisi ile ilgili elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir (Habibi, et al., 2005; Fallah, et al., 2006).

Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen 170 nm IZO/cam ince filmi için Şekil 8.16(b) incelendiğinde ise yansıma değerlerinin kızılaltı bölgeden morötesi bölgeye doğru kaydıkça arttığı görülmektedir. Bunun nedeni fotonların enerjisinin artışından dolayı, fotonların elektron, atomlar veya kristal moleküleriyle daha fazla etkileşmeleri ve geri yansıtmalarıdır (Benramdane, et al., 1997). Bu durumun 170 nm IZO/cam ince filminin kaplamasız cam ile hemen hemen aynı yüksek geçirgenliğe sahip olmasından ve kristal yapısından kaynaklandığını da söyleyebiliriz. Ayrıca, Kesim 8.5.2.1 ve 8.5.2.2' deki FESEM ve AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi 170 nm IZO/cam ince filmlerinin yüzeylerinin daha düzgün olması ve daha sıkı bağlı ince taneciklerin bulunmasından dolayı malzemenin yansıtıcılık özelliğinin arttığını düşünmekteyiz. 170 nm IZO/cam filminin 550 nm' de %5 civarında yansımaya sahip olması az da olsa alttaş olarak kullandığımız cam alttaştan gelen yansımaların da etkisi olabileceğini düşünmekteyiz. Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen 170 nm IZO/cam ince filminin elde edilen Şekil 8.16(b) spektrumu incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum 170 nm IZO/cam ince filmi için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Gelen fotonun dalga boyu azaldıkça (yani fotonun enerjisi arttıkça) kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, gelen fotonun enerjisinin

artmasından dolayı elektronlarla daha fazla etkileşmesindendir. Kırılma indisi ile ilgili elde edilen sonuçlar Çizelge 8.4' te verilmiştir ve sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir (Benouis, et al., 2010).

Son olarak Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen 160 nm AZO/cam, 130 nm AZO/PET ve 360 nm AZO/Si ince filmleri için Şekil 8.16(c) incelendiğinde; 160 nm AZO/cam ve 130 nm AZO/PET morötesi bölgeden kızılaltı bölgeye doğru kaydıkça hemen hemen aynı yansıma değerleri sergiledikleri görülmektedir. Hatta bu durumun 160 nm AZO/cam ve 130 nm AZO/PET ince filmlerinin hemen hemen eşit yüksek geçirgenliğe sahip olmasından ve kristal yapısından kaynaklandığını da söyleyebiliriz. Ayrıca, Kesim 8.5.2.1 ve 8.5.2.2' deki FESEM ve AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi AZO ince filmlerinin yüzeylerinin daha düzgün olması ve daha sıkı bağlı ince taneciklerin bulunmasından dolayı malzemenin yansıtıcılık özelliğinin arttığını düşünmekteyiz. 160 nm AZO/cam ve 130 nm AZO/PET ince filmlerinin 550 nm' de %5 ile %6 civarında yansımaya sahip olmaları az da olsa alttaş olarak kullandığımız cam ve PET alttaşlarından gelen yansımaların etkisi olabileceğini düşünmekteyiz. Filmetrics F_{20} cihazı ile ölçülen 160 nm AZO/cam ve 130 nm AZO/PET ince filmlerinin elde edilen Şekil 8.16(c) spektrumu incelendiğinde ise, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum 160 nm AZO/cam ve 130 nm AZO/PET ince filmleri için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Gelen fotonun dalga boyu azaldıkça (yani fotonun enerjisi arttıkça) kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, gelen fotonun enerjisinin artmasından dolayı elektronlarla daha fazla etkileşmesindendir. Kırılma indisi ile ilgili elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içerisindedir (Shan, et al., 2003).

Filmetrics F20 cihazı ile ölçülen 360 nm AZO/Si ince filminin yansıma değerlerinde sürekli dalgalanmalar görülmektedir. 360 nm AZO/Si filminin yansıma değerleri diğer farklı alttaşlar üzerine büyütülen AZO ince filmler ile karşılaştırıldığında ise 360 nm AZO/Si ince filminin dalgalı yansıma sergilediği görülmektedir. Burada alttaş olarak kullandığımız Si alttaştan gelen yansımaların ve kalınlığın etkisi olduğunu düşünmekteyiz.

SE tekniği ile ölçülen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin elde edilen Şekil 8.16(d) spektrumu incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum üretilen ince filmler için 650-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir.

Yoğunluk fiziksel yapının önemli bir parametresidir. İnce filmlerde görülen önemli bir özellik de filmin kalınlığının azalmasıyla yoğunluğunun da azalmasıdır. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin gözeneklilik (porozite) değerleri eşitlik 8.3 ile hesaplanmıştır (Oh et al., 2003).

$$\text{Porozite} = \left(1 - \frac{n^2 - 1}{n_d^2 - 1}\right) x\,100\,(\%) \qquad (8.3)$$

Burada n_d=2,1 gözeneksiz ITO filminin kırılma indisi ve n gözenekli ITO ince filminin kırılma indisidir (Kinckerbocker, et al., 1996). Gözeneksiz IZO ve AZO ince filmleri için ise n_d=2,0 alınmıştır.

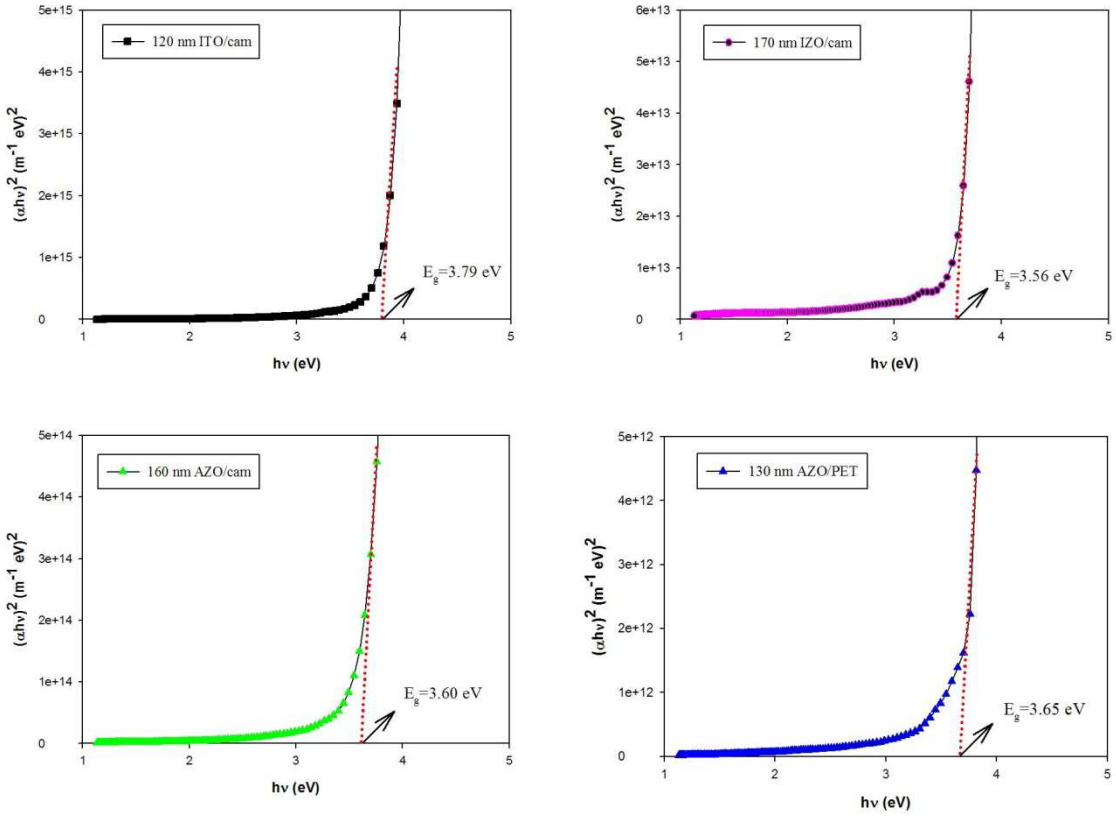
Çizelge 8.5' de RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin gözeneklilik değerlerinin kırılma indisi ile olan ilişkisi ele alınmıştır. Burada eşitlik 8.4 ile hesaplanan gözeneklilik değerlerinin, RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen filmlerde oldukça yüksek çıktığını söyleyebiliriz. Bu sonuçlar ile, üretilen filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin kontrol edilmesinde üretim tekniğinin önemli bir rol oynadığı sonucu çıkartılabilir. Aynı zamanda üretilen filmlerin kristal yapısı ve büyük tanelere sahip olması gözenekliliği etkileyen unsurlardır. Gözeneklilik değerleri için daha güvenilir sonuçlar elde etmek için kesim 8.5.2.2' deki AFM ölçümlerine bakılmıştır.

Çizelge 8.5 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin kırılma indisi ve porozite değerleri.

Malzeme	Kırılma indisi (n)	Porozite (%)
120 nm ITO/cam	n=1,89	P= 24,5
170 nm IZO/cam	n=1,78	P= 27,7
160 nm AZO/cam	n=1,73	P= 23,6
130 nm AZO/PET	n=1,64	P= 35,62

Şekil 8.15' de verilen soğurma spektrumlarından faydalanılarak $\alpha=2,303(A/d)$ ifadesinden her bir film için lineer soğurma katsayıları hesaplanıp, RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri çizilerek, Tauc metodu ile band aralığı değerleri hesaplanmıştır. Bu grafiklerin lineer kısımlarının doğrultularının hν eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$' da kestiği noktaların enerji değerleri filmlerin yasak enerji aralıkları olarak belirlenmiştir.

RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri Şekil 8.17'de ve band aralığı değerleri de Çizelge 8.6' da verilmektedir. Büyütülen ITO/cam ince filminin yasak enerji aralığı 3,79 eV olarak hesaplanmıştır. ITO ince filmlerinin yasak enerji aralıkları 3,5 ile 4,3 eV arasında değiştiği bilinmektedir ve elde edilen bu sonuç literatürle uyum içerisindedir (Gonçalves, et al., 2007; Kerkachea, et al., 2009; Cui, et al., 2002; Khodorov, et al., 2007; Raoufi, et al., 2007). Safsızlık katkılı ZnO filmler için yani RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen IZO ince filminin yasak enerji aralığı değeri 3,56 eV iken AZO ince filmlerinin yasak enerji aralıkları 3,60 eV ve 3,65 eV olarak hesaplanmıştır ve elde edilen bu sonuçlar literatürle uyum içerisindedir (Li, et al., 2010; Gonçalves, et al., 2007).



Şekil 8.17 RF magnetron tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin $(\alpha h\nu)^2$~hν değişim grafikleri.

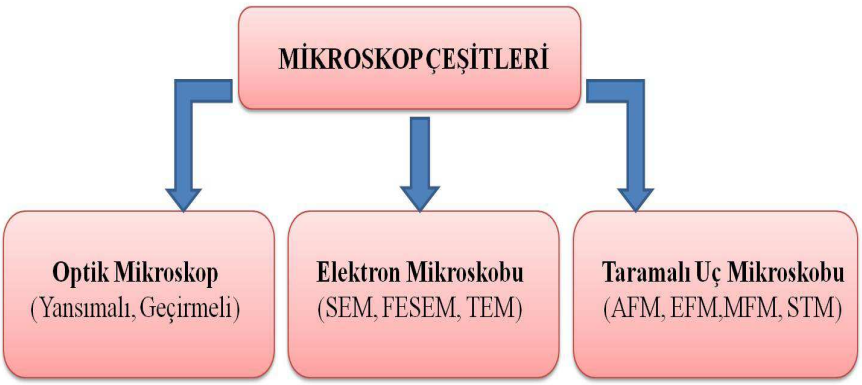
Çizelge 8.6 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin yasak enerji aralıkları.

Malzeme	E_g (eV)
120 nm ITO/cam	3,79
170 nm IZO/cam	3,56
160 nm AZO/cam	3,60
130 nm AZO/PET	3,65

8.5 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Yüzeysel Özellikleri

Yüzey, maddenin çevresi ile arasında bulunan ara birim olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir katı yüzeyi atomsal olarak düz bir yüzeye sahiptir. Ancak gerçekte böyle bir ideal yapı bulunmamaktadır. Tüm gerçek katı yüzeyleri değişik boyutlarda yüzey pürüzlülüklerine sahiptir (Erbil, 2006). Malzemelerin yüzey pürüzlülüğü ve kimyası malzeme üretim koşulları ve yüzeye uygulanan çeşitli yüzey işlemleri yardımı ile değiştirilebilir. Böylece üretilen malzemelerin teknolojik uygulamalarda kullanım verimini etkileyen önemli faktörlerden biri olan yüzey özellikleri elektriksel ve optiksel parametreleri önemli derecede etkiler. Dolayısı ile filmlerin yüzeysel özellikleri ayrıntılı şekilde incelenmelidir.

Malzemelerin yüzey özellikleri, makroskobik ve mikroskobik tekniklerle incelenir. Makroskobik inceleme optik mikroskop gibi düşük büyütmeli cihazlarla yapılır ve kısmen malzemelerin yapıları hakkında bilgi edinilebilir. Mikroskobik inceleme ise yüksek ayırt etme gücüne sahip elektron mikroskopları kullanılarak yapılır ve malzemenin yüzey özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi verir. Günümüzde yüzey ayrıntılarını atomik boyutta incelemek de mümkündür (Skoog, et al., 1998). Malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesinde en yaygın yöntemler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntü analizleridir. Bu analizlerin incelenmesi sonucunda elde edilen filmlerin pürüzlülükleri, tabana tutunmaları, homojenlikleri ve yüzey kusurları hakkında bilgi edinilebilir. Şekil 8.18'de malzeme analizinde kullanılan mikroskop çeşitleri verilmektedir.



Şekil 8.18 Yüzey analizinde kullanılan mikroskop çeşitleri.

8.5.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi

Günümüz teknolojisinde mikro yapılı malzemeleri görüntülemek, yüzey durumlarını incelemek, analiz etmek ve açıklamak için kullanılan cihazlardan biri taramalı elektron mikroskobudur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile malzemelerin faz dağılımları, tanelerin varlığı, homojenlikleri, gözenekli yapıları ve tabana tutunmaları hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür.

SEM-FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) alan emisyon taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen yüzey görüntülerinde seçilen bir bölge için elemental analiz veya mikroanaliz, enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) ile yapılmaktadır. FESEM-EDS sistemi ile karakteristik X-ışınları analiz edilir. Bu şekilde hem malzemenin yüzey görüntüsü elde edilir hem de elemental bileşimi belirlenebilir.

FESEM-EDS sistemi kullanılarak FESEM analizi yapılmıştır. FESEM yüzey görüntüsü almadan önce ITO ince filmlerin elektriksel olarak yüklenmesini önlemek için numune yüzeyi çok ince bir iletken tabaka ile kaplanır. Bunun için altın gibi elementler vakum içerisinde buharlaştırılarak numune üzerine püskürtülür. Altın kaplama, elektriksel iletkenlik sağladığı gibi ayrıca organik malzemelerin

incelenmesinde ikincil elektron (SE) verimini arttırır. Ayrıca FESEM analizleri sırasında ince filmlerin ağırlıkça içerdikleri %In, %Sn ve %O oranları EDS analizleri ile tespit edilmiştir.

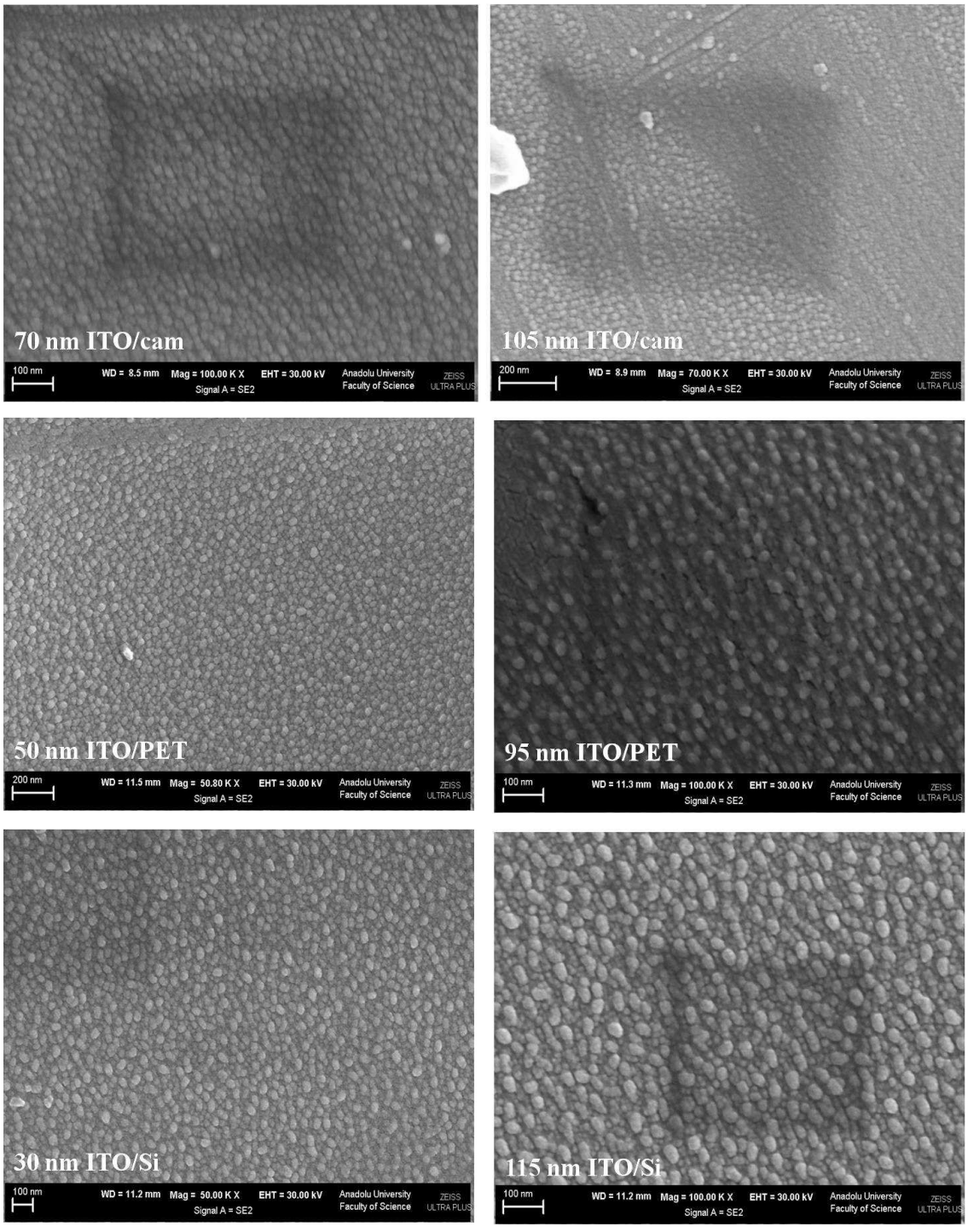
Bu bölümde TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin yüzey özellikleri Zeiss Ultra Plus FESEM cihazı ve elemental analizleri ise EDS (IXRF Model 550i) ile incelenmiştir.

Malzemelerin yüzey özelliklerini ve pürüzlülüklerini incelemek amacıyla taramalı uç mikroskopları geliştirilmiştir. Taramalı uç mikroskoplarından en yaygın olarak kullanılanı AFM (Atomic Force Microscope)' dir. AFM, numuneyi nano boyutta görüntülemek, ölçmek ve değiştirmek için kullanılan en önemli tekniklerden biridir. AFM ile elde edilen yüzey topografisinden numunenin büyüme şekli, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyinde oluşabilecek yığılma ya da boşluk tipi kusurlar hakkında bilgi edinilebilir.

Bu bölümde TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin yüzey morfolojilerini incelemek ve pürüzlülük değerlerini belirlemek için (Ambios Q-scope Atomic Force Microscope) AFM cihazı kullanılmıştır. Üretilen tüm filmlerin 4 x 4 μm^2 skalada iki boyutlu ve üç boyutlu görüntüleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, ScanAtomic SPM software-2009 (Q-Port version 5.1.0) ile 40 hat boyunca alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir.

8.5.1.1 FESEM ve EDS analizleri

Şekil 8.19' da TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin farklı büyütme oranlarında alınmış FESEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 8.19 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin FESEM görüntüleri.

İkincil elektronlar kullanılarak 30 kV hızlandırma potansiyelinde alınan FESEM görüntülerinde ITO ince filmleri küresel tanecikli olarak homojen ve düzgün bir yapıda büyümüşlerdir. Ayrıca, genel olarak tüm ITO ince filmlerde sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği söylenebilir. FESEM görüntüleri ölçek olarak AFM görüntülerinin alındığı ölçeğe yakın olması nedeniyle, AFM görüntüleri ile benzer özellikler göstermektedir. Farklı yükseklikte ve boyutta yığılma şeklindeki oluşumlar olmadığından film kalınlığının yüzeyde homojen olduğunun bir göstergesidir. Bu durumun ITO ince filmlerinin aynı zamanda düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmasına neden olacaktır. Çizelge 8.8' de verilen pürüzlülük değerleri de bu sonucu desteklemektedir. 100000 ve üzeri büyütülmüş görüntüler ise, filmlerin yüzey özellikleri ile ilgili bir başka konu hakkında da bilgi vermektedir. Bu görüntüler yüzey üzerinde boşlukların olduğunu işaret etmektedir.

TVA tekniği ile üretilen 70 nm ITO/cam ve 105 nm ITO/cam ince filmlerinin FESEM ölçümlerinden yararlanarak ortalama tanecik boyutunun 20-25 nm civarında olduğu bulunmuştur. 50 nm ITO/PET ve 95 nm ITO/PET ince filmlerinin FESEM ölçümlerinden ortalama tanecik boyutunun 25-28 nm civarında olduğu bulunmuştur. 30 nm ITO/Si ve 115 nm ITO/PET ince filmlerinin FESEM ölçümlerinden ise ortalama tanecik boyutunun 25 nm civarında olduğu bulunmuştur.

TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin EDS sonuçları Çizelge 8.7' de verilmiştir. Buna göre üretilen tüm ITO ince filmlerinin yüzdece ağırlık oranları bakımından indiyum, kalay ve oksijen dışında herhangi bir safsızlık filmlerin yüzeyinde gözlenmemiştir.

Çizelge 8.7 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin EDS sonuçları.

70 nm ITO/cam	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	85
	In	12
	Sn	3
	Toplam	100

105 nm ITO/cam	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	74
	In	22
	Sn	4
	Toplam	100

50 nm ITO/PET	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	92
	In	5
	Sn	3
	Toplam	100

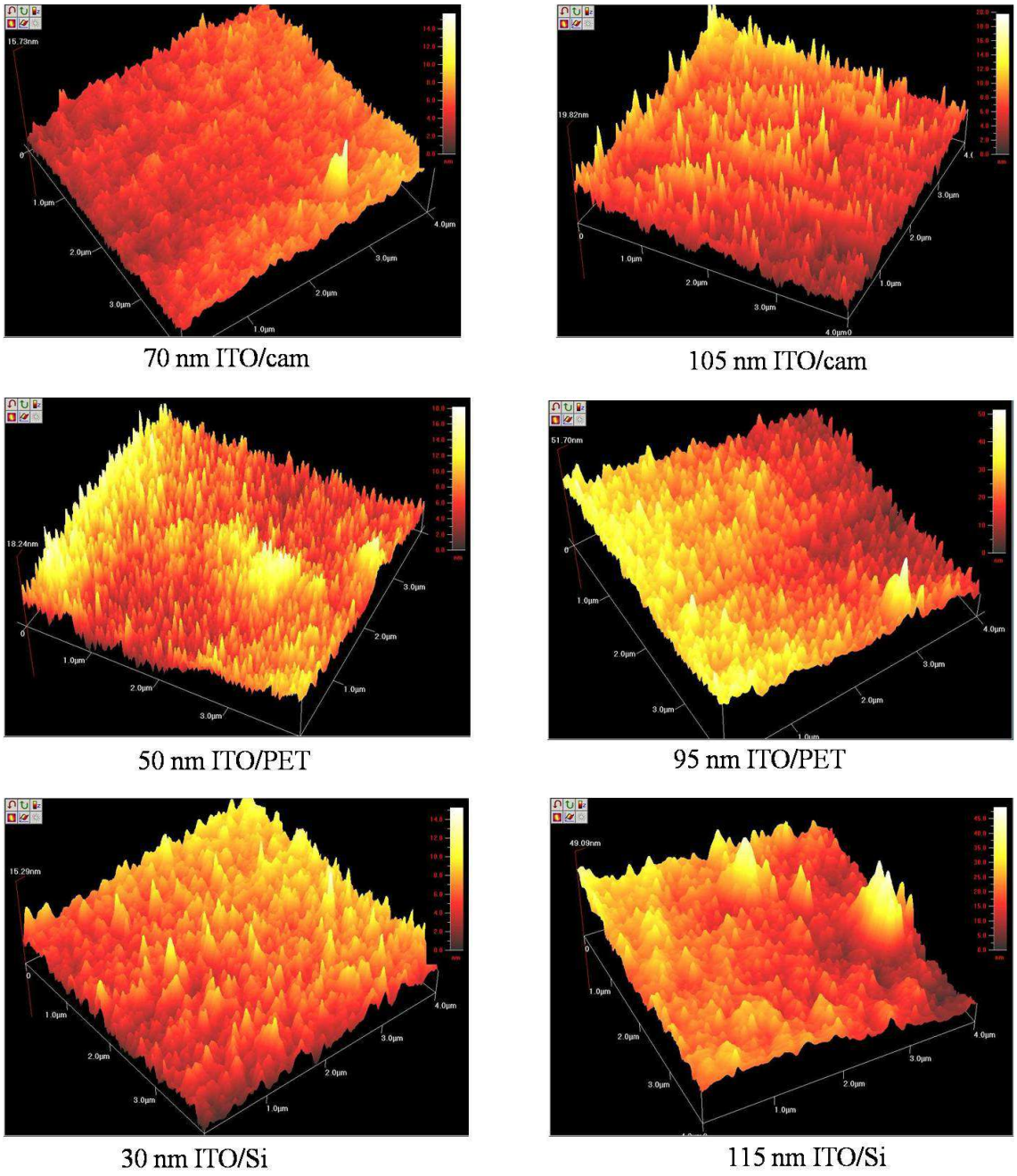
95 nm ITO/PET	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	95
	In	3
	Sn	2
	Toplam	100

30 nm ITO/Si	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	35
	In	59
	Sn	6
	Toplam	100

115 nm ITO/Si	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	38
	In	56
	Sn	6
	Toplam	100

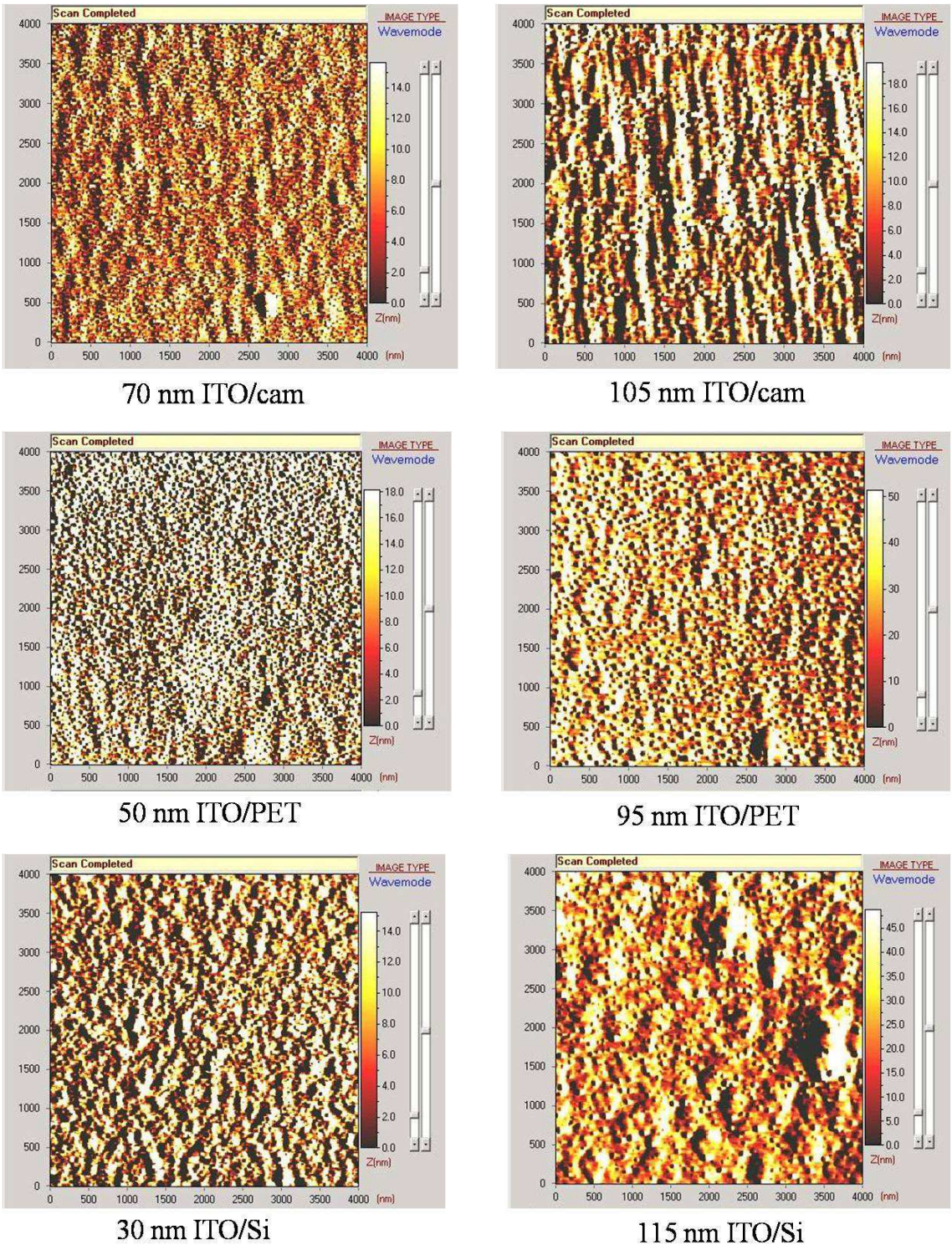
8.5.1.2 AFM analizleri

TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin yüzey morfolojilerini incelemek ve pürüzlülük değerlerini belirlemek için AFM cihazı kullanılmıştır. ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmleri atmosfer ortamında non-contak modunda 4 x 4 μm^2 skalada alınmıştır ve üç boyutlu AFM görüntüleri Şekil 8.20' de verilmektedir.



Şekil 8.20 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin üç boyutlu AFM görüntüleri.

ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin AFM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde taneli bir yapının hakim olduğu dikkati çekmektedir. Tanelerin boyut olarak diğer tanelerle hemen hemen aynı olması homojen bir kaplama olduğunu belirtmektedir. Eğer tanelerin boyutları arasındaki fark büyük olsaydı, film oluşumu esnasında komşu tanelerin bir araya gelerek daha büyük kümeler oluşturduğu fikrini akla getirecekti. Yukarıda bahsedilen yorumlar çerçevesinde ve film yüzeylerinde görülen düşük yükseklikteki bölgeler de dikkate alındığında, filmlerin tabaka büyüme şeklinde gerçekleştiğini düşünmekteyiz. Ayrıca filmleri üretmek için taban olarak kullandığımız cam malzeme de yüzey yapısı olarak bir pürüzlülüğe sahiptir. Tabanın yüzeyinde çukur, vadi ve basamak başlangıcı gibi bölgeler yüzeyden ayrılmaya eğilimli atomlar için yüksek bir enerji engeli olarak davranırlar ve bu bölgeler kusurların ve film atomlarının nükleasyon için uygun buldukları yerlerdir. Böylece kullandığımız taban da film yüzeylerinin homojenliğini ve tanelerin büyüklüklerini etkilemektedir. Üretilen ITO ince filmler düz bir oluşum sergilemesine rağmen tepe benzeri sivri oluşumların olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum kristalleşme seviyeleri ve yapısal özellikleri hakkında da bilgi vermektedir. Bu sonuç XRD verileri ile de uyum içindedir (Şekil 8.3). Ayrıca, ilk dikkati çeken tüm ITO filmlerinin yüzey pürüzlülüğünün düşük olması ve yükseklik olarak hemen hemen homojen dağılım sergileyen tanelerden oluşmalarıdır.



Şekil 8.21 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin iki boyutlu AFM görüntüleri.

Şekil 8.21’ de TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin iki boyutlu faz görüntüleri verilmektedir. İki boyutlu faz görüntüleri incelendiğinde genel olarak filmlerin homojen, düzgün ve küçük taneli yapılanmanın oluştuğu yani sıkı paketlenmiş tanelerin yüzey üzerinde dağıldığı söylenebilir. Ayrıca faz görüntülerinde üretilen filmlerin genelinde bazı bölgelerde bir kontrast dikkat çekmektedir ve bu kontrast farkı tanelerin yükseklik farkından kaynaklanabileceğini düşünüyoruz. Ayrıca film kalınlığı azaldıkça taneciklerin küçüldüğü ve tanecikler arasında boşlukların çok fazla olmadığı dikkat çekmektedir. Film oluşumu sırasında yüzeylerdeki kusurların azlığı dolayısıyla da yüzey pürüzlülüklerinin düşük çıkabileceği sonucuna varılmıştır.

Scan Atomic SPM software-2009 (Q-Port version 5.1.0) ile 40 hat boyunca alınan ölçümler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin R_q (RMS pürüzlülük) ve R_a (ortalama pürüzlülük) pürüzlülük değerleri Çizelge 8.7’ de verilmektedir.

Çizelge 8.8 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin R_q ve R_a pürüzlülük değerleri.

Malzeme	**R_q (nm)**	**R_a (nm)**
70 nm ITO/cam	1,15	0,93
105 nm ITO/cam	1,74	1,37
50 nm ITO/PET	2,10	1,68
95 nm ITO/PET	7,46	6,33
30 nm ITO/Si	1,64	1,34
115 nm ITO/Si	5,86	4,73

Çizelge 8.8 ’den görüldüğü gibi, ITO/cam için R_q pürüzlülük değeri 1,15-1,74 nm arasında, R_a pürüzlülük değeri 0,93-1,37 nm arasında değişim göstermektedir. ITO/PET için R_q pürüzlülük değeri 2,10-7,46 nm arasında, R_a pürüzlülük değeri 1,68-6,33 nm arasında değişim göstermektedir. ITO/Si için ise R_q pürüzlülük değeri 1,64-5,86 nm arasında, R_a pürüzlülük değeri 1,34-4,73 nm arasında değişim göstermektedir.

Çizelge 8.8 incelendiğinde, TVA tekniği ile üretilen tüm ITO filmlerin R_q ve R_a değerlerinin düşük olması yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğunu buna dayanarak, tüm filmlerinin yüzey yapılanması esnasında daha az boşluklara sahip olduğunu, tanelerin yüzeye yükselti olarak daha homojen dağıldığını ve sıkı paketlenmiş tanelerden oluştuğunu söyleyebiliriz. Üretilen filmlerin kalınlıkları da yüzey pürüzlüğü üzerinde önemli bir parametredir. Film kalınlıkları arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün artması, yüzeyin yükseklik olarak homojen dağılım sergilemeyen tanelerden oluşmasından ve böylece tabaka tabaka büyümenin baskın olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca ITO filmlerinin AFM görüntülerinde ortaya çıkan sıkı paketli yapının bu filmlerde düşük geçirgenliğe ve yüksek soğurmaya neden olduğu ve böylece yüzey özelliklerin optik özellikleri de etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

8.5.2 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi

FESEM-EDS sistemi kullanılarak FESEM analizi yapılmıştır. FESEM yüzey görüntüsü almadan önce ITO, IZO ve AZO ince filmlerin elektriksel olarak yüklenmesini önlemek için numune yüzeyi çok ince bir iletken tabaka ile kaplanır. Bunun için altın gibi elementler vakum içerisinde buharlaştırılarak numune üzerine püskürtülür. Altın kaplama, elektriksel iletkenlik sağladığı gibi ayrıca organik malzemelerin incelenmesinde ikincil elektron (SE) verimini arttırır. Ayrıca FESEM analizleri sırasında ince filmlerin ağırlıkça içerdikleri %In, %Sn, Zn, Al ve %O oranları EDS elemantal analizleri ile tespit edilmiştir.

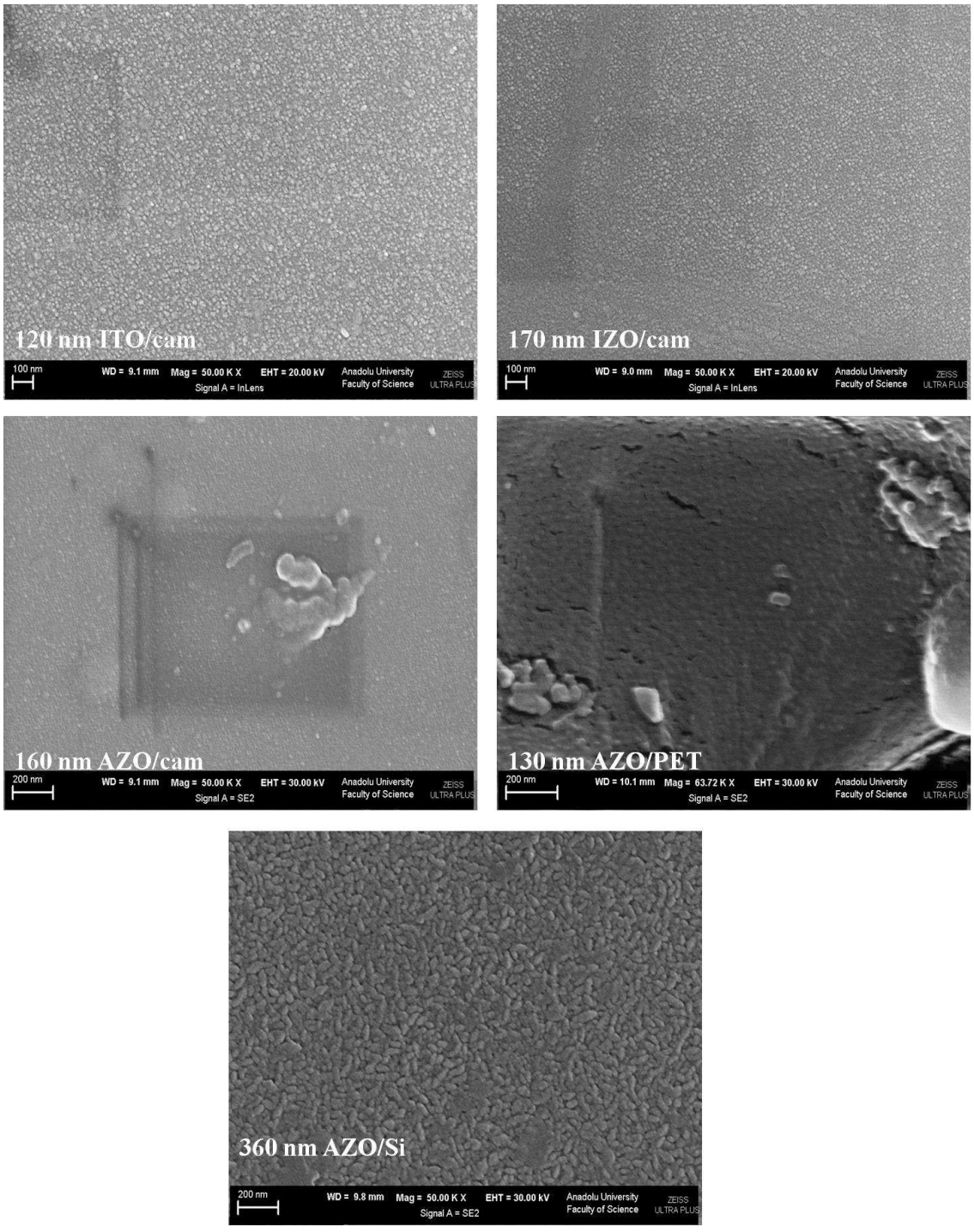
Bu bölümde RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin yüzey özellikleri Zeiss Ultra Plus FESEM cihazı ve mikroanalizleri ise EDS (Model 550i IXRF) ile incelenmiştir.

Malzemelerin yüzey özelliklerini ve pürüzlülüklerini incelemek amacıyla taramalı uç mikroskopları geliştirilmiştir. Taramalı uç mikroskoplarından en yaygın olarak kullanılanı AFM (Atomic Force Microscope)' dir. AFM, numuneyi nano boyutta görüntülemek, ölçmek ve değiştirmek için kullanılan en önemli tekniklerden biridir. AFM ile elde edilen yüzey topografisinden numunenin büyüme şekli, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyinde oluşabilecek yığılma ya da boşluk tipi kusurlar hakkında bilgi edinilebilir.

Bu bölümde RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin yüzey morfolojilerini incelemek ve pürüzlülük değerlerini belirlemek için (Ambios Q-scope Atomic Force Microscope) AFM cihazı kullanılmıştır. Üretilen tüm filmlerin 4 x 4 μm^2 skalada iki boyutlu ve üç boyutlu görüntüleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, ScanAtomic SPM software-2009 (Q-Port version 5.1.0) ile 40 hat boyunca alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ortalama tanecik boyutu da belirlenmiştir.

8.5.2.1 FESEM ve EDS analizleri

Şekil 8.22' de RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin 50000 büyütme oranlarında alınmış FESEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 8.22 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin FESEM görüntüleri.

İkincil elektronlar kullanılarak 20-30 kV hızlandırma potansiyelinde alınan FESEM görüntülerinde ITO/cam, IZO/cam ve AZO/cam ince filmleri granüler yapıda, homojen ve düzgün bir yapıda büyümüşlerdir. Ayrıca, genel olarak bu ince filmlerde sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği söylenebilir. Bu görüntüler ölçek olarak AFM görüntülerinin alındığı ölçeğe yakın olması nedeniyle, AFM görüntüleri ile benzer özellikler göstermektedir. Farklı yükseklikte ve boyutta yığılma şeklindeki oluşumlar olmadığından film kalınlığının yüzeyde homojen olduğunun bir göstergesidir. Bu durumun ITO/cam, IZO/cam ve AZO/cam ince filmlerinin aynı zamanda düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmalarına neden olacaktır. Çizelge 8.10' da verilen pürüzlülük değerleri de bu sonucu desteklemektedir. AZO/PET ince filminde ise film oluşumu sırasında bölgesel yığılmaların olduğunu ve kırıkların oluştuğunu görmekteyiz. AZO/Si ince filminin FESEM görüntüsü incelendiğinde, alttaş etkisine bağlı olarak AZO filmi granüler yapıda, homojen ve düzgün bir yapıda büyümüştür. Ayrıca, genel olarak bu ince filmde sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği söylenebilir.

RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen 120 nm ITO/cam ve 170 nm IZO/cam ince filmlerinin FESEM ölçümlerinden yararlanarak ortalama tanecik boyutunun 15 nm civarında olduğu bulunmuştur. 160 nm AZO/cam, 130 nm AZO/PET ve 360 nm AZO/Si ince filmlerinin FESEM ölçümlerinden de ortalama tanecik boyutlarının sırasıyla 13, 30 ve 25 nm civarında olduğu bulunmuştur.

RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin EDS sonuçları Çizelge 8.9' da verilmiştir. Buna göre yüzdece ağırlık oranları bakımından indiyum, kalay, çinko, alüminyum ve oksijen dışında herhangi bir safsızlık filmlerin yüzeyinde gözlenmemiştir.

Çizelge 8.9 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin EDS sonuçları.

120 nm ITO/cam	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	81
	In	14
	Sn	5
	Toplam	100

170 nm IZO/cam	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	6
	In	47
	Zn	47
	Toplam	100

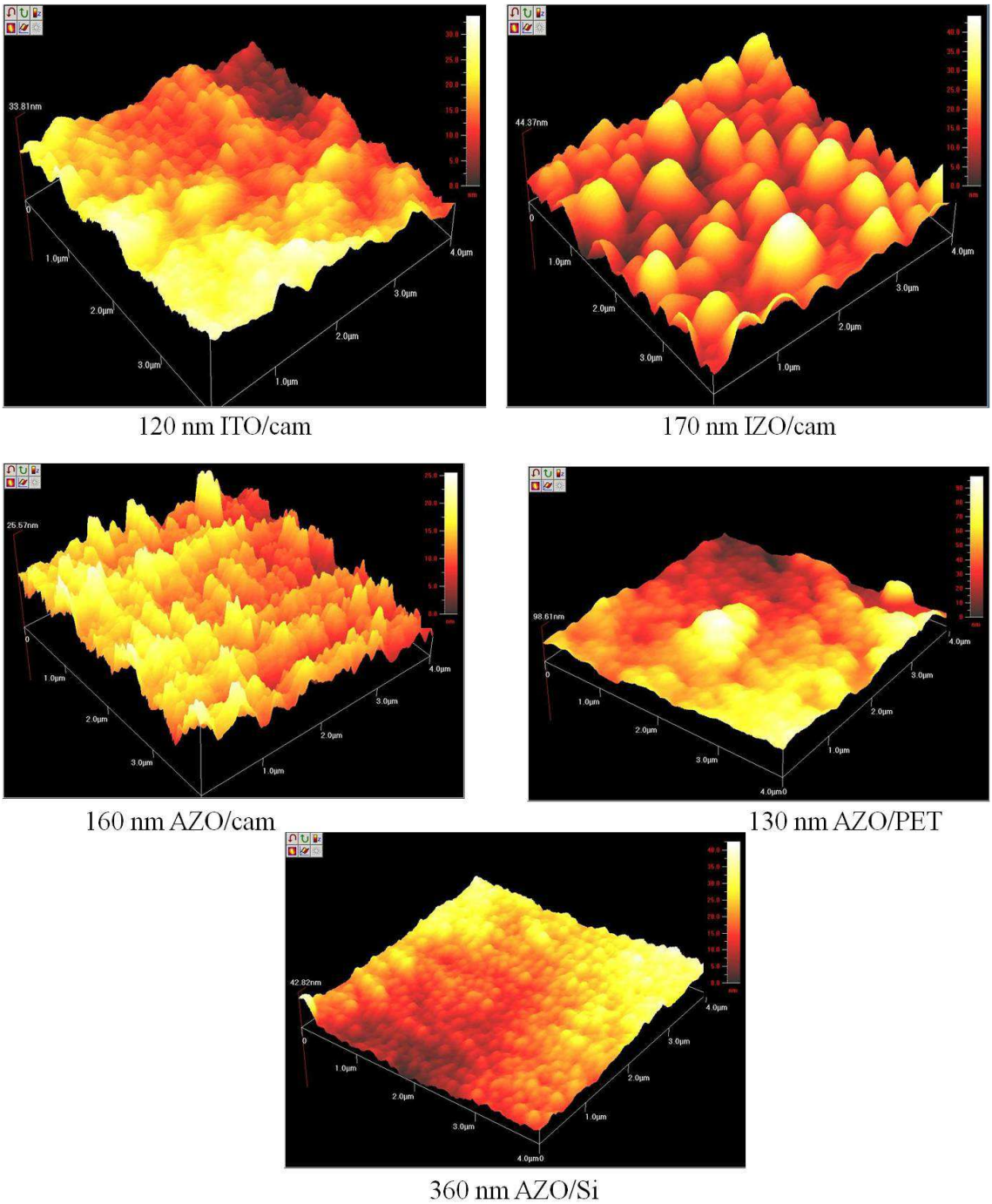
160 nm AZO/cam	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	42
	Zn	48
	Al	10
	Toplam	100

130 nm AZO/PET	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	45
	Zn	50
	Al	5
	Toplam	100

360 nm AZO/Si	Element	Yüzdece Ağırlık (%)
	O	28
	Zn	65
	Al	7
	Toplam	100

8.5.2.2 AFM analizleri

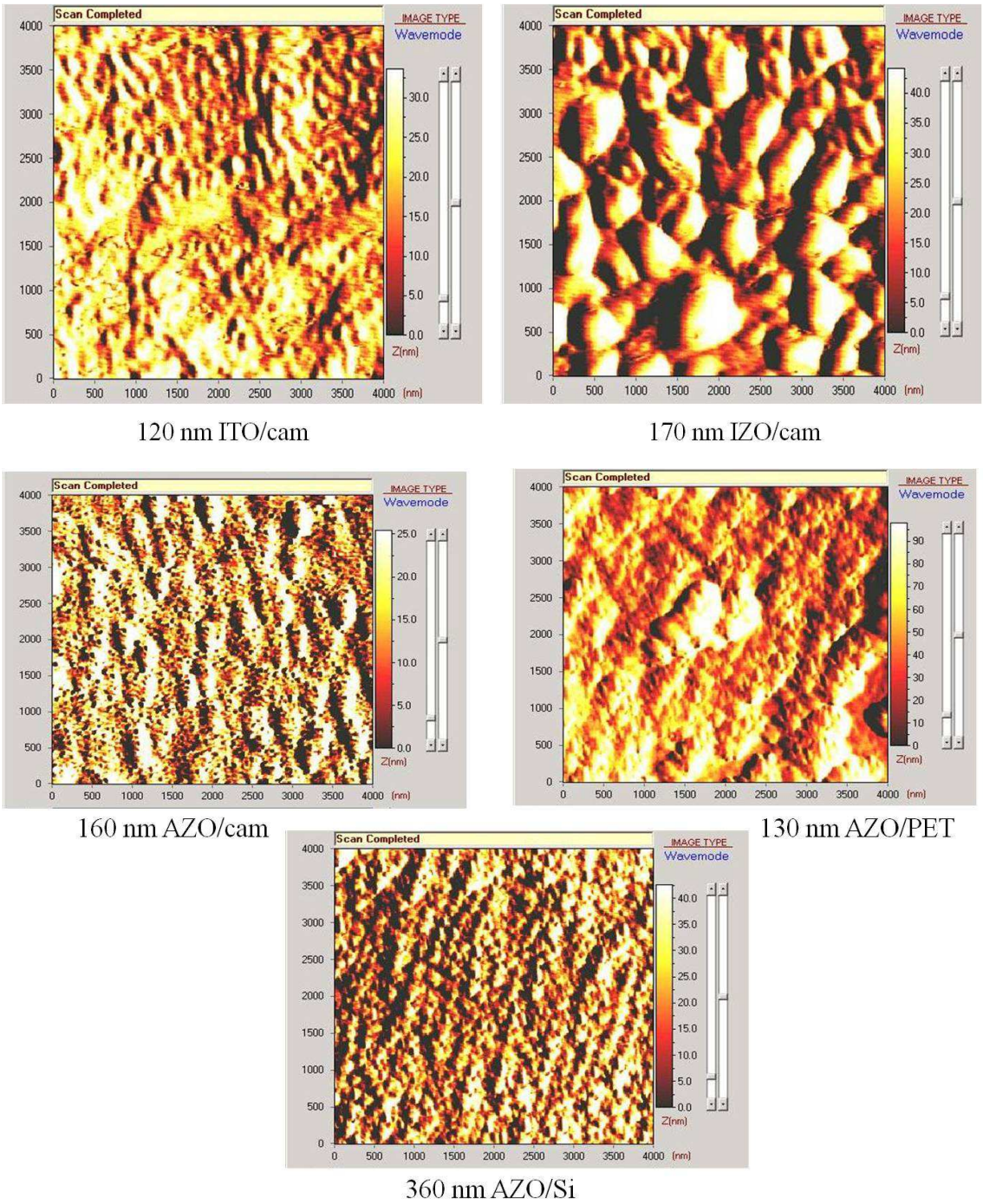
RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin yüzey morfolojilerini incelemek ve pürüzlülük değerlerini belirlemek için AFM cihazı kullanılmıştır. ITO, IZO ve AZO ince filmleri atmosfer ortamında non-contak modunda 4 x 4 μm^2 skalada alınmıştır ve üç boyutlu AFM görüntüleri Şekil 8.23' te verilmektedir.



Şekil 8.23 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin üç boyutlu AFM görüntüleri.

ITO/cam ince filminin AFM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde rastgele dağılmış farklı yükseklik ve büyüklükte oluşumlar görülmektedir. Yüzeyde kümeler şeklinde oluşumlar söz konusudur, ancak birbirinden ayırt edilebilir derecede taneli bir yapılanma belirgin değildir. IZO/cam ince filminde yüzeyde gözlenen beyaz bölgeler film oluşumu esnasında atomların üst üste yığılmaları sonucunda oluşan kümeleri göstermektedir. Ayrıca, büyük taneli yapılanmanın oluştuğu ve tepe benzeri oluşumlar kendini göstermektedir. AZO/cam ince filminde ise, yüzeyde rastgele dağılmış farklı yükseklik ve büyüklükte oluşumlar ve kanal şeklinde oluşumlar göze çarpmaktadır. AZO/PET ince filminin AFM görüntüsü incelendiğinde, bölgesel olarak yığılmaların olduğu gözlenmektedir. Yani, film oluşumu esnasında komşu tanelerin bir araya gelerek daha büyük kümeler oluşturduğunu görmekteyiz. Ayrıca filmi üretmek için taban olarak kullandığımız PET malzeme de yüzey yapısı olarak yaklaşık 3 nm bir pürüzlülüğe sahiptir. AZO/Si ince filminin AFM görüntüsünde yüzeyde taneli bir yapının hakim olduğu dikkati çekmektedir. Tanelerin boyut olarak diğer tanelerle hemen hemen aynı olması homojen bir kaplama olduğunu belirtmektedir. Film yüzeyinde görülen düşük yükseklikteki bölgeler de dikkate alındığında, filmlerin tabaka büyüme şeklinde gerçekleştiğini düşünmekteyiz. Böylece kullandığımız alttaşta film yüzeylerinin homojenliğini ve tanelerin büyüklüklerini etkilemektedir. Ayrıca, AZO/Si ince filminin yüzey pürüzlülüğünün düşük olması ve yükseklik olarak hemen hemen homojen dağılım sergileyen tanelerden oluştuğu göze çarpmaktadır.

Şekil 8.24’ de RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin iki boyutlu faz görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.24 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin iki boyutlu AFM görüntüleri.

ITO/cam ince filminin iki boyutlu faz görüntüsü incelendiğinde genel olarak bir kontrast dikkat çekmektedir ve bu kontrast farkı tanelerin yükseklik farkından kaynaklanabileceğini düşünüyoruz. Atom kümelerinin aralarında birbirinden ayırt edilmesi zor olan taneli yapılanmanın da oluştuğunu söyleyebiliriz. IZO/cam ince filminde ise, büyük taneli yapılanmanın oluştuğu tanecikler arasında boşlukların çok fazla olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca, film yüzeylerinde komşu tanelerin üst üste gelmeleri sonucu ortaya çıkan yükseklik farkından yani ada tipi büyüme mekanizmasından bahsedebiliriz. AZO/cam ince filminin iki boyutlu faz görüntüsünde homojen, düzgün ve küçük taneli yapılanmanın oluştuğu yani sıkı paketlenmiş tanelerin yüzey üzerinde dağıldığı söylenebilir. AZO/PET ince filmi incelendiğinde ise, film yüzeylerinde yığılma şeklindeki bölgelerin olduğu ve yüzeylerdeki bu kusurlardan dolayı yüzey pürüzlülüklerinin arttığı sonucuna varılmıştır. AZO/Si ince filminin iki boyutlu faz görünüsü incelendiğinde, homojen, ayırt edilebilir derecede taneli bir yapılanma oluştuğunu görmekteyiz.

Scan Atomic SPM software-2009 (Q-Port version 5.1.0) ile 40 hat boyunca alınan ölçümler sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. RF magntorun sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin R_q (RMS pürüzlülük) ve R_a (ortalama pürüzlülük) pürüzlülük değerleri Çizelge 8.9' da verilmektedir.

Çizelge 8.10 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin R_q ve R_a pürüzlülük değerleri.

Malzeme	R_q (nm)	R_a (nm)
120 nm ITO/cam	4,34	5,23
170 nm IZO/cam	6,64	5,56
160 nm AZO/cam	3,20	2,60
130 nm AZO/PET	2,92	2,36
360 nm AZO/Si	1,46	1,84

Çizelge 8.10 incelendiğinde, RF magnetron tekniği ile üretilen tüm filminin R_q ve R_a değerlerinin düşük olması yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğunu buna dayanarak, tüm filmlerinin yüzey yapılanması esnasında daha az boşluklara sahip olduğunu, tanelerin yüzeye yükselti olarak daha homojen dağıldığını ve sıkı paketlenmiş tanelerden oluştuğunu söyleyebiliriz. Üretilen filmlerin kalınlıkları da yüzey pürüzlüğü üzerinde önemli bir parametredir. Farklı malzemeler olmalarına rağmen film kalınlıkları arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün artması, yüzeyin yükseklik olarak homojen dağılım sergilemeyen tanelerden oluşmasından ve böylece tabaka tabaka büyümenin baskın olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca ITO filmlerinin AFM görüntülerinde ortaya çıkan, tanelerin yüzeye homojen dağıldığını bununda filmlerde yüksek geçirgenliğe ve düşük soğurmaya neden olduğu ve böylece yüzey özelliklerin optik özellikleri de etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

8.6 ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Elektriksel Özellikleri

Bir malzemenin elektriksel iletkenliği ve özdirenci o malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Pek çok elektrik ve elektronik uygulamaları için, malzemenin bu karakteristiklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve belirlenmesi gerekir. Yarıiletken malzemelerin gerek güneş pillerinde gerekse optoelektronik cihazlarda yüksek verimlilikle kullanılabilmesi için, bu malzemelerin uygun elektriksel özelliklere sahip olması gerekir. Günümüzde teknolojik uygulamalarda kullanılacak olan saydam iletken oksit filmlerin elektriksel iletkenliklerini açıklayabilmek için birçok araştırma yapılmaktadır. Filmleri elde etmek için kullanılan teknikler, üretim parametreleri, katkı türü/miktarı, çözeltinin pH değeri ve filmlerin kalınlıkları gibi özellikler üretilen malzemelerin elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir (Sorar, 2008).

Bu bölümde ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin elektriksel iletkenlik tipini belirlemek amacıyla sıcak-uç tekniği ve filmlerin özdirenç değerlerini ve tabaka

dirençlerini belirlemek için de dört-uç tekniği (four-probe) kullanılarak elektriksel özellikleri araştırılmıştır.

TVA tekniği ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO/cam, ITO/PET, ITO/Si, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerin özdirenç değerleri dört-uç (four-probe) tekniği ile hava ortamında ve oda sıcaklığında ölçülmüştür. Bu teknikte uçlardan iki tanesi akım kaynağı ve diğer ikisi voltajın ölçülmesi için kullanılır. Dört uç kullanılarak uç direncinden, metal uçlardaki temas direncinden ve örnek malzemeden kaynaklanan ölçüm hataları dikkate alınmamaktadır. Bu teknikte kullanılan uçların üretildiği malzeme, uçlar arası mesafeler ve uçların geometrisi malzemenin direncini etkilemektedir. Bu teknikle düşük özdirence sahip malzemelerin analizini yapmak oldukça kolayken yüksek özdirençli malzemelerde akımın arttırılması gerekmektedir.

8.6.1 TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi

Özdirenç yarıiletken ve iletken malzemeler için temel bir özelliktir. Ayrıca heriki malzeme ve yarıiletken levhaların fabrikasyonu için de kritik bir parametredir. Yarıiletken ve diğer tüm iletken malzemelerin özdirencini belirlemede oldukça önemli bir yöntemdir. ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin sıcak uç tekniği ile belirlenen elektriksel iletkenlik tipleri ve dört-uç tekniği ile belirlenen elektriksel özdirenç değerleri Çizelge 8.11’ de verilmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda belirtildiği gibi, ITO ince filmlerinin özdirenç değerlerinin 10^{-3}-10^{-4} Ω-cm aralığında değiştiği görülmektedir (Hao, et al., 2008; Gao, et al., 2008; Hotovy; 2013). Bu çalışmada TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin literatürdeki çalışmalara göre daha düşük özdirenç değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 8.11 TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerine ait elektriksel özdirenç değerleri ve iletkenlik tipleri.

Malzeme	Özdirenç ($x10^{-5}\Omega$-cm)	Tabaka Direnci ($\Omega/\square$)	Elektriksel İletkenlik Tipi
70 nm ITO/cam	0,93	7,06	n-tipi
105 nm ITO/cam	0,65	4,09	n-tipi
50 nm ITO/PET	0,23	1,60	n-tipi
95 nm ITO/PET	1,05	2,44	n-tipi
30 nm ITO/Si	1,09	10,62	n-tipi
115 nm ITO/Si	5,82	23,34	n-tipi

ITO ince filmlerindeki az bir özdirenç artışının AFM görüntülerinde belirlenen yükseklik ve boyut olarak büyük olan taneli yapının geri gelmeye başlamasıyla açıklanabilir. ITO ince filmlerde elektriksel iletkenlik, indiyuma kalay katkılandırılması sonucu malzemede ortaya çıkan oksijen eksikliği kusurlarına bağlıdır. ITO ince filmlerinde oksijen boşlukları az olduğu için direncin artmasına neden olmaktadır. Bu filmlerde elektriksel iletkenlik iletim elektronları ve boşluklardan kaynaklanmaktadır. Öte yandan direncin tekrar artması, filmlerin az da olsa kristalleşmesinden sonra tekrar oksitlenmesi ile ilişkilidir. ITO ince filmlerinin özdirençlerinin artması, tıpkı metallerde olduğu gibi, serbest elektronların mobilitelerinin artmasına bağlanabilir (Alam, 2000).

Sıcak uç tekniği bir havya ve standart bir voltmetre kullanılarak yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik tipini belirlemede kullanılabilecek kolay bir yöntemdir. Isıtılan havya numune yüzeyine yaklaştırılarak bir sıcak uç elde edilir. Yaratılan sıcaklık değişimi sonucunda oluşturulan ısıl elektromotor kuvvetin işareti taşıyıcı tipi hakkında bilgi verir. Elde edilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin sıcak uç tekniği ile elektriksel iletkenlik türleri belirlenmiş ve n-tipi özellik gösterdikleri görülmüştür.

8.6.2 RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi

RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerin özdirenç değerleri dört-uç (four-probe) tekniği ile hava ortamında ve oda sıcaklığında ölçülmüştür. Bu teknikle düşük özdirence sahip malzemelerin analizini yapmak oldukça kolayken yüksek özdirençli malzemelerde akımın arttırılması gerekmektedir. ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin sıcak uç tekniği ile belirlenen elektriksel iletkenlik tipleri ve dört-uç tekniği ile belirlenen elektriksel özdirenç değerleri Çizelge 8.12' de verilmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda belirtildiği gibi, ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin özdirenç değerlerinin 10^{-3}-10^{-4} Ω-cm aralığında değiştiği görülmektedir (Calnan, et al., 2010; Kim, et al., 2010). Bu çalışmada RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin literatürdeki çalışmalara göre daha düşük özdirenç değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 8.12 ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerine ait elektriksel özdirenç değerleri ve iletkenlik tipleri.

Malzeme	Özdirenç ($x10^{-5}$Ω-cm)	Tabaka Direnci	Elektriksel İletkenlik Tipi
120 nm ITO/cam	0,26	1,15 (Ω/□)	n-tipi
170 nm IZO/cam	0,68	334,81 (MΩ/□)	n-tipi
160 nm AZO/cam	0,09	26,44 (MΩ/□)	n-tipi
130 nm AZO/PET	0,71	2,41 (Ω/□))	n-tipi
360 nm AZO/Si	1,87	152,28 (kΩ/□)	n-tipi

ZnO ince filmleri oldukça yüksek bir serbest taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. IZO ve AZO ince filmleri içindeki indiyum ve alüminyum taşıyıcı konsantrasyonunda ilave bir artışa sebep olur. Çinko atomları, oksijen boşlukları ve indiyum veya alüminyum

örgü içersine serbest elektron sağlayacaklardır. Dolayısıyla IZO ve AZO ince filmlerinin iletkenliklerinde bir artış ve buna bağlı olarak da özdirençte bir düşüş olacaktır.

Sıcak uç tekniği bir havya ve standart bir voltmetre kullanılarak yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik tipini belirlemede kullanılabilecek kolay bir yöntemdir. Elde edilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin sıcak uç tekniği ile elektriksel iletkenlik türleri belirlenmiş ve n-tipi özellik gösterdikleri görülmüştür.

9. TARTIŞMA VE SONUÇ

9.1 Sonuçlar

Bu çalışma süresince Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği ve Teknolojileri Laboratuarında bulunan Termiyonik Vakum Ark (TVA) ve Radyo Frekansı (RF) magnetron sıçratma teknikleri ile ilk defa üçlü bileşiklerden olan ITO, IZO ve AZO materyallerinin plazmaları oluşturularak ince filmleri üretilmiştir. Üretilen ince filmler çeşitli malzeme analizi teknikleri kullanılarak yapısal, optiksel, elektriksel ve yüzeysel özellikleri araştırılmıştır.

TVA tekniği ile 3 ve 7 dakika süreyle cam, PET ve Si alttaşları üzerine büyütülen 90% In_2O_3, 10% SnO_2 (ITO) ince filmlerinin üretim parametreleri sabit tutulurken farklı kalınlıkta ITO ince filmleri büyütülmüştür. Büyütülen ITO ince filmlerinin bazı fiziksel özelllikleri araştırılmıştır. RF magnetron sıçratma tekniği kullanılarak ise ITO ve IZO cam alttaş üzerine AZO ince filmleri ise cam, PET ve Si alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Hedef olarak In-Sn, In-Zn ve Al-Zn kullanılmış ve vakum odası içine reaktif gaz olarak O_2 gazı kullanılmıştır. Üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin %50 Ar+%50 O_2 konsantrasyonundaki bazı fiziksel özellikleri incelenmiştir.

İnce filmlerin gerek güneş pillerinde gerekse optoelektronik cihazlarda yüksek verimlilikle kullanılabilmesi, elde edilen ince filmlerin uygun elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özelliklere sahip olması ile mümkündür. Üretilen ince filmlerin kalınlıkları ise belirtilen özellikleri önemli derecede etkilemektedir. Bu yüzden üretilen ince filmlerin kalınlıklarının hassas olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin kalınlıkları Filmetrics F20 cihazı ve spektroskopik elipsometre (SE) cihazı ile birlikte hassas bir şekilde belirlenmiştir. 500-1100 nm dalgaboyu aralığında en uygun gelme açısı olan Brewster açısı 60^0-65^0 için deneysel olarak ölçülen spektroskopik Ψ değerleri ile Cauchy modeli kullanılarak teorik olarak belirlenen Ψ değerleri ile en iyi uyumu sağlanarak tüm filmlerin kalınlıkları hassas bir şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Üretilen ince filmlerin düşük MSE değerlerine sahip

olduğu saptanmıştır. Ayrıca, 3 ve 7 dakika kısa bir süre içerisinde TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin kalınlıkları 50-105 nm arasında değişmektedir. Dolayısıyla plazma destekli diğer ince film üretim tekniklerine göre kullanılan TVA tekniği zaman açısından avantaj sağlamaktadır. RF magnetron sıçratma tekniği ile 40 ile 60 dakika boyunca üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin kalınlıkları ise 120-360 nm arasında değişmektedir.

ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin kristalleşme seviyelerini ve bazı yapısal parametrelerini belirlemek için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerin XRD desenlerinin incelenmesi sonucunda; 70 nm ITO/cam, 105 nm ITO/cam ve 30 nm ITO/Si filmlerinde ITO malzemesine ait SnO, SnO_2, Sn_3O_4, In, karakteristik pikleri mevcuttur. Ancak, görülen bu piklerin şiddetleri düşük olmasından dolayı tüm üretilen ince filmlerin amorf yapıda oldukları kabul edilmiştir. 50 nm ITO/PET, 95 nm ITO/PET ve 115 nm ITO/Si ince filmlerinde ise ITO malzemesine ait herhangi bir pik gözlenmediğinden dolayı tüm filmlerin amorf yapıda olduğu kabul edilmiştir. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerin XRD desenlerinin incelenmesi sonucunda; 120 nm ITO/cam ve 170 nm IZO/cam ince filmlerin belirli doğrultuda tercihli yönelime sahip olmadıkları için bu filmlerin amorf yapıda olduğu görülmektedir. 160 nm AZO/cam, 130 nm AZO/PET, 360 nm AZO/Si ince filmlerinin XRD desenlerine bakıldığında ise, özellikle 360 nm AZO/Si ince filminin zemin sinyalinin yüksek olduğu ve tüm filmlerin belirli doğrultuda tercihli yönelime sahip olmadıkları için bu filmlerin amorf yapıda olduğu görülmektedir.

ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin optik özelliklerini incelemek için geçirgenlik ve soğurma spektrumları alınmıştır. TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin kaplamasız cam ve kaplamasız PET ile karşılaştırılmış olarak elde edilen geçirgenlik spektrumlarından geçirgenlik değerlerinin düşük olduğu kalınlıklarının artmasıyla geçirgenlik değerlerinin de azaldığı görülmektedir. ITO/cam için optik geçirgenlik değerleri, görünür bölgede 550 nm' de %23-%35 arasında değişirken, ITO/PET için ise %25-%40 arasında değişmektedir. ~700 nm den daha uzun dalgaboylarında filmlerin geçirgenliklerinin artmaya devam ettiğini, bu

dalgaboyundan kısa dalgaboylarında ise azaldığı görülmektedir. ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin geçirgenlik değerlerinin beklenenden çok düşük çıkmasının sebebinin, elde edilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin üretim tekniğinden ve yapının opak olmasına bağlı olarak oksijen eksikliğinden kaynaklandığını düşünmekteyiz. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin kaplamasız cam ve kaplamasız PET ile karşılaştırılmış olarak elde edilen geçirgenlik spektrumlarından geçirgenlik değerlerinin görünür bölgede 550 nm' de %80-90 arasında olduğu görülmektedir. Geçirgenlik değerlerindeki değişimlerin filmlerin iç kısımlarındaki ve yüzeylerindeki saçılmalardan kaynaklanabileceğini ve RF magnetron sıçratma yöntemi ile üretilen ITO, IZO ve AZO filmlerinin yüksek geçirgenlik değerlerinin özellikle bu filmlerin iç kısımlarındaki saçılma yolu ile gerçekleşen kayıpların az olmasından kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz. TVA tekniği ile üretilen ince filmlerin geçirgenlik spektrumları ile RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ince filmlerin geçirgenlik spektrumları kıyaslandığında RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ince filmlerin çok daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin soğurma spektrumlarından, tüm ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerin kısa dalga boylarında yüksek soğurma özelliklerinden dolayı opak malzemeler olarak davranırken uzun dalga boylarında saydam malzemeler olarak davranmaktadırlar. 70 nm ve 105 nm ITO/cam ince filmleri temel soğurma kenarının 300 nm civarında olduğu belirlenmiştir. 50 nm ve 95 nm ITO/PET ince filmleri için ise temel soğurma kenarının 320 nm civarında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen tüm ITO ince filmlerin temel soğurma bölgelerinde belirgin bir kayma olmadığı belirlenmiştir. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin soğurma spektrumları incelendiğinde, ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerin kısa dalga boylarında düşük soğurma özelliklerinden dolayı saydam malzemeler olarak davrandıkları görülmektedir. Tüm üretilen ince filmler için temel soğurma kenarının 320 nm civarında olduğu belirlenmiştir.

TVA tekniği ile üretilen ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Siince filmlerinin yansıma spektrumlarından, ITO/cam, ITO/PET ve ITO/Si ince filmlerinin yansıma değerlerinin

yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun dejenere bir yarıiletken olan ITO ince filmlerinin serbest elektron kontrasyonunun yüksek olmasından kaynaklandığını düşünmekteyiz. Ayrıca, FESEM ve AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi ITO ince filmlerinin yüzeylerinin daha düzgün olması ve daha sıkı bağlı taneciklerin bulunmasından dolayı malzemenin yansıtıcılık özelliğinin arttığını düşünmekteyiz. ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin yüksek yansımaya alttaş olarak kullandığımız cam ve PET alttaşlarından gelen yansımaların da etkisi olabileceğini düşünmekteyiz. Yansıma uzun dalga boyuna doğru kaydıkça arttığı ve tüm filmlerin benzer davranış sergilediği görülmektedir. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin yansıma spektrumları incelendiğinde, ITO/cam ve IZO/cam ince filmlerinin yansıma değerlerinin uzun dalgaboylarına doğru kaydıkça azaldığı görülmektedir. Bu durumun dejenere bir yarıiletken olmasına rağmen ITO ince filminde serbest elektron kontrasyonunun düşük olmasından kaynaklandığını düşünmekteyiz. IZO/cam ince filminde ise fotonların enerjisinin artışından dolayı, fotonların elektron, atomlar veya kristal molekülleriyle daha fazla etkileşmeleri ve geri yansıtmalarıdır. Ayrıca, FESEM ve AFM incelemelerinden de belirlendiği gibi ITO/cam ve IZO/cam ince filmlerinin yüzeylerinin daha düzgün olması ve daha sıkı bağlı ince taneciklerin bulunmasından dolayı malzemenin yansıtıcılık özelliğinin arttığını düşünmekteyiz. ITO/cam ve IZO/cam ince filmlerinin sırasıyla 550 nm' de %7 ile %5 civarında yansımaya sahip olmaları alttaş olarak kullandığımız cam alttaştan gelen yansımaların da etkisi olabileceğini düşünmekteyiz. Bu durum kırılmanın azalmasına sebep olurken filmlerin yansıtma özelliğini artırdığını düşünmekteyiz. AZO/cam, AZO/PET ve AZO/Si ince filmlerinin yansıma spektrumları incelendiğinde; AZO/cam ve AZO/PET morötesi bölgeden kızılaltı bölgeye doğru kaydıkça hemen hemen aynı yansıma değerleri sergiledikleri görülmektedir. Hatta bu durumun AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin hemen hemen eşit yüksek geçirgenliğe sahip olmasından ve kristal yapısından kaynaklandığını da söyleyebiliriz. AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin 550 nm' de %5 ile %6 civarında yansımaya sahip olmaları az da olsa alttaş olarak kullandığımız cam ve PET alttaşlarından gelen yansımaların etkisi olabileceğini düşünmekteyiz.

TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin Filmetrics F20 cihazı ile ve spektroskopik elipsometre (SE) ile ölçülen karşılaştırılmış olarak elde edilen kırılma indisi spektrumları incelendiğinde, kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı ve bu durumun tüm ITO ince filmlerde benzer formda olduğu görülmektedir. Bu durum üretilen tüm ince filmleri için 400-1000 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Gelen fotonun dalga boyu azaldıkça (yani fotonun enerjisi arttıkça) kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, TVA tekniği ile üretilen ITO/cam ve ITO/PET ince filmlerinin kırılma indisi değerleri 550 nm'de 1,94 ile 2,02 arasında değişmektedir. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/ cam için kırılma indisi değeri 1,89, IZO/cam için kırılma indisi değeri 1,78 ve AZO/cam ve AZO/PET için ise sırasıyla 1,73 ile 1,64' tür.

TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin gözeneklilik değerlerinin kırılma indisi ile olan ilişkisi ele alınmıştır ve kırılma indisine bağlı olarak gözeneklilik değerleri hesaplanmış ve azalan kırılma indisi değerlerine bağlı olarak gözenekliliğinin arttığı gözlenmiştir. TVA tekniği ile üretilen tüm ITO ince filmlerinini gözeneklilik değerleri 18,9 ile 9,6 arasında değişirken RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam, IZO/cam, AZO/cam ve AZO/PET ince filmlerinin gözeneklilik değerleri 14,2 ile 35,2 arasında değişmektedir. Burada, TVA tekniği ile üretilen ince filmler ile RF megnetron sıçratma tekniği ile üretilen filmler kıyaslandığında TVA tekniği ile üretilen ince filmlerde gözenekliliğin oldukça düşük çıktığını söyleyebiliriz. Bu sonuçlar ile, üretilen filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin kontrol edilmesinde üretim tekniğinin önemli bir rol oynadığı sonucu çıkartılabilir. Aynı zamanda üretilen filmlerin kristal yapısı ve büyük tanelere sahip olması gözenekliliği etkileyen unsurlardır. Gözeneklilik değerleri için daha güvenilir sonuçlar elde etmek için ayrıca AFM ölçümlerine de bakılmıştır.

İnce filmlerin diğer önemli bir optiksel parametresi de yasak enerji aralığıdır. Bu çalışmada TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen tüm ince filmlerinin yasak enerji aralıkları Tauc metodu kullanılarak hesaplanmıştır ve $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafiklerinden tüm ince filmlerin direkt band aralıklarına sahip oldukları belirlenmiştir.

TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin yasak enerji aralıkları 3,80 eV- 3,90 eV arasında değişmektedir. RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO/cam ince filminin yasak enerji aralığı 3,79 eV hesaplanmıştır. Safsızlık katkılı ZnO filmler için yani RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen IZO ince filminin yasak enerji aralığı değeri 3,56 eV iken AZO ince filmlerinin yasak enerji aralıkları 3,60 eV ve 3,65 eV olarak hesaplanmıştır.

Üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerin yüzey özelliklerini incelemek ve yüzey pürüzlülüklerini incelemek için, FESEM ve AFM cihazları ile görüntüleri alınmıştır. Üretilen tüm ince filmlerin farklı büyütmelerde FESEM görüntüleri alınırken AFM cihazı ile tüm ince filmlerin 4 x 4 μm^2 skalada iki boyutlu ve üç boyutlu görüntüleri elde edilmiştir ve ortalama yüzey pürüzlülükleri belirlenmiştir. Genel olarak TVA tekniği ile üretilen tüm ITO ince filmlerde sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği söylenebilir. FESEM görüntüleri ölçek olarak AFM görüntülerinin alındığı ölçeğe yakın olması nedeniyle, AFM görüntüleri ile benzer özellikler göstermektedir. AFM görüntüleri incelendiğinde yüzeyde taneli bir yapının hakim olduğu dikkati çekmektedir. Tanelerin boyut olarak diğer tanelerle hemen hemen aynı olması homojen bir kaplama olduğunu belirtmektedir. Farklı yükseklikte ve boyutta yığılma şeklindeki oluşumlar olmadığından film kalınlığının yüzeyde homojen olduğunun bir göstergesidir. Bu durumun ITO ince filmlerinin aynı zamanda düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmasına neden olacaktır. ITO ince filmler düz bir oluşum sergilemesine rağmen tepe benzeri sivri oluşumların olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum kristalleşme seviyeleri ve yapısal özellikleri hakkında da bilgi vermektedir. Ayrıca, ilk dikkati çeken tüm ITO filmlerinin yüzey pürüzlülüğünün düşük olması ve yükseklik olarak hemen hemen homojen dağılım sergileyen tanelerden oluşmalarıdır. Bununla birlikte, film kalınlığı azaldıkça taneciklerin küçüldüğü ve tanecikler arasında boşlukların çok fazla olmadığı dikkat çekmektedir. Film oluşumu sırasında yüzeylerdeki kusurların azlığı dolayısıyla da yüzey pürüzlülüklerinin düşük çıkabileceği sonucuna varılmıştır. ITO ince filmlerinin AFM görüntülerinde ortaya çıkan sıkı paketli yapının bu filmlerde düşük geçirgenliğe ve yüksek soğurmaya neden olduğu ve böylece yüzey özelliklerin optik özellikleri de etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. TVA tekniği ile üretilen tüm ITO ince filmlerinin

FESEM ölçümlerinden yararlanarak ortalama tanecik boyutunun 20-28 nm civarında nano boyutlarda olduğu bulunmuştur. Ayrıca, üretilen tüm ITO ince filmlerinin EDS analizleri sonucunda tüm ITO ince filmlerinin yüzdece ağırlık oranları bakımından indiyum, kalay ve oksijen dışında herhangibir safsızlık filmlerin yüzeyinde gözlenmemiştir. Bu da TVA tekniği ile ince film üretiminin oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Genel olarak RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinden alınan FESEM görüntülerinde ITO, IZO ve AZO ince filmleri granüler yapıda, homojen ve düzgün bir yapıda büyümüşlerdir. Ayrıca, sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği söylenebilir. Bu görüntüler ölçek olarak AFM görüntülerinin alındığı ölçeğe yakın olması nedeniyle, AFM görüntüleri ile benzer özellikler göstermektedir. Farklı yükseklikte ve boyutta yığılma şeklindeki oluşumlar olmadığından film kalınlığının yüzeyde homojen olduğunun bir göstergesidir. Bu durumun üretilen tüm ince filmlerinin aynı zamanda düşük pürüzlülük değerlerine sahip olmalarına neden olacaktır. AZO/PET ince filminde film oluşumu sırasında bölgesel yığılmaların olduğunu ve kırıkların oluştuğu görülmektedir. AZO/Si ince filminin FESEM görüntüsü incelendiğinde, alttaş etkisine bağlı olarak AZO filmi pirinç tanelerini andıran granüler yapıda, homojen ve düzgün bir yapıda büyümüştür. Ayrıca, genel olarak bu ince filmde sıkı paketli bir yapılanmanın oluştuğu, tabana tutunmanın iyi olduğu ve homojen bir kalınlık elde edildiği söylenebilir. AFM görüntüleri incelendiğinde, ITO/cam ince filminin AFM görüntüsünde yüzeyde rastgele dağılmış farklı yükseklik ve büyüklükte oluşumlar görülmektedir. Yüzeyde kümeler şeklinde oluşumlar söz konusudur, ancak birbirinden ayırt edilebilir derecede taneli bir yapılanma belirgin değildir. IZO/cam ince filminde yüzeyde gözlenen beyaz bölgeler film oluşumu esnasında üst üste yığılmalar sonucunda oluşan kümeleri göstermektedir. Ayrıca, büyük taneli yapılanmanın oluştuğu ve tepe benzeri oluşumlar kendini göstermektedir. AZO/cam ince filminde ise, yüzeyde rastgele dağılmış farklı yükseklik ve büyüklükte oluşumlar görülmektedir. AZO/PET ince filminin AFM görüntüsü incelendiğinde, bölgesel olarak yığılmaların olduğu gözlenmektedir. Yani, film oluşumu esnasında komşu tanelerin bir araya gelerek daha büyük kümeler

oluşturduğunu görmekteyiz. AZO/Si ince filminin AFM görüntüsünde yüzeyde taneli bir yapının hakim olduğu dikkati çekmektedir. Tanelerin boyut olarak diğer tanelerle hemen hemen aynı olması homojen bir kaplama olduğunu belirtmektedir. Ayrıca, AZO/Si ince filminin yüzey pürüzlülüğünün düşük olması ve yükseklik olarak hemen hemen homojen dağılım sergileyen tanelerden oluştuğu göze çarpmaktadır.Üretilen tümince filmlerinin FESEM ölçümlerinden yararlanarak ortalama tanecik boyutunun 13 ile 30 nm civarında nano boyutlarda olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, EDS sonuçları değerlendirildiğinde üretilen tüm ince filmlerinde yüzdece ağırlık oranları bakımından indiyum, kalay, çinko, alüminyum ve oksijen dışında herhangibir safsızlık filmlerin yüzeyinde gözlenmemiştir. TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile farklı alttaşlar üzerine üretilen tüm ince filmlerin hemen hemen aynı yüzey özellikleri sergiledikleri görülmektedir.

Üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerin teknolojik uygulamalarda kullanım potansiyelini belirleyen diğer bir özellik ise elektriksel özelliklerinin incelenmesidir. TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin iletkenlik tipleri sıcak uç tekniği ile belirlenirken dört-uç tekniği ile elektriksel özdirenç değerleri hesaplanmıştır. Literatürde ITO ince filmlerinin özdirenç değerlerinin 10^{-3}-10^{-4} Ω-cm aralığında değiştiği görülmüştür. Bu çalışmada TVA tekniği ile üretilen ITO ince filmlerinin literatürdeki çalışmalara göre daha düşük tabaka direncine ve daha düşük özdirenç değerlerine (10^{-5} Ω/□ ve 10^{-5} Ω-cm) sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun da üretilen ITO ince filmlerin düşük pürüzlülüğe sahip olmalarına bağlı olarak yüzey mobilitelerinin artmasına böylece özdirenç değerlerinde bir azalmaya sebep olabiliceğini bir göstermiştir. Üretilen tüm ince filmlerin iletkenlik tiplerine bakıldığında n-tipi özellik gösterdikleri bulunmuştur. Literatürdeki bazı çalışmalarda belirtildiği gibi, ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin özdirenç değerlerinin 10^{-3}-10^{-4} Ω-cm aralığında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin literatürdeki çalışmalara gore daha düşük özdirenç değerlerine (10^{-5} Ω-cm) sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen ITO, IZO, AZO ince filmlerinin elektriksel iletkenlik türleri belirlenmiş olup tüm ince filmlerin n-tipi özellik gösterdikleri görülmüştür. TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmleri n-tipi özellik sergilemişlerdir.

Bunun yanında literatüre göre daha düşük tabaka direnci ve özdirenç değerleri bulunmuştur.

Sonuç olarak bu çalışmada cam, PET ve Si alttaşlar üzerine büyütülen ITO ince filmlerinin üretimi TVA tekniği kullanılarak ilk defa üretilmiştir. TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri ile elde edilen sonuçlara bakıldığında üretilen filmlerin literatürle uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, RF magnetron sıçratma ince film üretim tekniğine göre TVA tekniği ile üretim süresinin çok kısa olması kullanılan yöntemin avantajını ortaya koymaktadır.

9.2 Tartışma ve Öneriler

Bu çalışmada güneş pillerinde ve optoelektronik cihazlarda kullanım potansiyeline sahip ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin üretimi cam, PET ve Si alttaşlar üzerine TVA ve RF magnetron sıçratma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, üretilen tüm filmlerin yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özelliklerinin araştırılması üzerine bir çalışma yapılmıştır.

TVA tekniği ile elde edilen sonuçlara göre, ITO ince filmleri ile ilgili ilerideki çalışmalarda yapılabilecek değişikliler şöyle sıralanabilir,

- ✓ İnce filmlerin özellikleri üzerine üretim parametrelerinin etkisi oldukça önemlidir. Bu nedenle daha kaliteli ITO ince filmlerinin üretimi için kalınlık parametreleri değiştirilerek uygun kalınlık belirlenebilir.

- ✓ Yarıiletken filmlerin yapısal özellikleri üretim parametrelerinden biri olan taban sıcaklığına bağlıdır. Bu çalışmada herhangi bir taban sıcaklığı uygulanmamıştır. Uygulanacak taban sıcaklığı ile daha kaliteli ITO ince filmlerinin üretimi gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, üretim sonrası ısıl işlemler uygulanarak oksijen alışverişine yatkın ITO ince filmlerin kristalleşmesinde ve buna bağlı olarak yapısal, özellikle optiksel özellikleri ile ilgili olarak iyileştirmeler

yapılabilir. Ayrıca, Azot, Argon ve vakumlu ortamlarda tavlama işlemi yapılarak, sonuçlar karşılaştırılıp optimum değerler elde edilebilir.

- ✓ Bilindiği gibi ITO ince filmler günlük hayatta çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunlar arasında en bilinenler optoelektronik cihazlar, ince film transistörler, güneş pilleri ve son zamanlarda plastic alttalar üzerine üretilen organic ışık yayan ledler (OLED) gelmektedir. Güneş pilleri yapımında n-tipi yarı iletken olarak kullanılan ITO ince filmlerin, farklı yarıiletkenlerle p-n kavşağı oluşturacak şekilde çeşitli üretimleri yapılıp, güneş pillerinin verimine olan etkileri incelenebilir.

RF magnetron sıçratma tekniği ile elde edilen sonuçlara göre, ITO, IZO ve AZO ince filmleri ile ilgili ilerideki çalışmalarda yapılabilecek değişikliler şöyle sıralanabilir,

- ✓ Bu çalışmada, son zamanlarda ITO malzemesine alternatif malzemeler olarak gösterilen IZO ve AZO ince filmlerinin üretimi sırasında deney parametreleri değiştirilebilir. İleriki çalışmalarda uygulanan güç, uygulanan süre, farklı oranlarda oksijen konsantrasyonları, uygun taban sıcaklığı gibi parametreler kullanılarak farklı özelliklerde alternatif ITO, IZO ve AZO ince film üretimi denenebilir.

- ✓ Üretim sonrası ısıl işlemler uygulanarak, oksijen alışverişine yatkın bu filmlerin yapısal, optiksel özelliklerinde dikkate değer değişiklikler yaratılabilir.

- ✓ RF magnetron sıçratma tekniği ile üretilen ITO, IZO ve AZO ince filmlerinin hem daha yüksek geçirgenliğe hem de düşük özdirence sahip olmasından dolayı fotovoltaik güneş pillerinde pencere materyali olarak kullanılabileceğinin uygun olduğu görülmektedir.

10. KAYNAKLAR DİZİNİ

Alam, M.J., Cameron, D.C:, 2000, Optical and electrical properties of transparent conductive ITO thin films deposited by sol-gel process, Thin Solid Films, 377-378, 455-459.

Alivisatos, A.P., 1996, Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. Science. 271, 933.

Aksoy, S., 2006, Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 65 s.

Arığ, A.B., 2010, TiN ve TiO_2 İnce Filmlerinin Hazırlanması ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 129 s.

Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M., 1977, Ellipsometry and Polarized Light, North-Holland, Amsterdam.

Bach, H. and Krause, D., 1997, Thin Films On Glass, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Bar´a, I., Quintela, M., Mendes, L., Nunes, P. and Martins, R., 1999, Performances exhibited by large area ITO layers produced by rf magnetron sputtering, Thin Solid Films, 337, 171–175.

Balbağ, M.Z., Pat, S., Cenik, M.İ., Akan, T., Ekem, N., Musa, G., 2007, Boron Evaporation and Related Difficulties, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 9, 858 – 861.

Balbağ, M.Z., 2009, Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile Magnezyum, Bor ve Magnezyum Di Bor İnce Filmlerinin Üretilmesi Ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 122 s.

Balbağ, M.Z., Pat, S., Ozkan, M., Ekem, N., Musa, G., 2010, Thermionic vacuum arc (TVA) technique for magnesium thin film deposition, Physica B, 405, 3276–3278.

Balbağ, M.Z., Pat, S., 2012, Electrically conductive and optically transparent polyethylene terephthalate films coated with gold and silver by thermionic vacuum arc thin film deposition, Journal of Plastic Film and Sheeting, 27, 209-222.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Baz, Z., 2008, Atmali Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemiyle Çinko Nitrür (Zn_3N_2) Üretimi Ve Optiksel Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 126 s.

Bashar, S.A., 1998, Study of ITO for novel optoelectronic devices, Ph. D. Thesis, University of London.

Benouis, C.E., Benhaliliba, M., Sanchez Juarez, A., Aida, M.S., Chami, F., Yakuphanoglu, F., 2010, The effect of indium doping on structural, electrical conductivity, photoconductivity and density of states properties of ZnO films, Journal of Alloys and Compounds, 490, 62–67.

Benramdane, N., Murad, W.A., Misho, R.H., Ziane, M. and Kebbab, Z., 1997, A chemical method for the preparation of thin films of CdO and ZnO, Materials Chemistry and Physics, 48, 119-123.

Bian, J., Li, X., Chen, L., Yao., Quin, 2004, Properties of undoped n-type ZnO film and N-In codoped ZnO film deposited by ultrasonic spray pyrolysis, chemical physics Letters, 393, 256-259.

Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, Ch., 1986, Atomic Force Microscope, Phys. Rev. Lett., 56, 930.

Brus, L.E., 1986, Electronic wave functions in semiconductor clusters: experiment and theory. J. Phys. Chem., 90, 255.

Caferov, T., 1998, Yarıiletken Fiziği-1.

Calnan,S., Tiwari, A.N., 2010, High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells, Thin Solid Films, 518, 1839–1849.

Chopra, K., L., Major, S., Pandya, D.K., 1983, Transparent conductors-a status review, Thin Solid Films, 102, 1.

Chrisa, X.P., 1998, Growth and Characterization of Indium Oxide (InOx) Films, Ph.D.'s Thesis, University of Crete.

Coutts, T.J., Young, D.L., Li, X., 2000, MRS Bull. August, 58–65.

Cui, H.N., Teixeira, V., Monteiro, A., 2002, Microstructure study of indium tin oxide thin films by optical methods, Vacuum, 67, 589.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Çalışkan, H., SiO_2 ve ZrO_2 ince filmlerin hazırlanması ve optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 108 s.

Çetin, N.E., Korkmaz, Ş., Elmas, S., Ekem, N., Pat, S., Balbağ, MZ., Tarhan, E., Temel, S., Özmumcu, M., 2013, The structural, optical and morphological properties of CaF_2 thin films by using Thermionic Vacuum Arc (TVA), Materials Letters, 91, 175-178.

Dai, Z.H., Zhang, R.J., Shao, J., Chen, Y.M., Zheng, Y.X., Wu, J.D. and Chen, L.Y., 2009, Optical Proeprties of Zinc-oxide Films Determined Using Spectroscopic Ellipsometry with Various Dispersion Models, Journal of Korean Physical Society, 55-3, 1227-1232.

Dawar, A.L., and Joshi, J.C., 1984, Semiconducting transparent thin films: their properties and applications, Journal of Material Science, 19, 1.

Delahoy, A.E., and Cherny, M., 1996, MRS Symp. Proc. 426, 467–477.

Deng, W., Ohgi, T., Nejo, H. and Fujita D., 2000,Characteristics of indium tin oxide films deposited by dc and rf magnetron sputtering, National Research Institute for Metals, 305- 0047, Japan,

Durlu, T.N., 1996, Katıhal Fiziğine Giriş, Ankara Üniversitesi, ISBN-975-556-0009.

Durose, K., Edwards, P.R. and Halliday, D.P., 1999, Materials aspects of CdTe/CdS solar cells, Journal of Crystal Growth, 197, 733-742.

Dyer, S.E., Gregory, D.J., Amons, P.S., Slot, A.B., 1996, Preparation and Piezoresistive Properties of Reactively Sputtered Indium Tin Oxide Thin Films, 288, 279-286.

Ekem, N., Musa, G., Pat, S., Balbag, Z., Cenik, I., Vladoiu, R., 2008, Carbon thin film deposition by Thermionic Vacuum Arc (TVA), Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, 10, 672 – 674.

Elmas, S., Korkmaz, Ş., Pat, S., 2013 a, Optical characterization of deposited ITO thin films on glass and PET substrates, Applied Surface Science, 276, 641–645.

Elmas, S., Korkmaz, Ş., 2013 b, Deposition of Al doped ZnO thin films on the different substrates with radio frequency magnetron sputtering, Journal of Non-Crystalline Solids, 359, 69–72.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Erbil, H.Y., 2006, Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces, Blackwell Publishing, India, 352.

Ertek, Ö., 2011, Spin kaplama yöntemiyle üretilmiş ZnO ince filmlerin sıcaklığa bağlı optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 130 s.

Fallah, H.R., Ghasemi, M., Hassanzadeh, A., Steki, H., 2006, The effect of deposition rate on electrical, optical and structural properties of tin-doped indium oxide (ITO) films on glass at low substrate temperature, Physica B, 373, 274–279.

Fallah, H.R., Varnamkhasti, M.G., Vahid, M.J., 2010, Substrate temperature effect on transparent heat reflecting nanocrystalline ITO films prepared by electron beam evaporation, Renewable Energy, 35, 1527–1530.

Fujiwara, H., 2007, Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications, John Wiley & Sons Ltd, England.

Gao, M.Z., Job, R., Xue, D.S., Fahrner, W.R., 2008, Thickness Dependence of Resistivity and Optical Reflectance of ITO Films, Chinese Physics Letters, 25, 1380.

Ginley, D. S. and Bright, C., 2000, Tranparent conducting oxides, MRS Bulletin, 15-18.

Ginley, D.S., (Ed), 2010, Handbook of Transparent Conductors, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 9p.

Goldstein, J.I. and Yakowitz, H., 1975, Practical scanning electron microscope, Plenum Press, New York, 582 p.

Gonçalves, G., Elangovan, E., Barquinha, P., Pereira, L., Martins, R., Fortunato, E., 2007, Influence of post-annealing temperature on the properties exhibited by ITO, IZO and GZO thin films, Thin Solid Films, 515, 8562–8566.

Gordan, R.G., 2000, MRS Bull. August, 52–57.

Grill A., 1993, Cold Plasma in materials fabrication, IEEE Pres.

Guille´n, C., Herrero, J., 2010, Optical, electrical and structural characteristics of Al:ZnO thin films with various thicknesses deposited by DC sputtering at room temperature and annealed in air or vacuum, Vacuum, 84, 924–929.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Gurumurugan, K., Mangalaraj, D., Narayandass, S.N., Nakanishi, Y. and Hatanaka, Y., 1997, Composition studies on CdO thin films formed by pyrolysis and sputtering, Applied Surface Science, 113-114, 422-425.

Habibi, M.H. and Talebian, Nasrin., 2005, The Effect of Annealing on Structural, Optical and Electrical Properties of Nanostructured Tin Doped Indium Oxide Thin Films, Acta Chim. Slov. 52, 53–59.

Hamberg, I. and Granqvist, C.G., 1986, Evaporated Sn-doped In_2O_3 films: Basic optical properties and applications to energy-efficient windows, Journal of Applied Physics , 60, 11.

Harding, G.L, and Window, B., 1990, DC magnetron reactively sputtered indium-tin-oxide films produced using argon–oxygen–hydrogen mixtures, Sol. Energy Mater., 20, 367-379.

Hartnagel, H.L, Dawar, A.L, Jain, A.K, and Jagadish, C., 1995, Semiconducting Transparent Thin Films (Philadelphia, PA:Institute of Physics Publishing).

Hao, L., Diao, X., Xu, H., Gu, B., Wang, T., 2008, Thickness dependence of structural, electrical and optical properties of indium tin oxide (ITO) filmsdeposited on PET substrates, Applied Surface Science, 254, 3504–3508.

Honda, S., Watamori, M., and Oura, K., 1996, The effects of oxygen content on electrical and optical properties of indium tin oxide films fabricated by reactive sputtering, Thin Solid Films, 281–282: 206–208.

Hotovya, J., Hüpkes, J., Böttler, W., Marins, E., Spiess, L., Kups, T., Smirnov, V., Hotovy, I., Kováč, J., 2013, Sputtered ITO for Application in thin-film silicon solar cells: Relationship Between Structural and Electrical Properties

Hu, J., Gordon, R., 1992 a, Textured aluminum-doped zinc oxide thin films from atmosferic pressure chemical-vapor deposition, Journal of Applied Physics, 71, 880.

Hu, J., and Gordon, R.G., 1992 b, Atmospheric pressure chemical vapor deposition of gallium doped zinc oxide thin films from diethyl zinc, water, and triethyl gallium, J. Appl. Phys., 72, 5381–5392.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Huang, J.L., Yau, B.S., Chen, C.Y., Lo, W.T., Lii, D.F., 2000, The Electromagnetic shielding effectiveness of indium tin oxide films, Departman of Materials Science and Engineering, National Cheng-Kung University, Ceramics International 27, 363- 365.

Huang, R.S., Ladbrooke, P. H., 1978, "The use of a four-point probe for profiling submicron layers", Solid-State Electronics, 21: 1123-1128.

Ishibashi, S., Higuchi, Y., Ota, Y. and Nakamura, K., 1990, Journal of Vacuum Science and Technology A, 8, 1399–1402.

Johnson, R.L., 2005, Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers, Master Thesis, Electrical Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa, 98 p.

Jung, Y.S., Seo, J.Y., Lee, D.W., Jeon, D.Y., 2003, Influence of DC magnetron sputtering parameters on the properties of amorphous indium zinc oxide thin film, Thin Solid Films 445, 63–71.

Kavasoğlu, N., 2006, Kimyasal Püskürtme Sisteminde Osilatör Frekansının ZnO ve Alaşımlarının Elektrooptiksel Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 143 s.

Kerkache, L., Layadi, A., Dogheche, E., Remiens, D., 2006, Physical Properties of RF sputtered ITO Thin Films and Annealing Effect, Applied Physics, 39, 184 -189.

Kerkache, L., Layadi, A., Mosser, A., 2009, Effect of oxygen partial pressure on the structural and optical properties of dc sputtered ITO thin films, Journal of Alloys and Compounds, 485, 46.

Ketenci, E., 2010, CdO: F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 114 s.

Kırmızıgül, F., 2008, CdO İnce Filmlerinin Püskürtme Yöntemiyle Hazırlanması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana, 97 s. (Yayınlanmamış).

Kim, H., Pique´, A., Horwitz, J.S., Mattoussi, H., Murata, H., Kafafi, Z.H., Chrisey, D.B., 1999, Indium tin oxide thin films for organic light-emitting devices, Applied Physics Letters, 74, 3444–3446.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kim, H., Horwitz, J. S., Kim, W. H., Kafafi, Z., Chrisey, D. B., 2003, High Quality Sn-Doped In_2O_3 Films Grown by Pulsed Laser Deposition for Organic Light-Emitting Diodes, Materials Research Society Symposium – Proceedings, 780, 21-32.

Kim, J.H., Jeon,K.A., Kim, G.H., Lee,S.Y., 2006, Electrical, Structural, and Optical Properties of ITO Thin Films Prepared at Room Temperate by Pulsed Laser Deposition, Applied Surface Science, 252,. 4834–4837.

Kim, Do-Geun., Lee, Sunghun., Kim, Dong-Ho., Lee, Gun-Hwan., Isshiki, Minoru., 2008, Temperature dependence of the microstructure and resistivity of indium zinc oxide films deposited by direct current magnetron reactive sputtering, Thin Solid Films, 516, 2045–2049.

Kim, J.M., Thiyagarajan, P., Rhee, S.W., 2010, Deposition of Al-doped ZnO Films on Polyethylene Naphthalate Substrate with Radio Frequency Magnetron Sputtering, Thin Solid Films, 518, 5860–5865.

Kinckerbocker, S.A., Kulkarni, A.K., 1996, Estimation and verification of the optical properties of indium tin oxide based on the energy band diagram, Journal of Vacuum Science and Technology A, 143, 3, 757.

Kittel, C., 1996, Katıhal Fiziğine Giriş, Güven Yayınları, İstanbul, 434 s.

Khodorov, A., Piechowiak, M., Gomes, M.J.M., 2007, Structural, electrical and optical properties of indium–tin–oxide thin films prepared by pulsed laser deposition Thin Solid Films, 515, 7829.

Koelmans, H., 1971, Application of semiconducting thin films, Thin Solid Films, 8, 19-33.

Korkmaz, Ş., 1994, Spray Pyrolysis yöntemiyle elde edilen Pb_{1-x} Cd_xS filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 129 s.

Korkmaz, S., Elmas, S., Ekem, N., Pat, S., Balbağ, MZ., 2012 a, Deposition of MgF_2 thin films for antireflection coating by using thermionic vacuum arc (TVA), Optics Communications, 285, 2373–2376.

Korkmaz, S., Pat, S., Ekem, N., Balbağ, MZ., Temel, S., 2012 b, Thermal treatment effect on the optical properties of ZrO_2 thin films deposited by thermionic vacuum arc, Vacuum, 86, 1930-1933.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kwok, H.S., Sun, X.W. and Kim, D.H., 1998, Pulsed laser deposited crystalline ultrathin indium tin oxide films and their conduction mechanisms, Thin Solid Films, 335, 299–302.

Legaya, G., Markeya, L., Meunier-Prestb, R. and Finota, E., 2007, Measurements of thickness dispersion in biolayers by scanning force microscopy and comparison with spectroscopic ellipsometry analysis, Ultramicroscopy, 107, 1111–1117.

Lewis, B.G., Paine, D.C., 2000, Applications and Processing of Transparent Conducting Oxides, MRS Bulletin, 22.

Li, G.F., Zhou, J., Huang, Y.W., Yang, M., Feng, J.H., Zhang, Q., 2010, Indium zinc oxide semiconductor thin films deposited by dc magnetron sputtering at room temperature, Vacuum, 85, 22-25.

Löffler, J., 2005, Ph.D. thesis, Transparent Conductive Oxides for Thin-Film Silicon Solar Cells.

Lungu, CP., Mustata, I., Musa, G., et al., 2004, Low friction silver-DLC coatings prepared by thermionic vacuum arc method, Vacuum, 76, 2-3, 127-130.

Major, S. and Chopra, K.L., 1988, Indium-doped zinc-oxide films as transparent electrodes for solar-cells, Solar Energy Materials, 17, 319–327.

Majumder, S.B., Jain, M., Dobal, P.S., Katiyar, R.S., 2003, Investigations on Solution derived aluminium doped zinc oxide thin films, Materials Science and Engineering B, 103, 16.

Martin, P.M., 2009, Deposition Technologies, Columbia Basin Thin Film Solutions LLC Kennewick, Washington, p. 851-854.

May, C. and Strümpfel, J., 1999, ITO coating by reactive magnetron sputtering-comparison of properties from DC and MF processing, Thin Solid Films, 351, 48–52.

Meng, L., Maçarico, A. and Martins, R., 1994, Study of annealed indium tin oxide films prepared by rf reactive magnetron sputtering, Pergamon 0042-207X(94)00150-2, Cemop/Uninova, Quinta de Torre, 2825 Monte da Caparica, Portugal.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Minami, T., Nanto, H., Takata, S., 1984 a, Highly conductive and transparent aluminum doped zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering, Japanese Journal of Applied Physics, 23, L280.

Minami, T., Nanto H., Shooji, S., Takata, S., 1984 b, The stability of zinc oxide transparent electrodes fabricated by RF magnetron sputtering, Thin Solid Films, 111, 167.

Minami, T., Sato, H., Takata, S., Ogawa, N., Mouri, T., 1992, Large-area milky transparent conducting Al-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering, Japanese Journal of Appied Physics, 31, L1106.

Minami, T., 1999, Transparent and conductive multicomponent oxide films prepared by magnetron sputtering, Journal of Vacuum Science and Technology, A17, 1765.

Minami, T., Sato, H., Nanto, H., Takata, S., 1989, Heat treatment in hydrogen gas and plasma for transparent conducting oxide films such as ZnO, SnO_2 and indium tin oxide, Thin Solid Films, 176, 277.

Minami, T., 2000, New n-type transparent conducting oxides, MRS Bulletin, 25, 38.

Minami, T., 2005, Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes, Semiconductor Science and Technology, 20, 35–44.

Mohamed, S.H., El-Hossary, F.M., Gamal, G.A. and Kahlid, M.M., 2009, Properties of Indium Tin Oxide Thin Films Deposited on Polymer Substrates, Acta Physica Polonica A, 115,704-708.

Mudryi, A.V., Ivaniukovich, A.V., Ulyashin, A.G., 2007, Deposition by Magnetron Sputtering and Characterization of İndium Tin Oxide Thin Films, Thin Solid Films, 515, 6489–6492.

Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A. and Popescu, A., 1983, Low voltage arc welding in vacuum, Review Roum. Physics, 28, 907.

Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A., Popescu, A., 1984, Heated Cathode Arc In Vacuum ArcIn Vacuum Developed In The Vapors of The Heated Anode, Proc. XI th Symp. On Discharges And Insulation In Vacuum, Berlin, 229.

Musa, G., Mustata, I., Ciupina, V., et al., 2004, Diamond-like nanostructured carbon film deposition using thermionic vacuum arc, Diamond And Related Materials, 13, 4-8, 1398-1401.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Musa, G., Bob, C.S., Lungu, C.P., et al., 2007, Gaseous Thermionic Vacuum Arc(G-TVA) an extension of TVA (Thermionic Vacuum Arc) input materials from solid samples to gases and liquids for carbon thin film deposition, Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, 9, 4, 867-870.

Nakada, T., Ohkubo, Y., Kunioka., A., 1991, Effect of water vapor on the growth of textured ZnO-based films for solar cells by DC-magnetron sputtering, Japanese Journal of Applied Physics, 30, L3344.

Nayar, P.S., Catalano, A., 1981, Zinc phosphide-zinc oxide heterojunction solar cells, Applied Physics Letters, 39, 705.

Neamen, D., 1997, Semiconductor Physics and Devices (3rd ed.), University of Mexico: McGraw-Hill.

Nishio, K., Sei T. and Tsuchiya, T., 1996, Preparation and electrical properties of ITO thin films by dip-coating process, Journal of Materials Science, 31, 1761–1766.

Nunes, P., Fernandes, B., Fortunato, E., Vilarinho, P., Martins, R., 2000, Performances presented by zinc oxide thin films deposited by spray pyrolysis, Thin Solid Films, 337, 176-179.

Nunes, P., Fortunato, E., Tonello, P., Fernandes, F., B., , Vilarinho, P., Martins, R., 2002, Effect of dopant elements on the properties of ZnO thin films,Vacuum, 64, 281-285.

Oh, S.H., Kim, D.J., Hahn, S.H., Kim, E.J., 2003, Comparison of optical and photocatalytic properties of TiO_2 thin films prepared by electron-beam evaporation and sol–gel dip-coating, Materials Letters, 57, 4151.

Ohring, M., 2002, The Materials Science of Thin Films, Academic Press, New Jersey., 196p.

Omar, M.A., 1975, Elementary Solid State Physics, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Menlo Park, California.

Operations Manual for the Filmetrics F20 Thin Film Analyzer, Revision 4.04, Filmetrics Inc Limited 2005.

Özkan M., 2010, Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile II-VI Grubu Bazı Yarıiletken Bileşiklerin İnce Filmlerinin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 137 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Özkan, M., Ekem, N., Pat, S., Balbağ, M.Z., 2012, ZnS thin film depositionon Silicon and glass substrates by Thermionic vacuum Arc, Materials Science in Semiconductor Processing, 15, 113-119.

Palalı, E., 2005, Sol-Jel Yöntemiyle İndiyum Kalay Oksit (ITO) İnce Film Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 67 s.

Pankove, J.I., 1971, Optical process in semiconductors, Solid State Physical Electronics Series, Prentice-Hall, N.J.

Pat, S., Ekem, N., Akan, T., Küsmüs, Ö., Demirkol, S., Vladoiu, R., Lungu, C.P., Musa, G., 2005, Study on Thermionic Vacuum Arc-A Novel and Advanced Technology For Surface Coating, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 7, 5, 2495-2499.

Pat., S., 2007, Çoklu gaz karışımı plazmalarının optik emisyon spektroskopisi Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 158 s.

Pat., S., Özmumcu, M., Ekem, N., Özkan, M., Korkmaz S., Balbag, M.Z., 2010, Antireflective Coating on Polyethylene Terephthalate by Thermionic Vacuum Arc, Journal of Plastic Film and Sheeting, 259-269.

Pat., S., Temel, S., Ekem, N., Korkmaz S., Özkan, M., Balbag, M.Z., 2012, Diamond-like carbon coated on polyethylene terephthalate by Thermionic Vacuum Arc, Journal of Plastic Film and Sheeting, 128-137.

Petrou, P., Singh, R., Brodie, D.E., 1979, The use of ZnO in transparent type MIS solar cells, Applied Physics Letters, 35, 930.

Ramamoorthy, K., Sanjeeviraja, C., Jayachandran, M., Sankaranarayanan, K., Bhattacharya, P., Kukreja, L.M., 2001, Preparation and characterization of ZnO thin films on InP by laser-molecular beam epitaxy technique for solar cells, Journal of Crystal Growth, 226, 281-286.

Rancourt, J.D., 1987, Optical Thin Films User's Handbook, McGraw-Hill, California, 289p.

Raoufi, D., Kiasatpour, A., Fallah, H.R., Rosatian, A.S.H., 2007, Surface characterization and microstructure of ITO thin films at different annealing temperatures, Applied Surface Science, 253, 9085.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Rauf, I.A., 1995, Sturucture and Properties of Tin-Doped Indium Oxide Thin Films Prepared by Rective Electron- Beam Evaporation with a Zone- Confining Arrengement, Journal of Applied Physics, 79, 8, 4057-4065.

Rudden, M.N. and Wilson, J., 1980, Elements of Solid State Physics, School of Physics, Newcastle Upon Tyne Polytechnic.

Salehi, A., 1998, The effects of deposition rate and substrate temperature of ITO thin films on electrical and optical properties, Thin Solid Films, 324, 214–218.

Sato, H., Minami, T., Takata, S.,Yamada, T., 1993, Transparent conducting p-type NiO thin films prepared by magnetron sputtering, Thin Solid Films, 236, 27.

Seeger, K., 2002, Semiconductor Physics: An Introduction 8th edition, Springer, Berlin., 10-32 p.

Senthilkumar, V., Vickraman, P., Jayachandran, M., Sanjeeviraj, C., 2010, Structural and optical properties of indium tin oxide (ITO) thin films with different compositions prepared by electron beam evaporation, Vacuum, 84, 864–869.

Shan, F.K., Yu, Y.S., 2003, Optical properties of pure and Al doped ZnO thin films fabricated with plasma produced by excimer laser, Thin Solid Films, 435, 174–178.

Sheu, J.K., Su, Y.K., Chi, G.C., Jou M.J. and Chang, C.M., 1999, Effects of thermal annealing on the indium tin oxide Schottky contacts of n-GaN, Applied Physics Letters, 72, 3317–3319.

Sim, K.U., Shin, S.W., Moholkar, A.V.,Yun,J.H., Moon, J. H., Kim, J.H., 2010, Effects of Dopant (Al, Ga, and In) on the Characteristics of ZnO Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering System, Current Applied Physics, S463–S467.

Singh, J., 1995, Semiconductor optoelectronics, McGraw-Hill, Inc., USA, 725 p.

Skoog, D.A., Holler, F.J., Nieman, T.A., 1998, Principles of Instrumental Analysis.Ed. Harbor Drive, part IV. Orlando, Florida.

Sorar, İ., 2008, Katkılı ve Katkısız Çinko Oksit (ZnO) İnce Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 145 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Söyleyici, M., 2011, Ir Katkılı ZnO Filmlerinin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 133 s.

Smith, W.F., 1990, Principles of materials science and engineering, McGraw-Hill, Inc., USA, 864 p.

Sreenivas, K., Sundarsena Rao, T., Mansnigh, A. and Chandra, S., 1985, Preparation and Characterization of r.f. Sputtered Indium Tin Oxide Films, Journal of Applied Physics, 57, 2, 384 – 392.

Stadler, A., 2012, Transparent Conducting Oxides—An Up-To-Date Overview, Materials 5, 661-683 p.

Sze, S.M., 2002, Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley&Sons, New York., 85-127 p.

Şişman, İ., 2006, CdS, CdSe ve CdTe Bileşik Yarıiletken İnce Filmlerinin Aynı Çözeltiden Elektrokimyasal Olarak Au(111) Elektrodu Üzerinde Büyütülmesi ve AFM, STM, XRD ve UV-VIS Spektroskopisi ile Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 201 s.

Takahashi, Y., Okada, S., Tahar, R.B.H., Nakano, K., Ban, T. and Ohya, Y., 1997, Dip-coating of ITO films, Journal of Non-Crystalline and Solids, 218, 129–134.

Tang, W., Cameron D. C., 1994, Aluminum-doped zinc oxide transparent conductors deposited by the sol-gel process, Thin Solid Films, 238, 83.

Torlakoğlu, A., 2008, Atık Pet'den Üretilen Kısa Yağlı Alkid Reçinelerinin Amino Reçineleri İle Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 123 s.

Ulu, Y.A., 2007, $Al_xGa_{1-x}As$/GaAs Nanoyapilarinin Kimyasal Aşindirma Yöntemi İLE İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 101 s.

Verkey, A.J., Fort, A.F., 1994, Transparent conducting cadmium oxide thin films prepared by a solution growth technique, Thin Solid Films, 239, 211.

Vladoiu, R., Musa, G., Mustata, I., 2003, Thermoionic vacuum arc - A new method of thin film deposition, Journal Of Optoelectronıcs And Advanced Materials, 5, 325-330.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Vladoiu, R., Ciupina, V., Surdu-Bob, C., et al., 2007, Properties of the carbon thin films deposited by thermionic vacuum arc, Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, 9, 862-866.

Wager, J.F., Keszler, D.A,. Presley, R.E., 2008, Transparent Electronics. New York: Springer.

Wasa, K. and Hayakava, S., 1992, Handbook of Sputtering Deposition Technology, Noyes Publication.

Willey, R.R., 1996, Practical Design and Production of Optical Thin films, Marcel Dekker, Michigan, 182p.

Wong, F.L., Fung, M.K., Tong, S.W., Lee, C.S., Lee, S.T., 2004, Flexible organic light-emitting device based on magnetron sputtered indium-tin-oxide on plastic substrate, Thin Solid Films, 466, 1-2, 225-230.

Xiao, Y.B., Kong, S.M., Kim, E.H., Chung, C.W., 2011, Characteristics of indium zinc oxide thin films prepared by direct current Magnetron sputtering for flexible solar cells, Solar Energy Materials Solar Cells, 95, 264–269.

Ylmaz, S., 2008, Dy_2O_3, Eu_2O_3, Sm_2O_3 katkılanmış β-Bi_2O_3 tipi katı elektrolitlerin sentezlenmesi, karakterizasyonları ve katı hal oksijen iyonik iletkenliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 212 s.

Zhang, K.R., Zhu, F.R., Huan, C.H.A., Wee, A.T.S. and Osipowicz, T., 1999, Indium-doped zinc oxide films prepared by simultaneous rf and dc magnetron sputtering, Surf. Interface Anal., 28, 271–274.

Zhang, K.R., Zhu, F.R., Huan, C.H.A., and Wee, A.T.S, 1999, , Effect of hydrogen partial pressure on optoelectronic properties of indium tin oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering method, Journal of Applied Physics, 86, 974–980.

Zhao, Z., Morel, D.L. and Ferekides, C.S., 2002, Electrical and optical properties of thin-doped CdO films deposited by atmospheric metalorganic chemical vapor deposition, Thin Solid Films, 413, 203-211.

Zhou, J., 2005, Indium Tin Oxide (ITO) Deposition, Patterning and shottky Contact Farication. Ph.D.'s Thesis, Rochester Institute of Technology.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Saliha ELMAS

Doğum Yeri: Karacabey/BURSA

Doğum Tarihi: 13.06.1980

Adres: Ali Fuat Güven Bulvarı Vişnelik Mah. Ilgazlar kız öğrenci evi No:43 Eskişehir

Fakülte: Fen Edebiyat Fakültesi

Bölüm: Fizik Bölümü

EĞİTİM:

2008–2013	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
	Fen Bilimleri Enstitüsü
	Fizik A.B.D. Katıhal Fiziği B.D. Doktora, Eskişehir
2005–2008	Afyon Kocatepe Üniversitesi
	Fen Bilimleri Enstitüsü
	Fizik A.B.D. Genel Fizik B.D. Yüksek Lisans, Afyonkarahisar
2001–2005	Süleyman Demirel Üniversitesi
	Fen-Edebiyat Fakültesi
	Fizik Bölümü, Lisans, Isparta
1995–1999	Karacabey Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)

Doktora Tez Adı: "ITO, IZO ve AZO İnce Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi" Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şadan KORKMAZ

Yüksek Lisans Tez Adı: "Tungsten Karbürlü Metal Matriks Kompozit Seramiklerinin Elastik Sabitelerinin İncelenmesi" Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bekir ORUNCAK

SCI, SSCI, AHCI İNDEKSLERİNE GİREN DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

1- Korkmaz S, **Elmas S**, Ekem N, Pat S, Balbağ MZ., "Deposition of MgF_2 thin films for antireflection coating by using thermionic vacuum arc (TVA)", Optics Communications, 285;2373-2376, **2012**

2- N. Emre Çetin, Şadan Korkmaz, **Saliha Elmas**, Naci Ekem, Suat Pat, M. Zafer Balbağ, Enver Tarhan, Sinan Temel, Murat Özmumcu, "The structural, optical and morphological properties of CaF_2 thin films by using Thermionic Vacuum Arc (TVA)", Materials Letters, 91;175-178, **2013**

3- Saliha Elmas, Şadan Korkmaz, "Deposition of Al doped ZnO thin films on the different substrates with radio frequency magnetron sputtering", Journal of Non-Crystalline Solids, 359;69-72, **2013**

4- Saliha Elmas, Şadan Korkmaz, Suat Pat, "Optical characterization of deposited ITO thin films on glass and PET substrates", Applied Surface Science, 276;641– 645, **2013**

DİĞER DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

1- İ. H. Sarpun, **S. Elmas**, R. Ünal, H. A. Yalım, B. Oruncak, A. Erol,"Elastic Properties of WC-Ni Composites", Balkan Physics Letters, Special Issue, 241-246, **2008.**

2- Korkmaz Ş., Ekem N., Pat S., Balbag M. Z., Ozkan M.,Temel S., Çetin E., Özmumcu M., ve **Elmas S** "ZrO_2 and SiO_2 coatings of mineral lenses for anti-reflection with thermionic vacuum arc (TVA) technique and investigation of some physical properties", Azerbaijan J. Pys: Fizika, 16, 2, 272-274, **2010**.

3- Korkmaz Ş., Ekem N., Pat S., Balbag M. Z., Ozkan M.,Temel S., Çetin E., Özmumcu M., ve **Elmas S**, "ZnO thin films with reactive sputter at different O2 concentrations and some physical properties", Azerbaijan J. Pys: Fizika, 16, 2, 247-249, **2010**.

HAKEMLİ KONFERANS/SEMPOZYUMLARIN BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR

1-I.H SARPUN, **S. ELMAS**, R. UNAL, H. A. YALIM, B. ORUNCAK, A. EROL "Elastic Properties of Composites", Turkish Physical Society 24th International Physics Conference, 28-31 August **2007**, Inönü University, Malatya – Turkey

2-Ş. KORKMAZ, **S. ELMAS**, N. E. ÇETİN, S. TEMEL, M .Z BALBAĞ, S. PAT, N. EKEM "RF Saçtırma Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen ZnO İnce Filmlerinin Bazı Optik Özelliklerinin Oksijen Konsantrasyonuna Göre İncelenmesi", I. Ulusal Metal, Yarıiletken ve Oksit Materyallerin Üretiminde Kullanılan Sistemler ve Analiz Teknikleri Kongresi (MYOMAT 2009), 15 – 16 Haziran **2009**,ESOGU, Eskişehir

3-S. ELMAS, Ş. KORKMAZ, N. EKEM, S. PAT, M. Z. BALBAG, M. ÖZKAN, S. TEMEL, G. MUSA, "RF Saçtırma Tekniği ile Üretilen GaAsN İnce Filmlerin Bazı Optik Özelliklerinin İncelenmesi", I. Ulusal Metal, Yarıiletken ve Oksit Materyallerin Üretiminde Kullanılan Sistemler ve Analiz Teknikleri Kongresi (MYOMAT 2009), 15 – 16 Haziran **2009**, ESOGU, Eskişehir

4-S. ELMAS, S. KORKMAZ, S. PAT, M. Z. BALBAG, N. EKEM "Radyo Frekans (RF) Saçtırma Metodu Kullanılarak Elde Edilen ZnO İnce Filmlere Oksijen Konsantrasyonunun Etkisi" Turkish Physical Society 26th International Physics Conference, 23-27 September **2009**, Bodrum, Turkey

5-Saliha Elmas, Şadan KORKMAZ, Naci EKEM, Suat PAT, M. Zafer BALBAĞ, Mehmet ÖZKAN "Some Optical Properties of MgF_2 Thin Films Deposited by Thermoionic Vacuum Arc (TVA)" The 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR6), 15 – 18 June **2010**, Çeşme, Turkey

6- S. Elmas, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, M. Ozkan, Ş. Korkmaz, S. Temel, M. Nebi, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, T.Aydogmus, S. Pekdemir, O. Aydın "Deposition of ITO Thin Films by Thermoionic Vacuum Arc (TVA) Technique" The 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR7), 27 – 1 June **2011**, İstanbul, Turkey

7- S. Temel, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, M. Ozkan, Ş. Korkmaz, **S. Elmas**, M. Nebi, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, T.Aydogmus, S. Pekdemir, O. Aydın "SiO_2-ZrO_2 Multilayer AR Coatings of Lenses by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique" The 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR7), 27 – 1 June **2011**, İstanbul, Turkey

8- M. Nebi, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, M. Ozkan, Ş. Korkmaz, S. Temel, **S. Elmas**, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, T. Aydogmus, S. Pekdemir, O. Aydın "Some Physical Properties of Deposited ZnO Thin Films by RF Sputter at Various Oxygen Concentrations" The 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR7), 27 – 1 June **2011**, İstanbul, Turkey

9- S. Elmas, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbağ, Ş. Korkmaz, S. Temel, M. Nebi, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, T.Aydoğmuş, S. Pekdemir "Some Physical Properties of Deposited ITO Thin Films by Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique" 27th International Physical Congress, Turkish Physical Society, 5 – 9 Eylül **2011**, Bodrum,Turkey

10- S. Temel, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbag, Ş. Korkmaz, M. Nebi, N.E. Cetin, M. Ozmumcu, **S. Elmas**, T. Aydoğmuş, S. Pekdemir, " Multilayer Anti-Reflective Coatings of Mineral Lenses with Thermıonıc Vacuum Arc (TVA) Technique", 27th International Physical Congress, Turkish Physical Society, 5 – 9 Eylül **2011**, Bodrum,Turkey

11- M. Nebi, S. Pat, N. Ekem, M. Z. Balbağ, Ş. Korkmaz, S. Temel, N. E. Cetın, M. Ozmumcu, **S. Elmas**, T. Aydogmuş, S. Pekdemır, "Investigation Of Some Physical Properties Of Deposited GaAs Thin Films by RF Sputtering", 27th International Physical Congress, Turkish Physical Society, 5 – 9 Eylül **2011**, Bodrum,Turkey

12- T. Aydoğmuş, N. Ekem, S. Pat, M. Z. Balbağ, Ş. Korkmaz, S. Temel, N. E. Cetin, M. Ozmumcu, **S. Elmas**, M. Nebi, S. Pekdemir " Dedosıted MgF2 Thin Films by Thermionic Vacuum Arc (TVA)" 27th International Physical Congress, Turkish Physical Society, 5 – 9 Eylül **2011**, Bodrum,Turkey

13- S. Pekdemir, S. Pat, N. Ekem, M. Z. Balbağ, Ş. Korkmaz, S. Temel, N. E. Cetin M. Ozmumcu, **S. Elmas**, M. Nebi, T. Aydoğmuş "Deposited AR Coatings of Pet Substrates By Thermionic Vacuum Arc (TVA) Technique" 27th International Physical Congress, Turkish Physical Society, 5 – 9 Eylül **2011**, Bodrum, Turkey

14- Saliha Elmas, Şadan Korkmaz, Suat Pat, Tuna Aydoğmuş, "Investigation of structural, electrical and surface properties of ITO thin films prepared by thermionic vacuum arc (TVA)", 10. Kimyasal Fizik Kongresi (CPC-X), 10-12 Ekim **2012**, Ankara, Türkiye

15- Volkan Senay, Suat Pat, Sadan Korkmaz, Tuna Aydoğmuş, **Saliha Elmas**, Soner Ozen, Naci Ekem, M. Zafer Balbağ, "ZnO thin film synthesis by reactive radio frequency magnetron sputtering", The 9th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NanoTR9), 24 – 28 June **2013**, Erzurum, Turkey

PROJE DENEYİMİ

Özel Bir Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği Kullanılarak Gözlük Camlarına Çeşitli Kaplamaların Yapılması Ve Bazı Fiziksel Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, TÜBİTAK, **2009-2011**.