

CdO: F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu

Elif Ketenci

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

MAYIS, 2010

Production and Characterization of CdO:F Films

Elif Ketenci

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Physics

May, 2010

CdO: F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu

Elif Ketenci

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

Danışman: Doç. Dr. Ferhunde Atay

MAYIS, 2010

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Elif KETENCİ'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "CdO: F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ferhunde ATAY

İkinci Danışman :-

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Ferhunde ATAY

Üye : Prof. Dr. Muhsin ZOR

Üye : Doç. Dr. İdris AKYÜZ

Üye : Doç. Dr. Metin KUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Salih KÖSE

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

CdO:F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu

Elif Ketenci

ÖZET

Bu çalışmada II-VI grup ikili bileşiklerinden olan CdO yarıiletken filmleri ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında üretilmiştir ve CdO yarıiletken filmlerinin fiziksel özelliklerine Flor elementi katkısının (%1, %2, %3, %4, %5) etkisi araştırılmıştır. CdO:F filmlerinin spektroskopik elipsometri ölçümlerinden kalınlıkları belirlenmiş ve bazı optik parametreleri (sönüm katsayısı ve kırılma indisi) saptanmıştır. Elde edilen filmlerin X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde tüm filmlerin polikristal yapıda olduğu ve %1 F katkı oranının yapısal özellikleri iyileştirmek açısından en iyi katkı oranı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. CdO:F yarıiletken filmlerinin optik özellikleri incelenmiş, direkt bant geçişine sahip oldukları saptanmış ve ayrıca 2.40eV-2.56eV arasında yasak enerji aralıklarına sahip oldukları belirlenmiştir. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) ile filmlerin üç boyutlu yüzey topografileri ve faz görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerden taneli yapılanmanın varlığı dikkati çekmiştir. Filmlerin elektriksel iletkenlik ve öz direnç değerlerini belirlemek amacıyla iki uç metodu kullanılmıştır. Bunun sonucunda %1 oranında F katkısının en yüksek iletkenlik değerini verdiği gözlenmiştir. Tüm sonuçlar opto elektronik endüstrisi ve fotovoltaik güneş pili uygulamaları açısından değerlendirilmiş ve F katkısının her bir fiziksel özellik üzerinde önemli bir etki yarattığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: CdO:F Filmleri, Ultrasonik Kimyasal Püskürtme Tekniği, Spektroskopik Elipsometre, X-ışını Kırınımı, Optik Özellikler, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Elektriksel Özellikler.

Production and Characterization of CdO:F Films

Elif Ketenci

SUMMARY

In this work, CdO films which belong to II-VI group binary compounds have been produced by Ultrasonic spray pyrolysis (USP) technique at the substrate temperature of $300\pm 5^{\circ}\text{C}$ and the effect of F doping (at 1%, 2%, 3%, 4% and 5 %) on the physical properties of CdO semiconductor films has been investigated. Thicknesses and some optical parameters such as refractive index and extinction coefficient have been determined by spectroscopic ellipsometry. X-ray diffraction studies showed that all of the films have polycrystalline structure and F doping at 1 % made the best improvement in point of view of the structural properties. Optical properties have been investigated and CdO:F films were found to have direct band structure with band gap values between 2.40eV and 2.56eV. Three dimensional surface topography and phase images of the films have been taken by atomic force microscope (AFM). Existence of a granular structure on the surface has been noticed. Two probe method has been used to determine the electrical conductivity and resistivity values of the films. It has been seen that electrical conductivity values are high for F doping at 1 %. All of the results have been appreciated in point of view of optoelectronic industry and photovoltaic solar cell applications and it has been concluded that F doping has a noticeable affect on each physical property.

Keywords: CdO:F Films, Ultrasonic Spray Pyrolysis Technique, Spectroscopic Ellipsometer, X-Ray Diffraction, Optical Properties, Atomic Force Microscope, Electrical Properties.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve öğrenimim süresince gerek çalışmalarım da teorik ve deneysel bilgi ve birikimini, gerekse manevi destek ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yakınlığını hissettiren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ferhunde ATAY'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenimim ve çalışmalarım süresince bana zaman ayıran, bilimsel bilgi ve tecrübelerine sık sık başvurduğum ve ayrıca bana vermiş olduğu moral ve motivasyon için değerli hocam Sayın Doç. Dr. İdris AKYÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamın her aşamasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Salih KÖSE'ye teşekkür ederim.

Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği laboratuvarında optik ölçümlerin alınmasında yardımcı olan Doç. Dr. Metin KUL, Doç. Dr. A. Şenol AYBEK ve Yrd. Doç. Dr. Evren TURAN'a teşekkür ederim.

Yaşantımın her döneminde, bugünlere gelmemi sağlayan, her türlü başarımın arkasında emekleri olan çok değerli annem Hülya ve babam Metin Candan KETENCİ'ye, ayrıca kardeşim Emir'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 1001 Bilimsel Araştırmalar 108T525 no'lu proje tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yarıiletkenler ve Yarıiletken Film Teknolojisi.....	1
1.3. Saydam İletken Oksit Filmler.....	6
1.4. CdO Filmleri.....	7
1.5. Amaç.....	9
2. YARIİLETKEN MALZEME ANALİZİ	11
2.1. Giriş.....	11
2.2. Yapısal Özellikler.....	11
2.3. Optik Özellikler.....	17
2.3.1. Bir Yarıiletkenle Işığın Etkileşimi.....	19
2.3.2. Yarıiletkenlerde Soğurma Olayları.....	21
2.3.3. Spektroskopik Elipsometri Tekniği.....	26
2.4. Yüzey Özellikleri	31
2.5. Elektriksel Özellikler.....	37
3. CdO:F FİMLERİNİN ELDE EDİLMESİ	42

3.1. Giriş.....	42
3.2. Kimyasal Püskürtme Tekniği.....	42
3.3. CdO Filmlerinin Elde Edilmesi.....	48
3.4. Yapılan Analizler ve Kullanılan Ölçüm Cihazları.....	50
4. CdO:F FİMLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	55
4.1. Giriş.....	55
4.2. CdO:F Filmlerinin Kalınlıkları.....	55
4.3. CdO:F Filmlerinin Yapısal Özellikleri	58
4.4. CdO:F Filmlerinin Optik Özellikleri.....	65
4.5. CdO:F Filmlerinin Yüzeysel Özellikleri.....	72
4.6. CdO:F Filmlerinin Elektriksel Özellikleri.....	78
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	81
5.1. Sonuçlar.....	81
5.2. Tartışma ve Öneriler.....	86
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 X-ışını elde etmede kullanılan Röntgen tüpü.....	13
2.2 Bir düzlemdeki A ve B ardışık örgü noktalarından X-ışınlarının saçılması.....	14
2.3 Ardışık düzlemlerden X-ışınlarının saçılması.....	15
2.4 X-ışınları toz difraktometresi.....	15
2.5 (a) Valans bandındaki bir elektronun optik yolla uyarılması.....	22
(b) Tersine süreçte bir foton yayınlanması.....	22
2.6 Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu.....	23
2.7 Safsızlıklar ve bantlar arasındaki geçişler (a) donör-iletim bandı, (b) valans bandı-akseptör, (c) valans bandı-donör, (d) akseptör-iletim bandı	24
2.8 Serbest bir elektronun iletim bandındaki geçişi.....	25
2.9 Sınır yüzeyinden yansıyan polarize ışık.....	28
2.10 Atomik Kuvvet Mikroskopunda temel görüntü alma mekanizması.....	33
2.11 Atomik Kuvvet Mikroskopunun çalışma modları.....	35
2.12 Atomik Kuvvet Mikroskopunda yay-numune etkileşmesi.....	36
2.13 İki uç tekniği ile oluşturulan elektriksel düzeneğin şematik diyagramı....	39
2.14 (a) Sığ tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği.....	41
(b) Derin tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği.....	41
3.1 Püskürtme başlığından çözelti akışının şematik diyagramı.....	45
3.2 UKP sisteminin şematik diyagramı.....	46
3.3 PHE 102 Spektroskopik Elipsometre cihazının fotoğrafı.....	51
3.4 Shimadzu SolidSpec-3700 UV-VIS-NIR Spectrophotometer cihazının fotoğrafı.....	52
3.5 Park System XE-70 Atomik Kuvvet Mikroskobu.....	53
4.1 CdO:F filmlerinin deneysel ve teorik ψ spektrumları.....	57
4.2 CdO:F filmlerinin XRD desenleri.....	60
4.3 (111) CdO ₂ ve (111) CdO yönelimleri için yapılanma katsayıları.....	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.4 CdO:F filmleri için tane büyüklükleri.....	63
4.5 CdO:F filmlerinin geçirgenlik spektrumları.....	66
4.6 CdO:F filmlerinin soğurma spektrumları.....	67
4.7 CdO:F filmlerinin yansıma spektrumları.....	68
4.8 CdO:F filmlerinin kırılma indisi spektrumları.....	68
4.9 CdO:F filmlerinin sönüm katsayısı spektrumları.....	69
4.10 CdO:F filmlerinin $(\alpha h\nu)^2 \sim (h\nu)$ değişim grafikleri.....	71
4.11 Yasak enerji aralığının katkı oranlarına göre değişimi.....	72
4.12 CdO:F filmlerinin üç boyutlu AKM görüntüleri.....	74
4.13 CdO:F filmlerinin iki boyutlu faz görüntüleri	75
4.14 F katkı oranına göre CdO filmlerinin pürüzlülük değerlerinin değişimi...	78
4.15 CdO:F filmlerinin I-V karakteristiği.....	79
4.16 CdO:F filmlerinin elektriksel iletkenlik ve özdirenç değerlerinin değişimi.....	80
5.1 CdO:F filmlerinin kalite faktörlerinin grafiksel gösterimi.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 İnce film üretim tekniklerinin sınıflandırılması.....	43
3.2 CdO:F filmlerinin üretim parametreleri.....	49
3.3 Üretilen filmlerin kodları.....	50
4.1 CdO:F filmlerinin kalınlıkları (d) ve modelleme parametreleri.....	58
4.2 CdO:F filmlerinin XRD desenlerinden elde edilen veriler.....	61
4.3 CdO:F filmlerinin baskın yönelimleri ve örgü sabitleri.....	63
4.4 CdO:F filmlerinin dislokasyon ve makrogerilme değerleri.....	65
4.5 CdO:F filmlerinin yasak enerji aralıkları.....	70
4.6 CdO:F filmlerinin R_q , R_a ve R_{pv} pürüzlülük değerleri.....	77
4.7 CdO:F filmlerinin eğim, öz direnç ve iletkenlik değerleri.....	80
5.1 CdO:F filmlerinin kalite faktörleri.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
a	Örgü sabiti
A	Soğurma
α	Lineer soğurma katsayısı
Å	Angstrom
A_n, B_n, C_n	Cauchy parametreleri
A_k, B_k	Urbach parametreleri
β	Yarı pik genişliği
°C	Santigrat derece
c	Işık hızı
d	Kalınlık, düzlemler arası mesafe
D	Tane boyutu
Δ	Delta
Δ_p, Δ_s	Faz
E_g	Yasak enerji aralığı
eV	Elektron volt
E_d	Donör enerji seviyesi
E_c	İletim bandı alt sınırı
E_v	Valans bandı üst sınırı
$\langle e \rangle$	Makrogerilme
$\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_2$	Kompleks dielektrik sabiti
E_i	Safsızlığın iyonizasyon enerjisi
E_{eks}	Eksitonun bağlanma enerjisi
e	Elektronun yükü
E	Elektrik alan
h, \hbar	Planck sabiti
I	Standart şiddet, akım
I_o	Gözlenen şiddet, gelen ışığın şiddeti

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
I_T	Geçen ışığın şiddeti
I_A	Soğurulan ışığın şiddeti
I_R	Yansıyan ışığın şiddeti
j	Akım yoğunluğu
k	Sönüm katsayısı
λ	Dalgaboyu
m_e, m_p	Elektron ve hol kütlesi
mm	Milimetre
M	Molar
μ	Mobilite
μ_e, μ_p	Elektron ve hol mobilitesi
μm	Mikrometre
N	Newton
N_a, N_d	Akseptör ve donör yoğunluğu
nm	Nanometre
n	Kırılma indisi
n, p	Taşıyıcı yoğunluğu
ψ	Psi
q	Yük
$\Omega.cm$	Ohm.santimetre
R	Yansıma katsayısı
R_p	Paralel polarize yansıma genliği
R_s	Dik polarize yansıma genliği
R_q	Rms pürüzlülük
R_a	Ortalama pürüzlülük
R_{pv}	Pik-vadi pürüzlülük

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

Açıklama

ρ	öz direnç
δ	Dislokasyon yoğunluğu
σ	İletkenlik
ν	Frekans
T	Geçirgenlik
τ_e, τ_p	Durulma zamanı
θ	Bragg açısı
2θ	Kırınım açısı
%	Yüzde
V	Voltaj

Kısaltmalar

Açıklama

ASTM	American Society for Testing Materials
AKM	Atomik kuvvet mikroskobu
CF0	CdO Filmleri
CF1	1 % F katkılı CdO Filmleri
CF2	2 % F katkılı CdO Filmleri
CF3	3 % F katkılı CdO Filmleri
CF4	4 % F katkılı CdO Filmleri
CF5	5 % F katkılı CdO Filmleri
CVD	Kimyasal Buhar Çöktürme
(hkl)	Miller indisleri
IR	Infrared (kızılötesi)
LED	Işık yayan diyot
MSE	Mean square error
NIR	Yakın infrared

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Acıklama</u>
SİO	Saydam iletken oksit
TC	Yapılanma katsayısı
TUM	Taramalı uç mikroskobu
UKP	Ultrasonik kimyasal püskürtme
UV	Ultraviyole
VIS	Visible (görünür)
XRD	X-Ray Diffraction

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1 Giriş

Günümüzde teknoloji ve onun kaynağını oluşturan bilim, doğrudan bir üretici güç ve üretim faktörü haline gelmiştir. Mekanik, ısı, elektrik, optik, kimyasal ve biyolojik işlevler bakımından üstün nitelik ve yüksek performansa sahip malzemelerin tasarlanması ve üretilmesi teknolojik açıdan büyük önem taşımaktadır. Yarıiletken malzemeler de özellikle elektronik endüstrisinde ve teknolojide önemli bir yere sahiplerdir. Bu malzemelerin savunma sistemlerinden cep telefonuna, uydu sistemlerinden bilgisayar teknolojisine kadar pek çok uygulama alanı mevcuttur. Ayrıca, bu tip malzemelere opto-elektronik alanında da ihtiyaç duyulmaktadır ve her geçen gün yeni malzemeler üretme ve inceleme çalışmalarına fazlasıyla ağırlık verilmektedir.

Teknolojik malzemelerin hem ekonomik bir üretim tekniğiyle üretilmesi hem de fiziksel özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada; saydam iletken oksit (SİO) ailesine ait olan kadmiyum oksit (CdO) yarıiletken filmleri, diğer üretim teknikleri arasında ekonomik ve uygulama kolaylığı ile dikkat çeken Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) tekniği ile elde edilmiş ve üretilen filmlerin fiziksel özellikleri Flor (F) katkısı ile iyileştirilmeye çalışılmıştır.

1.2 Yarıiletkenler ve Yarıiletken Film Teknolojisi

Yarıiletkenler, elektriksel iletkenlikleri metallerle yalıtkanlar arasında olan özel malzemelerdir. Mutlak sıfır sıcaklıkta (0 K) yalıtkan olan bu malzemeler ısı, ışık, veya elektriksel gerilim gibi dış etkiler uygulandığında valans

elektronlarının bir kısmını serbest hale geçirerek iletken duruma gelirler. Uygulanan dış etkiler kaldırıldığında ise yalıtkan duruma geri dönerler.

Yarıiletkenlerin diğer bir önemli özelliği küçük bir etki ile fiziksel özelliklerinin hissedilir derecede değiştirilebilmesidir. Örneğin bir yarıiletkene sıcaklık etkisi uygulandığında, yüksek sıcaklıklarda valans bandındaki elektronlar yeterli miktarda ısıl enerji kazanarak iletim bandına uyarılırlar. Böylece valans bandında holler ve iletim bandında serbest elektronlar oluşur. Her iki tip serbest taşıyıcı da akıma katkı getirir ve serbest elektron ve hollerin sayısı sıcaklıkla orantılıdır (McKelvey, 1996). Ayrıca katkılama ya da tavlama gibi işlemler de yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerinde büyük etkilere sebep olabilir.

Yarıiletkenler genel olarak elemental yarıiletkenler ve bileşik yarıiletkenler olarak iki grupta sınıflandırılabilirler. Elemental yarıiletkenler, periyodik tablonun IV. grubunda bulunan elementlerden oluşan Silisyum (Si), Germanyum (Ge),... gibi yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenler ise periyodik tablonun iki farklı grubunda bulunan elementlerin bileşimi ile oluşan yarıiletkenlerdir. Örneğin kadmiyum sülfür (CdS), II. gruptan Cd ile VI. gruptan S elementinin birleşimi ile oluşan bir bileşik yarıiletken malzemedir. Ayrıca, üçlü ve dörtlü yarıiletken bileşikler de üretilebilir.

Yarıiletkenler saflık derecelerine göre has ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Has yarıiletkenler, kirlilik atomlarını veya kusurlarını içermeyen saf yarıiletkenlerdir. Katkı atomları olarak adlandırılan özel kirlilik atomlarının belirli bir miktarda kristale kontrollü bir şekilde ilave edilmesiyle katkılı yarıiletkenler elde edilir. Böylece yarıiletkenin fiziksel özellikleri katkı elementinin cinsine ve miktarına bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Ayrıca eklenen katkı elementine göre çoğunluk yük taşıyıcıları, ya iletim bandındaki elektronlar ya da valans bandındaki holler olur (Neamen, 2007). Böylece katkılanan elemente göre katkılı yarıiletkenler n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler olarak ikiye ayrılırlar. Has yarıiletken içerisine 5. grup elementi katkıldığında n-tipi, 3. grup elementi katkıldığında ise p-tipi yarıiletken elde edilir.

1800'lü yıllardan günümüze kadar yarıiletken malzemelerin gelişimi, onu günlük hayatımızın vazgeçilmezi yapmıştır. Günümüzde yarıiletkenler olmadan modern bir dünya düşünülemez. Yarıiletken malzemeler olmasaydı, hayatımızda önem taşıyan birçok cihazdan bugün yararlanamazdık.

Yarıiletken filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, filmi destekleyerek filmin oluşumuna yardımcı olan bir taban üzerine dizilmesi ile ince bir tabaka halinde oluşturulan malzemelerdir (Kırmızıgül, 2008). İnce filmlerin kalınlığı tipik olarak 1 μ m civarındadır (Atay, 2001). İnce film üretilmesinde taban olarak mikroskop camı, seramik, metal ve grafit gibi malzemeler kullanılabilir (Kittel, 1996). Üretilen filmler tane sınırlarına ve üretim tekniklerinden kaynaklanan kusurlara sahip olarak oluşabilmektedirler (Köse, 1993). Kalınlığı 1 ile 10 μ m arasında değişen filmler için yapı ve işlem teknolojisinde çok sayıda kullanım alanı mevcuttur. Bu kullanım alanları; ısıya dayanıklı malzeme kaplama, korumalı giysiler, malzemelerin ömür sürelerinin arttırılması, atmosfer basıncına ve ısıya karşı malzemelerin korunması, güneş pilleri, opto-elektronik devreler ve bilgisayarlarda hafıza bölümleri gibi alanlar olabilmektedir (Eckertova, 1986).

Yarıiletken ince filmler homoepitaksiyel, heteroepitaksiyel ve polikristal filmler olmak üzere üç gruba ayrılırlar (Koelmans, 1971). Homoepitaksiyel ve heteroepitaksiyel filmler ileri teknolojinin kullanımı ile elde edilen maliyeti yüksek filmlerdir. Bu yüzden bilimsel çalışmalarda, daha düşük maliyetle ve pratik olarak elde edilen polikristal filmler tercih edilmektedir. 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 değişik tekniklerle elde edilebilen yarıiletken malzemelerdir (Kırmızıgül, 2008).

Metal yarıiletken kontaklar 1874'de Braun'un ilk çalışmalarından daha önce yapılmış olup, Braun, metal ve yarıiletken kontaklar arasındaki elektriksel iletkenliğin asimetrik doğasını keşfetmiştir. Bu devre elemanları ilk radyo deneylerinde dedektör

olarak kullanılmıştır. 1906'da Pickard, Si kullanarak yapmış olduğu nokta kontak dedektörü için patent almıştır. 1907'de Pierce, bir tür yarıiletken üzerine metallerin püskürtülmesiyle elde edilen diyotların doğrultucu karakteristiklerini yayınlamıştır (Neamen, 2007).

Yarıiletken kristaller kullanılarak diyotlar, transistörler ve entegre devreler üretilmektedir. Entegre devrelerin kullanımı ikinci bir endüstri devrimini başlatmıştır. Bir entegre devre; bir silisyum tek kristali üzerinde iç bağlantılar, diyotlar, transistörler, dirençler ve kondansatörlerin bir araya getirilmiş halidir. Entegre devreyi oluşturan çipler, yüz binlerce devre elemanı bulundurabilmektedir. Bu entegre devreler, bilgisayarların, televizyonların, saatlerin, kameraların, hesap makinelerinin, otomobillerin, uçakların, robotların, uzay araçlarının ve günümüzde kullanılan tüm haberleşme sistemlerinin kalbini oluşturmaktadır (Çırak vd., 2008).

Yarıiletken teknolojisi bugün olduğu gibi geleceğin de en önemli teknolojilerinden biri olacaktır. Otomobillerin panel aydınlatmaları, cep telefonlarındaki aydınlatma, trafik ışıkları gibi aydınlatma ve işaretleme sistemleri de yarıiletken diyotlarla sağlanmaktadır. Tüm bunların dışında, yarıiletken algılama sistemlerinde, yangınlarda gaz analizinde, sağlık alanında hızlı ve doğru sıcaklık ölçümünde de kullanılmaktadır. Ayrıca askeri alanda, hedef belirleme ve gece görüş sistemleri gibi pek çok kullanım alanı da bulunmaktadır.

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaçlar da yine yarıiletken malzemeleri geleceğin vazgeçilmezi yapmaktadır. Bu amaçla kullanılan güneş panelleri hem elektrik hem de ısı üretimini karşılayarak en popüler yenilenebilir enerji ikonlarından biri olmuştur. Güneşten gelen foton tanecikleri yarıiletkenlerdeki bağlı elektronların serbest kalmalarını sağlayarak elektriksel iletimin oluşmasına neden olurlar. Gelişen teknoloji ile birlikte, yeni nesil, daha verimli ve ekonomik güneş panelleri üretilmeye başlanmıştır. Yeni nesil ince film fotovoltaik pillerinin 2010 yılında dünya genelinde 3700 megawatt elektrik üretmesi öngörülmektedir. Bu fotovoltaik uygulamalarda da hemen hemen tüm teknolojide olduğu gibi yarıiletken malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Temel incelemeler tek kristaller üzerine

yapılmasına rağmen, çalışmalar genellikle amorf ve polikristal ince filmler üzerinde yoğunlaşmaktadır (Kasem, 1999). Yarıiletken ince film güneş pilleri, tek kristal güneş pillerine göre daha kolay üretilmesi ve ekonomik olmasından dolayı tercih edilmektedir. Ancak polikristal yarıiletken güneş pillerinin verimlilikleri tek kristal güneş pillerinkilere göre daha düşüktür. Si, Ge ve GaAs gibi tek kristaller ile CdS, CdSe, CeTe, Cu₂S, InP, AgInS₂, CuInS₂ ve Cd_{1-x}Zn_xS gibi yarıiletkenler güneş pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Peker, 1999; Ilıcan, 2001).

Doğada en iyi bilinen yarıiletken malzemeler silikon (Si) ve germanyumdur (Ge). Bunlar elemental yarıiletken olup mikroçip üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra InP ve GaAs gibi ikili, InGaAs gibi üçlü ve InGaAlAs gibi dördü bileşikler de elektronik ve opto-elektronik cihazların üretiminde temel elemanlardır. SiO₂ doğada kum ve kuartz şeklinde bulunur ve yeryüzünde en çok bulunan elementlerden bir tanesidir. Yarıiletken özelliğe sahip oluşu, bu tip maddeleri teknolojinin vazgeçilmezi ve hayatın bir parçası haline getirmiştir. Bu malzemeler belirli ve ileri teknoloji ihtiva eden sistemlerle üretilebilmektedir. Bu malzemelerin üretilmesi ileri teknolojinin varlığına ve ileri teknolojinin varlığı da bu malzemelerin üretilmesine bağlıdır. Bu çerçevede alternatif ve yüksek verimlilikteki diğer yarıiletken malzeme araştırmaları ve üretim teknikleri son derece önem kazanmaktadır.

İnce film formunda nanokristal yarıiletken malzemeler, bu malzemelerle yapılan aygıtların karakteristik özelliklerinin artırılmasına imkan verir. Bu tip malzemelerde, materyali oluşturan parçacık sayısının artmasından dolayı katı yapıdan moleküler yapıya doğru aşamalı bir geçiş gözlenir. Bir yarıiletkenin nanokristal büyüklüğü yarıiletkenin bant yapısını etkilediği için, yarıiletkeni oluşturan parçacıkların yeterince küçük olması, yük taşıyıcılarının kuantum sınırında bulunmasına ve bant yapılarının kesikli enerji seviyelerine ayrışmasına sebep olur (Pejova, et al., 2005). Nanometre büyüklüğündeki yarıiletken malzemelerin özelliklerinden birisi de, yarıiletkenin sahip olduğu yasak enerji aralığının artarken, yarıiletken nanokristal yapı çapının azalmasıdır (Yang, et al., 2006).

1.3 Saydam İletken Oksit Filmler

SİO'ler doğalarında bulunan mükemmel elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenlik karakteristikleriyle dikkat çeken malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı SİO ince filmler; saydam elektrotlar, güneş pilleri, foto-transistörler, sıvı kristal uygulamalar, optik ısıtıcılar ve gaz sensörleri gibi pek çok geniş uygulama alanına sahiplerdir (Ito, et al., 2006; Lim, et al., 2007). Bu uygulamalarda, özellikle çinko oksit, kalay oksit, indiyum oksit ve indiyum kalay oksit üzerine odaklanılmıştır (Dong, et al., 2006). Bununla beraber son yıllarda özellikle CdO ince filmleri, düşük maliyetleri, kaynaklarının kolaylıkla sağlanabilmeleri ve zehirli olmayışlarıyla diğer malzemelere alternatif olarak ilgi görmektedir (Devshette, et al., 2008).

Farklı uygulamalar için seçilecek SİO malzemesi değişebilir. Örneğin; güneş pillerinde kullanılan SİO'ler güneş spektrumunda yüksek derecede geçirgen, düşük elektriksel dirençli sahip, H-plazması altında kararlı ve özellikle α -Si güneş pilleri için uygun yapıya sahip olmalıdırlar. Cam taban üzerine kaplanmış SİO'nun pencere tabakası olarak geçirgen ve iletken bir davranış sergilemesi gerekir (Durose, et al., 1999). Diğer uygulamalar için ise ek kriterler de önem kazanmaktadır. Bunlar; fiziksel, kimyasal ve ısıl dayanıklılık, iş fonksiyonu, homojenlik, toksinlik ve maliyet gibi kriterler olabilmektedir (Zhao, et al., 2002).

SİO malzemeler elektromagnetik spektrumun görünür ve yakın IR bölgelerinde yüksek geçirgenliğe ve IR bölgesinde ise yüksek yansıtıcılığa sahiptir. 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 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.

SİO'ler yüksek optiksel geçirgenlikleri, düşük özdirençleri ve geniş bant aralıklarıyla pek çok kullanım alanına sahip oldukları için, üretim yöntemleri ve özelliklerinin geliştirilip, en iyi şekilde kullanımları üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları oldukça fazladır. Tüm bu işlevleriyle SİO'ler ince film fotovoltaik cihazlar için oldukça önemli ve cazip malzemeler halini almaktadır. Artışının devam etmekte olduğu güneş pili verimliliği ve kullanımı konusundaki istikrar, maliyeti düşürmeyi ve performansı en iyi şekilde kullanmayı gerektirmektedir. Bu yüzden SİO'lerin optiksel, elektriksel ve malzeme özelliklerindeki ilerleme gün geçtikçe önem kazanmaktadır (Krishnakumar, et al., 2009).

1.4 CdO Filmleri

CdO filmleri bir II-VI grup bileşiğidir. Düşük elektriksel özdirence ($1.1-3.4 \times 10^{-3} \Omega.cm$) (Dakhel, et al., 2009) sahip olan CdO filmlerinin yasak enerji aralıkları yaklaşık 2.5 eV'dur (Carballeda-Galicia, et al., 2000; Galicia, et al., 2000). Bazı çalışmalarda CdO malzemesinin yasak bant aralığının 2.2 eV ile 2.7 eV arasında değiştiği de görülmüştür (Choi, et al., 1996). Ancak CdO filmleri dar bant aralıklarından dolayı diğer SİO' ler arasında az ilgi görmüş malzemelerdir. Bununla beraber bu filmler yüksek mobilite değerlerine sahiptirler ($\mu = 130 cm^2 / Vs$) (Cruz, et al., 2005), ki bu özellik yüksek iletkenlik için oldukça önemlidir. Son zamanlarda CdO filmleri, SİO'ler içinde düşük maliyetli hammaddeleri, yüksek elektriksel iletkenlikleri (Saha, et al., 2008; Yan, et al., 2001; Ghosh, et al., 2005) ve orta derecedeki kırılma indisleriyle öne çıkmaktadırlar.

CdO ince filmleri, yüksek kalitedeki elektrik ve optik özellikleri sayesinde teknolojiye büyük ilgi görmektedirler (Flores, et al., 2009). Örneğin; güneş pilleri ve

foto-diyotlar gibi uygulamaları, düşük elektriksel özdirençleri, yüksek taşıyıcı konsantrasyonları ve güneş spektrumunun görünür bölgesindeki yüksek optiksel geçirgenlikleri sayesinde (Gupta, et al., 2008; Saha, et al., 2007). Ayrıca CdO ince filmleri, saydam elektrotlar (Benko, et al., 1986), sıvı kristal göstergeler, IR detektörleri, anti yansıtıcı kaplamalar ve gaz sensörleri olarak da (Chu, et al., 2003) kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, CdO göstergeler oldukça mükemmel özellikler gösterecek şekilde tasarlanmakta ve bu durum onu en az diğer SiO malzemeler kadar elverişli hale getirmektedir (Saha, et al., 2008). CdO, IR bölgedeki yüksek yansıtma özelliği, görünür bölgedeki yüksek geçirgenliği ile birlikte ısı yansıtıcı olarak da kullanılabilir (Tang, et al., 1998).

Katkılı ve katkısız CdO ince filmleri; sol-gel (Cruz, et al., 2007), ultrasonik kimyasal püskürtme (Vigil, et al., 2001), iyon demet saçırma, magnetik saçırma (Subramanyam, et al., 1998) ve lazer çöktürme (Gupta, et al., 2008) gibi farklı teknikler kullanılarak üretilmektedir. CdO genellikle In, Sn (Zhao, et al., 2002), F (Chen, et al., 2008; Ferro, et al., 1999), Al (Maity, et al., 2006), Sc ve Y gibi farklı elementlerle katkılanarak üretilmiştir. Katkı elementi CdO filminin bant genişliğini artırıp elektriksel iletkenliğini geliştirmektedir (Dakhel, et al., 2009).

Yapılan literatür araştırmalarına göre, katkı elementi olarak F katkısının seçilmesi, fiziksel özelliklerini iyileştirici etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır. F elementi periyodik tablonun 7. grubunda bulunmaktadır. Bu konuda literatürde yayınlanmış makaleler mevcuttur (Deokate, et al., 2008; Kul, et al., 2007; Kul, et al., 2007; Kul, et al., 2007; Irmak, et al., 2007). Ferro ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada F katkısının CdO filmlerinin taşıyıcı konsantrasyonunda artışa sebep olduğu belirlenmiştir (Ferro, et al., 2000). Ayrıca katkı miktarının artmasıyla filmlerin yasak enerji aralıklarının da arttığı bilinmektedir ve bu konuda yapılan bir başka çalışmada ise F katkısının artmasıyla CdO filmlerinin özdirençlerinin azaldığı belirlenmiş ve yine aynı çalışmada F katkısı yasak enerji aralıklarında artışa sebep olmuştur (Ghosh, et al., 2005).

1.5. Amaç

Son yıllarda, doğalarında bulunan mükemmel elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenlik özellikleri ile dikkat çeken ve SİO grubuna ait olan Zn, In, Sn ve Cd elementlerinin oksitli bileşikleri ince film olarak ilgi odağı olmaya başlamıştır. Bunun ana nedeni, bu filmlerin fotovoltaik güneş pilleri, gaz sensörleri, saydam elektrotlar ve diğer opto-elektronik aygıtlar gibi önemli potansiyel uygulamalarının bulunmasıdır. Ancak günümüzdeki SİO teknolojisi sadece birkaç malzemeye bağlı kalmaktadır. Son birkaç yıldır ZnO, SnO ve ITO tabanlı malzemelerin SİO teknolojisinde yeterli olduğu düşüncesi değişmeye başlamıştır. Bunun nedeni, mevcut malzemelerin performans sınırlarının artık daha iyi anlaşılması ve üretilebilecek düşük maliyetli yeni malzemelerle performans sınırlarının genişletilebileceği umududur. Yeni malzemelere olan ihtiyaç SİO'lerin yeni potansiyel kullanımlarını da gündeme getirmiştir. CdO filmleri, SİO malzemeler içinde özellikle son yıllarda önemi anlaşılmaya başlanan, gelecekteki teknolojik uygulamalarda ticari olarak daha çok kullanım alanı bulacağına inanılan ve diyot, transistör, p-n eklem tabanlı aygıtlar, opto-elektronik cihazlar ve özellikle fotovoltaik güneş pilleri için umut verici olacağı düşünülen malzemelerdir. Bu yarıiletken malzemelerin elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özellikleri ise, kullanıldıkları cihazın verimliliğini ve ömrünü önemli derecede etkileyen parametrelerdir. Doğal olarak filmlerin basit ve ekonomik üretim teknikleri ile büyütülmesi, belirtilen fiziksel özelliklerinin ayrıntılı incelenmesi ve katkılama, üretim parametrelerini değiştirme, tavlama gibi bazı işlemler ile kalitelerinin artırılması bilime ve teknolojiye çok büyük katkı getirecektir.

Bu çalışmada; CdO:F yarıiletken filmlerinin, üretim teknikleri arasında, araştırma/geliştirme çalışmaları için uygun olması, düşük maliyeti ve geniş alanlara çöktürme imkanı sağlamasıyla ön plana çıkan Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) tekniği ile üretilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca mevcut ve gelecekte popüler olacak opto-elektronik cihazların ve özellikle fotovoltaik pillerin performanslarını arttırmak için bu cihazlarda kullanabileceğini düşündüğümüz CdO filmlerinin özelliklerini F elementi

katkılayarak iyileştirmeye çalışmak da diğer bir amacımızdır. Bu amaç kapsamında, belirtilen cihazlarda kullanılacak olan yarıiletken filmlerin uygun elektrik ve optik özelliklere sahip olması önemlidir ve kullanılacak katkı elementi miktarının detaylı araştırmalar sonucunda dikkatli bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Bu çalışmada CdO filmlerinin özdirencini azaltmak, diğer SİO'lere göre dar olan bant aralığını arttırmak, bu arada da geçirgenliği muhafaza etmek/arttırmak, ara yüzey ve malzeme uyumluluğunu iyileştirmek, kimyasal kararlılığını arttırmak ve çevresel olarak daha uzun süre kararlı olmasını sağlamak için uygun F katkı miktarını belirlemek hedeflenmiştir. Diğer bir amacımız ise üretilen CdO:F filmlerinin yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özelliklerini inceleyerek, fotovoltaik güneş pili ve opto elektronik cihazlarda kullanım potansiyellerini araştırmaktır.

2. YARIİLETKEN MALZEME ANALİZİ

2.1. Giriş

Yarıiletken filmlerin teknolojik uygulamalarda ne denli verimli olacağını belirlemek için yapısal, elektriksel, optiksel ve yüzeysel özellikleri gibi pek çok fiziksel özelliğinin iyi bir şekilde incelenmesi ve bilinmesi gerekmektedir. Kristal kusurlarının, bant yapılarının, elektriksel iletim özelliklerinin ve yüzeysel özelliklerinin bilinmesi ile uygulama amacına göre elverişli malzemeler seçilebilir. Örneğin, güneş pillerinde pencere materyali olarak, düşük özdirençli, yüksek optiksel geçirgenlikli ve direkt bant geçişli filmleri tercih etmek uygun olmaktadır. Bu bölümde, genel olarak yarıiletken filmlerin bazı fiziksel özellikleri ve analizleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.2. Yapısal Özellikler

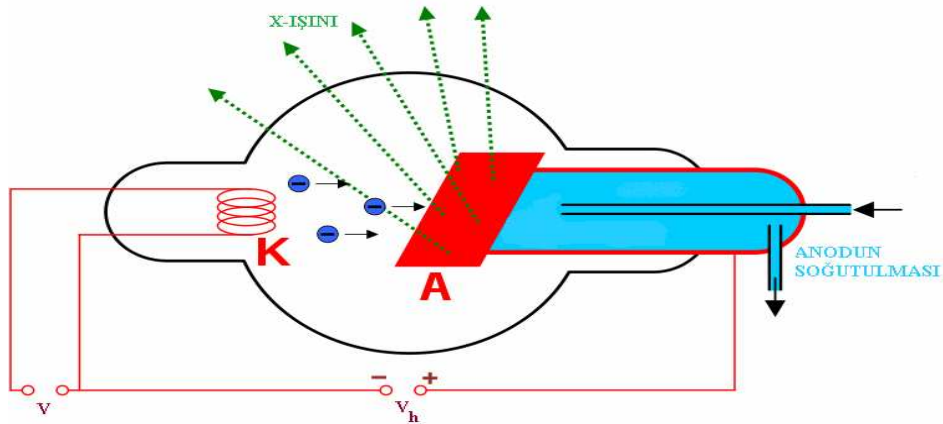
Bir malzemenin atomik yapısını görüntülemek yüksek çözünürlüğe sahip çeşitli elektron mikroskopları kullanılarak mümkündür. Fakat bilinmeyen yapıları belirlemek veya yapısal parametreleri tayin etmek için kırınım tekniklerini kullanmak gerekir. Katıların kristal yapılarını incelemek için en çok kullanılan kırınım tekniği X-ışını kırınımıdır (Bilgin, 2003).

X-ışınları, dalga boyları 0.1-100 Å arasında olan elektromagnetik dalgalardır. 1895 yılında Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilen ve özellikleri bilinmeyen bu elektromagnetik dalgalar “X-ışınları” olarak isimlendirilmiştir. Daha sonra 1912 yılında Max Von Laue tarafından ilk kez X-ışınlarının kristaller tarafından kırınımına uğradığı belirlenmiştir. Böylece hem malzemeler hem de X-ışınları hakkında önemli bilgilere ulaşılmıştır (Cullity, 1996). X-ışınlarının doğru çizgiler üzerinde yol aldıkları, elektrik ve magnetik alanlardan

etkilenmedikleri, saydam olmayan malzemeden kolaylıkla geçtikleri, fosfor gibi ışıldayan maddelerin ışıldamasına neden oldukları ve fotoğraf filmlerinde iz bıraktıkları bulunmuştur.

X-ışınlarının dalga boylarının kristaldeki atomlar arası mesafe mertebesinde olması, kristal yapı hakkında bilgi edinmeye imkân vermektedir. Bu nedenle X-ışınları, kristal yapı analizi çalışmalarında çok önemli bir yer tutmaktadır. Filmlerin X-ışını kırınım desenlerinin incelenmesi kalınlık, kimyasal bileşim, amorf, tek kristal ya da polikristal durum, kristalografik yönelim, örgü parametreleri ve tane büyüklüğü hakkında bilgi verebilmektedir (Murt and Guldner, 1969). Ayrıca X-ışını kırınım teknikleri numuneye zarar vermez ve numuneyi değiştirmez (Birkholz, 2006).

X-ışınlarının elde edilmesinde, Şekil 2.1.'de gösterilen Röntgen tüplerinden yararlanılmaktadır. Bu sistemlerde, havası boşaltılmış cam tüp içerisindeki anot ve katot levhaları arasına yüksek gerilim uygulanır. Isıtılan bir flaman üzerinden termoiyonik olay sonucu katottan kopan elektronlar, anot-katot arasına uygulanan yüksek gerilimin etkisiyle hızlandırılarak hedef metal konumunda olan anot üzerine düşürülür. Bu sırada enerjisini ve hızını kaybeden elektronlar her doğrultuda X-ışını yayar. Hedefe çarpan elektronların enerjilerinin çoğu ısıya, %1 kadarı da X-ışınına dönüşür. Bu yüzden hedefin erimemesi için soğutma işlemi yapılır. Uygulanan gerilim değerine bağlı olarak çeşitli dalga boylarında X-ışınları elde edilebilir (Gündüz, 1999). Bu şekilde elde edilen X-ışınlarına sürekli X-ışınları denir.



Şekil 2.1. X-ışını elde etmede kullanılan Röntgen tüpü.

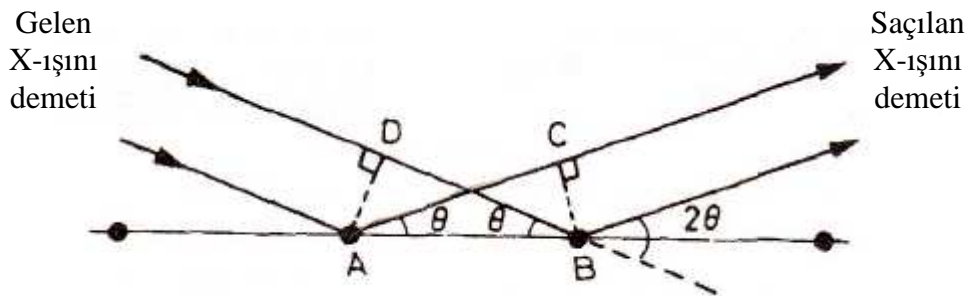
X-ışınlarının dalga boyunun, katılardaki atomlar arası mesafe ile kıyaslanabilir büyüklükte olması, X-ışınları için kristalin üç-boyutlu kırınım ağı gibi davranacağı anlamına gelir. Optiksel bir kırınım deneyinde, kırınım ağı üzerindeki çizgilerin mesafesini kırınım maksimumlarının aralarındaki uzaklıkların ölçülmesinden elde etmek mümkündür. Farklı mertebelerdeki maksimumların bağıl şiddetlerini ölçerek de ağı üzerindeki çizgilerin yapısı hakkında bilgi elde edinilebilir. Tümüyle benzer bir yolla, bir kristalden oluşan X-ışını kırınım maksimumlarının aralarındaki uzaklıkların ölçülmesi, birim hücrenin büyüklüğünü belirlememize izin verir ve kırınıma uğramış demetlerin şiddetlerinden de hücre içindeki atomların düzenlenmesi hakkında bilgi elde edilir (Hook and Hall, 1999; Peker, 2000).

X-ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde, ışınlar katı yüzeyinden küçük geliş açılarıyla tam yansımaya uğrarlar ve ışınlar kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Kristal yapıdaki bu saçılmalar kırınım olarak adlandırılır ve kırınım çok sayıda atomu içeren saçılmalar meydana gelir (Bütün, 2007). Bragg, paralel örgü düzlemleri tarafından saçılan X-ışınlarının yapıcı girişimi için gerekli olan koşulu türetmiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi düzlem takımının bir düzlemine θ açısı ile gelen X-ışınlarını göz önüne alalım. Bu şekil, AC ve DB uzaklıkları eşit ise, düzlemdeki iki ardışık A ve B örgü noktalarından saçılan dalgaların yapıcı bir girişimi olacağını açıklamaktadır. Saçılan dalga, gelen dalga gibi, düzlemle

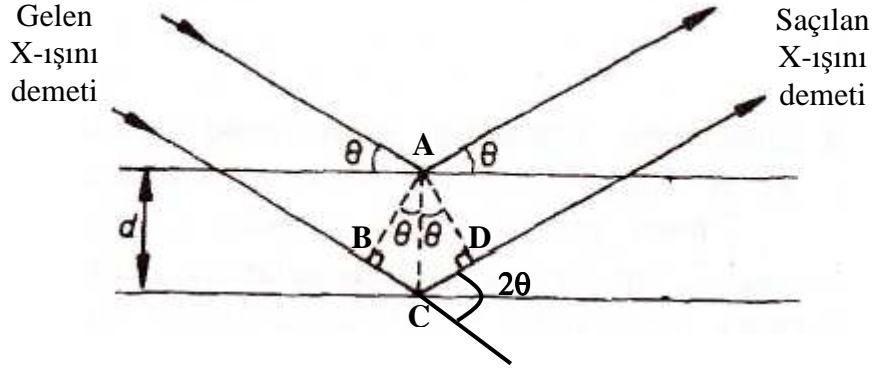
aynı θ açısını yaparsa durum yukarıda belirtildiği gibidir. Böylece kırınıma uğramış dalga düzlemden yansımış gibi bir izlenim bırakır. Geliş açısı olarak gelen demetin düzlemlerle yaptığı θ açısının kullanılması, X-ışını kristalografisinde alışılmış olan bir tercihtir. Yansıma şartı, X-ışını demetinin 2θ açısı kadar sapmasını gerektirir. Burada 2θ kırınım açısı olup, gelen X-ışınının doğrultusu ile kırınıma uğrayan X-ışını arasındaki açıdır. Kristalin gerçek tekrarlanan birimi, her örgü noktasına eşlik eden ve atomlardan oluşan yapı birimi olduğu için, atomlardan daha çok örgü noktalarıyla ilgili saçılma göz önüne alınır. Örgü noktası bir optik kırınım ağındaki çizgilerin benzeridir ve yapı birimi ise çizginin yapısını belirler. Şekil 2.2’de verilen bir düzlemde gerçekleşen koherent saçılma bir kırınım maksimumu elde etmek için yeterli değildir. Aynı zamanda ardışık düzlemlerden de aynı fazda saçılma olmalıdır. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi iki ardışık düzlemden olan saçılmalarda yol farkı, dalga boyunun tam katı ise yapıcı girişim gerçekleşir ve bir kırınım maksimumu elde edilir. Bu durumun olabilmesi için Şekil 2.3’e göre,

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

olmalıdır. Burada d , düzlemler arasındaki uzaklıktır ve n ise bir tam sayı olup yansımanın mertebesini verir. Bu eşitlik Bragg Yasası olarak adlandırılır (Hook and Hall, 1999).

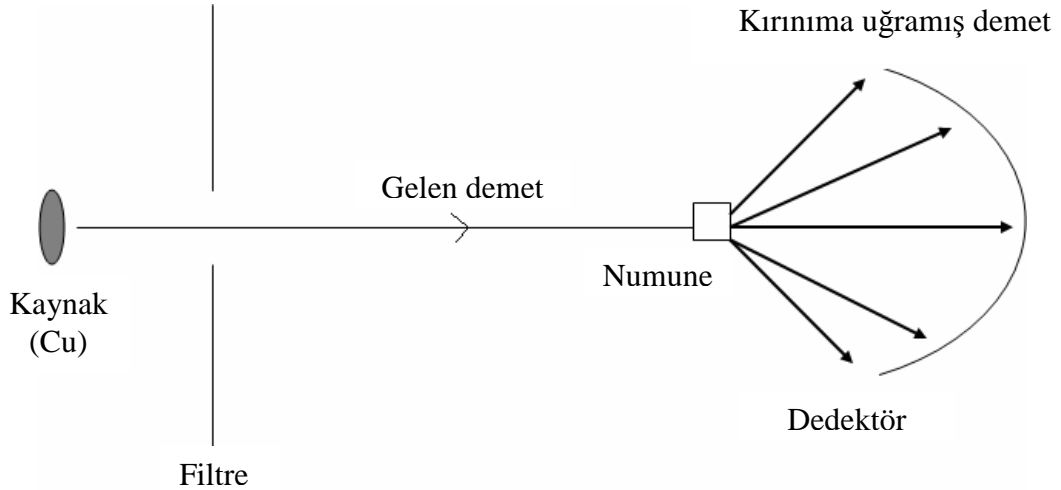


Şekil 2.2. Bir düzlemdeki A ve B ardışık örgü noktalarından X-ışınlarının saçılması.



Şekil 2.3. Ardışık düzlemlerden X-ışınlarının saçılması.

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi modern X-ışını cihazlarında, kırınıma uğrayan ışının kırınım açısını ve şiddetini ölçecek ışınım sayıcılar bulunur. Böylece kırınım açısı 2θ ’nın, kırınıma uğrayan ışının şiddetine göre değişimini veren kırınım deseni elde edilir. Desen üzerindeki pik genişliklerine ve zemin şiddetine bakılarak malzemenin kristalleşmesi hakkında bilgi edinilebilir.



Şekil 2.4. X-ışınları toz difraktometresi

Bileşimi bilinen bir malzemede tercihli yönelimi karakterize etmenin en yaygın yolu, tercihli yönelim gösteren malzemenin kırınım şiddetlerini ASTM (American Society for Testing Materials) kartlarındaki şiddetlerle karşılaştırmaktır. Tercihli yönelimleri belirlemek amacıyla yapılanma katsayısı ($TC(h_i k_i l_i)$) için aşağıda verilen ifade kullanılarak Haris analizi gerçekleştirilir (Barrett and Massalski, 1980).

$$TC(h_i k_i l_i) = \frac{I(h_i k_i l_i)}{I_o(h_i k_i l_i)} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I(h_i k_i l_i)}{I_o(h_i k_i l_i)} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

Burada $I_o(h_i k_i l_i)$, $(h_i k_i l_i)$ düzleminin standart şiddetini ve $I(h_i k_i l_i)$ ise aynı düzlemin gözlenen şiddetini ifade eder. Tercihli bir yönelme için $TC(h_i k_i l_i)$ değeri birden büyük olmalıdır (Nair et al., 1998; Connolly, 2003).

Scherrer formülü X-ışını kırınım deseninden yararlanarak tane büyüklüklerinin belirlenmesine yarar ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Kaelble, 1967):

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.3)$$

Burada D tane boyutu, β ilgili kristal yönü için radyan olarak yarı pik genişliği, θ Bragg açısı ve λ kullanılan X-ışınının dalgaboyudur. Bir malzemede parçacıkların boyutları ne kadar küçülürse X-ışını kırınım desenindeki piklerde de buna bağlı olarak bir genişleme söz konusu olur.

Bir malzeme için hesaplanan örgü sabiti değerleri ASTM kartındaki değerlerle kıyaslandığında arada bir fark olması, malzemede bir deformasyon olduğunu gösterir. Bu durum yer değiştiren kusurlardan veya amorf taban tarafından oluşturulan gerilmelerden kaynaklanabilir (Vigil et al., 2000).

Dislokasyon yoğunluğu (δ), bir malzemenin belli bir kısmında (örneğin bir tanesinde) bulunan dislokasyonların sayısının bir ölçüsüdür. Dislokasyon çizgisel bir kusur olduğu için, δ dislokasyonun birim hacimdeki toplam uzunluğu olarak da tanımlanır. Yani, birim alanı kesen dislokasyon çizgilerinin sayısıdır (Akyüz, 2005). Dislokasyon yoğunluğu Williamson ve Smallman tarafından verilen

$$\delta = \frac{n}{D^2} \quad (2.4)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir (Williamson, et al., 1956). Minimum δ değeri için $n=1$ alınır. Küçük δ değerleri malzemenin kristalleşme seviyesinin iyi olduğunu gösterir (Zhao, et al., 2002).

X-ışını kırınım desenlerinde gözlenen piklerin pozisyonlarındaki hafif kaymalar sıkışmış veya genişlemiş örgü düzlemlerine sahip tanelerin bulunduğunu gösterir (Joseph, et al., 1999). Bu durum aşağıdaki denklem ile verilir:

$$\langle e \rangle = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (2.5)$$

Burada $\langle e \rangle$ malzemedeki makro gerilmeleri, d deformasyon halinde düzlemler arası mesafeyi ve d_0 ise deformasyon olmadığı durumdaki düzlemler arasındaki mesafeyi göstermektedir (Vigil, et al., 2001).

2.3. Optik Özellikler

Işık düşürülen kristal bir katıda yansıma, soğurma, kırılma ve geçme gibi optik olaylar gerçekleşir (Soylu, 2006). Yarıiletkenlerin optik özelliklerinin incelenmesi ile bant yapıları ve malzeme içerisindeki elektronların ve hollerin davranışları ile ilgili bilgiler elde edilebilir.

Herhangi bir ortam üzerine değişik frekanslardan oluşan bir ışın demeti gönderildiğinde, ortamı meydana getiren atomlar bu frekanslar arasında uygun enerjili olan fotonları soğurarak daha yüksek enerji seviyelerine geçiş yaparlar. Soğurma, elektromagnetik dalga ile malzemedeki yüklerin etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olarak bilinir. Gelen ışığın dalga boyuna göre optik soğurma değişmektedir. Gelen fotonun enerjisi enerji bant aralığından daha büyük ya da eşit ise fotonlar soğurulurken, enerji bant aralığından daha küçük ise fotonlar soğurulmadan direk geçerler. Bu soğurma özelliklerinden yapılan ölçümler soğurma spektrometrisinin temelini oluşturur. Soğurma ölçümleri geniş bir dalga boyu aralığında yapılırsa, ortamdan geçen ışınların bağıl şiddetleri ile dalga boyları arasındaki bağıntı soğurma spektrumunu verir. Her bir malzemenin yayınladığı dalga boyları birbirinden farklıdır ve kendine özgüdür. Aynı şekilde her malzemenin soğuracağı dalga boyları da diğer malzemelerinkinden farklı olacaktır. Bu nedenle soğurma spektrumları kullanılarak bir yarıiletkenin bant yapısı incelenip, yasak enerji aralığı belirlenebilir. Ayrıca elde edilen soğurma spektrumu yardımı ile bir takım teorik hesaplamalar sonucu ya da spektroskopik elipsometre cihazı ile geçirgenlik, kırılma indisi, soğurma katsayısı, yansıtırlık, dielektrik sabiti gibi bazı optik parametrelere de ulaşılabilir.

Bir yarıiletken malzemenin bant yapısını araştırmak için kullanılacak en uygun ve direkt yol o malzemenin optiksel soğurma spektrumunu incelemektir. Soğurma işleminde, bilinen enerjili bir foton yarıiletken içerisindeki bir elektronu düşük enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır. Dolayısı ile gelen bir ışık önüne yerleştiren yarıiletken malzemeden geçen ışığın şiddeti dalga boyunun bir fonksiyonu olarak incelenebilir. Bu sayede malzemedeki elektron geçişleri ve izinli elektronik enerji seviyelerinin dağılımları hakkında bilgi edinilebilir. Bir yarıiletkenin optiksel soğurma katsayısı direkt olarak optiksel geçirgenlik bilgilerinden hesaplanabilir.

2.3.1. Bir Yarıiletkenle Işığın Etkileşimi

λ dalga boylu I_0 şiddetli bir ışık d kalınlıklı bir yarıiletken üzerine geldiğinde, bu ışığın bir kısmı yarıiletkeni geçer, bir kısmı soğrulur ve bir kısmı da yarıiletken tarafından yansıtılır. Yarıiletken yüzeyine gelen ışığın şiddeti I_0 ; geçen, soğrulan ve yansıyan demetlerin I_T , I_A ve I_R şiddetlerinin toplamına eşit olur.

$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (2.6)$$

Bu eşitlik bir başka şekilde geçirgenlik (T), absorpsiyon (A) ve yansıtıcılık (R) cinsinden,

$$T + A + R = 1 \quad (2.7)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

Yarıiletken malzeme üzerine gönderilen bir foton, yarıiletkenin yasak enerji aralığına (E_g) eşit veya daha büyük bir enerjiye sahipse, bu durumda valans bandındaki bir elektron uyarılarak iletim bandına geçer ve bu olay “soğurma olayı” olarak bilinir. Malzeme üzerine gönderilen ışığın şiddeti I_0 , geçen ışığın şiddeti I ve malzemenin kalınlığı d ise, lineer soğurma katsayısı α ;

$$\alpha = 2.303 \frac{\log_{10}(I_0/I)}{d} \quad (2.8)$$

denklemleri ile verilir. Lineer soğurma katsayısı; malzemenin yoğunluğuna, gelen ışığın dalga boyuna ve malzemenin yasak enerji aralığına bağlı olarak değişir (Smith, 1990).

Malzeme üzerine gönderilen fotonlar, bir elektrona daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılmak 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. Bir malzemenin alt yüzeyine gelen ışık ile alt yüzeyinden yansıyan ışık şiddeti arasındaki fark, malzemeyi geçen ışık şiddetine eşit olacaktır. Bu ilişki;

$$I = (1 - R)^2 (I_0 e^{-\alpha d}) \quad (2.9)$$

denklemleri ile verilir (Benramdane, et al., 1997).

Işık bir malzemedan geçerken enerjisinin bir kısmını kaybeder. Bu enerji kaybı ışığın hızını azaltacağından ışık demeti yön değiştirir ve kırılmaya uğrar. Işığın boşluktaki hızının malzeme içindeki hızına oranı malzemenin kırılma indisi olarak tanımlanır ve yarıiletken bir malzeme için kompleks kırılma indisi;

$$n = n_0 - ik \quad (2.10)$$

denklemleri ile ifade edilir. Denklem (2.10)'un gerçek kısmı "kırılma indisi"ni verir ve

$$n_0 = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (2.11)$$

ile verilir. Sanal kısmı ise

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (2.12)$$

ile verilir ve k “sönüm (extinction) katsayısı” olarak tanımlanır. Burada λ gelen ışığın dalga boyudur. Kompleks kırılma indisinin gerçekte 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 kutuplaşma kabiliyeti yüksek olduğunda, fotonlarla daha çok etkileşirler ve daha fazla kırılmaya sebep olurlar. Bu nedenle, malzemenin kırılma indisi ile dielektrik sabiti arasında bir ilişki vardır. Yarıiletken bir malzeme için kompleks dielektrik sabiti; $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ ve $\epsilon_2 = 2nk$ olmak üzere;

$$\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2 \quad (2.13)$$

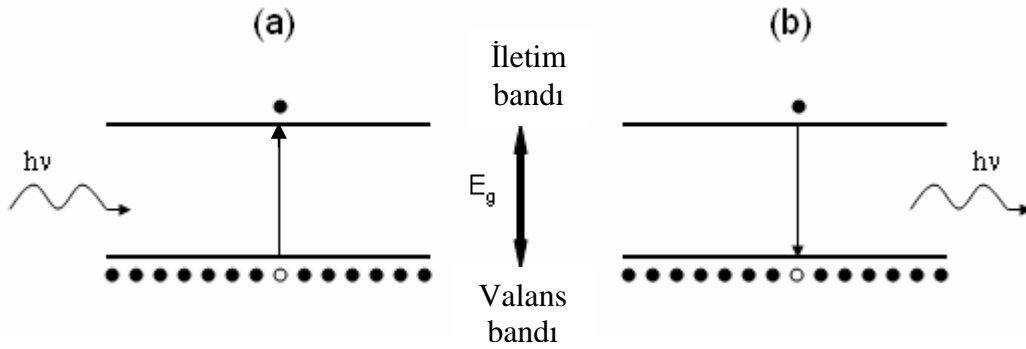
denklemleri ile verilir. Dielektrik sabiti kristalin bant yapısına hassas bir şekilde bağlıdır ve dielektrik sabitinin belirlenmesi kristalin bant yapısı tayinlerinde faydalı bilgiler verir.

2.3.2. Yarıiletkenlerde Soğurma Olayları

Bir yarıiletkende valans bandındaki bir elektron optik yolla uyarılarak yasak enerji aralığını geçebilir. Bu işlem Şekil 2.5 (a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu olayda gelen fotonun enerjisi tamamen elektrona aktarılır. Yeterli enerjiyi alan elektron iletim bandına çıkar ve valans bandında bir boşluk oluşur. Bu olay meydana geldiğinde, fotonun malzeme tarafından tamamen soğurulduğu söylenir. Buradaki ana şart olaya

sebebiyet veren fotonun enerjisinin en az yarıiletkenin yasak enerjisine eşit ya da daha büyük olmasıdır. Tersine olan süreçte ise, bir iletim elektronu bir boşlukla birleşerek enerjisi $h\nu$ olan bir foton üretir. Bu durum Şekil 2.5 (b)'de gösterilmektedir. Bu işlem de ışık yayan diyotların (LED) ve yarıiletken lazerlerin temelini oluşturur (Turton, 2005).

Bir yarıiletken üzerine ışık düştüğünde farklı etkiler meydana gelebilir. Bu durumda bir elektron farklı geçiş mekanizmaları sergileyebilir. Meydana gelebilecek mümkün geçişler; bantlar arasında, safsızlıklarla bantlar arasında ve bir banttaki serbest taşıyıcılarla olabilir.



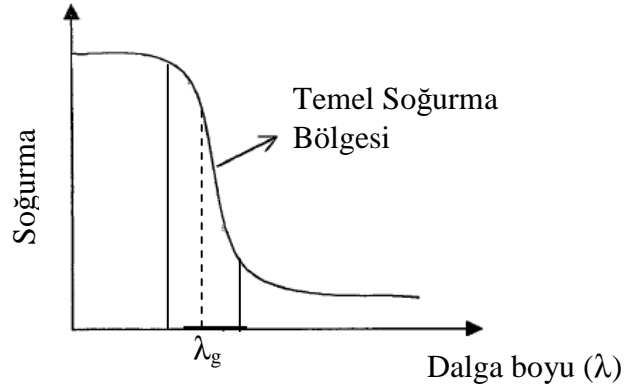
Şekil 2.5. (a) Valans bandındaki bir elektronun optik yolla uyarılması.
(b) Tersine süreçte bir foton yayınlanması.

Temel soğurma olayı bir elektronun valans bandından iletim bandına uyarılması halindeki geçişi ifade eder. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, bu soğurma olayı kendisini soğurma spektrumunda hızlı bir artış ile gösterir ve bu bölge temel soğurma bölgesi olarak bilinir. Bu durumda temel soğurma bölgesi yarıiletken bir malzemenin enerji aralığını belirlemek için kullanılabilir. Temel soğurma; yarıiletken üzerine gelen bir fotonun valans bandında bulunan bir elektron tarafından soğurulmasıyla elektronun iletim bandına geçmesi olayıdır. Bu olay valans ve iletim bandı arasındaki yasak enerji

aralığı E_g olan bir yarıiletkende, foton enerjisi $h\nu$ en az E_g 'ye eşit olduğunda gerçekleşir ve;

$$h\nu = E_g \quad \text{veya} \quad \lambda_g = hc / E_g \quad (2.14)$$

ile verilir. Burada ν ve λ_g sırası ile enerjisi E_g olan fotonun frekansı ve dalga boyu, h Planck sabiti ve c de ışık hızıdır. Bir yarıiletkenin soğurma spektrumunda λ_g değeri temel soğurma bölgesine düşer. Yarıiletken malzeme kısa dalga boylarında kuvvetli bir soğurucu ve uzun dalga boylarında ise geçirgen olur. Bu iki bölgeyi ayıran sınır ise temel soğurma bölgesidir (Akyüz, 2000).



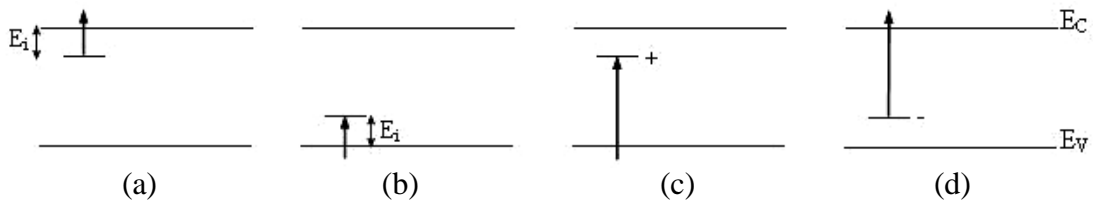
Şekil 2.6. Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu (Akyüz, 2000).

Temel soğurma bölgesinde direkt ve indirekt olmak üzere iki çeşit geçiş olabilir. Her iki geçişte de elektronlar valans bandından iletim bandına geçerler, ancak geçişte kullanılan yollar farklıdır. Bir yarıiletken malzemede foton soğurulması işlemi elektronun momentum korunumu sağlanmalıdır. Direkt geçişlerde, elektron valans bandından iletim bandına momentumunda bir değişiklik olmadan geçer. Bu tip geçişler için α ile foton enerjisi $h\nu$ ve enerji aralığı E_g arasındaki bağıntı;

$$n_0 \alpha h\nu \cong (h\nu - E_g)^n \quad (n_0=1) \quad (2.15)$$

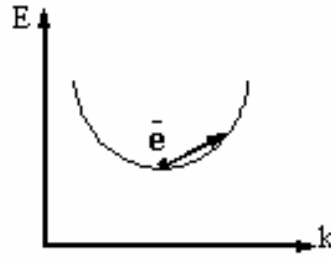
ifadesi ile verilir (Omar, 1975). Burada n_0 kırılma indisi, n izinli direkt geçişler için 1/2 ve izinsiz direkt geçişler için 3/2 değerini alan bir sabittir. İndirekt geçişlerde ise elektronun hem enerjisinde hem de momentumunda bir değişim olur. Foton, momentumda bir değişim sağlayamayacağı için iki adımlı bir işleme ihtiyaç duyulur. Momentum korunumu bir fonon etkileşmesi ile sağlanır.

Ayrıca Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, yarıiletkenlerde safsızlıklar ve bantlar arasında da geçişler olabilir. Şekil 2.7 (a) ve (b)’de gösterilen geçişler, düşük enerjili bir fotonun soğurulması ile gerçekleşebilir. Bu tip bir soğurma işlemi için fotonun enerjisi en az safsızlığın iyonizasyon enerjisine (E_i) eşit olmalıdır. Bir safsızlık ile bant arasındaki geçiş kendisini soğurma kenarında, bant aralığından küçük bir enerjide bir omuz şeklinde gösterir. Bu tip geçişler için soğurma katsayısı temel soğurmada daha küçük bir aralığı kapsar. Çünkü safsızlık seviyelerinin yoğunluğu bantlardaki durum yoğunluğundan çok daha azdır. Pratikte sıg safsızlıklar soğurmada nadiren fark edilir. Bunun nedeni bant sarkmalarını içeren geçişlerin baskınlığıdır. Ancak derin seviyelerde safsızlık seviyesi soğurma kenarıyla kıyaslanabilecek kadar arttığında, safsızlıklar soğurma spektrumunda belirli bir omuz olarak görülebilir.



Şekil 2.7. Safsızlıklar ve bantlar arasındaki geçişler. (a) donör-iletim bandı (b) valans bandı-akseptör (c) valans bandı-donör (d) akseptör-iletim bandı.

Başka bir tip soğurmada ise, elektron bir fotonu soğurarak aynı bant içinde (Şekil 2.8) daha yüksek bir enerji seviyesine geçiş yapar. Bu tip bir geçiş momentum korunumu için ek bir etkileşme gerektirir. Momentumdaki değişim fononlar yoluyla örgü ile etkileşerek veya iyonlaşmış safsızlıklardan saçılarak sağlanır. Yarıiletkenlerde bağlı bir elektron ile hol birbirlerini Coulomb kuvvetiyle çekerler ve birbirlerinin etrafında dönerler. Bu şekilde oluşan elektron-hol çiftine eksiton denir. Eksitonların yükü sıfırdır. Eksitonlar tarafından soğrulma için; $h\nu \geq E_g - E_{eks}$ şartının sağlanması gerekir. Burada E_{eks} eksitonun bağlanma enerjisidir. Bir diğer soğurma olayı katkı atomları tarafından soğurmadır ve katkı yarıiletkenlerde meydana gelir. Yarıiletkene gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından küçük ise, valans bandındaki elektronlar iletim bandına çıkamaz. Bu durumda gelen foton yarıiletkenin tipine göre donör veya akseptör atomları tarafından soğrulur.



Şekil 2.8. Serbest bir elektronun iletim bandındaki geçişi.

Bir yarıiletkenin bant aralığı soğurma katsayısı ve yarıiletken üzerine gelen fotonun enerjisinin bilinmesi ile belirlenebilir. Direkt bant aralıklı bir yarıiletken malzemede $(\alpha h\nu)^2$ 'nin enerjiye $(h\nu)$ karşılık çizilen grafiğinin lineer kısmının enerji eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ ' da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletken malzemenin bant aralığını verir. Bu yöntem "optik metot" olarak bilinir.

Yarıiletken malzemede; katkı atomlarının yoğunluğunun artırılması sonucunda, enerji seviyelerinde yarılmalar meydana gelir ve donör veya akseptör seviyeleri

“safsızlık bandı” olarak tanımlanan bir bant oluştururlar. Bunun yanında bir başka önemli etki ise, yasak enerji aralığı içine bantların genişlediğini gösteren bant sarkmalarının oluşumudur. İyonlaşmış donörler, iletim bandındaki elektronlar üzerine çekici bir kuvvet ve valans bandındaki holler üzerine ise itici bir kuvvet uygulayarak bant sarkmalarının oluşmasına sebep olur. Katkı atomları ve kristal arasındaki diğer bir etkileşim de deformasyon potansiyelidir. Çünkü katkı atomu genellikle bir örgü atomundan daha büyük veya daha küçük olacağı için, yerel bir mekanik gerilme meydana gelir ve bu tip bir etkileşim de bant kenarlarını bozar. Sonuç olarak katkı yarıiletken bir malzemede; safsızlık bandının oluşumu, Coulomb etkileşimi ve deformasyon potansiyeli sebebiyle bant kenarları bozulur ve bant sarkmaları ortaya çıkar.

2.3.3. Spektroskopik Elipsometri 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 fizikokimyasının özelliklerinin bilinmesiyle silikon teknolojisinin gelişmesi sağlanmış ve daha küçük elektronik sistemlerin oluşturulması için yol açılmıştır.

Elipsometri 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.

Elipsometri tekniği yaklaşık bir yüzyıldır bilinir ve yarıiletkenler, düz panel göstergeler, optik kaplamalar ve polimer film endüstrisinde uygun kullanıma sahiptir. Bununla birlikte, elipsometri tekniği numune yüzey özelliklerindeki küçük değişikliklere karşı duyarlı olduğu için, doku boyunca malzeme taşınımı konusundaki incelemelerde yani biyoloji ve tıp gibi diğer disiplinlerde de uygun bir teknik haline gelmiştir.

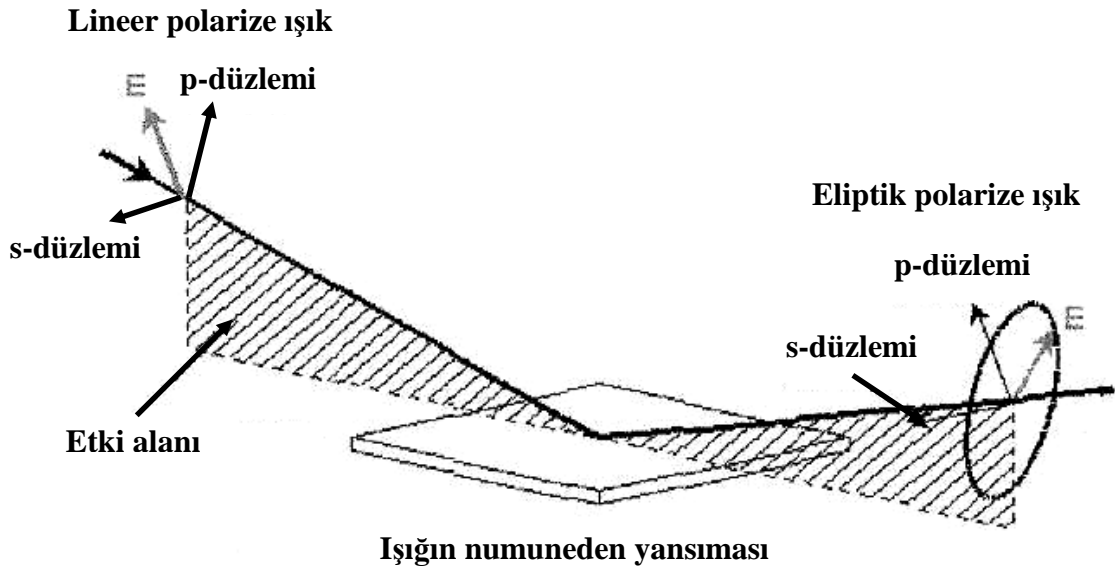
Elipsometri yansıma veya geçirme sonrası polarizasyondaki değişimi ölçer. Genelde yansıma düzenekleri bu ölçüm için yeterlidir. Polarizasyondaki değişimin tam detaylı incelemesi kalınlık, kompleks kırılma indisi veya dielektrik fonksiyonu gibi numunenin özellikleri üzerinden yapılır. Elipsometri, diğer 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 elipsometrik modelleme işlemi geçersiz kalacağı için, teknikle ilgili daha gelişmiş değişkenlere ihtiyaç vardır.

Elipsometri tekniği ile elde edilen deneysel veri genellikle Fresnel 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 çözümlenmektedir. Bu tip elipsometrelerde, pek çok gelişmeye rağmen, bazı durumlarda düşük hassasiyet ve özellikle düşük yansıma veren numunelerde düşük sinyal/gürültü oranı ile karşılaşılabilir.

Elipsometri, 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 2.9' da sınır yüzeyinden yansıyan polarize ışık gösterilmektedir. Elektromagnetik dalganın polarizasyon durumu ise, elipsometrik 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.



Şekil 2.9. Sınır yüzeyinden yansıyan polarize ışık.

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 elipsometrik Ψ parametresinin ifadesini verir.

$$\tan \psi = \frac{R_p}{R_s} \quad (2.16)$$

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

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_s \quad (2.17)$$

Burada Δ_p ve Δ_s sırasıyla R_p ve R_s nin fazlarıdır. Elipsometrik parametrelerle Frensel katsayıları arasında ilişki kurulabilir. Elipsometrik parametreler direkt olarak elipsometreden okunan büyüklükler değildir. Elipsometre üzerinden okunan R_p ve R_s değerlerinden elipsometrik parametreler Ψ ve Δ ya geçiş yapabilmek için kullanılan çeşitli hesap teknikleri vardır.

Elipsometri tekniğindeki karakterizasyon metodu indirekt (dolaylı) bir doğaya sahiptir. Elipsometrik 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;

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \quad (2.18)$$

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;

$$k(\lambda) = A_k e^{B_k(E-E_b)} \quad (2.19)$$

ifadesi ile verilir. Burada A_k ve B_k Urbach parametreleridir ve

$$E \approx \frac{1240}{\lambda} \quad \text{ve} \quad E_b \approx \frac{1240}{\lambda_b} \quad (2.20)$$

olarak verilir. Dalga boyu 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.

Kısmi polarizasyona sebep olabilecek fiziksel olaylar şu şekilde sıralanabilir:

- a) Numune yüzeyindeki yüksek pürüzlülük nedeni ile ortaya çıkan yüzey saçılmaları ve numuneye gelen ışığın gelme açısındaki değişim
- b) Monokromatörün sonlu bant genişliğinin neden olduğu dalga boyu değişimi
- c) Bir taban üzerine oluşturulan ince filmin kalınlığının homojen olmaması
- d) Kullanılan tabanın ışığı soğurmasının oldukça düşük ($k \sim 0$) olması nedeni ile ortaya çıkan geri yüzey yansımaları.

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 elipsometrik veriler yanlıştır
- b) Veri analizinde kullanılan model uygun değildir
- c) Numunede depolarizasyon etkisi olabilir.

2.4. Yüzey Özellikleri

Malzeme biliminde katı yüzeylerin fiziksel niteliği, yüzeylerinin oluşumları, faz dağılımları, tanelerin varlığı, homojenlikleri, gözenekli yapıları ve tabana tutunmaları hakkında ayrıntılı bilgi sağlamak büyük önem taşır. Günümüzde yüzey ayrıntılarını atomik boyutlarda incelemek mümkündür. Yüzey özelliklerini incelemek amacıyla taramalı uç mikroskopları (TUM) geliştirilmiştir. Bu mikroskoplar numuneyi tarayan fiziksel bir uç kullanarak yüzey görüntüsü oluştururlar. Yüzey görüntüsü, mekanik olarak hareket ettirilen uç ile numune çizgi-çizgi taratılarak ve konumun bir fonksiyonu olarak uç-yüzey etkileşmesi kaydedilerek elde edilir. TUM; taramalı tünel mikroskopunun 1981’de icat edilmesi ile ortaya çıkmıştır. Taramalı uç mikroskopları eş zamanlı olarak birkaç etkileşmeyi görüntüleyebilir. Görüntü elde etmek için bu etkileşmelerin kullanılma tarzı “mod” adını alır. Çözünürlük değerleri teknikten tekniğe değişim gösterse de, bazı uç tekniklerinde etkileyici bir atomik çözünürlüğe ulaşabilir. Bunun için atomik seviyedeki hareketleri algılayabilecek piezoelektrik düzeneklere ihtiyaç vardır. Bu nedenle bu tekniklere “piezoelektrik teknikler” de denilebilir. Tekniklerden en yaygın olanları AKM (Atomik Kuvvet Mikroskobu), EKM (Elektrostatik Kuvvet Mikroskobu), MKM (Magnetik Kuvvet Mikroskobu) ve TTM (Taramalı Tünel Mikroskobu) dir.

Taramalı uç mikroskopisinin bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Avantajlarından bahsedecek olursak;

- Mikroskobun çözünürlüğü kırınım ile sınırlı değildir. Sadece bir kaç *pm* kadar küçük olan uç-numune etkileşmesinin boyutu ile sınırlıdır.
- Etkileşme küçük yapıların oluşturulması ile numunenin yeniden düzenlenmesinde kullanılabilir.
- Elektron mikroskobu metotlarının aksine, numuneler kısmi bir vakum gerektirmez. Hava ortamında standart sıcaklıkta veya basınçta ya da bir sıvı içine daldırılmışken görüntülenebilir.

Dezavantajlarından bahsedecek olursak;

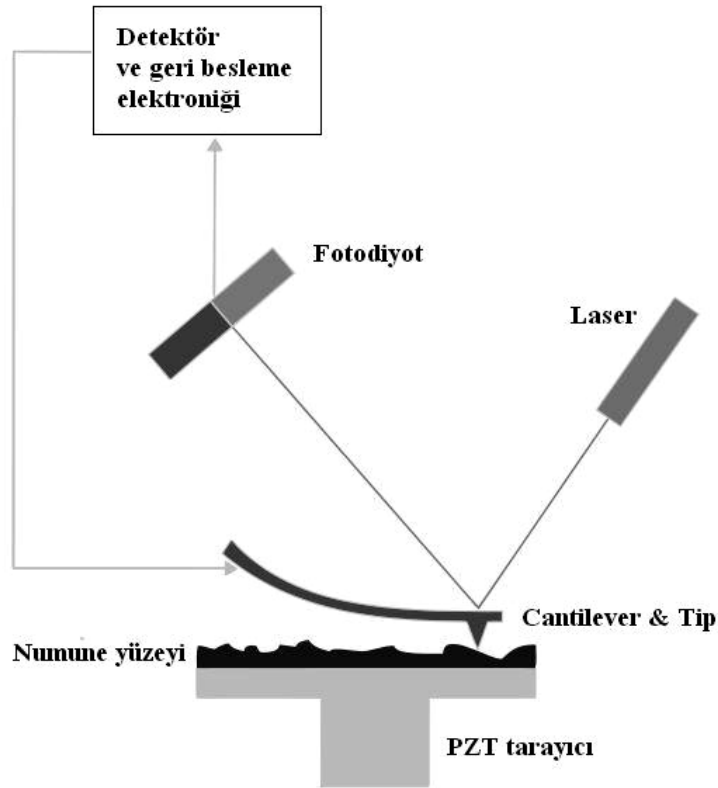
- Tarama ucunun detaylı şeklinin belirlenmesi bazen zordur. Eğer numune yatay konumda 10 nm veya daha az mesafede yükseklik olarak önemli derecede değişiyorsa, bunun etkisi sonuç verilerine de yansıtacaktır.
- Tarama işleminden dolayı bu teknikler görüntü elde etmede genelde yavaşlardır.
- Maksimum görüntü boyutu genelde küçüktür.

Taramalı uç mikroskoplarının en yaygın olarak kullanılanı AKM'dir. AKM, nanometre boyutunda çok yüksek çözünürlüğe sahip bir mikroskopi tekniğidir. Bu değer optik kırınım limitinden bin kat daha iyi bir değerdir. AKM'nin geliştirilmesine öncü olan taramalı tünel mikroskobu Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer tarafından 1980'lerin başında geliştirilmiştir ve bu onlara 1986 yılında Nobel Fizik ödülü kazandırmıştır. Binnig, Quate ve Gerber 1986 yılında ilk AKM'yi geliştirmişlerdir.

AKM, numuneyi nano boyutta görüntülemek, ölçmek ve değiştirmek için kullanılan en önemli tekniklerden biridir. Bu teknikte bilgi, yüzeyi mekanik bir uç vasıtasıyla "hissederek" elde edilir. Çok küçük fakat kesin ve hassas elektriksel komutları kullanabilen piezoelektrik elementler oldukça hassas taramayı mümkün kılar. AKM ilk başta taramalı tünel mikroskobunun dezavantajı olan, sadece iletken ve yarıiletken yüzeyleri inceleyebilme sınırlılığını ortadan kaldırmak üzere geliştirilmişti. Ancak AKM, polimer, seramik, kompozit, cam ve biyolojik numuneler gibi birçok çeşit yüzeyin görüntülenmesine imkan sağladı.

AKM, numune yüzeyini bir-iki mikron uzunluğunda ve genelde 100 Å' dan daha az bir çapa sahip keskin bir uç (tip) yardımı ile inceler. Tip, 100–200 µm uzunluğunda bir yayın (cantilever) serbest ucuna yerleştirilir. Bu yay genellikle silisyum, silisyum oksit veya silisyumnitrürden yapılır. Tip ile numune yüzeyi arasındaki kuvvetler (10^{-8} - 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 yayaaki sapmayı ölçer. Ölçülen bu sapmalar bir bilgisayar vasıtasıyla yüzey topografisinin bir haritasını oluşturur. AKM’ de ölçülen kuvvetler duruma göre; mekanik kontakt kuvvetleri, Van der Waals kuvvetleri, kapiler kuvvetler, kimyasal bağlar, elektrostatik ve manyetik kuvvetler olabilir. Genelde sapma miktarının ölçümü Şekil 2.10’da görüldüğü gibi yayın yüzeyinden yansıyan lazerin bir dizi foto diyot ile algılanması sonucu gerçekleştirilir. Bu hareketten faydalanılarak bilgisayar ortamına aktarılan veriler, yazılım aracılığı ile derlenerek görüntü elde edilir (Doğan, 2004). Bir AKM’nin performansı yayın fiziksel niteliklerine bağlıdır. Eğer tip, sabit bir yükseklikte taranırsa yüzey ile çarpışabilir ve zarar görür. Bu yüzden çoğu durumda tip ile numune arasında sabit bir kuvvet sağlama amacıyla tip-numune mesafesini ayarlamak için bir geri besleme (feedback) mekanizması kullanılır. Numune, sabit bir kuvvet sağlamak için z-yönünde hareket edebilen ve numuneyi taramak için ise x,y-yönünde hareket edebilen bir piezoelektrik tüp üzerine monte edilir.



Şekil 2.10. Atomik Kuvvet Mikroskopunda temel görüntü alma mekanizması (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atomic_force_microscope_block_diagram.svg).

AKM, görüntüleme metotlarına bağlı olarak birkaç farklı modda çalışmaktadır. Genelde mümkün görüntüleme modları statik (contact) ve dinamik (non-contact) olmak üzere iki gruba ayrılır. Her bir mod kendine has problemlerin çözümünde kullanılabilir. Bu araştırmacıya çeşitlilik sunar ve verilen bir deneysel şart göz önünde bulundurularak mikroskobu en uygun ve etkin modda çalıştırma imkanı sağlar. Görüntüleme modları Şekil 2.11’de şematik olarak verilmiştir.

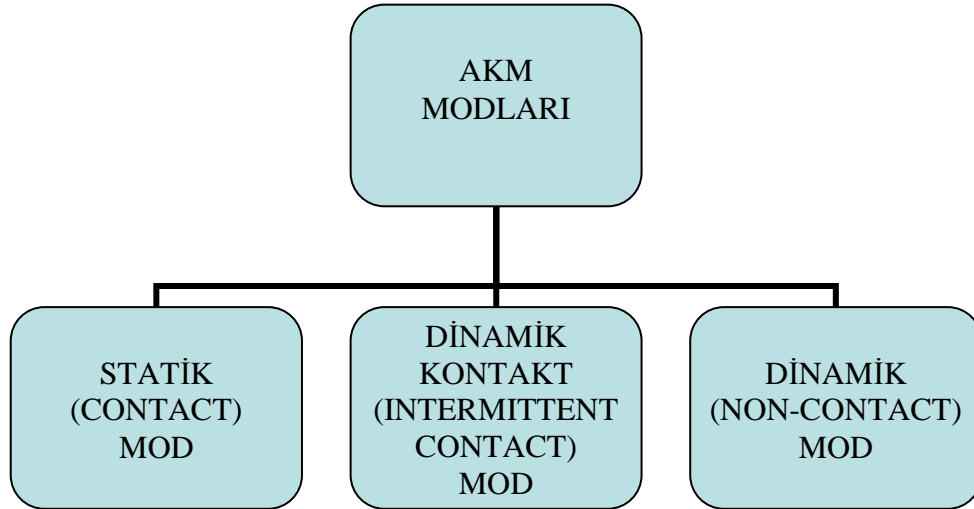
Statik modda, tip numune ile yumuşak bir “fiziksel kontakt” yapar. Tip, düşük yay sabitli ($< 1 \text{ N/m}$) bir yayın ucuna yerleştirilmiştir (bu değer numune atomlarını bir arada tutan etkin yay sabitinden küçüktür). Kontakt kuvvetler yayın eğilmesine ve topografide değişikliklere sebep olur. Statik tip sapması bir geri besleme sinyali olarak kullanılır. Statik bir sinyalin ölçümü gürültü ve sürüklenmeden etkileneceği için, sapma sinyalini desteklemek üzere düşük sertlikte bir yay kullanılır. Bununla birlikte numune yüzeyinin yakınlarında çekici kuvvetler çok etkili olabilir ve tipin yüzeye batmasına sebep olabilir. Bu yüzden, statik mod tüm kuvvetin itici olduğu kontakt bölgede yapılır. Bu nedenle bu tekniğe “kontakt mod” adı verilir. Tip ile yüzey arasındaki kuvvetin tarama süresince sabit bir sapma sağlayarak değişmez kalması sağlanır.

Dinamik (non-contact) modda ise, yay temel rezonans frekansına yakın bir değerde titreştirilir. Titreşim genliği, faz ve rezonans frekansı tip-numune etkileşme kuvvetleri nedeni ile değişir. Titreşimdeki bu değişiklikler numunenin karakteristiği hakkında bilgi verir. Yay numune yüzeyine yakın bölgede (yaklaşık $10\text{--}100 \text{ \AA}$) titreştirilir. Non-contact AKM 1987’de geliştirilmiştir ve kontakt AKM ve taramalı tünel mikroskobuna göre bazı avantajları vardır. Non-kontakt AKM’de var olan itici kuvvetlerin yokluğu yumuşak numunelerin görüntülenmesine imkan sağlar. Ayrıca; non-contact AKM’de numunenin iletken olmasına da gerek yoktur.

Intermittent kontakt modda, yay rezonans frekansı civarında titreştirilir. Etkileşme kuvvetleri nedeniyle bu titreşimin genliği değişir. Elektronik bir sistem ile yayın numune üzerindeki yüksekliği kontrol edilmeye çalışılır, yani bu modda görüntüleme tipin numune yüzeyi ile etkileşmesinde ortaya çıkan titreşim kontaktlarının etkisini kullanır. Bu bilinen kontakt AKM için bir geliştirmedir. Numune yüzeyine

daha az zarar verilebilir. Tip sadece titreşimin çok küçük bir kısmında kontakt itici kuvvetlerini hisseder. Bu şekilde yüzey taraması non-contact değildir. Bu modda yayın basınç kuvveti daha azdır ve çabuk hasar gören numunelerde kullanım için daha uygundur (polimerler, bio-organikler vb).

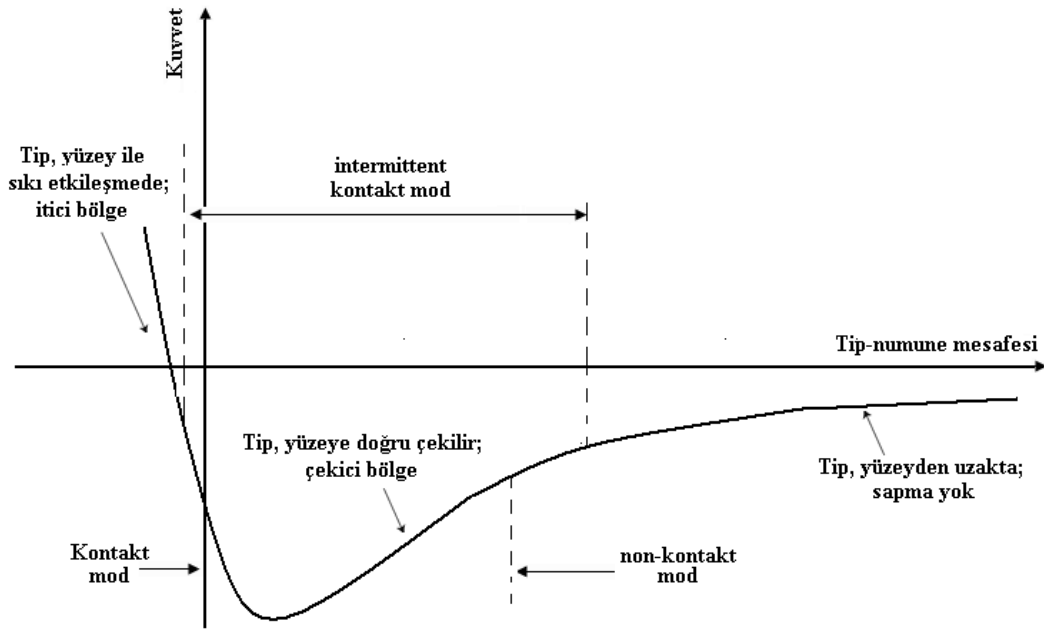
Bir diğer çalışma modu ise faz görüntüleme modudur. Titreşim altındaki tip numune yüzeyine değdiğinde sadece itici değil aynı zamanda adhesif, kapiler ve diğer bazı kuvvetleri de hisseder. Böylece tip ile numune yüzeyi etkileşmesi sadece frekansta değil aynı zamanda fazda da kaymaya sebep olur. Eğer numune yüzeyi homojen değilse taranan numune yüzeyi faz kaymasına sebep olur. Faz kayması numune karakteristiklerinin dağılımını yansıtır. Bu mod malzeme araştırmasında çok kullanışlıdır. Faz görüntüleme modu geniş bir uygulama alanı için değerli bilgiler verir. Bazı durumlarda malzeme özelliklerinin süreksiz olduğu yerlerde görüntüye kontrast katar.



Şekil 2.11. Atomik Kuvvet Mikroskobunun çalışma modları.

AKM’de tip ile numune arasındaki kuvvetler incelendiğinde, farklı tip-numune uzaklıklarına göre farklı kuvvetler baskın hale gelebilmektedir. Yay ile numune etkileşiminde tip-numune mesafesinin kuvvete göre etkileşmesi Şekil 2.12’de

gösterilmiştir. Kontak süresince ve yay yüzeyi deforme ederken elastik itme kuvvetleri baskındır. Bu yaklaşım HERTZ modeli olarak bilinir. Birkaç 10\AA mertebesindeki tip- numune ayrımlarında asıl etkileşme Van der Waals kuvveti adı verilen moleküller arası etkileşmedir. Aynı mesafelerde sıvı filmler söz konusu olduğunda etkileşme kapiler ve adhezyon kuvvetleri kaynaklıdır. Daha uzun mesafelerde elektrostatik etkileşme kuvvetleri baskın hale gelir. 1000\AA gibi mesafelerde ise magnetik kuvvetler baskınlık kazanır.



Şekil 2.12. Atomik Kuvvet Mikroskobunda yay-numune etkileşmesi.

2.5. Elektriksel Özellikler

Katıların elektriksel iletkenliğinde en önemli hususlardan biri iletkenlik aralığının fevkalade genişliğidir. Bilindiği gibi, bakır ve gümüş gibi en iyi iletkenle, kükürt gibi en iyi yalıtkan arasındaki iletkenlik oranı 10^{24} , den daha büyüktür. Bu oran oldukça büyük bir değerdir. Bu bir gezegenin yörüngesinin çapı ile atom etrafında dönen elektronun yörüngesinin çapının kıyaslanmasına benzemektedir. Eğer katılar iletkenlik bakımından bu kadar büyük orana sahip olmasaydı elektriğin kullanım emniyetinde büyük zorluklar yaşanırdı. Mesela elektriksel iletkenlik oranı 10^5 mertebesinde olsaydı bir ışığı yakmak için her anahtarı açıp kapatışta elektrik çarpması meydana gelirdi (Turton, 2005).

Elektriksel iletkenlik malzemelerde oluşan bağları göz önüne alarak açıklanabilir. Metalik bağlar serbest elektronlar üretirler ve bu elektronlar bir elektrik alanın etkisiyle kolayca hareket ederler. Dolayısıyla bu malzemelerin elektriksel iletkenlikleri yüksektir. Diğer bağ tiplerinde ise valans elektronları belli atomlara, iyonlara veya kovalent bağda olduğu gibi atom çiftlerine sıkıca bağlı bulunmaktadır. Bu malzemeler dolayısıyla yalıtandır. Aynı tip bağlara sahip birçok malzeme farklı elektriksel özellik de gösterebilmektedir. Mesela silisyum ve elmas her ikisi de benzer kristal yapıda ve kovalent bağlara sahip olmalarına rağmen, bilhassa yüksek sıcaklıklarda silisyum makul ölçülerde iyi bir iletken iken, elmas çok iyi bir yalıtandır. Bunun sebebi bant yapılarından kaynaklanmaktadır (Turton, 2005).

Bilindiği gibi, yarıiletkenlerde iletkenliğe katkı sağlayan sadece iletim elektronları değildir. Holler de iletkenliğe katkıda bulunur. Hollerin yükü elektronun yüküne eşittir fakat pozitif işaretlidir. Böylece bu boşlukların varlığı malzemenin iletkenliğini de etkileyecektir. Bir yarıiletkene bir elektrik alan uyguladığında elektronlar elektrik alana zıt yönde, holler ise elektrik alan ile aynı yönde hareket ederler. Bu iki takım parçacık zıt polariteli yüklere sahip olduklarına göre, toplam akım elektron ve hol akımlarının toplamına eşittir. İletkenlik ifadesi olan;

$$\sigma = n\mu_e \quad (2.21)$$

denklemini kullanarak bir yarıiletken malzemedeki toplam iletkenliği

$$\sigma = |e|(n\mu_e + p\mu_p) \quad (2.22)$$

olarak yazabiliriz. Burada n elektronların konsantrasyonu, p hollerin konsantrasyonu, μ_e ve μ_p sırasıyla elektronların ve hollerin mobiliteleridir. Elektron ve hollerin mobiliteleri;

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} \quad \text{ve} \quad \mu_h = \frac{e\tau_p}{m_p^*} \quad (2.23)$$

olarak verilir. Elektron ve hol katkılarının toplanmasıyla elde edilen elektrik akım yoğunluğu;

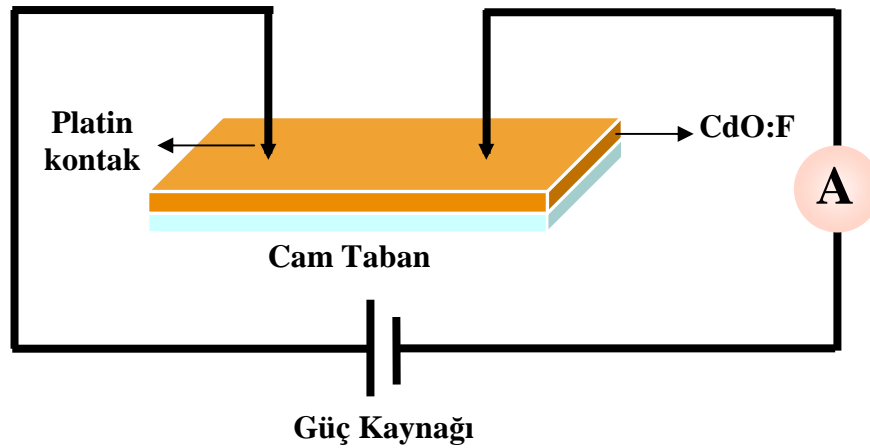
$$j = (ne\mu_e + pe\mu_p)E = \left(\frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_p}{m_p} \right) E = \sigma E \quad (2.24)$$

dir (Hook and Hall, 1999).

Yarıiletken bir malzemenin elektriksel öz direncinin veya iletkenliğinin ölçülmesinde yaygın olarak iki uç, Van der Pauw ve dört nokta uç gibi deneysel teknikler kullanılmaktadır. İki uç tekniğinde Şekil 2.13'de görüldüğü gibi, iki metal kontakla sahip yarıiletken malzeme, ampermetre ve güç kaynağından oluşan basit bir elektrik devresi ile, kontaklar arasına uygulanan voltaja karşılık akım değerleri belirlenir. Elde edilen akım-voltaj değişim grafiğinin eğimi ve,

$$\rho = \frac{\Delta V}{\Delta I} \cdot \frac{dxl}{L} \quad (2.25)$$

ile verilen denklem kullanılarak özdirenç değeri (ρ) hesaplanır. Burada; ΔV ve ΔI sırasıyla voltaj ve akım değişimlerini, d malzemenin kalınlığını, l her bir kontak uzunluğunu, $d \times l$ malzemenin kesit alanını ve L ise iki kontak arasındaki uzaklığı göstermektedir.



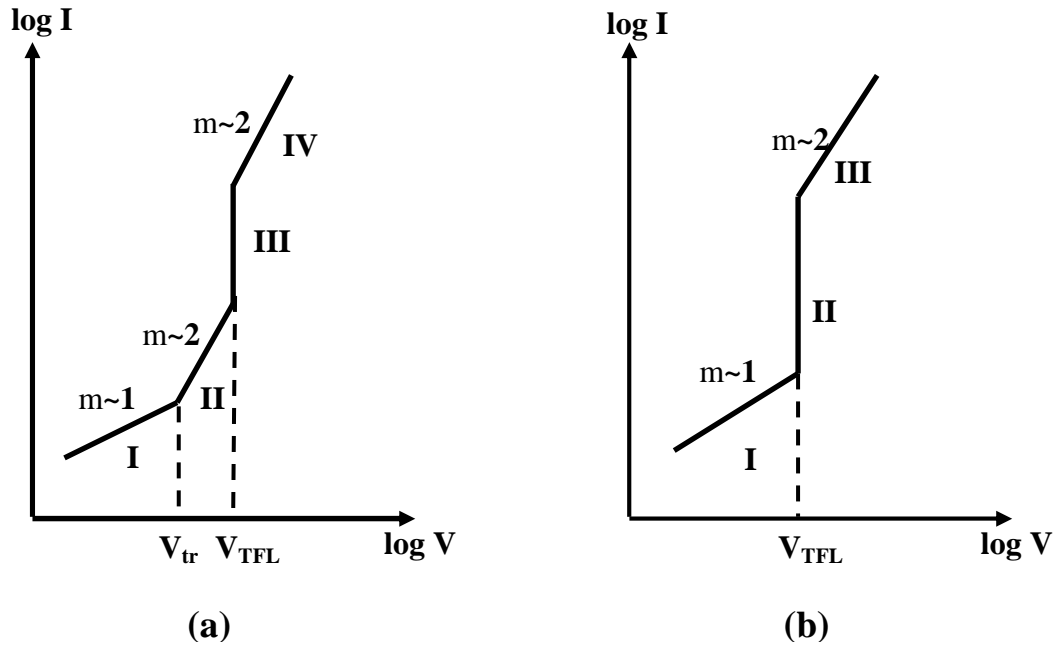
Şekil 2.13. İki uç tekniği ile oluşturulan elektrikselle düzenek şematik diyagramı.

Bir yarıiletken malzemenin elektrikselle özelliklerinin incelenmesi için, öncelikle metal-yarıiletken-metal yapıların oluşturulması ve akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinin elde edilmesi gerekmektedir. Elde edilen I-V karakteristiklerinden yararlanılarak; yarıiletkenin ohmik, space charge limited (SCL) ve Schottky gibi iletim özelliklerinden hangisine sahip olduğu hakkında bilgi edinilebilir.

Metal ve yarıiletken arasındaki ohmik kontak direnci, yarıiletkeninki ile kıyaslandığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Ohmik kontak; yarıiletken malzemenin n veya p-tipi olmasına göre, yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük veya küçük olmasına bağlı olarak iki şekilde oluşturulabilir (Kao and Hwang, 1979). SCL akımı, ohmik kontak özelliğindeki metal-yarıiletken-metal yapılarda gözlenmektedir. SCL akımının oluşması, yarıiletkene yeteri kadar taşıyıcının gönderilmesi ile meydana gelir. Kontak bölgesine bir dış elektrik alan

uygulandığında; elektrik alanın büyüklüğüne bağlı olarak, akümülyasyon bölgesinden yeteri kadar elektron yarıiletkenine enjekte edilir. Eğer uygulanan elektrik alan yeteri kadar büyükse, elektron malzeme içerisine uzay yüklerinin miktarıyla sınırlandırılmış bir akım şeklinde enjekte edilir. Bu akım SCL akımı olarak tanımlanır (Aybek, 1996).

Yarıiletkenlerde çeşitli kusurlardan ve katkı atomlarından kaynaklanan ve yasak enerji aralığı içinde bulunan tuzak seviyeleri, Fermi enerji seviyesinin üstünde ise sığ tuzak (shallow trap), Fermi enerji seviyesinde veya altında ise derin tuzak (deep trap) adını alırlar. Bir yarıiletkenin I-V karakteristiği $I \sim V^m$ ifadesine bağlı olarak, $m \sim 1$ ise ohmik iletim ve $m \sim 2$ ise SCL iletim özelliği gösterir. Sığ tuzaklı ve derin tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristikleri sırasıyla Şekil 2.14. (a) ve (b)'de verilmektedir. Şekil 2.14 (a)'da görülen I. bölgede, kristal içerisine enjekte edilen serbest taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve bu bölgede ohmik iletim baskındır. Metal kontak tarafından enjekte edilen taşıyıcı yoğunluğunun hacimde oluşturulan taşıyıcı yoğunluğundan fazla olduğu II. bölge ise tuzakların etkisinde meydana gelmektedir ve bu bölgede serbest taşıyıcılar boş tuzaklar tarafından yakalanırlar. Bu bölgede, akım $\sim V^2$ ile değişir ve ölçülen en yüksek akım değeri tuzakların tamamen dolduğu V_{TFL} voltajında gözlenir. I. bölgeden II. bölgeye geçiş V_{tr} ile temsil edilir. III. bölgede tuzaklar tamamen doludur ve küçük voltaj aralığında akımda keskin bir artış meydana gelmektedir. IV. bölgede ise akım trap-free square yasasına uyar ve Fermi enerji seviyesi tuzak seviyesine yaklaşır. Şekil 2.14. (b)'de görüldüğü gibi tuzak enerji seviyeleri derin ise, ohmik bölgeden (I) sonra, tuzakların tamamen dolduğu TFL bölgesi (II) gelir. Tuzakların dolması sonucunda, Fermi enerji seviyesi iletim bandına yaklaşır ve akım trap-free square (III) yasasına uyar (Kao and Hwang, 1979; Nan, et al., 1999; Lampert and Mark, 1970).



Şekil 2.14. (a) Sığ, (b) derin tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği.

3. FİLMLERİN ELDE EDİLMESİ

3.1. Giriş

Yarıiletken ince filmlerin elektriksel, yapısal, yüzeysel ve optiksel özellikleri üzerinde üretim parametrelerinin ve katkılama işlemlerinin büyük etkisi vardır. Bu çalışmada CdO filmleri farklı oranlarda F elementi ile katkılanarak 300 ± 5 °C taban sıcaklığında, basit ve ekonomik olmasıyla öne çıkan Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) tekniği ile üretilmiştir.

3.2 Kimyasal Püskürtme Tekniği

Mikro-elektronik katı hal aygıtları ince film şeklinde üretilen malzeme yapıları üzerine oluşturulduğu için, üretim teknolojileri çok büyük öneme sahiptir. Bu yüzden malzeme elde etmek için çok sayıda üretim tekniği geliştirilmiştir.

Temel olarak ince film üretim teknikleri fiziksel ve kimyasal süreçlere dayanır. Bu tekniklerin sınıflandırılması Çizelge 3.1'de verilmektedir. Bu teknikler arasında kimyasal püskürtme tekniği basit ve ekonomik bir teknik olmasıyla dikkat çekmektedir. Püskürtme yönteminin oldukça basit yapıda olması, gerekli tertibat yönünden ekonomik olması, üretim işleminde müdahale için elverişli yapıda olması, ince film üretimi için vakum ortamına ihtiyaç duyulmaması ve üretim işleminin adım adım takip edilebilmesi nedeni ile diğer tekniklere göre avantajlıdır. Ayrıca bu teknik n-tipi ve p-tipi katkılamaya da izin verir (Kırmızıgül, 2008). Bu belirgin özelliklerinden dolayı püskürtme tekniği ile yarıiletken filmlerin elde edilmesi hem bilimsel hem de teknolojik açıdan çalışma konusu olmakta ve uygun özellikleriyle de diğer teknikler arasında dikkat çekmektedir. (Ergin, et al., 2009; Bilgin, et al., 2004). Kimyasal püskürtme

tekniki elverişli, basit ve çok yönlü bir teknik olup çeşitli inorganik ve organik malzemelerin sentezi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Huang, et al., 2009).

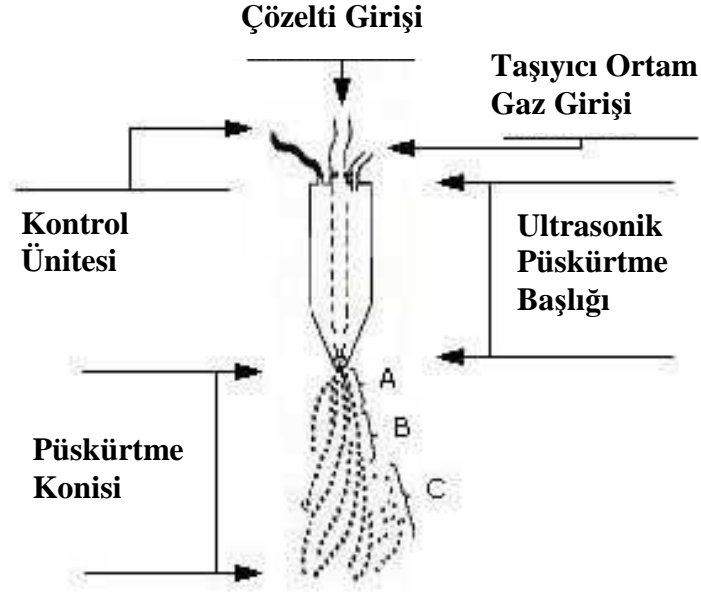
Çizelge 3.1 İnce film üretim tekniklerinin sınıflandırılması.

<p>✧ Fiziksel Çöktürme Teknikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Buharlaştırma <ul style="list-style-type: none"> - Termal Buharlaştırma - Elektron Demet Buharlaştırma • Saçtırma <ul style="list-style-type: none"> - DC Saçtırma - DC Magnetron Saçtırma - RF Saçtırma
<p>✧ Kimyasal Çöktürme Teknikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sıvı-Faz Teknikler <ul style="list-style-type: none"> - Kimyasal Püskürtme - Elektro Kaplama - Spin Kaplama - Sıvı-Faz Epitaksi • Gaz-Fazı Teknikler <ul style="list-style-type: none"> - Düşük-Basınç CVD (LPCVD) - Atmosferik Basınç CVD (APCVD) - CVD Epitaksi - Metalorganik CVD (MOCVD)

Kimyasal püskürtme tekniği kontrol edilebilir toz özellikleri, homojen dağılımlı bileşikler elde etmeye olanak sağlaması ve üretim zamanını kısaltması açısından etkili bir tekniktir (Taniguchi, et al., 2002). Diğer kimyasal metotlarla hazırlanan parçacıklarla kıyaslandığında kullanılan ultrasonik başlıklar ile üretilen parçacık boyutunun dağılımı daraltılabilir ve mikrometre boyutunda veya daha altında kontrol edilebilir. Ayrıca saflık derecesi yüksek tutulabilir ve kullanılan tozların bileşimi de kolayca kontrol edilebilir (Taniguchi, et al., 2002). Daha önemlisi ürün tozları birbirine çok yakın (10-20 nm boyutta) birincil parçacıkların yanında küresel ve mikrometre boyutlarda ikincil parçacıklar da içerebilir (Zhang, et al., 2009).

Kimyasal püskürtme tekniği, çöktürülecek malzemenin elementlerini içeren tuzların farklı konsantrasyonlarda hazırlanan sulu çözeltilerinden elde edilen başlangıç püskürtme çözeltisinin taşıyıcı gaz olarak kullanılan azot gazı ya da hava yardımıyla atomize edilerek ısıtılmış cam tabanlar üzerine belli bir süre püskürtülmesi işlemidir (Pamplin, 1979; Garnier, et al., 2009). Kimyasal püskürtme tekniğinin temel çalışma prensibi Şekil 3.1’de verilmektedir. Bu teknikte püskürtme başlığı kullanılarak çözelti damlacıkları tabanlar üzerine püskürtülür.

Kimyasal püskürtme tekniğinin bazı avantaj ve dezavantajları vardır. En önemli avantajları; basit ve ekonomik olması, düşük enerji tüketimi sağlaması, katkılamanın basit olması ve vakum gerektirmemesidir. Ayrıca bu teknik, geniş yüzeylere uygulanabilirliği açısından da ayrıcalıklıdır (Ajayi, et al., 1994; Akyüz, et al., 2000) ve bu teknikle elde edilen filmler polikristal yapıda olmaktadır (Goyal, et al., 1992; Beck and Cocivera, 1996). Metal ve tek kristal ince filmlerin elde edilememesi bu tekniğin dezavantajlarından biridir. Bu teknik ile düzgün kalınlıklı ve homojen filmlerin üretilmesi zordur. Ancak sisteme ultrasonik püskürtme başlıklı bir parça eklenerek daha homojen filmlerin elde edilmesi sağlanabilir. Bu durumda teknik, Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) tekniği olarak adlandırılır.



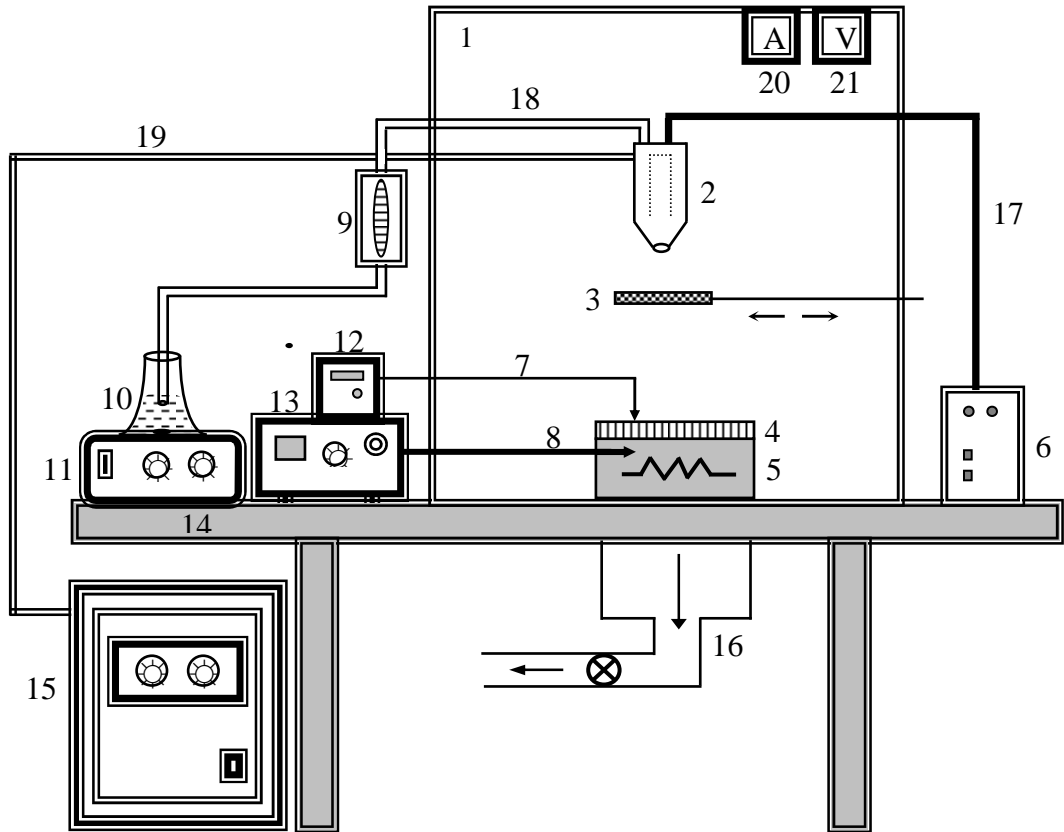
Şekil 3.1. Püskürtme başlığından çözelti akışının şematik diyagramı (Arabacı, 2001).

UKP tekniği diğer birçok film hazırlama tekniklerinden farklı olarak, hem uygulanabilirlik olarak basit hem de malzeme fiyatları açısından maliyeti düşük olan bir tekniktir. UKP tekniği, yüksek kalitede taban veya kimyasal gerektirmez. Bu çok yönlü teknik kullanılarak çok tabakalı filmleri bile hazırlamak mümkündür (Perednis, et al., 2004). Özellikle, oksitli film yapımında, ikili ve üçlü gruplardan oluşan filmlerde ve Cu içeren filmlerin elde edilmesinde kullanılır. Aynı zamanda son yıllarda süperiletken ince film yapımında bu teknik başarıyla uygulanmaktadır (Kılınç, 2006). Püskürtme tekniği uzunca bir süre cam endüstrisinde ve güneş pili yapımında kullanılmıştır.

Bu teknikte üretim parametreleri ve ön hazırlıklar, filmlerin oluşumlarını ve özelliklerini fazlasıyla etkilemektedir. Örneğin taban sıcaklığı, püskürtülen çözelti miktarı, püskürtme süresi, taşıyıcı gazın miktarı, çözelti derişimi gibi parametrelerin yanında, filmlerin çöktürüldüğü taban yüzeylerinin temiz olması bile atomik düzen ve filmlerin büyümesi üzerinde oldukça etkilidir. Alt tabanların yüzey sıcaklıkları; filmin yüzeyinin pürüzlenmesi, çatlama, parçalanması ve kristalleşmesi gibi özelliklerini

etkilerken, film oluşumu için kullanılan başlangıç çözeltisi filmin yapısı ve saflığı üzerinde doğrudan etkilidir (Kılınç, 2006).

UKP tekniğinde deneysel düzeneğin ana parçasını kapalı kutu şeklinde olan püskürtme odası oluşturmaktadır. Odanın kapalı kutu şeklinde yapılmasının iki nedeni vardır. Birincisi püskürtme anında açığa çıkan zehirli gazlardan korunmak, ikincisi oda içerisinde sürekli simetrik bir hava akışı sağlamaktır. Sistemde püskürtme odasının hacim merkezine yakın düşey eksen doğrultusunda yükseklik ayarlaması yapılabilen bir püskürtme başlığı bulunmaktadır. Püskürtme çözeltisinin akışı bir flowmetre (akış hızı ölçer) ile ölçülmektedir.



Şekil 3.2. UKP sisteminin şematik diyagramı.

Şekil 3.2’de UKP sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Bu şematik diyagramda (1) püskürtme odacığı, (2) ultrasonik püskürtme başlığı, (3) hareketli tava, (4) cam tabanlar, (5) gömme rezistanslı bronz blok, (6) osilatör, (7) 1. termoçift, (8) 2. termoçift, (9) akış hızı ölçer, (10) çözelti kabı, (11) ısıtıcı-magnetik karıştırıcı, (12) yüzey sıcaklık göstergesi, (13) gömme rezistanslı bronz bloğun ısı kontrol edici düzeneğı, (14) masa, (15) kompresör, (16) fan, (17) osilatör kablosu, (18) çözelti akış hortumu, (19) hava hortumu, (20) ac ampermetre ve (21) ac voltmetreyi göstermektedir.

Bu yöntemle üretilen filmlerin fiziksel özellikleri taban sıcaklığına önemli ölçüde bağlıdır. Taban sıcaklığının düşük ya da yüksek olması, filmlerin tabana tutunmasını, kalınlıklarını ve dolayısıyla fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük taban sıcaklığı filmlerin kalın olmasına ve yüksek taban sıcaklığı ise filmlerin daha ince olmasına sebep olmaktadır. Taban sıcaklığı, termoçiftin çıkışına dijital gösterge bağlanarak direkt olarak okunmaktadır. Termoçift ile taban arasında çok az miktarda indiyum konularak ısıl iletim sağlanmaktadır.

Püskürtme çözeltisinde kullanılan bileşikler, büyütülen filmlerin fiziksel özelliklerini belirleyen en önemli etkenlerden biridir (Chamberlin, 1966). Bir diğer önemli etken de püskürtme basıncıdır (Pamplin, 1979). Küçük püskürtme basınçlarında elde edilen tabakaların kristalleşmesi daha kolay olurken tabakalarda daha büyük boşluklar oluşmaktadır. Bu nedenle filmlerin kalitesi düşmektedir. Çok yüksek püskürtme basınçları da filmlerin kalitesini düşürmektedir (Polat, 1982).

Genelde bir taban üzerine kaplanan ince filmler, optik ve elektronik alanda ileri teknoloji malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, güneş pili üretiminde kullanılabilecek birçok yarıiletken ince film malzemenin düşük maliyetlerde cam, metal gibi tabanlar üzerinde cm^2 mertebesinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir. Bu açıdan bakıldığında UKP tekniğı bu amaca da hizmet etmektedir.

3.3. CdO Filmlerinin Elde Edilmesi

CdO filmleri 300 ± 5 °C taban sıcaklığında mikroskop cam tabanlar üzerine UKP tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Filmlerin üretilmesi için Cd, O ve F elementlerini içeren kimyasal maddelerin çözeltileri deiyonize su kullanılarak hazırlanmıştır. Cd ve O kaynağı olarak kadmiyum asetat [$\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.1 M] ve F kaynağı olarak amonyum florür [NH_4F , 0.1 M] kimyasallarının sulu çözeltileri kullanılmıştır. Başlangıç püskürtme çözelti miktarı toplam 150 ml olarak hazırlanmış ve tüm filmler için sabit tutulmuştur. Püskürtme çözeltisi, oluşabilecek tortulanmaları önlemek amacıyla, hem üretim öncesinde hem de üretim esnasında magnetik karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırılmıştır. Püskürtme işlemi ultrasonik püskürtme başlığı ile yapılmıştır. Ultrasonik titreşim frekansı 100 kHz ve ortalama damlacık boyutu $20 \mu\text{m}$ 'dir.

Başlangıç püskürtme çözeltisi, 1 bar basınçlı hava (kompresör) yardımı ile yaklaşık olarak 30 dk süre ile püskürtülmüştür. Püskürtme hızı 5 ml.dk^{-1} olarak belirlenmiş ve akış hızı ölçer ile kontrol edilmiştir. Böylece püskürtülen çözelti miktarı 150 ml olmuştur.

Taban sıcaklığı elektrik ısıtıcısı ile sağlanmış ve demir-konstantan termoçift yardımı ile sıcaklık göstergesinden direkt olarak okunmuştur. Taban olarak kullanılan mikroskop camları ve püskürtme başlığı arası mesafe ~ 35 cm olarak sabitlenmiş ve tüm filmler için çözeltiler aynı mesafeden püskürtülmüştür. Üretim tamamlandıktan sonra filmler, püskürtme odası içinde 8-10 saat soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra filmler, ölçümler için saklama kapları içinde muhafaza edilmiştir.

CdO filmleri içine %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında F elementi katılanmıştır. Bu katkı oranları, başlangıç püskürtme çözeltisi içindeki F elementi miktarını göstermektedir. Üretim parametreleri ve film kodları Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. CdO:F filmlerinin üretim parametreleri.

Materyal	CdO:F
Katkı Miktarı	%1, %2, %3, %4, %5
Kullanılan Çözeltiler	Cd(CH ₃ COO) ₂ .2H ₂ O ve NH ₄ F
Çözelti Molaritesi	0.1 M
Taban Sıcaklığı	300±5 °C
Püskürtme Hızı	~ 5 cc/dk
Püskürtme Zamanı	~ 30 dk
Taşıyıcı Gaz	Basıncılı hava (1 bar)
Toplam Çözelti Miktarı	150 cc

Çizelge 3.3. Üretilen filmlerin kodları.

Materyal	Kodu
CdO	CF0
CdO:F (%1)	CF1
CdO:F (%2)	CF2
CdO:F (%3)	CF3
CdO:F (%4)	CF4
CdO:F (%5)	CF5

3.4 Yapılan Analizler ve Kullanılan Ölçüm Cihazları

Teknolojik uygulamalarda kullanılacak olan yarıiletken ince filmlerin basit ve ekonomik tekniklerle üretilmelerinin yanında fiziksel özelliklerinin bilinmesi ve iyi analiz edilmesi de oldukça önemlidir. Bu amaçla basit ve ekonomik bir teknik olan UKP tekniği ile üretilen katkısız ve F katkılı CdO filmlerinin özelliklerini incelemek için aşağıda verilen ölçüm cihazları kullanılmıştır.

Üretilen tüm filmlerin kalınlıklarını ve optik özelliklerini belirlemek için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü Araştırma Laboratuvarında bulunan “PHE 102 Spektroskopik Elipsometre” ve Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Araştırma Laboratuvarında bulunan “Shimadzu SolidSpec-3700 UV-VIS-NIR Spectrophotometer” cihazları kullanılmıştır. Belirtilen cihazların fotoğrafları sırası ile

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de verilmektedir. Tüm filmlerin kalınlıkları (d), Ψ parametreleri, kırılma indisleri (n) ve sönüm katsayıları (k) 250–2300 nm ölçüm aralıklı “PHE 102 Spektroskopik Elipsometre” cihazı; geçirgenlik (T), absorpsiyon (A) ve yansımaya (R) spektrumları ise 150-3300 nm ölçüm aralıklı “Shimadzu SolidSpec-3700 UV-VIS-NIR Spectrophotometer” cihazı kullanılarak alınmıştır. Ayrıca optik metot ile tüm filmlerin yasak enerji aralıkları (E_g) belirlenmiştir.

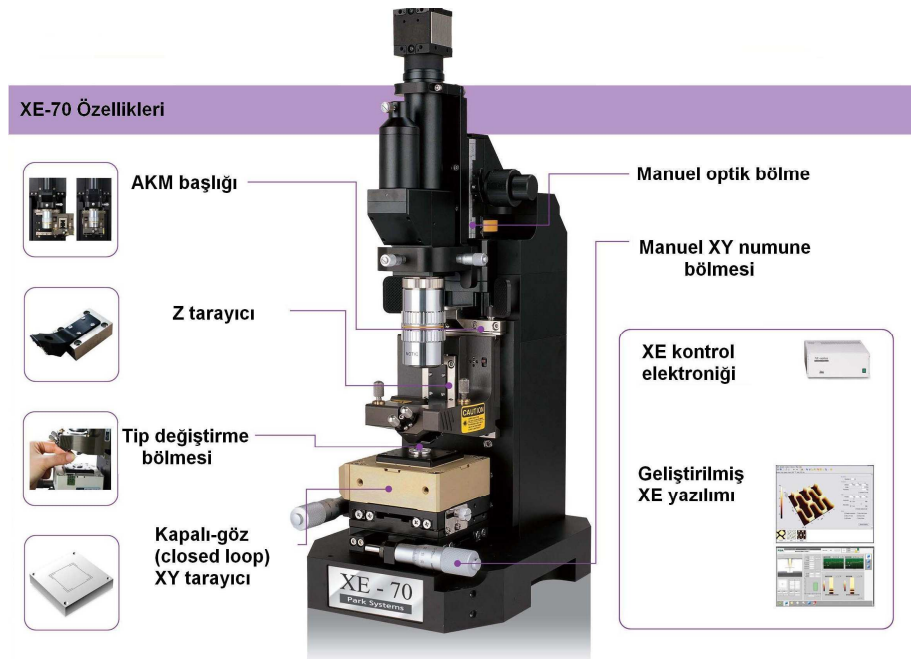


Şekil 3.3. PHE 102 Spektroskopik Elipsometre cihazının fotoğrafı.



Şekil 3.4. Shimadzu SolidSpec-3700 UV-VIS-NIR Spectrophotometer cihazının fotoğrafı.

Üretilen filmlerin topografi ve faz görüntüleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.5’de verilen “Park System XE 70 model” Atomik kuvvet mikroskobu (AKM) ile “non-contact” modda yaklaşık 300 kHz titreşim frekansında ve 0.55 Hz tarama hızında, hava ortamında, oda sıcaklığında alınmıştır. Yay ve uç Si’den yapılmıştır ve yay sabiti 40 N/m’dir. Ayrıca rms (R_q), ortalama (R_a) ve pik-vadi (R_{pv}) pürüzlülük değerleri “XEI version 1.7.1” yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Tüm filmler için görüntüler $2.5 \times 2.5 \mu m^2$ alanlı bölgeler taranarak alınmıştır ve pürüzlülük değerleri de tüm taranan bölge üzerinden belirlenmiştir.



Şekil 3.5. XE-70 Atomik Kuvvet Mikroskobu

Filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için XRD desenleri Rigaku X-Ray Diffractometer cihazında $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ dalga boyulu CuK_α ışını kullanılarak toz metodu ile $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ aralığında alınmıştır. Bu desenler yardımı ile filmlerin kristalleşme seviyeleri araştırılmış ve bazı yapısal parametreler hesaplanarak filmlerin yapısal özellikleri analiz edilmiştir. Bu amaçla, XRD desenlerinden alınan kırınım açısı (2θ), düzlemler arası mesafe (d) ve yarı pik genişliği (β) değerleri kullanılarak; örgü sabitleri (a , b , c), tane boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ), makro gerilmeler $\langle e \rangle$ ve yapılanma katsayısı (TC) değerleri hesaplanmış ve bu değerler yardımıyla yapısal özellikleri açıklanmaya çalışılmıştır.

CdO:F filmlerinin uygulanan voltaja bağlı olarak iletim mekanizmalarını ve elektriksel iletkenliklerini belirlemek için Şekil 2.13'de verilen sistem kullanılmıştır. Tüm filmler için kontak uzunluğu $\sim 0,1 \text{ mm}$ ve iki kontak arasındaki uzaklık $\sim 3 \text{ mm}$ olarak ayarlanmıştır. Oda sıcaklığında ve karanlıkta "Model 3521 Dual Power Supply" güç kaynağı ve "Thurlby 1503 digital multimeter" cihazları kullanılarak akım-voltaj

(I-V) ölçümleri alınmış ve logaritmik skalada I-V karakteristikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden üretilen filmlerin iletim mekanizmaları incelenmiş, iki uç metodu ile elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.

4. CdO:F FİLMLERİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

4.1. Giriş

Yarıiletken filmlerin, teknolojik uygulamalar için uygun olup olmadıklarını belirleyen fiziksel parametreleridir. CdO yarıiletken malzemesinin pek çok teknolojik alanda kullanımı mevcuttur. Bu çalışmada CdO:F filmlerinin özellikle fotovoltaik güneş pillerinde saydam ön kontak malzemeler olarak kullanılabilirlikleri araştırılmıştır ve bu bölümde elde edilen katkısız ve F katkılı CdO filmlerinin yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

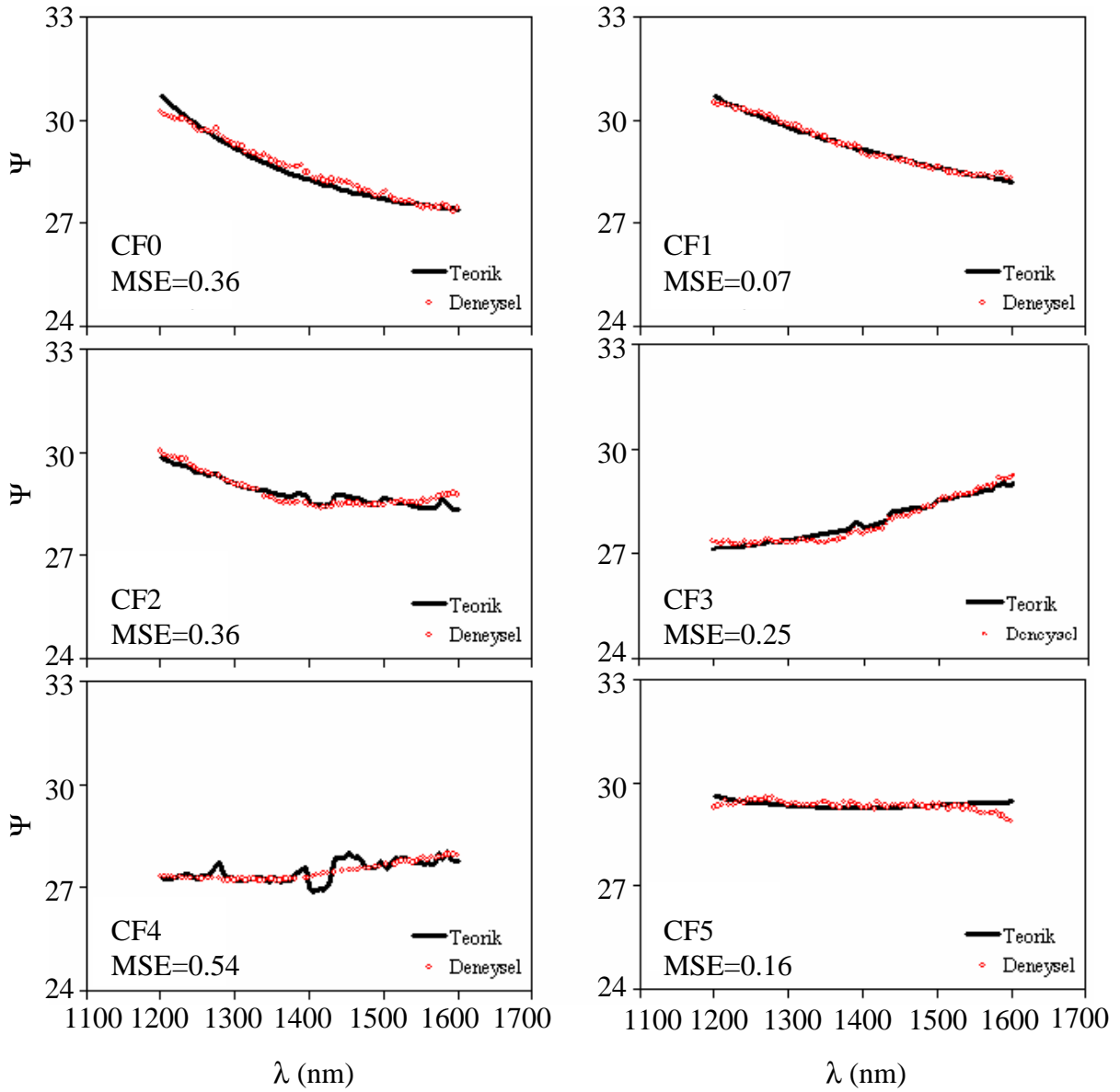
4.2. CdO:F Filmlerinin Kalınlıkları

Yarıiletken malzemelerin gerek güneş pillerinde gerekse opto-elektronik cihazlarda yüksek verimlilikle kullanılabilmesi için, bu malzemelerin uygun elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özelliklere sahip olması gerekir. Üretilen yarıiletken filmlerin kalınlıkları ise malzemenin belirtilen özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Böylece kalınlık da teknolojik cihazların verimliliği üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Örneğin optiksel özellikleri uygun seçilen bir yarıiletken malzemede milimetrenin binde biri kadar (μm) bir kalınlık içerisinde güneş ışınlarının tümüne yakın bir kısmı soğurulabilir. Dolayısıyla fotovoltaik güneş pillerinde ve opto-elektronik cihazlarda kullanım potansiyeli olan yarıiletken malzemelerin kalınlıklarının hassas bir şekilde belirlenmesi gerekir (<http://w3.gazi.edu.tr/~enyilmaz//fotovoltai%20piller.pdf>). Elde edilen filmlerin kalınlıklarını belirlemek oldukça önemli ve hassas bir süreçtir.

Bu çalışmada üretilen CdO:F filmlerinin kalınlıklarını belirlemek için spektroskopik elipsometre cihazı kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, Cauchy-Urbach modeli soğurma katsayısının küçük olduğu bölgelerde sağlıklı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, her numune için soğurma katsayısının düşük olduğu uygun ve standart bir aralık, filmlerin soğurma ve geçirgenlik spektrumları göz önüne alınarak, 1200–1600 nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca depolarizasyon etkisi olan numunelerin elipsometrik 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 duyarlılıkla tayin etmek için önce malzeme üzerine farklı gelme açılarında (50°, 55°, 60°, 65°, 70° ve 75°) 1200–1600 nm dalga boyu aralığında polarize ışık gönderilerek Ψ spektrumları alınmıştır. Bu spektrumlar incelenerek F katkılı CdO filmleri için en uygun gelme açısı 75° olarak belirlenmiştir. Daha sonra en uygun gelme açısı için deneysel olarak ölçülen spektroskopik Ψ değerlerinin, Cauchy-Urbach modeli kullanılarak teorik olarak belirlenen Ψ değerleri ile en iyi uyumu sağlanarak (fitting) tüm filmlerin kalınlıkları hassas bir şekilde belirlenmiştir.

CdO:F filmlerinin Ψ parametreleri için 1200-1600 nm dalga boyu aralığında ölçülen spektroskopik elipsometri verileri ve Cauchy-Urbach modeli kullanılarak teorik olarak belirlenen Ψ değerleri Şekil 4.1'de verilmektedir. Tüm filmlerin Ψ spektrumlarından, teorik model ve deneysel veri arasındaki uyumun iyi ve MSE değerlerinin küçük olduğu görülmektedir. Ancak deneysel ve teorik Ψ değerlerinde bazı sapmalar da göze çarpmaktadır. Yansıma olayında çok önemli olan yüzey etkisi, üretilen CdO:F filmlerinin pürüzlü yüzeylere sahip olmalarından dolayı elipsometrik Ψ değerlerinde sapmalara neden olabilir. UKP tekniği ile üretilen filmler tam olarak düzgün ve homojen olarak elde edilememektedir ve yüzey pürüzlülükleri yüksektir. Bundan dolayı Ψ değerlerindeki sapmaların; filmlerin üretilmesinde kullanılan üretim tekniğinden, yüzeylerindeki pürüzlülüğten, yüzey etkilerinden, tane sınırlarından ve yüzey morfolojilerinden kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz. Ayrıca, filmlerin bant aralığının altındaki enerjilerde gelen fotonlar için, filmlerin pürüzlü yüzeyleri, tane sınırları ve morfolojileri gelen ışığın yansımalarını etkilemektedir. Daha açık olarak

numuneden yansıyan ışığın polarizasyon durumunda değişikliğe sebep olmaktadır 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 tabanlardan geri yansımalar da deneysel Ψ değerlerinde sapmalara neden olur. Deneysel ve teorik Ψ değerlerinin analizi sonucunda tüm filmlerin kalınlıkları hassas olarak belirlenmiştir. Filmlerin kalınlıkları (d) ile modelleme parametreleri Çizelge 4.1.' de verilmektedir.



Şekil 4.1. CdO:F filmlerinin deneysel ve teorik Ψ spektrumları.

Çizelge 4.1. CdO:F filmlerinin kalınlıkları (d) ve modelleme parametreleri.

MATERYAL	$d(\text{nm})$	A_n	$B_n (\times 10^{-2})$ $(\text{nm})^2$	$C_n (\times 10^{-2})$ $(\text{nm})^4$	A_k	B_k $(\text{eV})^{-1}$	MSE
CF0	537.88	1.687	-55.2	9.1	0.043	3.59	0.36
CF1	650.56	1.594	-39.8	3.2	0.002	1.55	0.07
CF2	683.64	1.597	-39.8	3.2	0.002	1.55	0.36
CF3	664.69	1.351	20	-0.1	0.033	3.61	0.25
CF4	622.94	1.380	18.3	-3.6	0.031	2.18	0.54
CF5	654.93	1.388	18.9	-0.6	0.034	1.90	0.16

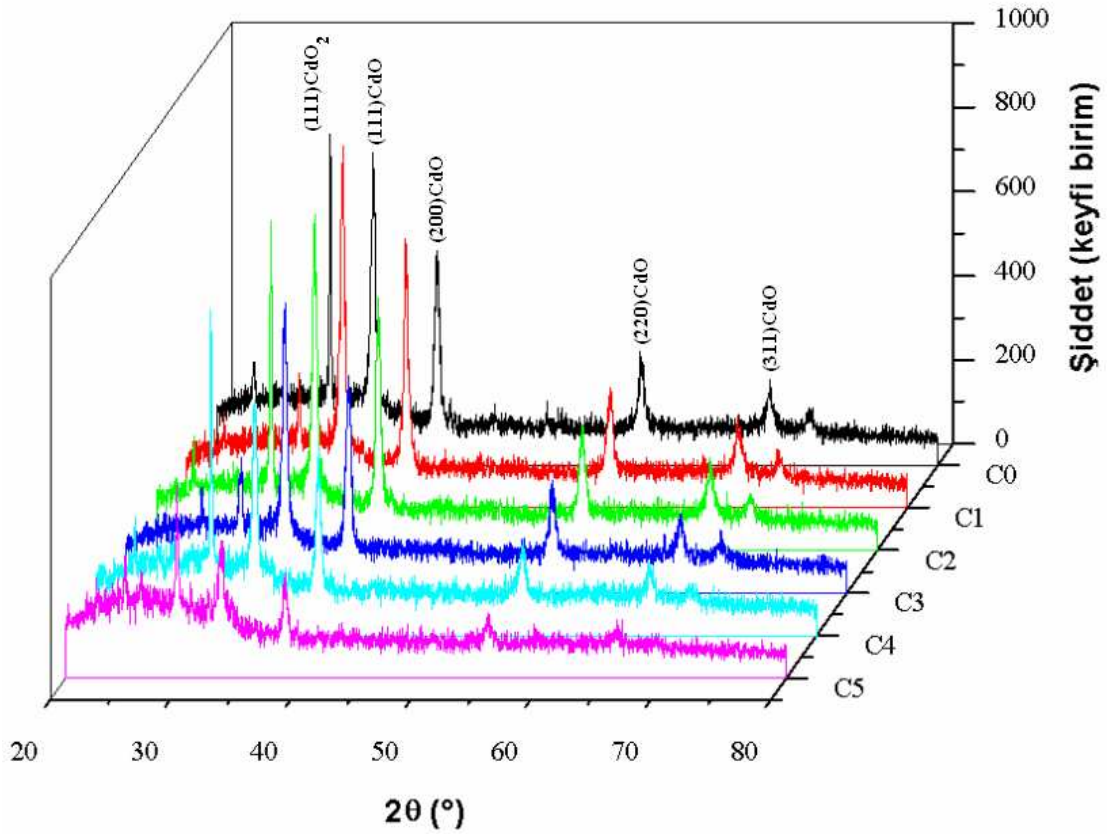
4.3. CdO:F Filmlerinin Yapısal Özellikleri

CdO:F filmlerinin XRD desenleri Şekil 4.2' de ve bu desenler üzerinde görülen farklı piklere ait veriler Çizelge 4.2' de verilmektedir. XRD desenlerinde farklı şiddet ve yarı pik genişliklerine sahip olan pikler tüm filmlerin polikristal yapıda oluştuğunu göstermektedir. Bu desenlerde (111) CdO₂, (111) CdO ve (200) CdO düzlemlerinden olan yansımalara ait üç pik en şiddetli piklerdir. CdO₂ ve CdO fazlarının filmlerin elde edilmesi aşamasında meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucunda oluştuğunu düşünmekteyiz. Ayrıca XRD desenlerinde F elementinin varlığını gösteren bir faza rastlanılmamıştır. Ancak 2θ ve şiddet değerlerinin değişimi, F elementinin yapıya girdiğinin bir göstergesidir.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, katkısız CF0 filmleri (111) CdO₂, (111) CdO ve (200) CdO düzlemlerinden olan yansımalara ait piklerle temsil edilen yönelimler

göstermektedir ve F katkı miktarına bağlı olarak da belirtilen yönelimlere ait piklerin şiddetlerinde ve yarı pik genişliklerinde değişimler mevcuttur. Bu yüzden CdO:F filmlerinde baskın büyüme yönelimlerini belirlemek amacıyla TC yapılanma katsayısı değerleri hesaplanmıştır ve değerler Çizelge 4.2’de verilmektedir. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, CF0 filmleri için TC değeri 1’den büyük olan üç pik olduğu için, bu filmlerde baskın büyüme yönelimleri (111) CdO₂, (111) CdO ve (200) CdO yönelimleri olarak belirlenmiştir. Belirtilen yönelimler %2 F katkılı CF2 filmleri için de geçerlidir. Ancak, %1 ve %3 F katkılı filmlerde ise (111) CdO₂ fazının baskınlığı azalmıştır ve bu filmler iki yönde baskın büyüme göstermiştir. %4 ve %5 F katkılı CdO filmlerinde ise (111) CdO₂ fazı ön plana çıkmakta ve tercihli yönelim olarak görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.3’de CF0 filmlerinde görülen (111) CdO₂ ve (111) CdO baskın yönelimleri için yapılanma katsayılarının F katkı miktarına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Bu şekilden de kararsız CdO₂ fazının F katkısına bağlı olarak düzenli bir değişim göstermediği, CF1 ve CF3 filmlerinde bu fazın baskınlığının önemli derecede azaldığı ve filmlerin daha kararlı yapıda oluştuğu açıkça görülmektedir. F katkısına göre fazların düzensiz değişim göstermesinin, kullandığımız üretim sisteminde film oluşumu esnasında taban üzerinde meydana gelen kimyasal reaksiyonun kontrol edilebilme şansının olmamasından kaynaklandığını söyleyebiliriz. Ancak CF1 ve CF3 filmlerinde baskınlığı oldukça azaltılan kararsız CdO₂ fazının çöktürme sonrası işlemlerle giderilebileceğini ve böylece daha kararlı filmlerin elde edilebileceğini düşünmekteyiz.

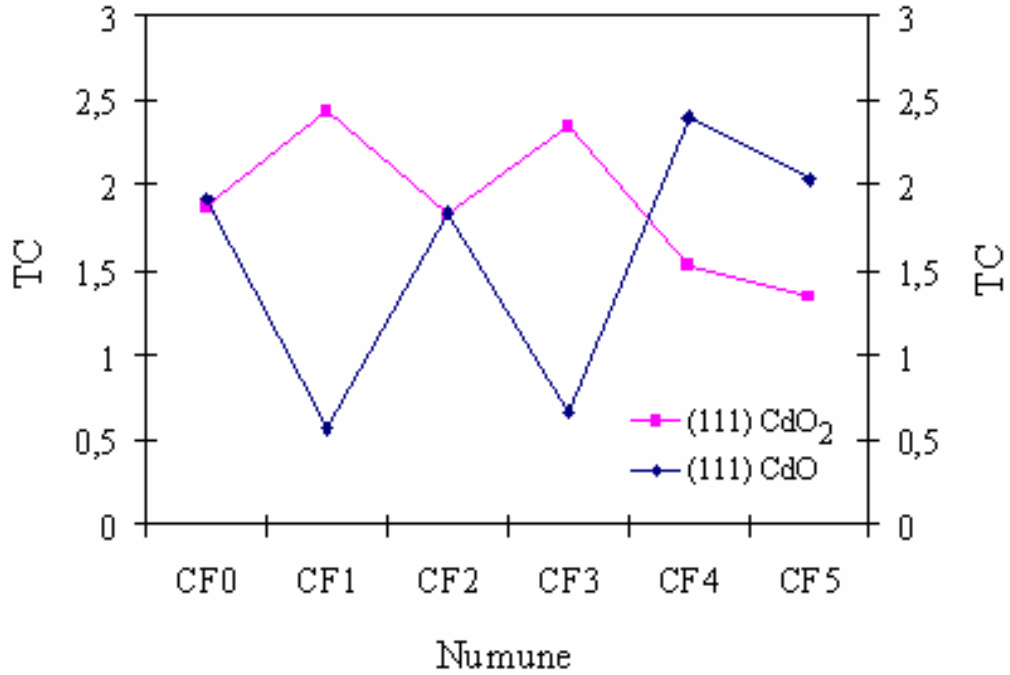
CdO filmlerinin kırınım desenleri üzerindeki piklerin şiddetli ve dar yarı pik genişlikli olması filmlerin kristalleşme düzeylerinin iyi olduğunu göstermektedir. %1, %2 ve %4 F katkılı filmler için pik şiddetlerinde ve yarı pik genişliklerinde önemli bir değişimin olmadığını söyleyebiliriz. Fakat %3 ve %5 F katkılı filmler için pik şiddetlerinde küçük de olsa bir azalmanın olduğunu ve bu katkı oranları için kristalleşme düzeylerinin biraz kötüleştiğini (özellikle de %5 F katkısı için) söylemek mümkündür.



Şekil 4.2. CdO:F filmlerinin XRD desenleri.

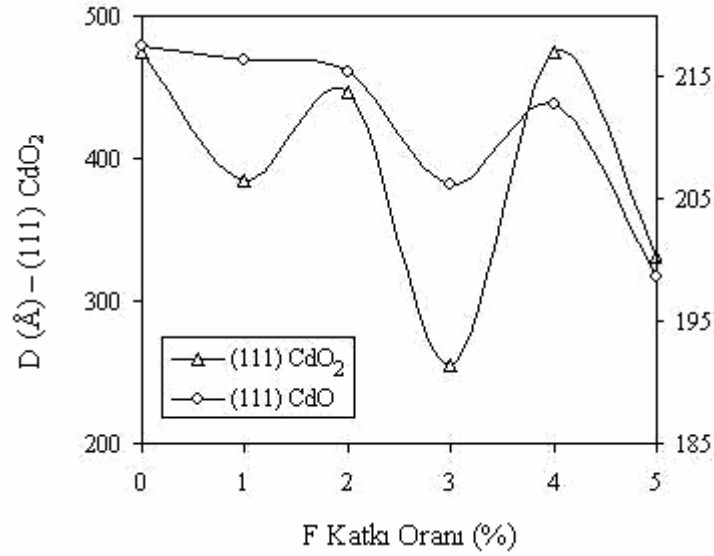
Çizelge 4.2. CdO:F filmlerinin XRD desenlerinden elde edilen veriler.

Numune	2 θ (°)	d (Å)	I/I ₀	(hkl)	Faz	TC	B $\times 10^{-3}$ (radyan)	D (Å)
CF0	29.42	3.034	100.00	(111)	CdO ₂ Küb.	1.93	3.16	474.19
	32.99	2.712	96.70	(111)	CdO Küb.	1.87	6.94	217.54
	38.34	2.346	67.20	(200)	CdO Küb.	1.30	7.12	215.41
	55.32	1.659	24.90	(220)	CdO Küb.	0.48	7.92	206.45
	66.00	1.414	15.10	(311)	CdO Küb.	0.29	10.40	165.80
CF1	29.38	3.038	22.80	(111)	CdO ₂ Küb.	0.56	3.89	384.85
	32.98	2.714	100.00	(111)	CdO Küb.	2.44	6.98	216.44
	38.28	2.349	77.70	(200)	CdO Küb.	1.89	7.52	203.88
	55.32	1.659	28.00	(220)	CdO Küb.	0.68	8.44	193.65
	66.10	1.412	13.00	(311)	CdO Küb.	0.32	8.91	193.82
CF2	29.52	3.023	100.00	(111)	CdO ₂ Küb.	1.84	3.35	447.13
	33.16	2.699	99.70	(111)	CdO Küb.	1.83	7.01	215.46
	38.50	2.336	71.70	(200)	CdO Küb.	1.32	7.38	207.88
	55.52	1.654	30.00	(220)	CdO Küb.	0.55	8.41	194.63
	66.10	1.412	19.40	(311)	CdO Küb.	0.36	8.62	200.49
CF3	29.56	3.020	28.20	(111)	CdO ₂ Küb.	0.66	5.86	255.52
	33.22	2.695	100.00	(111)	CdO Küb.	2.35	7.33	206.26
	38.54	2.334	72.90	(200)	CdO Küb.	1.71	8.50	180.58
	55.40	1.657	29.40	(220)	CdO Küb.	0.69	9.14	178.93
	66.14	1.412	18.80	(311)	CdO Küb.	0.44	8.18	211.22
CF4	29.60	3.016	100.00	(111)	CdO ₂ Küb.	2.40	3.16	474.38
	33.16	2.699	63.70	(111)	CdO Küb.	1.53	7.10	212.82
	38.50	2.336	50.70	(200)	CdO Küb.	1.22	8.08	189.92
	55.58	1.652	19.00	(220)	CdO Küb.	0.46	8.90	183.99
	65.99	1.414	10.10	(311)	CdO Küb.	0.24	9.86	175.19
CF5	29.28	3.048	100.00	(111)	CdO ₂ Küb.	2.04	4.52	331.28
	32.96	2.715	65.50	(111)	CdO Küb.	1.34	7.61	198.56
	38.18	2.355	48.80	(200)	CdO Küb.	0.99	7.50	204.29
	55.54	1.653	12.00	(220)	CdO Küb.	0.25	7.85	208.50
	65.92	1.416	18.80	(311)	CdO Küb.	0.38	6.44	268.14



Şekil 4.3. (111) CdO₂ ve (111) CdO yönelimleri için yapılanma katsayıları.

Scherrer formülü kullanılarak (111) CdO ve (111) CdO₂ pikleri için tane büyüklükleri hesaplanmıştır. Şekil 4.4, belirtilen pikler için tane büyüklüklerinin F katkı oranına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Her iki pik için de hesaplanan tane büyüklüklerinde F katkı oranına bağlı olarak düzenli bir artışın ya da azalışın olmadığı görülmektedir. %3 ve %5 F katkılı filmler için tane boyutlarının küçülmesi yüzeysel kusur olarak davranan tane sınırlarının artması anlamına geldiğinden, bu katkı oranlarında üretilen filmlerin kristalleşme seviyelerinin kötüleştiğinin söyleyebiliriz. Bu durum Şekil 4.2’de verilen XRD desenlerinden de açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.2 ve Şekil 4.4 birlikte değerlendirildiğinde, kararsız CdO₂ fazının önemli derecede baskınlığını kaybetmesinden ve (111) CdO piki için tane boyutunun büyük olmasından dolayı %1 F katkı oranının yapısal özellikleri iyileştirme açısından en uygun katkı oranı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.4. CdO:F filmleri için tane büyüklükleri.

Üretilen tüm filmler için en yüksek TC değerine sahip yönelimler için örgü sabitleri hesaplanmış ve ASTM kartlarında (ASTM kart no: 039-1221 ve 005-0640) verilen değerler ile kıyaslanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.3.' de verilmektedir. Bu çizelgeden değerlerin hemen hemen uyum içinde oldukları söylenebilir.

Çizelge 4.3. CdO:F filmlerinin baskın yönelimleri ve örgü sabitleri.

Materyal	Baskın Yönelim	Hesaplanan a=b=c (Å)	ASTM a=b=c (Å)
CF0	(111) CdO ₂	5.254	5.313
CF1	(111) CdO	4.700	4.695
CF2	(111) CdO ₂	5.237	5.313
CF3	(111) CdO	4.667	4.695
CF4	(111) CdO ₂	5.223	5.313
CF5	(111) CdO ₂	5.279	5.313

Bir kristalde düzlemlerin hatalı dizilmesi sonucunda oluşan ve çizgisel kusur olarak davranan dislokasyonlar da oluşabilir. Dislokasyon yoğunluğu (δ), kristalin birim hacmindeki dislokasyon çizgilerinin uzunluğunu temsil eder. Küçük δ değeri filmlerin kristalleşmelerinin iyi olduğu anlamına gelir. Ayrıca bir kristalde piklerin pozisyonlarında kaymalar olduğunu gösteren makrogerilmeler ($\langle e \rangle$) de meydana gelebilir. Küçük makrogerilme değerleri kristalde deformasyonun az olduğunu bir göstergesidir. Çizelge 4.4'de filmlerin en yüksek TC değerine sahip yönelimlerine ait dislokasyon ve makrogerilme değerleri verilmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde %1 ve %3 oranlarında F katkısı ile dislokasyon yoğunluğu değerlerinde bir azalma olduğu göze çarpmaktadır. Bu durumun belirtilen katkı oranlarında kararsız CdO₂ fazının etkisini önemli derecede kaybetmesinden kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz. Ayrıca %1 F katkı oranının çizgisel kusurları azaltma yönünde olumlu bir etki yaratması da, bu katkı oranının en uygun katkı oranı olabileceği fikrini güçlendirmektedir. Çizelge 4.4'de verilen $\langle e \rangle$ makrogerilme değerleri incelendiğinde, ilk olarak pozitif ve negatif değerler göze çarpmaktadır. Makrogerilme değerinin pozitif olması örgü düzlemlerinin deformasyon olmayan duruma göre genişlediğini, negatif olması ise sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını gösterir. Ayrıca makrogerilme değerinin küçük olması piklerin pozisyonlarındaki kaymaların küçük olduğunu yani kusurların ve deformasyonun az olduğunu ifade eder. Buna göre %1 katkı oranı küçük makrogerilme değerine sahip CdO filmlerinin elde edilmesine imkan sağlamıştır.

Çizelge 4.4. CdO:F filmlerinin dislokasyon ve makrogerilme değerleri.

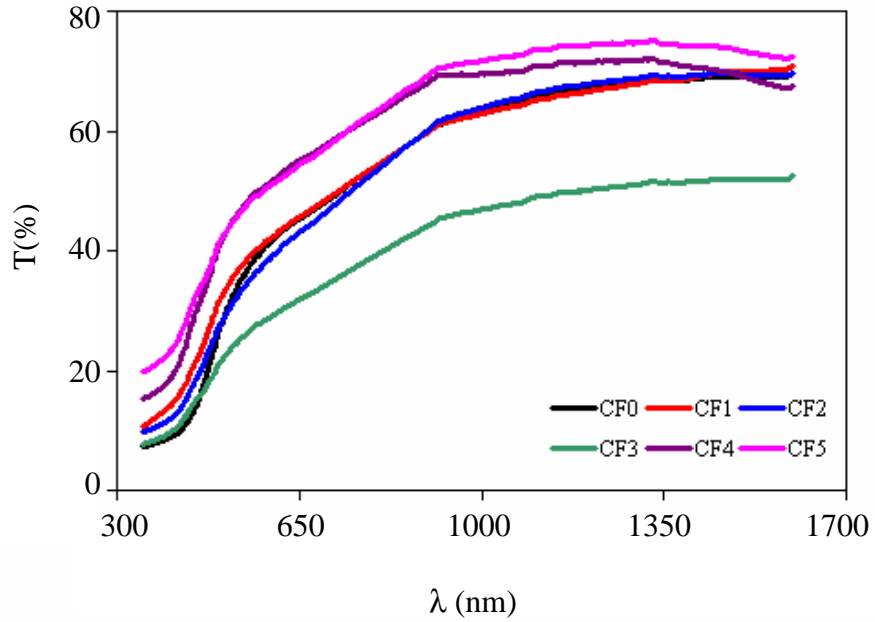
Materyal	Baskın Yönelim	$\delta \times 10^{-6}$ (çizgi/nm ²)	$\langle e \rangle \times 10^{-3}$
CF0	(111) CdO ₂	4.447	-9.144
CF1	(111) CdO	2.134	0.737
CF2	(111) CdO ₂	5.001	-12.000
CF3	(111) CdO	2.350	-6.268
CF4	(111) CdO ₂	4.443	-15.000
CF5	(111) CdO ₂	9.111	-4.572

4.4. CdO:F Filmlerinin Optik Özellikleri

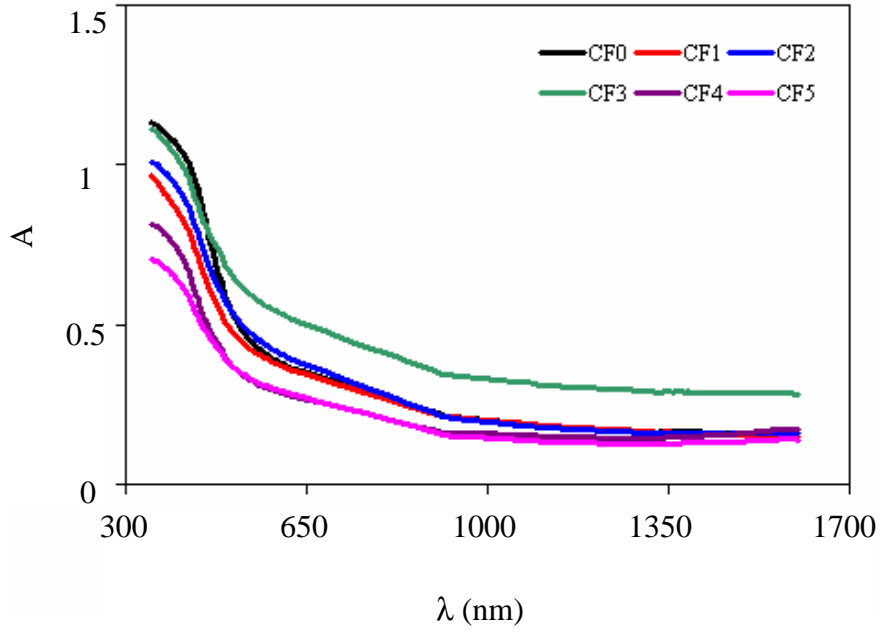
CdO:F filmlerinin geçirgenlik, soğurma ve yansıma spektrumları 350-1600 nm dalgaboyu aralığında UV spektrofotometresi ile alınmış ve kırılma indisi ile sönüm katsayısı spektrumları spektroskopik elipsometre cihazından belirlenmiştir.

CdO:F filmlerinin geçirgenlik spektrumları Şekil 4.5’de verilmektedir. Şekil 4.5’den, ~ 850 nm den daha uzun dalgaboylarında filmlerin geçirgenliklerinin yüksek olduğu, bu dalgaboyundan kısa dalgaboylarında ise hızla azaldığı görülmektedir. Spektrumda ilk dikkati çeken CF3 filmlerinin diğer filmlere nazaran daha düşük geçirgenlik değerlerine sahip olmalarıdır. Bu durumun %3 F katkı oranında numune yapısında daha iyi bir paketlenmenin meydana gelmesinden ve yüzey yapısında “pin hole” (delik) şeklinde boşlukların az olmasından kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz. CF4 ve CF5 filmlerinde ise geçirgenliklerin yüksek olma sebebinin, kristalleşme seviyesindeki düşüş ile birlikte F elementinin yapıda yarattığı deformasyonlarla yarık ve çatlak şeklindeki bölgelerin fazlalaşması olduğunu söyleyebiliriz.

CdO:F filmlerinin soğurma spektrumları Şekil 4.6' da verilmektedir. Soğurması en yüksek filmin CF3 olduğu açıktır. Ayrıca, CF4 ve CF5 filmlerinin yüzeylerinde oluştuğunu düşündüğümüz boşlukların etkisi bu filmlerin soğurma özelliklerini azaltarak kendini göstermiştir. Temel soğurma bölgesinde filmlerin absorbans değerlerindeki değişimin yavaş olması, bant kenarlarındaki bozulmaların bir göstergesi olarak düşünülebilir.



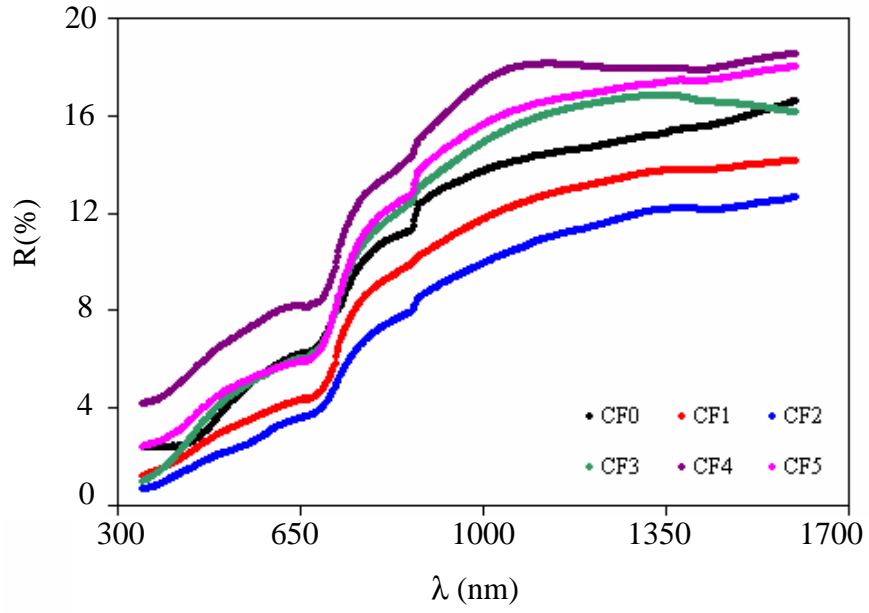
Şekil 4.5. CdO:F filmlerinin geçirgenlik spektrumları.



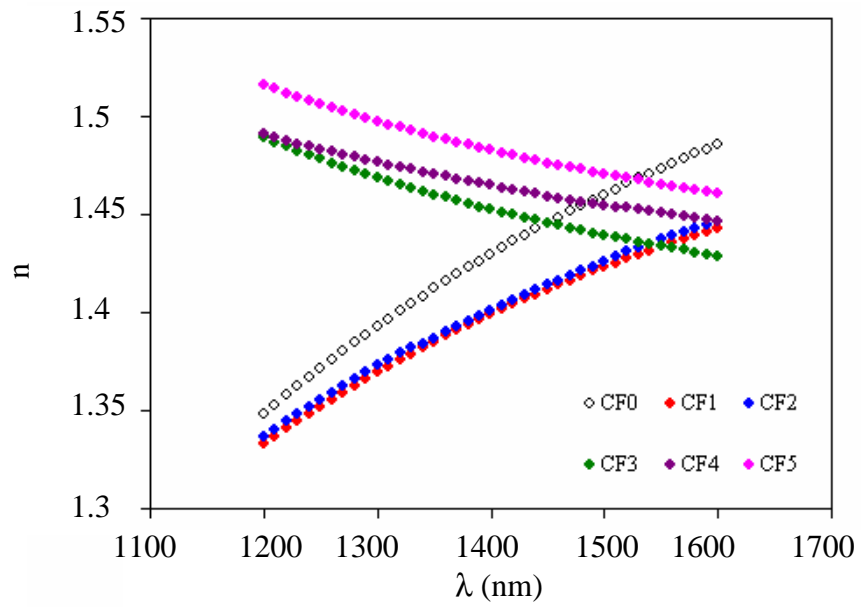
Şekil 4.6. CdO:F filmlerinin soğurma spektrumları.

Şekil 4.7.'de CdO:F filmlerinin yansımaya spektrumları verilmiştir. Yüksek F katkı oranlarında yansımaya değerlerinde bir artma olduğu ve %1 ile %2 F katkılı numuneler için ise yansımaya değerlerinin azaldığı görülmektedir. CF1 ve CF2 filmlerinde yansımaya değerlerinin azalması, güneş pillerinde pencere materyali ya da geçirgen ön kontak olarak kullanılabilir bu filmler için olumlu bir gelişme olarak düşünülebilir.

CdO:F filmlerinin kırılma indisi spektrumları Şekil 4.8'de verilmektedir. Yüksek F katkı oranlarında kırılma indisi değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum CF3, CF4 ve CF5 filmleri için 1200-1600 nm dalgaboyu aralığında normal dispersiyon olayının gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Ancak katkısız, %1 ve %2 F katkılı numunelerde kırılma indisi değerleri artan dalga boyu ile arttığı için, anormal dispersiyon olayı gözlenmektedir. CF0, CF1 ve CF2 filmlerinde gözlenen anormal dispersiyonun sebebi tam olarak anlaşılamamış olup, Çizelge 4.1' de görüldüğü gibi bu filmler için Cauchy parametresi B_n değerinin negatif olarak belirlenmesinden ya da bu filmlerde kararsız bir fazın varlığından kaynaklanabileceğini düşünmekteyiz.

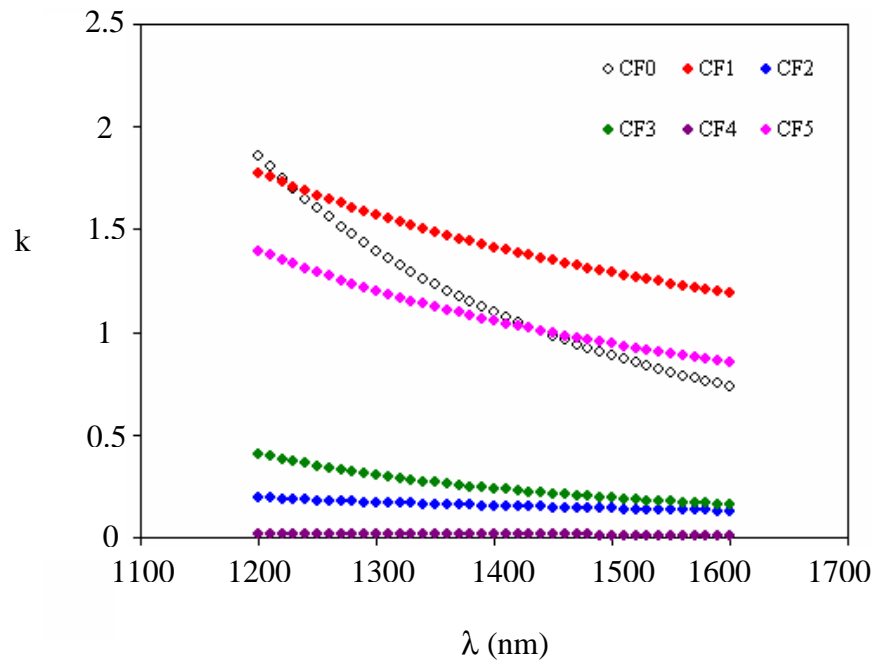


Şekil 4.7. CdO:F filmlerinin yansımaya spektrumları.



Şekil 4.8. CdO:F filmlerinin kırılma indisi spektrumları.

CdO:F filmlerinin sönüm katsayısı spektrumları Şekil 4.9'da verilmektedir. Bu spektrumlardan, CdO:F filmlerinin sönüm katsayısı değerlerinin artan dalgaboyuna bağlı olarak hafif bir şekilde azaldığı ve uzun dalgaboylarında hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Sönüm katsayısı değerleri malzemedeki soğurmanın bir ölçüsü olduğu için, filmlerin düşük soğurma özelliğine sahip olduğu bu dalgaboyu aralığında düşük sönüm katsayısı değerlerine sahip olması beklenen bir durumdur. Ayrıca %2, %3 ve %4 F katkılı CF2, CF3 ve CF4 filmlerinin sönüm katsayısı değerlerinin diğer filmlere nazaran oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.



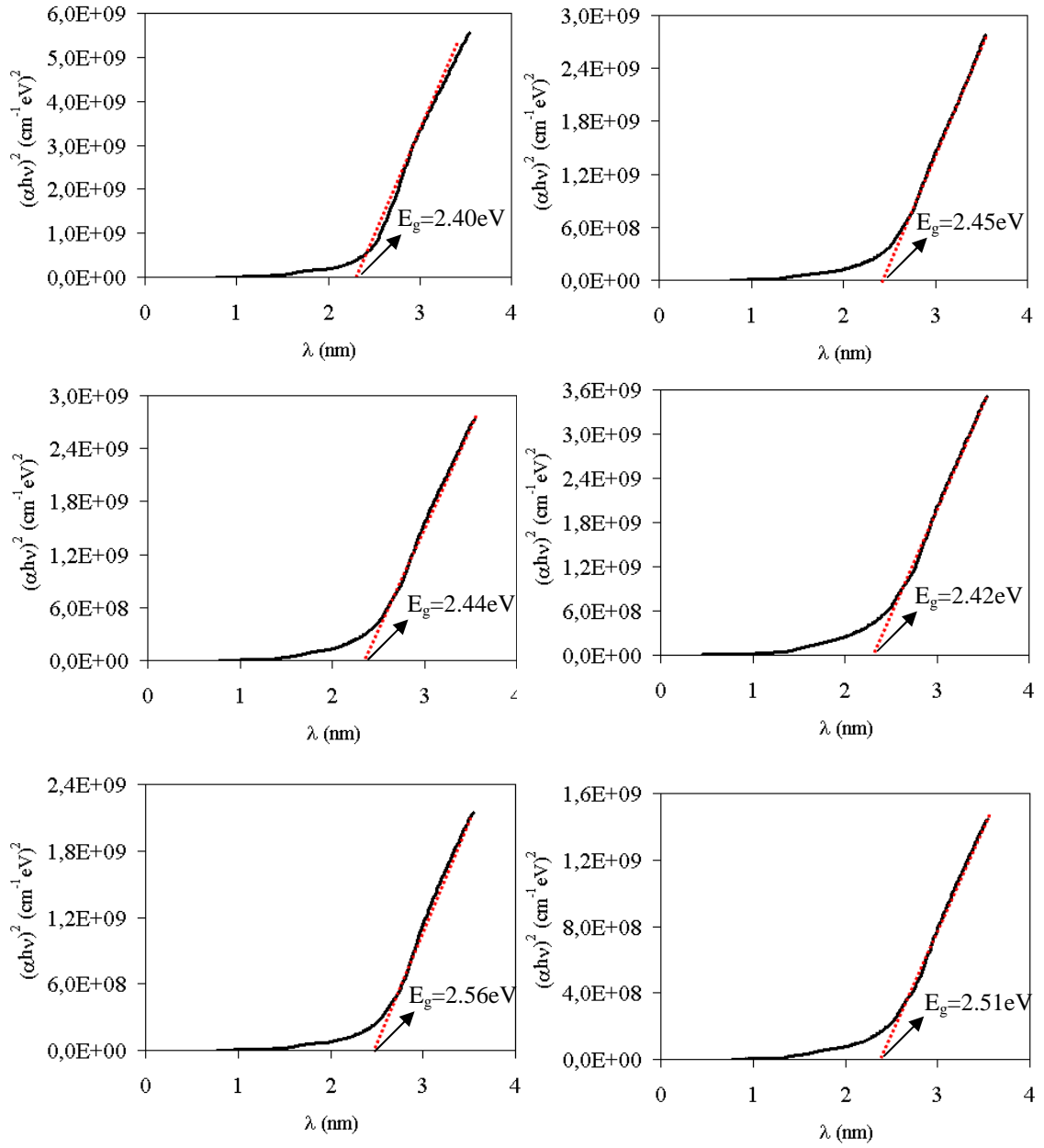
Şekil 4.9. CdO:F filmlerinin sönüm katsayısı spektrumları.

CdO:F filmleri için $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri çizilerek, optik metot ile bant aralığı değerleri hesaplanmıştır. İlgili grafikler Şekil 4.10'da ve bant aralığı değerleri de Çizelge 4.5'de verilmektedir. Şekil 4.10'dan CdO:F filmlerinin direkt bant yapısına sahip oldukları belirlenmiştir ve bu durum fotovoltaik güneş pili uygulamalarında arzu edilen bir özelliktir. Ayrıca Şekil 4.11.'de F katkı oranlarına göre CdO filmlerinin yasak enerji aralıklarının değişim grafiği verilmektedir. Tüm filmler için Çizelge 4.5.

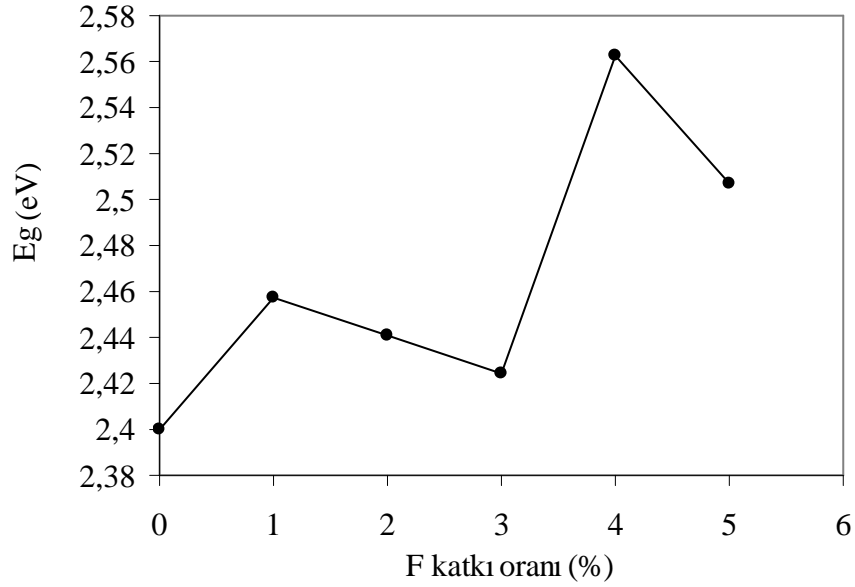
ve Şekil 4.11. incelendiğinde, F katkısı ile filmlerin bant aralığı değerlerinin arttığı görülmektedir. Buradan katkısız CdO filmlerinin katkılı filmlere göre yüksek deformasyona ve bant sarkmalarına sahip olduğu ve bu durumların F katkısı ile iyileştirildiği sonucuna varılmıştır. Üretilen filmlerin çeşitli uygulama alanlarında kullanımlarında katkı elementinin kristal yapıda ve optik bant genişliğinde değişiklik meydana getirmesi önemli hale gelmektedir ve yasak enerji aralığındaki bu değişim güneş pili fabrikasyonu için uygundur (Devshette, et al., 2008). Literatürde pek çok teknikte hazırlanan direkt bant geçişli CdO filmlerinin yasak enerji aralığı değerlerinin 2.2 ile 2.8 eV arasında değiştiği bilinmektedir (Saha, et al., 2007; Santos-Cruz, et al., 2005; Lokhandee, et al., 2004; Subramanyam, et al., 1997; Gurumurugan, et al., 1996; Deokate, et al., 2008).

Çizelge 4.5. CdO:F filmlerinin yasak enerji aralıkları.

Malzeme	E_g (eV)
CF0	2,40
CF1	2,46
CF2	2,44
CF3	2,42
CF4	2,56
CF5	2,51



Şekil 4.10. CdO:F filmlerinin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri.



Şekil 4.11. Yasak enerji aralığının katkı oranlarına göre değişimi.

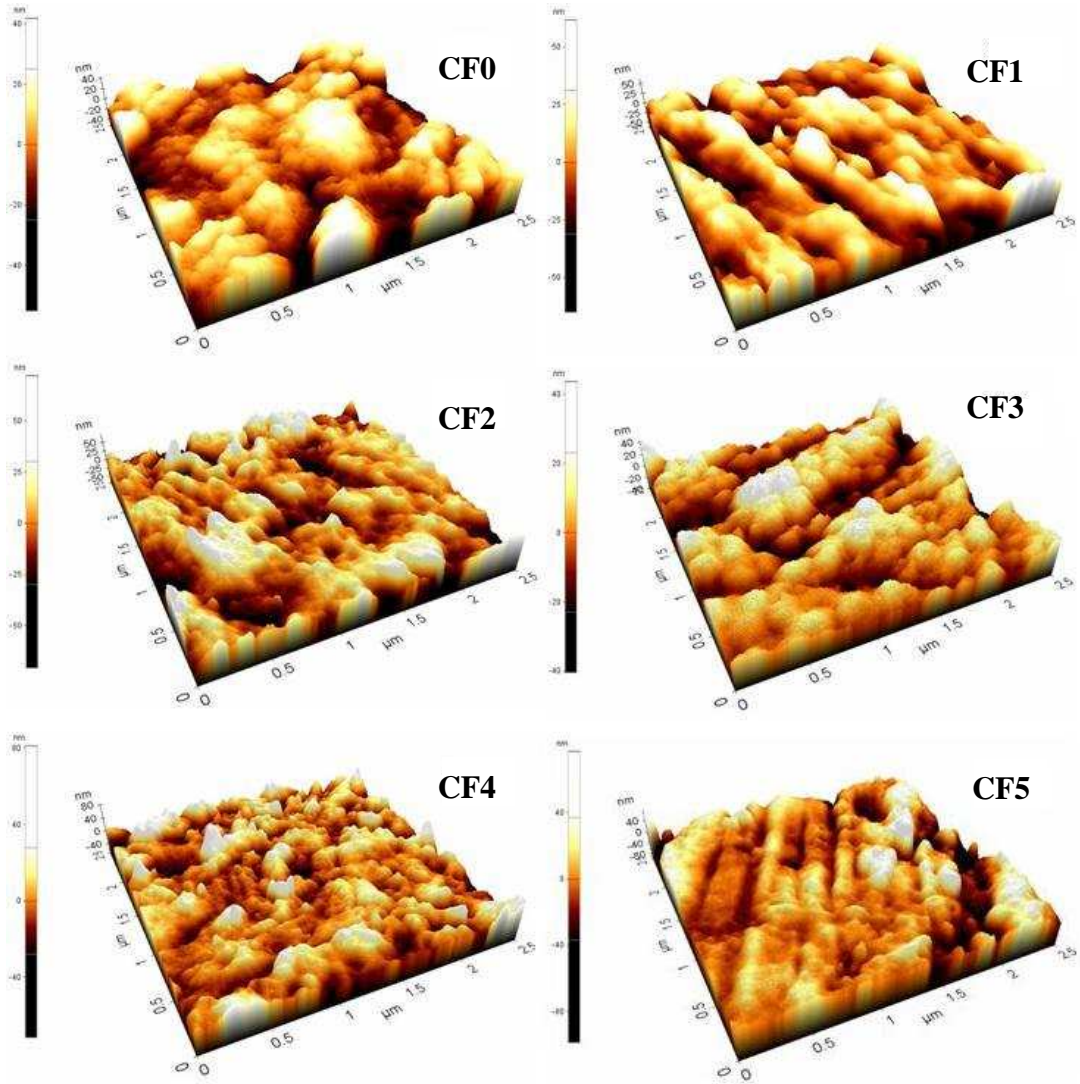
4.5. CdO:F Filmlerinin Yüzeysel Özellikleri

CdO:F filmlerinin yüzey morfolojilerini incelemek ve pürüzlülük değerlerini belirlemek için AKM kullanılmıştır.

CdO:F filmlerinin üç boyutlu AKM görüntüleri Şekil 4.12' de verilmektedir. Bu görüntülerden tanelerin varlığı filmlerin polikristal yapıda olduklarının bir göstergesidir. (Purica, et al., 2000). CF0 filmlerinin AKM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde taneli bir yapının hakim olduğu, ancak bu tanelerin boyutlarının farklılık gösterdiği dikkati çekmektedir. Bu görüntüdeki beyaz bölgeler üst üste yığılma şeklindeki oluşumların bir göstergesidir. Beyaz bölgelerdeki tanelerin boyut olarak diğer tanelere göre büyük olması, film oluşumu esnasında bu bölgelerdeki komşu tanelerin bir araya gelerek daha büyük kümeler oluşturduğu fikrini akla getirmektedir. Yukarıda bahsedilen yorumlar çerçevesinde ve film yüzeylerinde görülen düşük yükseklikteki bölgeler de dikkate alındığında, film oluşum mekanizmasının başlangıçta tabaka tabaka daha sonra ada-tipi

büyüme şeklinde karışık büyüme (mixed growth) olacak şekilde gerçekleştiğini düşünmekteyiz. Ayrıca CF0 filmlerinin AKM görüntüsünden film yüzeyinde tane boşluğu diyebileceğimiz siyah bölgelerin de bulunduğu belirlenmiştir. Bu durumun, yüzeye gelen atomların siyah bölgeleri büyüme merkezi olarak tercih etmemesinden ve yüzeyde difüzyon yoluyla daha büyük atom gruplarının olduğu beyaz bölgelere göç etmesinden kaynaklandığını söyleyebiliriz. 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.

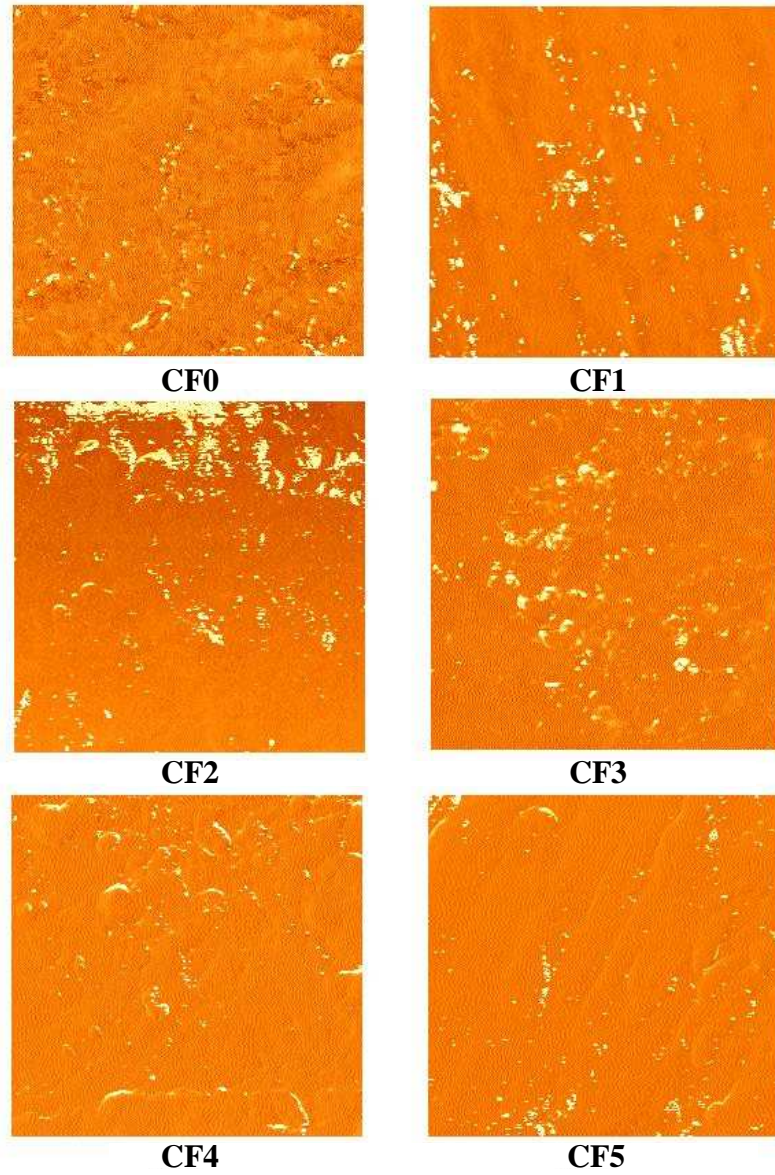
Şekil 4.12' de verilen F katkılı CdO filmlerinin görüntüleri incelendiğinde, %3 F katkılı CF3 filmi hariç diğer filmlerin yüzeylerindeki tane yapılanmasının yüksekliğinde artış gözlenmektedir. F atomlarının ilavesi ile birlikte yığılma şeklindeki bölgelerdeki birikimler artış göstermiştir ve filmler daha çok tane boşluğu içermektedir. CF1 filmi için kanal şeklinde oluşumlar dikkati çekmektedir. CF2 filminde de aynı durum geçerli olmakla birlikte, tane boşluklarının boyut olarak arttığı ve yığılma şeklindeki kusurların tepe benzeri sivri oluşumlar şeklinde kendini gösterdiği belirlenmiştir. CdO filmleri içerisine %4 oranında F katkılanması ile daha küçük ve ayırt edilmesi zor tanelerin oluştuğu ve CF1 ile CF2 filmlerinde olduğu gibi tepe benzeri oluşumların meydana geldiği saptanmıştır. CF5 filmlerinin yüzey görüntüsü incelendiğinde, bu filmlerin diğer filmlerden oldukça farklı bir yüzey topografisine sahip oldukları görülmektedir. Bu filmlerde tanelerin kayda değer derecede azalması ve taneli yapıdan ziyade yüzeyin düz bir oluşum sergilemesi söz konusudur. Bu durum, %5 F katkısının CdO filmlerinin kristalleşme seviyesini ve yapısal özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini gösterir. Bu sonuç X-ışınları verileri ile de uyum içindedir (Şekil 4.3). CF3 filmlerinin AKM görüntüleri incelendiğinde ise ilk dikkati çeken diğer tüm filmlere göre yüzey pürüzlülüğünün azalması ve yüzey yapılanmasının farklı boyutlarda ancak yükseklik olarak hemen hemen homojen dağılım sergileyen ve iyi ayırt edilebilir tanelerden oluşmasıdır. Ayrıca CF3 filmlerinde büyüme mekanizmasının daha çok tabaka tabaka yapılanma şeklinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.12. CdO:F filmlerinin üç boyutlu AKM görüntüleri.

Şekil 4.13' de CdO:F filmlerinin iki boyutlu faz görüntüleri verilmektedir. İki boyutlu faz görüntüleri incelendiğinde genel olarak filmlerin sıkı ve düzgün oluştuğu görülebilmektedir. Ayrıca faz görüntülerinde üretilen filmlerin genelinde bazı bölgelerde bir kontrast dikkat çekmektedir. CF0 filminde kontrast diğer filmlere göre daha azdır. Katkılı filmlerde kontrast yaratan bölgelerin safsızlıklar veya F katkısı ile oluşabilecek Cd ağırlıklı ikincil fazlar olabileceğini düşünmekteyiz. Ayrıca tüm filmler

için beyaz benekler şeklinde görülen bölgeler yüzeyde film oluşumu esnasında çöktürülen yüzey kirliliklerinden, film yüzeyindeki süreksizlikten (tane boşlukları) ve tanelerin yükseklik farkından da kaynaklanabilir. Faz görüntülerine bakıldığında, özellikle CF1, CF4 ve CF5 filmlerinde damar şeklinde bölgeler de dikkat çekmektedir. Bu bölgeler filmlerin topografi görüntülerinde ayırt edilmesi zor olan tane sınırlarının bir göstergesi de olabilir.



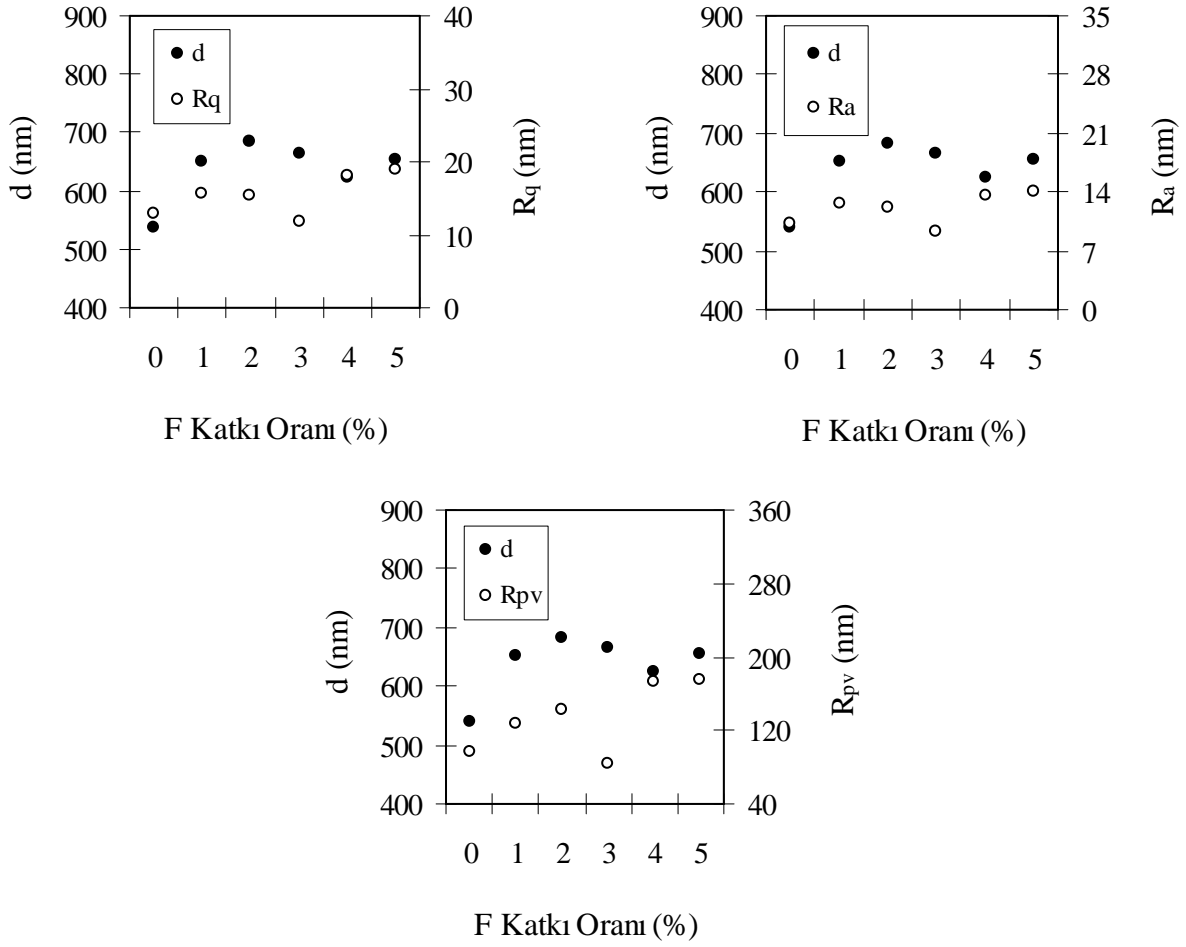
Şekil 4.13. CdO:F filmlerinin iki boyutlu faz görüntüleri.

CdO:F filmlerinin R_q (rms pürüzlülük), R_a (ortalama pürüzlülük) ve R_{pv} (pikvadi pürüzlülük) pürüzlülük değerleri Çizelge 4.6' da ve F katkı oranına göre film kalınlıklarının (d) ve pürüzlülük değerlerinin değişimi Şekil 4.14' de verilmektedir. Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi, R_q pürüzlülük değeri 11.74-18.81 nm arasında, R_a pürüzlülük değeri 9.27-14.15 nm arasında ve R_{pv} pürüzlülük değeri 84.09-175.53 nm arasında değişim göstermektedir. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.14 incelendiğinde, %3 F katkılı CF3 filmi hariç diğer katkılı filmlerde tüm pürüzlülük değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir. Topografi görüntülerinin incelenmesinden de belirlendiği gibi, CF3 filmi hariç diğer filmlerin yüzeylerindeki tane yapılanması yükseklik olarak artma eğilimindedir. Bu durum özellikle R_{pv} pürüzlülük değerlerindeki artış ile de kendini göstermektedir ve CF4 ile CF5 filmleri için oldukça yüksek olan R_{pv} değerleri filmlerde ortaya çıkan yükseklik farkının açık bir göstergesidir. Bu özellik filmlerde yapısal ve yüzeysel kusurlara sebep olabilir. Ancak %3 F katkılı CdO filmi katkısız CdO filmine göre daha düşük R_q , R_a ve R_{pv} pürüzlülük değerlerine sahiptir. Buna dayanarak, CF3 filmlerinin yüzey yapılanması esnasında daha az boşluklara sahip olduğunu, tanelerin yüzeye yükselti olarak daha homojen dağıldığını ve sıkı paketlenmiş tanelerden oluştuğunu söyleyebiliriz. CF3 filmlerinin, bu söz edilen özellikleri göz önüne alındığında özellikle güneş pili uygulamalarında kısa devre etkisini en aza indirgeyecek yapıda oluştuklarını düşünmekteyiz. Ayrıca opto-elektronik cihazların performansının R_{pv} pürüzlülük değerine bağlı olduğu bilinmektedir ve cihazlardaki sızıntı akımının artan R_{pv} değeriyle arttığı literatürde gözlenmiştir (Tak, et al., 2002; Gupta, et al., 2008).

Üretilen filmlerin kalınlıkları da yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir parametredir. Şekil 4.14 incelendiğinde F katkı oranına bağlı olarak film kalınlıklarının arttığı ve CF3 filmleri hariç 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 CF3 filmlerinin AKM 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.

Çizelge 4.6. CdO:F filmlerinin R_q , R_a ve R_{pv} pürüzlülük değerleri.

Numune	R_q (nm)	R_a (nm)	R_{pv} (nm)
CF0	12.82	10.35	96.95
CF1	15.59	12.61	126.87
CF2	15.35	12.13	142.77
CF3	11.74	9.27	84.09
CF4	18.18	13.51	172.87
CF5	18.81	14.15	175.53

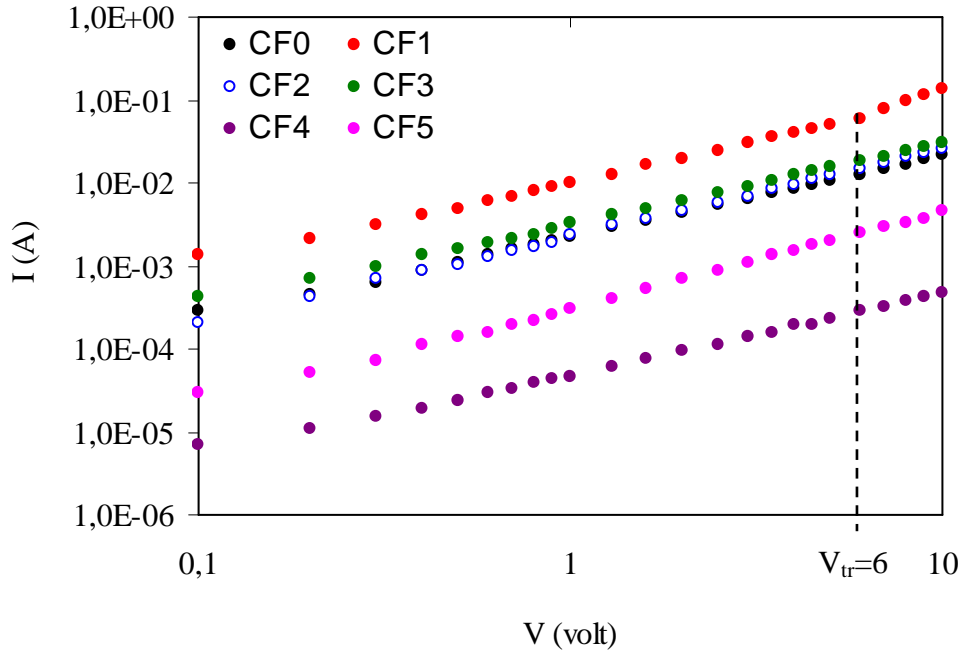


Şekil 4.14. F katkı oranına göre CdO filmlerinin pürüzlülük değerlerinin değişimi.

4.6. CdO:F Filmlerinin Elektriksel Özellikleri

CdO:F filmlerinin I-V karakteristiği Şekil 4.15’de ve uygulanan voltaj aralığında belirlenen geometrik eğim (m) değerleri Çizelge 4.7’ de verilmektedir. Şekil 4.15 ve Çizelge 4.7’ den %1 F katkılı CF1 filmleri hariç diğer tüm filmler için 0.1-10 V arasında akımın uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği ve böylece omik iletimin etkin olduğu belirlenmiştir. CF1 filmlerinde ise 0.1-6 V’ luk voltaj aralığında omik iletimin gerçekleştiği göze çarpmaktadır. Omik bölgede yarıiletken filmlerin serbest

taşıyıcıları materyal içerisine enjekte edilen taşıyıcılardan daha fazladır. Böylece akımı serbest yükler oluşturmakta ve enjekte edilen yüklerin katkısı daha az olmaktadır. Şekil 4.15' den görüldüğü gibi, CF1 filmlerinde omik iletim bölgesinden sonra akımın $I \sim V^{1.60}$ ile değiştiği SCL iletim bölgesi gelmektedir. Metalden yarıiletkeneye enjekte edilen yüklerin sayısının arttığını gösteren SCL bölgesinde akımı serbest yükler ve enjekte edilen yükler oluşturmaktadır. Ohmik bölgeden SCL bölgesine geçiş ise $V_{tr}=6$ V değerinde gerçekleşmektedir. Buradan CF1 filmlerinin sığ tuzaklı yapıya sahip oldukları sonucuna varılmıştır.



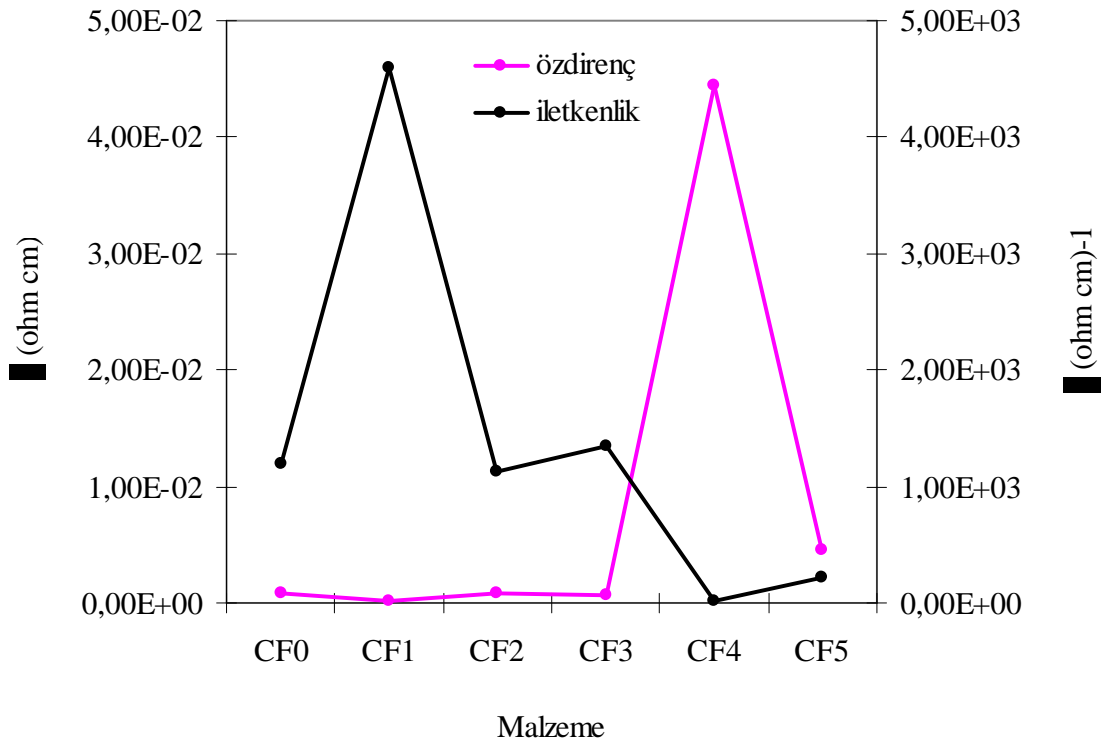
Şekil 4.15. CdO:F Filmlerinin I-V karakteristiği.

Çizelge 4.7. CdO:F filmlerinin eğim, özdirenç ve iletkenlik değerleri.

Numune	Eğim (m)	ρ ($\Omega.cm$)	σ ($\Omega.cm$) ⁻¹
CF0	~ 0.91 (0.1-10 V)	8.41×10^{-4}	1.19×10^3
CF1	~ 0.98 (0.1-6 V) ~ 1.60 (6-10 V)	2.18×10^{-4}	4.59×10^3
CF2	~ 1.00 (0.1-10 V)	8.90×10^{-4}	1.12×10^3
CF3	~ 0.89 (0.1-10 V)	7.40×10^{-4}	1.35×10^3
CF4	~ 0.89 (0.1-10 V)	4.44×10^{-2}	2.25×10^1
CF5	~ 1.07 (0.1-10 V)	4.62×10^{-3}	2.17×10^2

Tüm filmlerin ohmik bölgeleri için hesaplanan özdirenç ve iletkenlik değerleri Çizelge 4.7' de ve elektriksel iletkenlik ile özdirenç değerlerinin grafiksel değişimi ise Şekil 4.16' da verilmektedir. Çizelge 4.7' den katkısız ve % 1, 2, 3 F katkılı CF0, CF1, CF2 ve CF3 filmlerinin iletkenlik değerlerinin aynı mertebede olduğu ancak değer olarak bakıldığında Şekil 4.16' da da açıkça görüldüğü gibi %1 F katkısı ile iletkenlik değerlerinde bir artış olduğu belirlenmiştir. Ancak, yüksek F katkı oranlarında elde edilen CF4 ve CF5 filmlerinin iletkenlik değerleri incelendiğinde, %4 ve %5 F katkı oranlarının filmlerin elektriksel iletkenliklerini önemli derecede azalttığı gözle çarpılmaktadır. F katkısı ile CdO filmlerinin elektriksel özelliklerinin değişmesinin üretilen filmlerin yapısal ve yüzeysel özelliklerinden kaynaklandığını düşünmekteyiz. Şekil 4.2' de verilen XRD desenlerinden de açıkça görüldüğü gibi, %1 F katkı oranı kararsız CdO₂ fazının önemli derecede baskınlığını kaybetmesine yol açarken, %4 ve %5 F katkı oranlarında elde edilen filmlerde bu kararsız faz baskın hale gelmektedir. Bundan dolayı iyi kristalleşme seviyesine sahip olan %1 F katkılı CF1 filmlerinde elektriksel iletkenliğin iyileşmesinin kararsız CdO₂ fazının etkinliğini kaybetmesinden kaynaklandığını ve bu fazın baskınlaşması sonucunda da CF4 ve CF5 filmlerinde olduğu gibi iletkenliği azaltma etkisi ortaya çıktığını söyleyebiliriz. Ayrıca CF1

filmlerinde kararlı CdO fazı için tane boyutunun büyük ve dislokasyon yoğunluğunun düşük olması yapıdaki yüzeysel ve çizgisel kusurların azaldığını gösterir ki bu durum da %1 F katkısı ile iletkenlik değerlerindeki artışın bir sebebi olabilir. Ayrıca CF4 ve CF5 filmlerinde iletkenlik değerlerindeki azalışın, oksijenin tane sınırlarına yerleşerek elektronlar için tuzak durumları oluşturmasından kaynaklanabileceğini de söyleyebiliriz. Buna ilaveten, yüzey özelliklerinin incelenmesi sonucunda F katkısı ile birlikte yüzeyde yığılma şeklindeki bölgelerdeki birikimlerin artış gösterdiği ve filmlerin daha çok tane boşluğu içerdiği belirlenmiştir. Böylece katkılama ile filmlerin yüzey yapısında kimyasal reaksiyonun tam olarak gerçekleşmediği yerler oluşmuştur. Buradan hareketle F elementinin yapıya beklenen düzeyde giremediği ve rasgele bir dağılım sergilediği düşünülebilir. Buna ilaveten CF4 ile CF5 filmleri için oldukça yüksek olan R_{pv} pürüzlülük değerleri filmlerde ortaya çıkan yükseklik farkının açık bir göstergesidir. Bu durumların bu filmlerde yapısal ve yüzeysel kusurlara sebep olarak iletkenlik değerlerinin azalmasına neden olduğunu düşünmekteyiz.



Şekil 4.16. CdO:F filmlerinin elektriksel iletkenlik ve özdirenç değerlerinin değişimi.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada CdO yarıiletken ince filmleri ekonomik olması ve kolay uygulanabilirliği ile dikkat çeken bir yöntem olan Ultrasonik Kimyasal Püskürtme tekniği ile $300 \pm 5^\circ\text{C}$ taban sıcaklığında üretilmiştir. Ayrıca filmlerin kalitesini ve fiziksel özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla üretim aşamasında belirli oranlarda (%1, %2, %3, %4, %5) F elementi katkılanarak CdO:F yarıiletken ince filmleri elde edilmiştir. Üretilen filmlerin kalınlıkları belirlenmiş ve aynı zamanda yapısal, yüzeysel, optiksel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Tüm filmlerin kalınlıkları elipsometre cihazı ile hassas bir şekilde düşük MSE değerleri ile belirlenmiş ve F katkısı ile filmlerin kalınlıklarında bir artış olduğu saptanmıştır.

Filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için XRD desenleri alınarak bu desenler yardımı ile filmlerin kristalleşme seviyeleri araştırılmış ve bazı yapısal parametreler hesaplanmıştır. Bu amaçla, XRD desenlerinden alınan kırınım açısı (2θ), düzlemler arası mesafe (d) ve yarı pik genişliği (β) değerleri kullanılarak; örgü sabitleri (a, b, c), tane boyutu (D) ve yapılanma katsayısı (TC) değerleri hesaplanmış ve bu değerler yardımıyla yapısal özellikleri açıklanmıştır. CdO:F filmlerinin yapısal özellikleri incelenerek tüm filmlerin polikristal yapıda oluştukları ve filmlerin tek bir yönde tercihli büyümeden ziyade, (111) CdO, (200) CdO ve (111) CdO₂ düzlemlerinden olan yansımalara ait piklerle birkaç yönde baskın bir büyüme sergilediği belirlenmiştir. Ancak %1 ve %3 F katkılı filmlerde (111) CdO₂ fazının baskınlığının azaldığı ve daha kararlı bir yapıya sahip oldukları tespit edilmiştir. XRD desenlerinden CdO filmlerinin kristalleşme düzeylerinin iyi olduğu, ancak yapıya %5 oranında F elementinin girmesi sonucunda kristalleşme düzeyinin biraz kötüleştiği

saptanmıştır. (111) CdO ve (111) CdO₂ pikleri için tane büyüklükleri hesaplanmış ve F katkı oranına bağlı olarak düzenli bir değişimin olmadığı belirlenmiştir. TC değeri en yüksek olan pik için hesaplanan örgü sabitlerinin ASTM kartlarında verilen değerler ile hemen hemen uyum içinde oldukları saptanmıştır. Yapısal özellikler göz önüne alındığında %1 F katkı oranının bu çalışmada kullanılan katkı oranları içerisinde uygun katkı oranı olduğu sonucuna varılmıştır.

Fotovoltaik güneş pillerinde kullanılacak olan yarıiletken filmlerin uygun optik özelliklere sahip olması gerekir. Bu çalışmada üretilen CdO:F filmlerinin fotovoltaik güneş pillerinde uygulama potansiyelini araştırmak için geçirgenlik, soğurma ve yansımaya spektrumları alınmıştır. Ayrıca filmlerin optik özellikleri hakkında detaylı bilgi sahibi olmak için, deneysel ve teorik ψ değerlerinin en iyi uyumu sağlanarak 1200-1600 nm dalga boyu aralığında filmlerin kırılma indisi ve sönüm katsayısı değerleri belirlenmiştir. Fotovoltaik uygulamalarda kullanılacak olan yarıiletken malzemelerin diğer önemli bir optiksel parametresi de malzemelerin yasak enerji aralığıdır. Bu çalışmada CdO:F filmlerinin yasak enerji aralıklarını belirlemek için optik metot kullanılmıştır. CdO:F filmlerinin geçirgenlik spektrumlarından %3 F katkılı CF3 filmlerinin diğer filmlere nazaran daha düşük geçirgenlik değerine sahip olduğu ve %4 ile %5 F katkı oranlarında üretilen CF4 ve CF5 filmlerinin geçirgenliklerinin yüksek olduğu saptanmıştır. Buradan %3 F katkı oranının yüzey yapısındaki boşlukları azalttığı ve %4 ile %5 F katkı oranlarının ise yarık ve çatlak şeklindeki bölgeleri arttırdığı sonucuna varılmıştır. CdO:F filmlerinin soğurma spektrumlarından, CF3 filminin en yüksek soğurma özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca CF4 ve CF5 filmlerinin yüzeylerinde oluşabilecek boşlukların etkisi ile bu filmlerin soğurma özelliklerinin azaldığı saptanmıştır. CdO:F filmlerinin yansımaya spektrumlarından, %1 ve %2 F katkılı CdO filmlerinin yansımaya değerlerinin azaldığı ve bu filmlerin güneş pili uygulamalarında kayıpları azaltacağı sonucuna varılmıştır. CdO:F filmlerinin kırılma indisi spektrumlarından, katkısız, %1 ve %2 F katkılı numunelerde kırılma indisi değerleri artan dalga boyu ile arttığı için, anormal dispersiyon sergiledikleri belirlenmiştir. Sönüm katsayısı spektrumlarından, CF2, CF3 ve CF4 filmlerinin düşük soğurma özelliklerinden dolayı sönüm katsayısı değerlerinin oldukça düşük olduğu

belirlenmiştir. CdO:F filmlerinin $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafiklerinden direkt bant aralıklı malzemeler oldukları ve F katkısı ile CdO filmlerinin bant aralığı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. CdO:F filmlerinin optik özelliklerinin incelenmesi sonucunda F katkısının filmlerin optik özellikleri üzerinde önemli bir etki yarattığı sonucuna ulaşılmıştır.

Filmlerin yüzey özelliklerini incelemek ve yüzey pürüzlülükleri hakkında fikir sahibi olmak için, atomik kuvvet mikroskobu (AKM) ile topografi ve faz görüntüleri alınmıştır. Tüm filmler için görüntüler $2.5 \times 2.5 \mu\text{m}^2$ alanlı bölgeler taranarak alınmış ve rms, ortalama ve vadi-pik pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. CdO:F filmlerinin AKM görüntülerinin incelenmesi sonucunda, katkısız CdO filmlerinin yüzeyinde taneli bir yapının hakim olduğu, %3 F katkılı film hariç diğer filmlerin yüzeylerindeki tane yapılanmasının yükseklik olarak artış gösterdiği, yine %3 F katkılı film hariç F katkısı ile yığılma şeklindeki bölgelerdeki birikimlerin arttığı ve filmlerin daha fazla tane boşluğuna sahip olduğu saptanmıştır. Tabaka tabaka yapılanmanın baskın olduğu %3 F katkılı CF3 filmlerinde ise yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve iyi ayırt edilebilir tanelerin oluştuğu belirlenmiştir. Filmlerin faz görüntülerinin incelenmesinden, üretilen filmlerin genelinde bazı bölgelerde bir kontrast olduğu ve katkısız filmlerde kontrastın diğer filmlere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Katkılı filmlerde kontrast yaratan bölgelerin Cd ağırlıklı ikincil fazlar olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Filmlerin R_q , R_a ve R_{pv} pürüzlülük değerlerinin incelenmesi sonucunda, %3 F katkılı film hariç diğer F katkılı filmlerde tüm pürüzlülük değerlerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir. %3 F katkılı CdO filmlerinin yüzeylerinde daha az boşlukların bulunması, tanelerin daha homojen dağılması ve sıkı paketlenmiş olmasından dolayı, bu filmlerin özellikle güneş pili uygulamalarında kısa devre etkisini en aza indirgeyecek yapıda oluştukları sonucuna varılmıştır.

Filmlerin elektriksel özelliklerini belirlemek için iki uç tekniği kullanılmış ve filmlerin I-V karakteristiklerinden uygulanan voltaj aralığında belirlenen eğim (m) değerleri ile iletim mekanizmaları araştırılmıştır. %1 F katkılı CF1 filmleri hariç diğer tüm filmler için 0.1-10 V arasında ve CF1 filmlerinde ise 0.1-6 V'luk voltaj aralığında

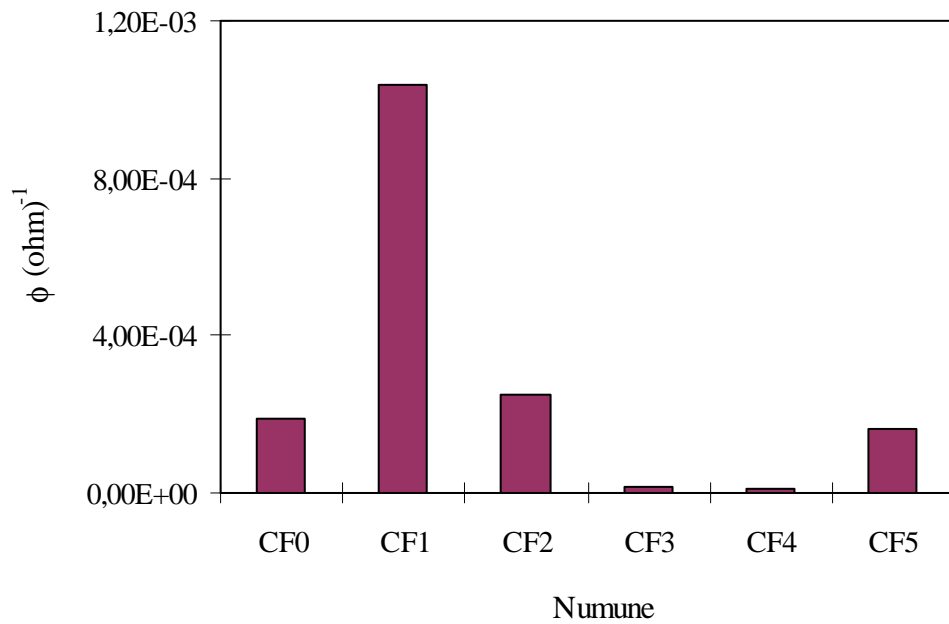
ohmik iletimin etkin olduğu belirlenmiştir. %1 F katkılı filmlerde ohmik iletim bölgesinden sonra SCL iletim bölgesinin geldiği ve bundan dolayı CF1 filmlerinin sığ tuzaklı yapıya sahip oldukları saptanmıştır. Tüm filmlerin ohmik bölgeleri için özdirenç değerleri ve elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır. Katkısız ve % 1, 2, 3 F katkılı CdO filmlerinin iletkenlik değerlerinin aynı mertebede olduğu ancak değer olarak bakıldığında %1 F katkısı ile iletkenlik değerleri artarken, %4 ve %5 F katkı oranları için elektriksel iletkenlik değerlerinin önemli derecede azaldığı saptanmıştır. %1 F katkılı CF1 filmlerinin iletkenliklerinin yüksek olmasının, bu katkı oranında kararsız CdO₂ fazının önemli derecede baskınlığını kaybetmesinden, yüzeysel ve çizgisel kusurların azalmasından kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır.

Fotovoltaik uygulamalarda kullanılacak yarıiletken malzemelerin en önemli iki özelliği yüksek geçirgenlik ve düşük özdirençtir. Bu çalışmada üretilen CdO:F filmlerinin güneş pillerinde kullanım potansiyellerini araştırmak için Haacke'nin kalite faktörü (figure of merit) $\Phi = T^{10} / R_s$ ifadesi kullanılarak tüm filmlerin kalite faktörü değerleri hesaplanmıştır. Bu ifadede T değeri olarak 350-1600 nm aralığı için ortalama geçirgenlik değerleri alınmıştır ve R_s tabaka direncini göstermektedir. CdO:F filmlerinin kalite faktörleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1'de verilmektedir. Bu çizelge ve şekilden bu çalışmadaki en kaliteli filmlerin %1 F katkılı CF1 filmlerinin olduğu belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı fotovoltaik güneş pillerinde CF1 filmlerinin geçirgen ön kontak olarak kullanılabilecekleri saptanmıştır.

Ayrıca pürüzlü yüzeylere sahip olan CdO:F filmlerinin tek eklemlerli μ c-Si güneş pillerinde alternatif bir uygulama alanında kullanılabileceklerini düşünmekteyiz. Çünkü düşük kırılma indisli bir malzeme (CdO:F filmleri) ve yüksek kırılma indisli bir malzeme (Si için $n \sim 3.7$) arasındaki pürüzlü ara yüzey yansıma değerlerinde azalmaya sebep olur. Bu etkiyi arttırmak için yüksek rms pürüzlülük değerleri (R_q) gereklidir. Ayrıca bu durum, Si tabakası içinde ışığın tuzaklanmasına imkan sağlar ve böylece ara yüzeydeki geri ve ileri saçılmalar ile Si tabakası içinde ışığın optiksel yolu artar. Bu açıdan bakıldığında üretilen CdO:F filmlerinin tek eklemlerli μ c-Si güneş pillerinde kullanılabileceği kanaatindeyiz.

Çizelge 5.1. CdO:F filmlerinin kalite faktörleri.

Malzeme	$\Phi (\Omega)^{-1}$
CF0	1.87×10^{-4}
CF1	1.04×10^{-3}
CF2	2.51×10^{-4}
CF3	1.53×10^{-5}
CF4	1.04×10^{-5}
CF5	1.64×10^{-4}



Şekil 5.1. CdO:F filmlerinin kalite faktörlerinin grafiksel gösterimi.

5.2. Tartışma ve Öneriler

Günümüzde maliyeti yüksek ve üretimi zor olan tek kristal güneş pillerine alternatif olarak yarıiletken ince film güneş pilleri gösterilmektedir. Yarıiletken ince film güneş pillerinde kullanılacak olan yarıiletken malzemelerin hem basit ve ekonomik bir üretim tekniği ile elde edilmesi hem de üretilen malzemelerin elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özelliklerinin çok iyi bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bunun için bu çalışmada güneş pillerinde kullanım potansiyeline sahip CdO:F yarıiletken malzemelerin üretimi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

Ultrasonik kimyasal püskürtme tekniğiyle üretilen yarıiletken filmlerin fiziksel özellikleri püskürtme hızı, taban sıcaklığı, taşıyıcı gaz, püskürtme süresi, katkı türü ve miktarı, püskürtme başlığı ile taban arasındaki uzaklık gibi üretim parametrelerine sıkı bir şekilde bağlıdır. Daha kaliteli filmler üretmek için püskürtme şartlarının dikkatli bir şekilde önceden ayarlanması gerekmektedir. Yüzeyleri hemen hemen homojen dağılımlı ve düzgün kalınlıklı filmler elde etmek için, sabit taban yerine döner taban kullanılmasının daha iyi olacağını düşünmekteyiz. Ayrıca püskürtme işlemi için bir püskürtme başlığı yerine birden fazla püskürtme başlığının kullanılması ile daha kaliteli filmlerin üretilebileceğine inanmaktayız. Ancak, üretim sisteminde bu gelişmeler planlanırken tekniğin basit ve ekonomik olma özelliklerinin korunması da oldukça önemlidir. Ayrıca UKP tekniği ile üretilen filmlerin uygun metal buharında, azot veya hidrojen atmosferinde ya da termal olarak tavlınmaları suretiyle fiziksel özelliklerinin iyileştirilebileceğini düşünmekteyiz.

Bu çalışmada filmleri üretmek için kullanılan ultrasonik kimyasal püskürtme tekniğinin filmlerin yüzey özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Genel olarak bu teknikle üretilen filmlerin tam olarak homojen bir yüzeye sahip olmadıkları ve diğer vakumlu üretim teknikleri ile üretilen filmlere göre yüzey pürüzlülüklerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca taban olarak kullanılan camın yüzeyinde bulunan çukur ya da vadi şeklindeki bölgelerin yüzeye gelen atom ya da atom grupları için

büyüme merkezi olabilecekleri ve bu durumun da film yüzeyinin homojenliğini ve düzgünlüğünü etkileyeceği saptanmıştır. Filmlerin ilk büyüme mekanizmasında taban sıcaklığının önemli bir etkisinin olduğu ve bu durumun da yüzey özelliklerini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir. Bu yüzden taban sıcaklığının çok iyi seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Film yüzeylerinde oluşan çok parlak ve beyaz bölgelerin üretim şartlarına ve film oluşumu esnasında meydana gelen kimyasal reaksiyona bağlı olduğu, ayrıca üretim esnasında çöktürülen yüzey kirliliklerinden ve yüzeydeki süreksizlikten (tane boşlukları) de kaynaklanabileceği saptanmıştır. Ayrıca püskürtme başlığından gelen ve yüzeye sıvı fazında ulaşan damlacıkların da yükseklik farkına sebep olabileceği belirlenmiştir. Yüzey özellikleri açısından bu istenmeyen durumları en aza indirmek için ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile üretilen filmlere çöktürme sonrası mutlaka ısıl işlemlerin yapılması gerektiğini düşünmekteyiz. Yapılacak bu işlemin aynı zamanda filmlerin yapısal özelliklerini de olumlu yönde etkileyeceği kanaatindeyiz.

Bu çalışmada elektrik ölçümleri için filmlerin yüzeyine düzlemsel formda kontaklar yapılmıştır. Eğer sandviç ölçümler yapılırsa daha sağlıklı sonuçlara ulaşılabilir. Çünkü düzlemsel ölçümlerde iki kontak arasındaki mesafe mm mertebesinde iken, sandviç yapılarda bu uzaklık μm ya da nm mertebesine düşebilmektedir. Düzlemsel ölçümlerde yüzey akımları rol oynarken, sandviç ölçümlerde gövde içerisindeki yük taşıyıcıları da iletim mekanizmalarına katkıda bulunmaktadır. Bu tür çalışmalarda sandviç ölçümlerinin daha faydalı olacağını düşünmekteyiz. Ayrıca filmlerin üretimi esnasında taşıyıcı gaz olarak havanın yerine azot gazının kullanılmasının filmlerin elektriksel özdirençlerinin azaltılmasında olumlu bir etki yapabileceğini düşünmekteyiz. Çünkü havadaki oksijen tane sınırlarına ve film yüzeylerine yerleşerek yük geçişini engelleyen potansiyel engellerinin oluşmasına yol açmakta ve bu da özdirenç artmasına sebep olmaktadır. Azot gazının kullanılması ile de bu istenmeyen durumun kısmen azaltılabileceğini düşünmekteyiz.

Özellikle, maliyet açısından bakıldığında fotovoltaik güneş pilleri teknolojisinde önemli bir yere sahip olan polikristal güneş pilleri için uygun özelliklerde tabaka

üretimine yönelik olan bu çalışma, pahalı vakumlu sistemlere alternatif olarak CdO filmlerinin üretilmesi ve katılama imkanı ile özelliklerinin iyileştirilmesine olanak sağlaması açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ajayi, O.B., Osuntola, O.K., Ojo, I.A., Jeynes, C., 1994, Preparation and characterization of MOCVD thin films of cadmium sulphide, *Thin Solid Films*, 248, 57.
- Akyuz, I., Atay,F., Bilgin, V., Kose, S., 2000, The investigation of electrical and optical properties of ZnO and ZnO:Sn films obtained by ultrasonic Spray pyrolysis, *Balkan Physics Letters*, 22, special issue.
- Akyüz, I., 2000, Püskürtme tekniği ile elde edilen $Zn_{1-x}Cd_xS$ filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir (Yayınlanmamış).
- Akyüz, İ., 2005, CdO Filmlerinin bazı fiziksel özellikleri üzerine Al katkılama ve tavlama işlemlerinin etkileri, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 119s.
- Arabacı, E., 2001, ZnS Yarıiletken bileşiğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 80s (Yayınlanmamış).
- Atay, F., 2001, $Cd_{1-x}Ni_xS$ filmlerinin elektriksel, optiksel, yapısal ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 145 s (Yayınlanmamış).
- Aybek, A.Ş., 1996, $Zn(In_2S_3)_S$ yarıiletken filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, Dotor Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 102 s (Yayınlanmamış).
- Baret, C.S. and Massalski, T.B., 1980, *Structure of Metals*, Oxford: Pergamon, p.204.
- Beck, M.E. and Cocivera, M., 1996, Thin-film copper indium diselenide prepared by selenization of copper indium oxide by Spray pyrolysis, *Thin Solid Films*, 272, 71-82.
- Benko, F.A., Koffyberg, F.D., 1986, Quantum efficiency and optical transitions of CdO photoanodes, *Solid State Communications*, 57, 901.
- 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
- Bilgin, V., 2003, ZnO Filmlerinin elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özellikleri üzerine kalay katkılanmasının etkisi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 165s. (Yayınlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bilgin, V., Kose, S., Atay, F., Akyuz, I., 2004, The effect of Zn concentration on some physical properties of tin oxide films obtained by ultrasonic Spray pyrolysis, *Material Letters*, 58, 3686, 3693.
- Birkholz, M., Zaumseil, P., Kittler, M., Wallat, I., Heyn, M.P., 2006, Structure of biomembrane-on-silicon hybrids derived from X-ray reflectometry, *Materials Science and Engineering: B*, 134, 125-129.
- Bütün, H., 2007, Fe_xZn_{1-x} ince filmlerinde $K\beta/K\alpha$ şiddet oranının ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 48 s (Yayınlanmamış).
- Carballeda-Galicia, D.M., Castanedo- Perez, R., Jimenez-Sandoval, O., Jimenez-Sandoval, S., Torres-Delgado, G., Zuniga-Romero, C.I., 2000, High transmittance CdO thin films obtained by the sol-gel method, *Thin Solid Films*, 371, 105.
- Chamberlin, R.R., and Skarman, J.S., 1966, Many sulphides and selenides, *J. Electrochem. Soc.*, 113, 86.
- Chen, J.T., Wang, J., Zhang, F., Zhang, G.A, Wu., Z.G., Yan P.X, 2008, The effect of La doping concentration on the properties of zinc oxide films prepared by the sol-gel method, *Journal of Crystal Growth*, 310, 2627.
- Choi, Y.S., Lee, C.G., Cho, S.M., 1996, Transparent conducting $Zn_xCd_{1-x}O$ thin films prepared by the sol-gel process, *Thin Solid Films*, 289, 153-158.
- Chu, Xiangfeng, 2003, High sensitivity chlorine gas sensors using $CdIn_2O_4$ thick film prepared by co-precipitation method, *Materials Research Bulletin*, 38, 1705.
- Connolly, R., 2003, *Introduction to x-ray powder diffraction*, Spring.
- Cruz, J.S., Delgado, G.T., Perez, R.C., Sandoval, S.J., Sandoval, O.J., Romero, C.I.Z., Marin, J.M., Angel, O.Z., 2005, Dependence of electrical and optical properties of sol-gel prepared undoped cadmium oxide thin films on annealing temperature, *Thin Solid Films*, 493, 83.
- Cruz, J.S., Delgado, G.T., Perez, R.C., Romero, C.I.Z., Angel, O.Z., 2007, Optical and electrical characterization of fluorine doped cadmium oxide thin films prepared by the sol-gel method, *Thin Solid Films*, 515, 5381.
- Cullity, B.D., 1996, *X-ışınları difraksiyonu*, (Çeviren: Sümer A.), İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çırak, Ç., Selver, R., Özek, N., 2008, Sabit sıcaklık konfigürasyonunda ortam sıcaklığı ve soğuk duvar sıcaklığının osilasyonlu yüzey gerilim hareketine geçiş etkileri, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 3(2) 191-204.
- Dakhel, A.A., Ali-Mohamed, A.Y., 2009, Structural, electrical and optical absorption properties of $\text{La}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ solid solution films obtained by sol-gel method, Materials Chemistry and Physics, 113, 356-360.
- Deokate, R.J., Pawar, S.M., Moholkar, A.V., Sawant, V.S., Pawar, C.A., Bhosale, C.H., Rajpure, K.Y., 2008, Spray deposition of highly transparent fluorine doped cadmium okside thin films, Applied Surface Science, 254, 2187-2195.
- Devshette, P.M., Deshpande, N.G., Bichile, G.K., 2008, Growth and physical properties of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{O}$ thin films prepared by spray pyrolysis technique, Journal of Alloys and Compounds, 463, 576-580.
- Doğan, M., 2004, 21. Yüzyılın Teknolojisi Nanoteknoloji, Popüler Bilim Dergisi, 128, 32-36.
- Dong, Q., Su, H., Zhang, D., Zhang, F., 2006, Fabrication and gas sensitivity of SnO_2 hierarchical films with interwoven tubular conformation by a biotemplate-directed sol-gel technique, Nanotechnology, 17, 3968.
- Durose, K., Edwards, P.R. and Halliday, D.P., 1999, Materials aspects of CdTe/CdS solar cells, Journal of Crystal Growth, 197, 733-742.
- Eckertova, L., 1986, Physics of Thin Films, Plenum Press, New York and London, 340s.
- Ergin, B., Ketenci, E., Atay, F., 2009, Characterization of ZnO films obtained by ultrasonic Spray pyrolysis technique, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 5249-5254.
- Ferro, R., Rodriguez, J.A., 1999, Some physical properties of F-doped CdO thin films deposited by spray pyrolysis, Thin Solid Films, 347, 295.
- Ferro, R., Rodriguez, J.A., Vigil, O., Morales-Acevedo, A., 2000, Chemical composition and electrical conduction mechanism for CdO:F thin films deposited by spray pyrolysis, Materials Science and Engineering B, 87, 83-86.
- Flores, M.A., Castanedo, R., Torres, G., Zelaya, O., 2009, Optical, electrical and structural properties of indium-doped cadmium oxide films obtained by the sol-gel technique, Solar Energy Materials & Solar Cells, 93, 28-32.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Galicia, D.M.C., Perez, R.C., Sandoval, O.J., Sandoval, S.J., Delgado, G.T., Romero, C.I.Z., 2000, High transmittance CdO thin films obtained by the sol-gel method, *Thin Solid Films*, 371, 105.
- Garnier, J., Bouteville, A., Hamilton, J., Pemble, M.E., Povey, I., 2009, A comparison of different Spray CVD methods for the production of undoped ZnO thin films, *Thin Solid Films*, 6090, 292.
- Ghosh, P.K., Das, S., Kundoo, S., Chattopadhyay, K.K., 2005, Effect of fluorine doping on semiconductor to metal-like transition and optical properties of cadmium oxide thin films deposited by sol-gel process, *Sol-Gel Science and Technology*, 34, 1.
- Goyal, D.J., Agashe, C., Takwale, M.G., Marethe, B.R., and Bhide, V.G., 1992, Development of transparent and conductive ZnO films by Spray pyrolysis, *Journal of Materials Science*, 27, 4705-4708.
- Gupta, R.K., Ghosh, K., Patel, R., Mishra, S.R., Kahol, P.K., 2008, Highly conducting and transparent tin-doped CdO thin films for optoelectronic applications, *Materials Letters*, 62, 4103-4105.
- Gupta, R.K., Ghosh, K., Patel, R., Mishra, S.R., Kahol, P.K., 2008, Structural, optical and electrical properties of In doped CdO thin films for optoelectronic applications, *Materials Letters*, 62, 3373.
- Gurumurugan, K., Mangalaraj, D., Narayandass, S.K. and Nakanishi, Y., 1996, DC reactive magnetron sputtered CdO thin films, *Mater. Lett.*, 28, 307.
- 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.
- Gündüz, E., 1999, *Modern Fiziğe Giriş*, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi No:100, İzmir, Türkiye.
- Hook, J.R., Hall, H.E., 1999, *Katıhal Fiziği*, (Çevirenler: Köksal, F., Altunbaş, M., Dinçer, M., Başaran, E.), Literatür Yayıncılık, İstanbul, sf.19-21.
- Huang, Y., Deng, K., Ai, Z., Zhang, L., 2009, Ultrasonic Spray pyrolysis synthesis and visible light activity of carbon-doped $Ti_{0,91}Zr_{0,09}O_2$ solid solution photocatalysts, *Materials Chemistry and Physics*, 114, 235-241.
- Ilıcan, S., 2001, *Spray pyrolysis yöntemi ile elde edilen In katkılı CdZnS filmlerinin özellikleri*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 122s. (Yayınlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Irmak, S., Kul, M., Band gap energies of CdO:F semiconductor films produced by ultrasonic spray pyrolysis method, 2007, AIP Conference Proceedings, 899, 608.
- Ito, N., Sato, Y., Song, P.K., Kaijio, A., Inoue, K., Shigesato, Y., 2006, Electrical and optical properties of amorphous indium zinc oxide films, Thin Solid Films, 496, 99.
- Joseph, B., Gopchandran, K.G., Thomas, P.V., Koshy, P. And Vaidyan, V.K., 1999, A study on the chemical spray deposition of zinc oxide thin films and their structural and electrical properties, Materials Chemistry and Physics, 58,71-77.
- Kaelble, E.F., (Ed), 1967, Handbook of X-rays for diffraction, emission, absorption and microscopy, McGraw-Hill, New York, 25p.
- Kao, K.C. and Hwang, W., 1979, Electrical transport in solids, International Series in the Science of the Solid State, Pergamon Pres, Cilt 14, 663 p.
- Kasem, K. K., 1999, Photo-elektrochemistry at polymer/semiconductor interface, Journal of Materials Science, 34, 5237-5242.
- Kılınç, T., 2006, $Zn_{1-x}Fe_xS$ ince filmlerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 45 s. (Yayınlanmamış).
- Kırmızıgül, F., 2008, CdO İnce Filmlerinin Püskürtme Yöntemiyle Hazırlanması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana, 97 s. (Yayınlanmamış).
- Kittel, C., 1996, Katılmal fiziğine giriş, (Çeviren: Karaoğlu B.), Bilgi Tek Yayınları, İstanbul, 434s.
- Koelmans, H., 1971, Application of semiconducting thin films, Thin Solid Films, 8, 19-33.
- Köse, S., 1993, Spray-pyrolysis metodu ile elde edilen $Cd_{1-x}Zn_xS$ filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 112s. (Yayınlanmamış).
- Krishnakumar, V., Ramamurthi, K., Kumaravel, R., Santhakumar, K., 2009, Preparation of cadmium stannate films by spray pyrolysis technique, Current Applied Physics, 9, 467-471.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kul, M., Aybek, A.S., Turan, E., Zor, M., Irmak, S., 2007, Effects of fluorine doping on the structural properties of the CdO films deposited by ultrasonic spray pyrolysis, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 1927-1933.
- Kul, M., Zor, M., Aybek, A.S., Irmak, S., Turan, E., 2007, Some structural properties of CdO:F films produced by ultrasonic spray pyrolysis method, *Thin Solid Films*, 515, 8590-8593.
- Kul, M., Zor, M., Aybek, A.S., Irmak, S., Turan, E., 2007, Electrical and optical properties of fluorine-doped CdO films deposited by ultrasonic spray pyrolysis, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 882-887.
- Lampert, M.A. and Mark, P., 1970, *Current injection in solids*, Academic Press, USA, 347 p.
- Lim, J.T., Jeong, C.H., Vozny, A., Lee, J.H., Kim, M.S., Yeom, G.Y., 2007, Top-emitting organic light-emitting diode using transparent conducting indium oxide layer fabricated by a two-step ion beam-assisted deposition, *Surf. Coat. Tech.*, 201, 5358.
- Lokhandee, B. J., Patil, P. S. and Uplane, M. D., 2004, Studies on cadmium oxide sprayed thin films deposited through non-aqueous medium, *Mater. Chem. Phys.*, 84, 238.
- Maity, R., Chattopadhyay, K.K., 2006, Synthesis and characterization of aluminum-doped CdO thin films by sol-gel process, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 90, 597.
- McKelvey, J.P., 1996, *Solid state and semiconductor physics*, Harper & Row Ltd., London, 512p.
- Murt, E. M. And Guldner, W. G., 1969, *Physical measurement and analysis of thin films*, Plenum Press, New York, 194 p.
- Nair, J.P., Jayakrishnan, R., Chaure, N.B. and Pandey, R.K., 1998, Letter to the Editor: In situ Sb-doped CdTe films, *Semiconductor Science and Technology*, 13, 340-344.
- Nan, C.W., Tschöpe, A., Holten, S., Kliem, H. And Birringer, R., 1999, Grain size-dependent electrical properties of nanocrystalline ZnO, *Journal of Applied Physics*, 85, 7735-7740.
- Nayar, P.S., Catalano, A., 1981, Zinc phosphide-zinc oxide heterojunction solar cells, *Appl. Phys. Lett.*, 39, 705.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Neamen, D., 2007, Yarıiletken fiziğine giriş, (Çevirenler: Sağlam, M., Ateş, A.), Aktif Yayınevi, Ankara, 1, 147, 164s.
- Omar, M.A., 1975, Elementary solid state physics: Principles and Applications, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 669p.
- Pamplin, B.R., 1979, Spray pyrolysis of ternary and quaternary solar cell materials, Prog. Crystal Growth Charact, 1, 395-403.
- Pamplin, B.R., 1979, Progress in Crystal Growth and Characterization, An International Review Journal, Pergamon Press, Oxford, 1, 4.
- Pejova, B., Grazdanov, I., 2005, Structural and optical properties of chemically deposited thin films of quantum-sized bismuth sulfide, Materials Chemistry and Physics, 99, 39-49.
- Peker, D., 1999, $CuAl_xIn_{1-x}S_2$ yarıiletken filmlerinin bazı fiziksel özellikleri, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 169s. (Yayınlanmamış).
- Peker, M., 2000, Ultrasonik spray pyrolysis yöntemi ile elde edilen $Cd_{1-x}Sn_xS$ filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 142 s. (Yayınlanmamış).
- Perednis, D., Gauckler, L., 2004, Thin film deposition using Spray pyrolysis, Journal of Electroceramics, 14, 103-111.
- Petrou, P., Singh, R., Brodie, D.E., 1979, The use of ZnO in transparent type MIS solar cells, Appl. Phys. Lett., 35, 930.
- Polat, H., 1982, Püskürtme yöntemi ile CdS filmlerinin elde edilmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 12s. (Yayınlanmamış).
- Saha, B., Das, S., Chattopadhyay, K.K., 2007, Electrical and optical properties of Al doped cadmium oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91, 1692.
- Saha, B., Thapa, R., Chattopadhyay, K.K., 2008, Wide range tuning of electrical conductivity of rf sputtered CdO thin films through oxygen partial pressure variation, Solar Energy Materials & Solar Cells, 92, 1077-1080.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Santos-Cruz, J., Torres-Delgado, G., Castanedo-Perez, R., Jiménez-Sandoval, S., Jiménez-Sandoval, O., Zúñiga-Romero, C.I., Márquez Marín J. and Zelaya-Angel O., 2005, Dependence of electrical and optical properties of sol-gel prepared undoped cadmium oxide thin films on annealing temperature, *Thin Solid Films*, 483, 83.
- Smith, W.F., 1990, *Principles of materials science and engineering*, Mc Graw-Hill, Inc., USA, 864 p.
- Soylu, M., 2006, Atamalı katodik vakum ark depolama sistemiyle üretilen ZnO'nun elektriksel iletkenliği ve ısıl işleme değişimi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana, 115 s.
- Subramanyam, T. K., Radha Krishna, B, Uthanna, S., Naidu, B. S. and Reddy, P. J., 1997, Influence of oxygen pressure on the physical properties of dc magnetron reactive sputtered cadmium oxide films, *Vacuum*, 48, 565.
- Subramanyam, T.K., Uthanna, S., Naidu, B.S., 1998, Preparation and characterization of CdO films deposited by dc magnetron reactive sputtering, *Materials Letters*, 35, 214.
- Tak, Y.H., Kim, K.B., Park, H.G., Lee, K.H., Lee, J.R., 2002, Criteria for ITO (indium-tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode, *Thin Solid Films*, 411, 12.
- Tang, W., Cameron D. C., 1994, Aluminum-doped zinc oxide transparent conductors deposited by the sol-gel process, *Thin Solid Films*, 238, 83.
- Tang, Z.K., Wong, G.K.L., Yu, P., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H., Segawa, Y., 1998, Enhancement of x-ray lasing due to wavefront correction of line-focusing optics with a large-aperture deformable mirror, *Applied Physics Letters*, 72, 3270.
- Taniguchi, I., Lim, C.K., Song, D., Wakihara, M., 2002, Particle morphology and electrochemical performances of spinel LiMn_2O_4 powders synthesized using ultrasonic Spray pyrolysis method, *Solid State Ionics*, 146, 239-247.
- Turton, R., 2005, *Katıların Fiziği*, (Çeviren: Yoğurtçu, Y.K.), Aktif Yayınevi, Erzurum, 436 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vigil, O., Vaillant, L., Cruz, F., Santana, G. and Morales-Acevedo, A., Contreras-Puente, G., 2000, Spray pyrolysis deposition of cadmium-zinc oxide thin films, *Thin Solid Films*, 361-362, 53-55.
- Vigil, O., Cruz, F., Morales-Acevedo, A., Contreras-puente, G., Vaillant, L., Santana, G., 2001, Structural and optical properties of annealed CdO thin films prepared by spray pyrolysis, *Materials Chemistry and Physics*, 68, 249.
- Williamson, G.K. and Smallman, R.E., 1956, *Phil Mg.*, 1-34.
- Yan, M., Lane, M., Kannewurf, C.R., Chang, R.P.H., 2001, Highly conductive epitaxial CdO thin films prepared by pulsed laser deposition, *Applied Physics Letters*, 78, 2342.
- Yang, C.C., Jiang, Q., 2006, Size effect on the bandgap of II-VI semiconductor nanocrystals, *Materials Science and Engineering*, 131, 191-194.
- Zhang, L., Yabu, T., Taniguchi, I., 2009, Synthesis of spherical nanostructured $\text{LiM}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ ($\text{M}=\text{Ni}^{2+}$, Co^{3+} and Ti^{4+} ; $0 < x < 0,2$) via a single-step ultrasonic Spray pyrolysis method and their high rate charge-discharge performances, *Materials Research Bulletin*, 44, 707-713.
- Zhao, Z., Morel, D.L. and Ferekides, C.S., 2002, Electrical and optical properties of thin-doped CdO films deposited by atmospheric metalorganic chemical vapour deposition, *Thin Solid Films*, 413, 203-211.
- http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atomic_force_microscope_block_diagram.svg
- <http://w3.gazi.edu.tr/~enyilmaz//fotovoltaik%20piller.pdf>
- http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atomic_force_microscope_block_diagram.svg