



**KADMIYUM TELLÜR İNCE FİMLERİNİN
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Tolga Murat DEMİRİZ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KADMIYUM TELLÜR İNCE FİLMLERİNİN ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Tolga Murat DEMİRİZ

Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Tolga Murat DEMİRİZ tarafından hazırlanan "KADMIYUM TELLÜR İNCE FİLMLERİNİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ

Başkan : Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ
Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat
Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. S. Kemal AKAY
Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat
Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ali KARA
Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat
Fakültesi, Kimya Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Kadir ERTÜRK
Namık Kemal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üy. Yalçın KALKAN
Muş Alparslan Üniversitesi, Varto Meslek
Yüksekokulu, Optisyonluk Programı Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

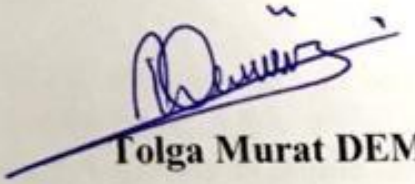
Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
24/05/2019

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

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

beyan ederim.

24/05/2019



Tolga Murat DEMİRİZ

ÖZET

Doktora Tezi

KADMIYUM TELLÜR İNCE FİMLERİNİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Tolga Murat DEMİRİZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ

Bu tez kapsamında depozisyon potansiyelinin CdTe ince filmlerinin fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. En iyi depozisyon potansiyelinin değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Depozisyon potansiyeli -0,4 V'tan başlayarak 0,1 V'luk değişimlerle -1,1 V'a kadar örnekler, ITO altlık üzerine depozit edilmiştir. Depozisyon potansiyeline bağlı olarak Cd/Te oranı, filmlerin yüzey oluşumları, filmlerin yapısal özellikleri, iletkenlik tipleri, taşıyıcı sayıları, optik özellikleri, yasak enerji bant aralıkları ve Nyquist değişimleri incelenmiştir.

Elde edilen CV voltamogramlarında, -0,40 V'ta CdTe'ye ait bir pik gözlenmiştir. Üretilen CdTe ince filmlerinin yasak enerji bant aralıklarının 1,61 eV–1,94 eV aralığında değerler aldığı ve film kalınlıklarının da 72 nm–140 nm arasında değiştiği görülmüştür. CdTe İnce filmlerine ait AFM ölçümlerinden, ince filmlerin pürüzlülük değerlerinin 35 nm ile 191 nm arasında değiştiği görülmüştür. SEM-EDAX ölçümleri sonucunda CdTe ince filmlerin Cd/Te bileşim oranlarının 1,03 ile 1,55 arasında olduğu belirlenmiştir. Donör yoğunluklarının 10^{17} ile 10^{19} cm⁻³ arasında değiştiği, -0,9 V'ta üretilen ince film örneğinin akseptör yoğunluğunun ise 10^{20} cm⁻³ olduğu belirlenmiştir. Bu değerlere bağlı olarak üretilen örneklerin iletkenlik tiplerinin n-tipi olduğu ve -0,9 V'ta üretilen filmin iletkenlik tipinin de p-tipi olduğu görülmüştür. Mott-Schottky yaklaşımına göre ölçülen $1/C^2$ -V eğrilerinden elde edilen düz bant potansiyelleri 0,28 V ile 0,60 V arasında değişirken, -0,9 V'ta üretilen ince filme ait düz bant potansiyeli ise -0,30 V olarak rapor edilmiştir. Bunlara ek olarak, CdTe ince filmlerine ait hesaplanmış Fermi enerji seviyeleri -3,57 eV ile 3,99 eV arasında değişmektedir. CdTe ince film örneklerinin yapısında bulunan boşluk (yani porlu yapılar) direncinin 0,787–306,1 k Ω ·cm² arasında olduğu belirlenirken, yük transfer direncinin 0,222–512,6 Ω ·cm² arasında olduğu belirlendi. Elektrokimyasal olarak üretilen CdTe ince filmleri ile ilgili gerçekleştirilen XRD analizleri, filmlerin CdTe'ün, hekzagonal ve monoklinik fazlarına sahip olduğu olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: CdTe, elektrodepozisyon, elektrokimyasal empedans spektroskopisi, Mott-Schottky, donör/akseptör yoğunluğu, elektronik enerji düzeyleri
2019, xiv + 113 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF CADMIUM TELLURIDE THIN FILMS

Tolga Murat DEMİRİZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ

In this study, the effect of deposition potential on physical characteristics of CdTe thin films is studied. The best deposition potential is researched. CdTe thin films are deposited on ITO substrate, changing deposition potential from -0,4 V to -1,1 V by a step of 0,1 V. The rate of Cd/Te, surface formation, morphological characteristics, conductivity types, carrier numbers, optical characteristics, forbidden energy band gaps and Nyquist curves of CdTe thin films are investigated depending on the deposition potential.

In the CV voltammogram, it is observed a peak at -0,4 V, which is belonging to CdTe. Forbidden energy band gaps of thin films have been determined between 1,61 eV–1,94 eV and thickness of thin films are determined between 72 nm–140 nm. Roughness values of CdTe thin films are found between 35 nm–191 nm from AFM measurements. Cd/Te rates of deposited CdTe thin films are reported between 1,03–1,55. Donor densities of CdTe thin films are found between 10^{17} – 10^{19} cm⁻³, while acceptor density of the CdTe thin film deposited at -0,9 V is 10^{20} cm⁻³. CdTe thin films deposited between -0,4 V and -0,8 V have n-type conductivity, while CdTe deposited on -0,9 V is p-type. From Mott-Schottky studies, it is concluded that Flat band potentials of CdTe thin films are between 0,28 V–0,60 V, and Flat band potential of the CdTe deposited at -0,9 V is -0,30 V. In addition, Fermi energy levels of CdTe thin films are calculated between -3,57 eV–3,99 eV. Pore resistance values of the films are found between 0,787–306,1 kΩ·cm² and charge transfer resistances of thin films are determined between 0,222–512,6 Ω·cm². According to the XRD measurements of electrodeposited CdTe thin films, the films have hexagonal and monoclinic crystalline phases.

Key words: CdTe, electrodeposition, electrochemical impedance spectroscopy, Mott-Schottky, donor/acceptor density, electronic energy levels

2019, xiv + 113 pages.

Bu zamana kadar yaptığım her işte; her zaman, her koşulda ve her şekilde yanımda olan aileme ithafen.

TEŞEKKÜR

Üniversitede lisans öğrenimim boyunca ve doktora tez çalışmam boyunca her türlü konu ve sorunda yeni ufuklar açan, gerek derslerimde ve gerekse deneylerimde yardımını esirgemeyen, yetişmemde çok büyük emeği olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Peksöz'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın deney kısmında yanımda olup yardım eden bölüm arkadaşım Gökhan Keser'e teşekkürlerimi sunarım.

Tolga Murat DEMİRİZ
24/05/2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL BİLGİLER.....	12
2.1.Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	12
2.1.1.Güneş Enerjisi.....	15
2.1.2.Güneş Enerjisi Depolama Şekilleri.....	16
2.2.İnce Filmler.....	17
2.2.1.İnce Film Üretim Yöntemleri.....	20
2.2.1.1.Buhar Fazda Büyütme.....	21
2.2.1.2.Sıvı Fazda Büyütme.....	23
2.2.1.3.Katı Fazda Büyütme.....	26
2.3.Yarıiletkenlerde Bant Yapısı.....	27
2.3.1.Periyodik Bir Alandaki Elektron.....	27
2.4.Bloch Elektronlarının Temel Özellikleri.....	28
2.4.1.Etkin Kütle.....	28
2.4.2.Wannier Teorisi–Etkin Kütle Yaklaşımı.....	29
2.5.Elektron Hızı.....	30
2.6.Bantlara Yerleşme ve Materyal Sınıflandırılması.....	31
2.7.Kristal Yapıları–Periyodiklik.....	33
2.8.Ters Örgü.....	39
2.9.Periyodik Yapılarda X–Işını Difraksiyonu.....	41
2.9.1.Laue Koşulu.....	41
2.9.2.Düzensizlik Etkisi.....	43
2.9.3.Saçılma Faktörü, f_{mnp}	45
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	48
3.1.Materyal.....	48
3.2.Deneysel.....	48
3.3.Döngüsel Voltametri Yöntemi.....	54
3.3.1.Deneysel Yöntem.....	55
3.4.Kıronoamperometre.....	59
3.5.Mott-Schottky.....	60
3.6.EIS (Elektrokimyasal Empedans Sistemi).....	64
3.6.1.AC Akım Teorisi ve Kompleks Empedans Değerlerinin Temsili.....	64
4.BULGULAR.....	71
4.1.Döngüsel Voltametri Çalışmaları.....	71
4.2.Kıronoamperometri Tekniği ile Filmlerin Sentezlenmesi.....	73
4.3.CdTe İnce Filmlerinin Optik Sonuçları.....	74
4.4.CdTe İnce Filmlerinin Yüzey İncelemeleri.....	80
4.5.Mott-Schottky (MS) ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Analizleri.....	96
5.TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	105

KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	113



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
i	A alanı başına akım
V_{oc}	Açık devre gerilimi
ω	Açısal hız
I	Akım
J	Akım yoğunluğu
N_A	Akseptör yoğunluğu
i_{pa}	Anodik akım
pH	Asitlik-Baziklik derecesi
f_i	Atomik faktör
M	Atomik kütle
E_g	Bant aralığı enerji değeri
C_n	Belirli bir eksende, $2\pi/n$ açılışta dönme
m	Bileşiğin kütlesi
MW	Bileşiğin moleküler ağırlığı
ρ	Bileşik yoğunluğu
σ	Bir düzleme göre yansımaya
R, R'	Bir örgü noktası
γ	Bloch durumu
k_B	Boltzmann sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
R_{pore}	Boşluk direnci
R_{CT}	CdTe ince filmi ile elektrolit arasındaki yük geçiş direnci
CPE_c	CdTe tabakasındaki sabit faz elementi
ψ	Dalga fonksiyonu
\mathbf{k}	Dalga vektörü
\mathbf{R}	Dedektör pozisyonu
χ^2	Deneysel verilerle fit değerleri arasındaki uyumun derecesi
ϵ_r	Depozit edilmiş yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ	Dielektrik sabiti
2θ	Difraksiyon açısı
R	Direnç
N_D	Doping yoğunluğu
V_{FB}	Düz bant potansiyeli
$\mathbf{F}(\mathbf{r})$	Düzlem dalga
CPE_{dl}	Elektrik çift tabakası için sabit faz elementi
A	Elektrot alanı
V	Elektrolitin hacmi
R_s	Elektrolitin ohmik direnci
E_{redoks}	Elektrolitin redoks enerjisi
n	Elektron sayısı (Cd^{2+} 'nin CdTe'deki Cd'a dönüşümünden dolayı $n=2$)
E_{Fn}	Elektronların Fermi seviyesi
m_e	Elektronun kütlesi

h_{ks}	Erime gizli ısısı
T_e	Erime sıcaklığı
$\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$	Eş düzlemlı olmayan vektörler
w	Fakırleşmiş bölge boyutu
F	Faraday sabiti
Φ	Faz
d	Film kalınlığı
η	Foto dönüşüm verimi
$h\nu$	Foton enerjisi
f	Frekans
Y_0	Frekans-bağımsız CPE parametresi
E_C, E_{CB}	İletim bandı enerji değeri
m_e^*	İletkenlik bandındaki elektronun etkin kütlesi
N_{CB}	İletkenlik bandındaki yoğunluk durumu
T_1	İlk sıcaklık
V_0	İlkel hücre hacmi
α	İnce film üretimde altlık döndürme derecesi
C	Kapasitans
$1/C^2$	Kapasitansın karesinin tersi
Z	Kapasitörün empedansı
x, y, z	Kartezyen koordinat sistemi koordinatları
C_k	Katının ısınma ısısı
i_{pc}	Katodik akım
J_{sc}	Kısa devre akım yoğunluğu
ρ	Konum vektörü
ξ_s	Koordinat ifade şekli
\mathbf{F}	Kuvvet
N	Malzemedeki atom sayısı
ϵ_b	Minimum enerji
n	Mol değeri
M	Molarite
m_n^*	n-tipi malzemenin efektif kütlesi
$\langle \mathbf{v} \rangle$	Ortalama elektron hızı
$\langle \mathbf{p} \rangle$	Ortalama momentum
$\alpha_i (\alpha, \beta, \gamma)$	Örgülerdeki açılar
a_i	Örgülerdeki uzunluklar
a_s	Periyot değeri
h	Planck sabiti
\hbar	Planck sabiti/ 2π
V	Potansiyel enerji
m_p^*	p-tipi malzemenin efektif kütlesi
I	$r \rightarrow -r$ dönüşümü
ω	Radyal frekans
n	Redoks sürecindeki elektron sayısı
D_j	Redoks türleri için difüzyon katsayısı
c_j^0	Redoks türlerinin yığın konsantrasyonu
S_n	Rotasyon C_n
$f_{m,n,p}$	Saçılma faktörü

I_{sc}	Saçılma yoğunluğu
m_0	Serbest elektron kütlesi
T	Sıcaklık
C_s	Sıvının ısınma ısısı
I_t, I_0	Sinyal genliği
E_0	Sinyalin genliği
α	Soğurma katsayısı
T_2	Son sıcaklık
E_t	t zamanındaki potansiyel
g_i	Tam sayı bir değişken
m_1, m_2, m_3	Tam sayı bir değişken
q	Temel yük
\mathbf{G}	Ters örgü vektörü
V	Uygulanan voltaj
N_{VB}	Valans bandındaki boşlukların yoğunluğu
m_h^*	Valans bandındaki etkin kütle
V_{bi}	Varolan potansiyel
E	Voltaj
S_G	Yapı faktörü
E_F	Yarıiletkendeki Fermi seviyesi dengesi
E_V, E_{VB}	Yarıiletkenin valans band enerjisi
\mathbf{r}	Yer vektörü
V_{bi}	Yerleşik potansiyel
N_{ss}	Yüzey durum yoğunluğu
t	Zaman

Kısaltmalar

Açıklama

2E	2 Elektrotlu Sistem
3E	3 Elektrotlu Sistem
AC	Alternatif Akım
AlAs	Alüminyum Arsenit
a-Si	Amorf Silisyum
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
AM	Aydınlanma
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenid
SC	Basit Kübik
BZ	Brillouin Bölgesi
BCC	Cisim Merkezli Kübik
DC	Doğru Akım
FF	Doluluk Faktörü
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektropisi
EDX	Enerji-Dispersiv X-Işını Analizi
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
FTO	Florin Katkılı Kalay Oksit
PEC	Fotoelektrokimyasal Hücre
PV	Fotovoltaik

GaAs	Galyum Arsenit
Ag/AgCl	Gümüş/Gümüş Klorür
LED	Işık Yayan Diyot
ITO	İndiyum Katkılı Çinko Oksit
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standarts
CdCl ₂	Kadmiyum Klorit
Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	Kadmiyum Nitrat
CdSe	Kadmiyum Selenid
CdS	Kadmiyum Sülfür
CdTe	Kadmiyum Tellür
CBD	Kimyasal Banyo Kaplama
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
CSP	Konsantre Güneş Gücü
GWEC	Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi
MOVPE	Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksisi
MOCVD	Metal-Organik Kimyasal Buharlaştırma Depozisyonu
MBE	Moleküler Işın Epitaksisi
MS	Mott-Schottky
UV-vis-NIR	Optik Transmittans Spektrumu
KCl	Potasyum Klorür
KNO ₃	Potasyum Nitrat
RF	Radyo Frekansı
SE	Schrödinger Eşitliği
NaCl	Sodyum Klorür
Na ₂ TeO ₃	Sodyum Tellürit
SCE	Standart Kalomel Elektrot
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TeO ₂	Tellürdioksit
TiO ₂	Titanyumdioksit
TEM	Transmittans Elektron Mikroskopisi
UV	Ultraviyole
XRD	X-Işını Difraktometresi
IR	Yüksek çözelti direncini yenmek için gerekli olan potansiyel
FCC	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No	
Şekil 2.1.	Rüzgâr tarlalarındaki, rüzgâr güllerinin optimum yerleşimi	12
Şekil 2.2.	Güneş radyasyonunun bileşenleri	15
Şekil 2.3.	Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlası	16
Şekil 2.4.	Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan üç farklı ince film teknoloji: CdTe/CdS, CIGS ve a-Si ince film güneş gözeleri	18
Şekil 2.5.	İnce film üretim teknikleri	20
Şekil 2.6.	Tipik bir MOCVD (Metal organik kimyasal buhar biriktirme) sisteminin şeması	22
Şekil 2.7.	Fiziksel buhar biriktirme teknikleri	23
Şekil 2.8.	Kimyasal banyo metodu blok diyagramı	24
Şekil 2.9.	Elektrokimyasal yöntem düzeneği	26
Şekil 2.10.	Bantlardaki elektron durumu	32
Şekil 2.11.	Bant çakışması durumu	33
Şekil 2.12.	Rotasyon simetrisinin saptanması	34
Şekil 2.13.	Bir boyutlu örgüler	35
Şekil 2.14.	2 boyutlu örgülerde 5 örnek	36
Şekil 2.15.	İlkel hücreler	37
Şekil 2.16.	BCC yapı için ilkel vektörler ve kafesler	38
Şekil 2.17.	BCC kafes yapısı için örgü vektörlerinin daha simetrik seçimi	38
Şekil 2.18.	Wigner–Seitz hücresinin belirlenmesi	39
Şekil 2.19.	Periyodik atomik yapısının saçılma geometrisi	42
Şekil 2.20.	Her bir temelde birden fazla atom olan bir kristalin saçılması	45
Şekil 2.21.	Birbiri içine geçmiş FCC yapılarının iki atomlu yapısı	46
Şekil 3.1.	Deney öncesinde ITO camlarımızı ultrasonik temizleme aşaması	49
Şekil 3.2.	İnce filmler için kullandığımız kimyasalların kütlelerin ölçüldüğü hassas terazi	51
Şekil 3.3.	Elektrolitlerin hazırlanma aşaması, (a) Karıştırma öncesinde elektrolit, (b) Karıştırma sonrasında elektrolit	52
Şekil 3.4.	(a) Gamry 3000 sistemi, (b) Sistemde kullandığımız elektrolit	52
Şekil 3.5.	Laboratuvarımızdaki AFM cihazı	53
Şekil 3.6.	Laboratuvarımızdaki UV ölçüm cihazı	54
Şekil 3.7.	Tipik bir döngüsel voltamogram	55
Şekil 3.8.	Döngüsel voltametri potansiyel dalga formu	56
Şekil 3.9.	Döngüsel voltametri voltamogramları	57
Şekil 3.10.	Kıranoamperometredeki zamana karşı potansiyeldeki değişim	59
Şekil 3.11.	Kıranoamperometri yönteminde zamana karşı akım değişimi	60
Şekil 3.12.	(a) Sol tarafta (renkli) redoks elektroliti ve sağ tarafta metalik ohmik bağlantılı, n-tipi yarıiletkenine ait enerji diyagramı; E_c , iletim bandı değeri; E_v , yarıiletkenin valans band enerjisi; E_F , yarıiletkendeki Fermi seviyesi dengesi ve E_{redoks} , elektrolitin redoks enerjisi ile yarıiletken/elektrolit arayüzeyinde Schottky engeli şekillenmiştir. Enerji diyagramındaki engelin düşey boyutu, yerleşik potansiyele, V_{bi} , karşılık gelmektedir. Fermi seviyelerinin uzaysal eksen denkliği bir uzay yük bölgesi veya w boyutunun	

	fakirleşmiş bölgesini oluşturur. Geri kontağa pozitif bir voltaj uygulandığında	
	(b) elektronların Fermi seviyesi, E_{Fn} , yükselmektedir ve fakirleşmiş bölgenin boyutu azalmaktadır. Bu nedenle eklemin kapasitansı artar ve lineer Mott-Schottky eğrisindeki kapasitansın karesinin tersi azalmaktadır.	
	(c) x-ekseniyle kesişen yer, elektrolit tarafındaki voltajın referans değerine bağlı olan, yerleşik voltaj değerini oluşturan düzband durumunu göstermektedir.	
	(d) Yüzey durum yoğunluğunun varlığında, N_{ss} , Fermi seviyesi band aralığı durumu seviyesine ulaşınca deşarj edilir ve eklemin elektrolit tarafında Helmholtz tabaka kapasitansının değerine bağlı olarak bir düzlük oluşur. Yüzey durumu şarj edildiğinde Mott-Schottky çizgisi devam eder, fakat düzband voltajı açılan Fermi seviyesinin açılımıyla açıklanan şekilde değiştirilir.	61
Şekil 3.13.	Standart Ag/AgCl elektrotlu, farklı pH değerlerindeki sulu elektrolit içindeki FTO üzerindeki yariletken elektrotun Mott-Schottky eğrisi	64
Şekil 3.14.	Lineer bir sistemdeki sinüzoidal akım karşılığı	66
Şekil 3.15.	Lissajous şeklinin orijini	67
Şekil 3.16.	Empedans vektörü ile Nyquist eğrisi	69
Şekil 3.17.	Tek zaman sabitli basit eşdeğer devre	69
Şekil 3.18.	Tek zaman sabitli Bode eğrisi	70
Şekil 4.1.	Kadmiyuma ait voltamogram	71
Şekil 4.2.	Tellüre ait voltamogram	72
Şekil 4.3.	Kadmiyum tellüre ait voltamogram	72
Şekil 4.4.	Farklı kaplama potansiyellerinde üretilmiş Cd-Te ince filmleri	74
Şekil 4.5.	Farklı kaplanma potansiyellerinde üretilmiş ince filmlere ait kronoamperometri sonuçları	75
Şekil 4.6.	Farklı kaplama potansiyellerinde üretilmiş ince film örneklerine ait UV-Vis soğurma sonuçları	75
Şekil 4.7.	Direk ve indirek band yapısı modeli	76
Şekil 4.8.	(a) -0,4 V'ta üretilen ince filmin yasak enerji bant aralığı, (b) -0,5 V'ta üretilen ince filmin yasak enerji bant aralığı, (c) -0,6 V'ta üretilen ince filmin yasak enerji bant aralığı, (d) -0,7 V'ta üretilen ince filmin yasak enerji bant aralığı, (e) -0,8 V'ta üretilen ince filmin yasak enerji bant aralığı, (f) -0,9 V'ta üretilen ince filmin yasak enerji bant aralığı	78
Şekil 4.9.	5x5 μm büyüklüğünde, (a) -0,4 V kaplama potansiyelinde, (b) -0,5 V kaplama potansiyelinde elektrodpozit edilmiş ince film örneklerinin AFM görüntüleri	80
Şekil 4.10.	5x5 μm büyüklüğünde, (a) -0,6 V kaplama potansiyelinde, (b) -0,7 V kaplama potansiyelinde elektrodpozit edilmiş ince film örneklerinin AFM görüntüleri	81

Şekil 4.11.	5x5 µm büyüklüğünde, (a) -0,8 V kaplama potansiyelinde, (b) -0,9 V kaplama potansiyelinde elektrodepozit edilmiş ince film örneklerinin AFM görüntüleri	81
Şekil 4.12.	(a) -0,4 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -0,4 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -0,4 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	83 84
Şekil 4.13.	(a) -0,5 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -0,5 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -0,5 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	84 85
Şekil 4.14.	(a) -0,6 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -0,6 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -0,6 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	86 87
Şekil 4.15.	(a) -0,7 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -0,7 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -0,7 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	87 88
Şekil 4.16.	(a) -0,8 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -0,8 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -0,8 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	89 90
Şekil 4.17.	(a) -0,9 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -0,9 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -0,9 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	90 91
Şekil 4.18.	(a) -1,0 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (b) -1,0 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü (c) -1,0 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	92 93
Şekil 4.19.	(a) -1,1 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	93

Şekil 4.19.	(b) -1,1 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	
	(c) -1,1 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü	94
Şekil 4.20.	Farklı kaplama potansiyellerinde hazırlanmış CdTe ince film örneklerinin Au-Pd kaplanarak SEM-EDAX ölçümlerini almaya hazırlanışı	95
Şekil 4.21.	Farklı kaplama potansiyellerinde hazırlanmış CdTe ince filmlerinin EDAX spektrumu	96
Şekil 4.22.	Farklı depozisyon potansiyellerinde üretilmiş CdTe ince filmlerine ait Mott-Schottky eğrileri	100
Şekil 4.23.	Depozisyon potansiyeline bağlı olarak üretilmiş CdTe ince filmlerinin elektronik enerji diyagramı	101
Şekil 4.24.	CdTe ince filmlerinin fit edilmiş eğrileri ve Nyquist eğrileri	103
Şekil 4.25.	-0,8 V kaplama potansiyelinde üretilmiş CdTe ince filmine ait XRD görüntüsü	104

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. 3 boyutlu örgü tipleri	37
Çizelge 4.1. Değişen voltaj değerlerine karşılık elektrolit dirençleri	74
Çizelge 4.2. Farklı potansiyellerde yapılan CdTe ince filmlerinin E_g değerleri ve film kalınlıkları	77
Çizelge 4.3. Kadmiyum tellürdeki kübik yapıdan hekzagonal faz yapısına geçiş	79
Çizelge 4.4. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince filmlerine ait pürüzlülük değerleri	82
Çizelge 4.5. CdTe ince filmlerinin elementel bileşimleri	96
Çizelge 4.6. CdTe ince filmlerine ait Mott-Schottky parametreleri	99
Çizelge 4.7. CdTe ince filmlerinin fitlenmesi sonrasındaki eşdeğer elektronik devre elemanlarının değerleri	103

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında depozisyon potansiyelinin CdTe ince filmlerinin fiziksel özelliklerine etkisi incelenerek, en iyi CdTe filminin üretildiği depozisyon potansiyel değeri tespit edilmeye çalışılmıştır. Depozisyon potansiyeli, -0,4 V'tan başlayarak 0,1 V'luk adımlarla -1,1 V'a kadar değiştirilerek, toplam 9 ayrı voltaj değerinde CdTe ince filmler üretilmiştir. Üretimin gerçekleştirildiği voltaj değerine bağlı olarak Cd/Te oranı, filmlerin yüzey oluşumları, filmlerin yapısal özellikleri, iletkenlik tipleri, taşıyıcı sayıları, optik özellikleri, yasak enerji band aralıkları ve elektrokimyasal empedans verilerinin değiştiği görülmüştür.

Günümüz dünyasında değişen iklim koşulları ve yaşam şartlarından dolayı artan enerji ihtiyacı, enerji üretimi sırasında çevreye verilen zarar, enerji elde etmede kullanılan fosil yakıtların bilinen rezervlerinin giderek azalması gibi sebeplerden dolayı, doğaya daha az zarar veren veya vermeyen yeni enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Temiz enerji kaynaklarının bazıları rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi, hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir.

Yukarıda adı geçen temiz enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisini kullanarak enerji sorununa bir seçenek sunabilmekteyiz. Solar, kelime olarak Latin kökenli bir kelimedir ve enerjinin güçlü kaynağı anlamına gelmektedir. Bu enerji, yani güneşten gelen bir saatlik enerji bile dünyadaki her bir kişinin bir yılda harcadığı enerjiye denktir. Birçok teknolojik çalışma da güneş ışığını, binalarda ve diğer alanlarda kullanabileceğimiz enerjiye çevirebilmek için yapılmaktadır (www.nrel.gov/workingwithus/re-solar.html, 2018).

Ülkemizde de son yıllarda, güneş enerjisi ile ilgili çalışmalar yapılmakta olup, kullanılmaya başlanılmıştır. Özellikle güneş enerjisinden daha verimli şekilde yararlanabilmek için üretim ve geliştirme alanlarında çalışmalar yapılmaktadır. Güneş enerjisinden yararlanabilmek için en bilindik olarak su ısıtma sistemleri ve direkt olarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen güneş pilleri kullanılmaktadır. Güneş pillerinde de, su ısıtma sistemlerinde de sistemin kurulduğu bölgenin günlük, aylık veya yıllık güneşlenme miktarlarının uygun seviyelerde olması önemlidir. Ülkemizdeki güneşlenme miktarı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın Enerji İşleri Genel

Müdürlüğü internet sayfasındaki (www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx, 2019) verilerden incelendiğinde, güneş enerjisi uygulamaları için ülkemizdeki güneşlenme miktarının uygun olduğu görülmektedir.

Yenilenebilir ve temiz enerji kaynağı olarak yukarıda da adı geçen birçok seçeneğin olduğu görülmektedir. Bunlardan birisi olan güneş enerjisini kullanırken güneş hücrelerini (PV) veya ince film teknolojisini kullanmak, enerji gereksiniminin bir çözümü olarak görülmektedir. Güneş hücrelerinin yapısında da bulunan ince filmlerin üretilmesinde ve geliştirilmesinde kullanılan bazı materyaller; silisyum (Si), amorf silisyum, galyum arsenit (GaAs), bakır indiyum diselenid (CuInSe_2), bakır indiyum galyum selenid (CIGS) ve kadmiyum tellür (CdTe) şeklinde sıralanabilir.

Sıraladığımız materyallerden birisi olan CdTe ince filmlerine ait yapılan çalışmaların bazılarını inceleyelim. İlk olarak, Olusola ve ark. (2017), iki elektrotlu elektrodepozisyon yöntemini kullanarak II-VI grup elementlerinden yararlanarak çok eklemlili yapıdaki, ZnS/CdS ve CdTe güneş hücrelerinin üretimini ve karakterizasyonunu başarılı şekilde çalışmışlardır. Fotoelektrokimyasal hücre (PEC) yöntemiyle üretilen üç hücrenin de n-tipi yapıda olduğu görülmüştür. I-V karakteristik ölçümlerine göre açık devre gerilimi (V_{oc}) 670 mV, kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) $41,5 \text{ mA cm}^{-2}$ ve doluluk-faktörü (FF) 0,46 olarak ölçülürken, oda sıcaklığında ölçülen verim değeri ise $\sim 12,8\%$ 'dir. C-V ölçüm sonuçlarına göre üretilen hücrelerin doluluk oranlarının $5,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ gibi iyi bir orana sahip olduğu görülmüştür. Üretilen ince filmler incelendiğinde, CdTe tabakasının ideal depozisyon katodik potansiyeli 1400 mV olarak görülmüş, ayrıca cam/FTO/n-ZnS/n-CdS üzerine kaplanmış CdTe kalınlığı ise $\sim 1,2 \mu\text{m}$ 'dir. İnce film güneş gözelerinde kullanılan CdTe katmanının enerji bant aralığı 1,50 eV olarak ölçülmüştür. Burada CdTe tabakası, açık havada 10 dakika boyunca $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de CdCl_2 gaz ortamında fırınlanan üretimi yaygın olarak kullanılmaktadır (Olusola ve ark., 2017).

Olusola ve ark. (2017), bir diğer çalışmada GaCl_3 eklenerek üretilen CdTe zeminli solar hücrelerinin yapısal özellikleri ile klasik CdCl_2 ile üretilen CdTe zeminli solar hücrelerinin yapısal özelliklerini karşılaştırmışlardır. Öncelikli olarak GaCl_3 ekleyince CdTe ince filmlerindeki oluşan yapısal ve optik özellikler incelenmiştir. Sonuçlara göre, $\text{GaCl}_3 + \text{CdCl}_2$ ile oluşturulan CdTe ince filmlerinin bant aralığının, yalnızca CdCl_2 ile

oluşturulan CdTe ince filmlerinin band aralığına yakın olduğu görülmüştür. Yapısal özellikler incelendiğinde, GaCl₃+CdCl₂ ile oluşturulan CdTe ince filmleri yalnızca CdCl₂ ile oluşturulan CdTe ince filmlerinden daha kristalit bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. CdCl₂ içine Ga eklenmesi, direnç düşüşüne ve kısa-devre akım yoğunluğu, doldurma faktörü ve tam solar hücre veriminin iyileşmesine sebep olmuştur. Cam/FTO/n-CdS/n-CdTe örnekleri için hücre verimleri % 1,9 – % 2,1 arasındayken, CdCl₂+GaCl₃ ile üretilmiş örnekler için hücre verimi % 6,1 – % 6,4 arasında seviyelere çıkmıştır. Sonraki CdCl₂+GaCl₃ ile yapılan çalışmalardan ise solar hücre veriminin % 10'dan fazla olduğu görülmüştür (Olusola ve ark., 2017).

Bir diğer çalışmada, buharlaştırma yöntemiyle farklı açılarda ($\alpha=0^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ve 60°) 55 rpm'lik altlıkların dönüş hızına karşılık, 40 rpm'lik kuvvet yardımıyla CdTe örnekleri hazırlanmıştır. SEM ve AFM görüntülerine göre değişken yapı ve biçimlerde sütun biçimli yapılar olduğu görülmüştür. XRD sonuçlarına göre, CdTe örneklerinin kübik fazlı yapıda olduğu görülmüştür. Altlık derecesinin (α) artmasının kristalit boyutunun azalmasına sebep olduğu görülmüştür. Örneklerdeki kolon şeklindeki yapılar sebebiyle ışığın saçılmasından dolayı $\alpha=50^\circ$ ve 60° 'de üretilmiş örneklerde görünür soğurma uç değerlerinin, düşük dalga boyu değerlerine doğru kaydığı görülmüştür. Üretilen bütün örneklerin optik band aralığı değerleri ortalama olarak ~1,5 eV olarak ölçülmüştür (Daza ve ark., 2017).

Benzer şekilde, Sheffield Hallam Üniversitesi'ndeki güneş enerjisi grubu, CdTe ince filmlerinin elektrodepozisyonlarındaki en iyi elektroliti seçmek için kadmiyum sülfat, kadmiyum nitrat ve kadmiyum klorit ön-maddelerini kullanmışlardır. Kadmiyum sülfat ön-maddelerinden üretilmiş CdTe tabakaların daha iyi olduğu görülmüştür. CdS/CdTe güneş hücrelerinde referans elektrot olarak K⁺ ve Ag⁺ uygun olduğu görülmüştür. Cam/FTO/CdS/CdTe/Au ve CdTe her iki metotla da üretilmiş ve verimlerinin % 5 – % 13 arasında olduğu ölçülmüştür. 2E sistemle üretilmiş örneklerin 3E ile üretilmiş örneklerden daha üstün olduğu görülmüştür. Üretim esnasında Te deposisyonu 250 mV ve Cd deposisyonu da 1000 mV civarında başlamıştır. Her iki sistemdeki örneklerin yapısal özelliklerinin de benzer olduğu görülmüştür. Üretilen örneklerin polikristalin yapıda, kübik yapıda ve (111) yönünde yönlendirilmiş olduğu görülmüştür. Oluşan kristalitlerin boyutları 20 nm ile 65 nm arasında olduğu ölçülmüştür. Her iki sistemdeki

örneklerde de CdTe ince filmlerinin band aralığı enerjisi 1,45 eV olarak ölçülmüştür ve oluşan malzemeler p-tipi ve n-tipi özellik göstermiştir (Dharmadasa ve ark., 2017).

Razmjoo ve ark. (2017), çeşitli akım yoğunluklarında florin katkılı kalay oksit altlık üzerine (FTO) galvonastatik olarak CdTe filmlerini elektrodepozit etmişlerdir. Elektrodepozit edilmiş filmler XRD, SEM ve optik absorpsiyon spektropisi teknikleriyle karakterize edilmiştir. Sonuçlara göre, artan akım miktarıyla birlikte depozit edilmiş filmlerdeki kadmiyum miktarı da artmaktadır. Uygulanan 18 mA/cm²'lik bir akım yoğunluğuna karşılık Cd:Te filmleri 1:1 oranındaki sitokiyometrik bir yapıyla oluşmaktadır. Dahası, maksimum optik soğurma ve kapalı bant aralığı değeri, CdTe sitokiyometrik filmlerde 1,45 eV değerindedir. Daha az poroziti ve daha büyük kristalit boyutlu filmler elektrodepozit edilmiştir. Bunlara ek olarak, ısısal bir etki yapmadan bu filmlerin yapılarında daha az poroziti, daha büyük kristalit boyutu ve daha düşük bant aralığı enerjisine sahip olduğu görülmüştür (Razmjoo ve ark., 2017).

CdTe/CdS güneş hücrelerinin geliştirilmesi için CdTe elektrodepozisyon voltajının optimizasyonu ile ilgili çalışmada, kadmiyum tellür (CdTe) ince filmler cam/FTO üzerine düşük maliyetli olarak, 2 elektrotlu sistemler ve sulu elektrodepozisyon metodu ile depozit edilmiştir. Cam/FTO altlıklara farklı voltajlarda depozit edilerek, CdTe tabakaları büyütülmüştür. Yapısal, elektriksel, optik ve morfolojik özellikleri XRD (X-Işını difraksiyonu), fotoelektrokimyasal hücre ölçümleri (PEC), optik absorpsiyon spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile incelenmiştir. XRD sonuçlarına göre 1,576 V altındaki ya da üstündeki voltajlarda kristalliğin, 2 fazlılıktan dolayı düzgün olmadığı görülmüştür. 1,576 V'ta büyütülmüş CdTe, sitokiyometriktir ve XRD ölçümlerinde (111) düzleminden pik verdiği görülmüştür. SEM çalışmalarından ise bütün tabakalardaki pin-holleri ve aralıkların, taneciklerin (grainlerin) arasında olduğu görülmüştür. Bu açıklıklar gösteriyor ki, sitokiyometrik voltajdan (1,576 V) uzaktaki voltajlarda büyütülmüş olan örnekler de benzer yapıdadır. Cam/FTO/CdS/CdTe/Au yapılarında, üretilmiş olan sitokiyometrik CdTe'nin lineer I-V eğrisine göre, AM 1,5 aydınlanmada verim değeri % 10,1 olarak görülmüştür (Diso ve ark., 2016).

Bir diğerk çalışmada ise, açık atmosferde post-depozisyon ile üretilen CdTe ince filmlerinin yapısal, optik, morfolojik ve elektriksel özelliklerinin değışimi incelenmiştir. 850 nm kalınlıktaki çoklu-kristalit yapıdaki CdTe ince filmleri cam ve ITO üzerine termal vakum buharlaştırma tekniğıyle depozit edilmiş ve 150 °C, 250 °C ve 350 °C sıcaklıklarda tavlannıştır. Fiziksel özellikleri UV-Vis spektrometresi, XRD, EDS ve güç ölçerli SEM ile karakterize edilmiştir. Optik transmittansın, ısısald davranışa bağılı olarak, optik band aralığındaki 1,78 eV'tan 1,54 eV'a kadar geçen enerjisine göre arttığı görülmüştür. Isısald dağılama sonucunda da filmlerin (çinko sülfür kübik yapı) kristallitliğı (111) yapısına doğıru değışmiştir. Yüzey morfolojisinin çalışmalarının sonucunda da filmlerin homojen, yoğun şekilde paketlenmiş, düzenli ve kristal kusurlarından uzak olduğı görülmüştür. Akım-voltaj ölçümleri de üretilen filmlerin ohmik özellikte olduğunu göstermiş ve iletkenliğıin de ısısald dağılama ile arttığı görülmüştür (Chander ve ark., 2016).

Başka bir çalışmada, florin katkısının, CdTe'ün karakteristik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. CdTe ince filmlerinin n-tip katkılayıcı olarak flüorun elektrolitlere katılınca üretilen filmlerin optik, yapısal, morfolojik ve elektriksel özelliklerinin nasıl değışebileceğı gözlemlenmiştir. Karakterizasyonlar XRD, ultraviyole-görünür spektrofotometri, SEM, enerji dağıtıcı X-ışını spektrometresi, fotoelektrokimyasal hücre özelliğı, direk akım bağılantı özelliğı ile yapılmıştır. CdTe gibi ikili yarı-iletken yapılarda ve CdS/CdTe gibi yapılarda 2015'te ulaşılmış en yüksek verim % 21,5 olarak ölçülmüştür. Üretilen hücrelerin verimlerinin, klor ve flor gibi halojenlerle büyütülmüş olan bütün katmanlara ve eş değıerdeki ara bölgelere bağılı olduğı görülmüştür. Yüksek verimli güneş hücreleri için, CdTe yüzeylerinin morfolojik, yapısal ve fotoelektriksel özelliklerinde, CdCl₂ eklenmesi önemli ve hassas bir basamak olduğı literatüre geçmiştir. Flor katkılamanın CdTe katmanlarındaki iletkenliğı arttırdığı düşünölmektedir. Literatürdeki optimum flor konsantrasyonun CdTe elektrolitlerinde ne kadar olduğı belli edilmemiştir (Ojo ve ark., 2016).

Ojo ve ark. (2016), bir diğerk çalışmalarında elektrodpozisyon ile üretilen, 3 katmanlı n-n-p hücrelerin özellikleri incelemiştirlerdir. Üretilen örnekler cam/FTO/n-CdS/n-CdTe/p-CdTe/Au şeklindedir. Laboratuvar ortamında üretilen örneklerin verimlerinin % 15,3'e kadar çıktığı gözlemlenmiştir (Ojo ve ark., 2016).

Esnek metal folyo üzerine elektrodepozisyon ile CdTe ince filmlerinin sentezi üzerine yapılan çalışmada, CdTe ince filmleri Mo folyo üzerine sulu asidik çözelti ile sıkça kullanılan TeO_2 yerine Na_2TeO_3 kullanılarak elektrodepozisyon yöntemiyle kaplanmıştır. XRD sonuçları CdTe ince filmlerinin kristal yapısının çinko sülfür simetrisinde olduğunu göstermiştir, ayrıca tellür konsantrasyonun morfoloji üzerinde etkili olduğu da görülmüştür. Filmlerdeki Cd:Te molar oranının, farklı tellür konsantrasyonlarında bile sitokiyometrik olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, tellür konsantrasyonundaki indirgenme durumu gözenekli ince filmlerin oluşmasına ve ince filmlerin kristal yapısının zayıf olmasına sebep olmuştur. UV-Vis spektrometresi ölçümlerine göre de CdTe ince filmlerinin band aralığı 1,49 eV olarak ölçülmüştür (Luo ve ark., 2016).

Bir başka çalışmada farklı kalınlıklardaki CdSnTe ince filmleri, vakumlu kapalı alan süblimleştirme tekniğiyle cam altlık üzerine kaplanmıştır. CdSnTe bileşiğinin kristal yapısını yüzey merkezli kübik yapı olarak ve kristal parametresini de 6,30 Å olduğu ölçülmüştür. EDAX çalışmaları, oluşan bileşiğin CdSnTe₂ olduğunu göstermiş, UV-vis-NIR optik transmitans spektrumuna göre de üretilen ince filmlerin farklı altlık sıcaklıkları olduğu görülmüştür. Enerji band aralığı 1,5 eV olarak ölçülürken, ölçülen band aralığının LED'ler, optoelektronik ve fotovoltaik yapılar için uygun olduğu görülmüştür (Selvakumar ve ark., 2016).

Echendu ve ark. (2016), karşılaştırma yapabilmek için CdTe ince filmleri 2 elektrotlu ve 3 elektrotlu sistemlerle elektrokimyasal olarak depozit etmişlerdir. Kadmiyum sülfat ve tellürdioksit sırasıyla kadmiyum ve tellür kaynağı olarak kullanılmış, elde edilen katmanlarda yapısal, optik ve elektriksel herhangi bir farklılık olmadığı görülmüştür. Bu çalışmadaki sonuçlara göre CdTe'ün elektrokimyasal depozisyonu için de ve genel olarak yarı-iletkenlerin elektrodepozisyonu için de 2 elektrotlu sistemin 3 elektrotlu sistem kadar iyi olduğu görülmüştür (Echendu ve ark., 2016).

CdTe güneş hücrelerinin esnek metal folyolar üzerine olan büyük ölçekli üretiminin, kalsiyum oksit karışımı cam altlıklar üzerine yapılırken karşılaşılan zorluklar nedeniyle, CdTe yarı-iletkenleri RF manyetronlu püskürtme yöntemiyle esnek Cu folyoların üzerine kaplanmıştır. Film kalınlığının, nano yapıların yapısal, optik ve

morfolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş, XRD sonuçlarına göre üretilen filmlerin çinko sülfür polikristalin yapıda olduğu ve (111) noktasında pik yaptığı, depozisyon zamanının artmasıyla filmin kristalliğinin arttığı ve ayrıca depozisyon zamanının 10-20 dakika aralığında farklı sürelerde uygulandığında yüzey özelliklerinin, tane boyutunun, pürüzlülük gibi özelliklerinin depozisyon zamanına bağlı olduğu görülmüştür. UV-Vis-NIR spektrometresi ile optik özelliklerinden, depozisyon zamanının artırılması ile CdTe/Cu yapısının görünür bölgedeki absorpsiyon oranının arttığı gözlemlenmiştir. RF manyetron püskürtme yöntemiyle, Cu folyo altlık üzerine kaplanan CdTe büyütmesinde yüzeyde oksit tabasının oluşmadığı ve kristallikle birlikte optik absorpsiyonun da arttığı görülmüştür (Akbarnejad ve ark., 2016).

CdTe ince filmler, içlerinde $(\text{CdCl}_2) \cdot \text{H}_2\text{O}$ ve TeO_2 bulunan sulu çözeltilerle elektrodpozisyon tekniğiyle başarılı şekilde hazırlanmıştır. Üretilen filmlerin yapısal, elektriksel, morfolojik ve optik özellikleri XRD, Raman spektrometresi, optik profilometri, DC I-V ölçümleri, PEC (fotoelektrokimyasal hücre) ölçümleri, SEM, AFM ve UV-Vis spektrometresi ile belirlenmiştir. Çalışmalara göre 3 elektrotlu bir sistemde, standart kalomel elektrot (SCE) ile çalışılınca en ideal katodik potansiyel 698 mV olarak ölçülmüştür. XRD sonuçlarına göre yapısal olarak işlem görmemiş CdTe ince filmlerin polikristalin kristal yapıda olduğu ve pik yoğunluğunun CdCl_2 eklenmesinden sonra artmakta olduğu görülmüştür. PEC ölçümlerine göre de olası büyütme türleri p-tipi, i-tipi ve n-tipi CdTe tabakaların oluşum ihtimalinin, depozisyon süresi boyunca değişken büyütme potansiyelleriyle mümkün olduğu görülmüştür. İşlem görmemiş tabakaların elektriksel direnç ölçümü de $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak ölçülmüştür. SEM ve AFM sonuçlarına göre, CdCl_2 kullanılarak yapılan üretimde CdSO_4 ile yapılan üretime göre pürüzlülük ve daha büyük tanecik boyutu oluşmaktadır. Optik absorpsiyon sonuçlarına göre, işlem görmemiş CdTe için band aralığı, CdCl_2 eklendikten sonra 1,48-1,52 eV değerinden 1,45-1,49 eV değerine düşmüştür (Abdul-Manaf ve ark., 2015).

İncelenen bu çalışmada, güneş hücresi uygulamalarında kullanılan elektrodpozit edilmiş CdTe ince filmlerindeki kimyasal ve termal işlemlerin etkisi incelenmiştir. Asidik sülfat sulu elektrolit ile elektrodpozit edilmiş nanokristalin yapıdaki CdTe ince filmlerin, farklı potansiyellerde üretilirken, elektrodpozisyon potansiyeli ve termal ve kimyasal işlemlerin, yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerindeki etkisi

incelenmiştir. -0,62 V (SCE) değerindeki elektrodepozisyonda, ısı ve CdCl₂ işlemi sonucunda oluşan CdTe filmler yüksek bir kristalin kübik yapıda oluşmuştur. Tanecikler oluşmuş, serbest çatlaklar ve de band aralığı 1,44 eV olan yaklaşıkça sitokiyometrik yapı oluşmuştur. Serbest Te yapısına rastlanmamıştır. CdTe filmlerinin özellikleri XRD, Raman spektrometresi, SEM, enerji dispersiv X-ışını ve UV-Vis spektrometresi ile incelenmiştir. CdTe/CdS güneş hücresinin J-V karakteristikleri 100 mW/cm²'lik bir aydınlanma altında incelenmiştir. Isı ve CdCl₂ etkisi altında, -0.62 V (SCE) değerinde elektrodepozit edilmiş CdTe filminin bazı değerleri ise: V_{oc} = 0,73 V, J_{sc} = 20 mA/cm², FF = %50 ve η = % 9 olarak ölçülmüştür (Fathy ve ark., 2015).

Bu uygulamada da, CdTe ince filmleri, Ni folyolar üzerine asidik çözeltilerden hızlı ve uygun bir elektrodepozisyon yöntemi olarak görülen 2-basamaklı elektrodepozisyon tekniğiyle hazırlanmıştır. İlk adımda, Ni folyo altlık üzerine -0,3 V'ta Te-zengini CdTe tabaka depozit edilmiş, sonrasında filmin yüzeyine -0,6 V'ta ikinci CdTe tabakası kaplanmıştır. 2-basamaklı CdTe ince filmlerinin üretimi, güneş hücreleri uygulamalarındaki önerilen potansiyele göre daha yüksek kısa devre akım yoğunluğu olduğunu göstermiştir ve bu, filmin kristallitliğini, eş değer CdTe piklerinin keskinliğindeki beklenen değerler gibi görülmesine bağlı olarak değiştirmiştir. 2-basamaklı sistemle Ni folyo altlık üzerine kaplanmış film yüzeylerindeki temel değişiklik, görünür alan içindeki geniş ve daha güçlü soğurma yoğunluğuna sebep olmuş ve görünür ışıktaki fotovoltaj performansın da arttığı görülmüştür (Wang ve ark., 2015).

Yao ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada CdTe polikristalin filmleri esnek Ni folyo altlık üzerine ardışık yüzey yazma (sequential screen printing) yöntemiyle kaplamışlardır ve azot atmosferinde katılaştırmışlardır (sintering). Bu yöntemle üretilen filmler üzerindeki sıcaklığın etkisini araştırmışlar ve 550 °C sıcaklıkta 2 saatlik katılaştırma işlemiyle oluşturulan CdTe filmlerinin yüksek kalitede olduğu görülmüştür. Katılaştırılmış CdTe filmlerinin özellikleri SEM, XRD ve UV-görünebilir spektroskopisiyle incelenmiştir. Yüksek kalitedeki CdTe filmlerin foto-akımları, diğer sıcaklıklarda hazırlanan örneklerinkinden daha yüksek olarak 2,04 mA/cm² olarak ölçülmüştür. CdCl₂ kullanılması nedeniyle ve daha büyük tanecik yapısından dolayı CdTe filminin band aralığında azalma olduğu görülmüştür. Son olarak, yüksek kristalinli CdTe polikristalin

filmlerine bağılı olarak fotoelektrodun foto-akımının, CdCl_2 uygulandıktan sonra $2,97 \text{ mA/cm}^2$ değerine arttığı görülmüştür (Yao ve ark., 2015).

Önceki çalışmalara benzer olarak, CdTe ince filmleri, cam/FTO üzerine basit bir sistem olan 2-elektrotlu sistemle asidik ve $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve TeO_2 içeren sulu çözelti kullanılarak elektrodepozit edilmiştir. XRD, optik soğurma, fotoelektrokimyasal hücre (PEC) ölçümleri, SEM ve transmitans elektron mikroskobisi (TEM) çalışmaları CdTe katmanlarının yapısal, optik, elektriksel ve morfolojik özelliklerini ölçmede kullanılmıştır. XRD çalışmalarına göre elektrodepozit edilmiş CdTe tabakaların kübik kristal yapılı polikristalin yapıda olduğu görülmüş, optik soğurma sonuçlarına göre de, işlem görmemiş olarak üretilen ve CdCl_2 etkisinde üretilen filmlerin band aralıkları sırasıyla $\sim 1,50 \text{ eV}$ ile $\sim 1,54 \text{ eV}$ aralığında ve $\sim 1,46 \text{ eV}$ ile $\sim 1,51 \text{ eV}$ aralığında olduğu görülmüştür. PEC ölçüm sonuçlarına göre $1,247 \text{ mV}$ – $1,258 \text{ mV}$ aralığındaki katodik voltajla büyütülmüş, işlem görmemiş CdTe tabakalarda p-tipi, i-tipi ve n-tipi elektriksel kontak olduğu görülmüştür. SEM görüntülerine göre de, Cam/FTO altlık yüzeyi boyunca düzgün bir şekilde CdCl_2 etkisi sonrasında CdTe'deki tanecik boyutunda, $\sim 85 \text{ nm}$ 'den $\sim 430 \text{ nm}$ 'ye kadar fark edilir oranda değişiklik görülmüştür. TEM görüntülerine göre, işlem görmemiş ve CdCl_2 uygulanmış CdTe katmanlarda sütun biçiminde yapılar gözlemlenmiştir, ayrıca tanecik boyutunun da CdCl_2 uygulanmasından sonra $\sim 50 \text{ nm}$ 'den $\sim 200 \text{ nm}$ 'ye kadar arttığı görülmüştür (Salim ve ark., 2015).

Son olarak, CdSe ve CdTe ince filmlerinin, $0,1 \text{ M Cd}^{2+}$ ve farklı iyon konsantrasyonlarındaki Se ve Te ile elektrodepozit edilmesine ait olan çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada, sıcaklığın yöntem üzerindeki etkileri araştırılmış, depozit edilmiş CdSe ve CdTe'ün kristal yapıları XRD ile belirlenmiştir. Optimum parametrelerle depozit edilmiş örneklerin SEM sonuçlarına göre CdSe gözenekli küresel taneciklere sahipken, CdTe'ün koraloid (mercana benzer) morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Optik soğurma sonuçlarına göre, CdSe ve CdTe'ün direk geçiş durumlarındaki, band aralığı enerjileri sırasıyla $1,96 \text{ eV}$ ve $1,51 \text{ eV}$ olarak ölçülmüştür. Laboratuvar ortamında elektrodepozit edilmiş CdSe ve CdTe filmlerinin her birim alan başına ölçülen, en yüksek foto-dönüşüm verimleri sırasıyla % 6 ve % 9,6 olarak ölçülmüştür (Shenouda ve ark., 2015).

Bu tez kapsamındaki çalışmada soğurucu materyal olarak kadmiyum tellür seçildi. Seçilen materyalin kadmiyum tellür olmasındaki sebepler; bant aralığı enerji değerinin (E_g) uygunluğu, soğurma katsayısının (α) uygunluğu, dönüşüm veriminin yüksek olması, fabrikasyon maliyetlerinin uygunluğu, olarak sıralanabilmektedir.

Kadmiyum tellür ince filmler, incelediğimiz bazı çalışmalarda da görüldüğü gibi birçok yöntemle üretilmektedir. Kadmiyum tellür zeminli güneş hücreleri; 1) Püskürtme, 2) Fiziksel buharlaştırma depozisyonu, 3) Kapalı yüzey süblimasyonu, 4) Moleküler ışın epitaksisi, 5) Elektrodpozisyon gibi birçok yöntemle üretilmektedir. Bu üretim yöntemlerine ilerleyen bölümlerde ayrıntı verilmiştir. Bu çalışmada kadmiyum tellür ince filmleri, elektrokimyasal yöntemlerden birisi olan, elektrodpozisyon yöntemiyle üretildi ve üretilen ince filmlerin karakterizasyonu XRD (X-ışını kristalografisi), SEM (Taramalı elektron mikroskopisi), EDX (Enerji-Dispersiv X-ışını analizi), AFM (Atomik kuvvet mikroskopisi), UV (Ultraviyole analizi), Mott-Schottky yöntemleriyle yapıldı. Kadmiyum tellür, ITO (indiyum katkılı çinko oksit) altlık üzerine elektrokimyasal depozisyon yöntemiyle depozit edildi. Hazırlanan örnekler sırasıyla -0,4 V, -0,5 V, -0,6 V, -0,7 V, -0,8 V, -0,9 V, -1,0 V ve -1,1 V kaplama voltajlarında gerçekleştirildi. Referans elektrot olarak Ag/AgCl referans elektrodu kullanıldı. İnce film örnekleri hazırlanırken pH değeri yaklaşık ~ 2 değerinde tutuldu. EDAX sonuçlarına göre Cd/Te oranı 0,81 ile 1,09 arasında olduğu belirlenirken, XRD sonuçlarına göre üretilen CdTe ince filmlerinin CdTe, $Cd_{1,81}Te$ ve $CdTe_2O_5$ gibi çeşitli fazlarda oluştuğu ve kristal yapılarının da hegzagonal ve monoklinik yapıda olduğu belirlendi. Üretilen ince filmlerin optik band aralık (E_g) değerleri 1,61 eV ile 1,94 eV arasında olduğu, UV verilerini de kullanarak hesaplandı. AFM sonuçlarına bakıldığında ise film kalınlıklarının 72 nm ile 140 nm aralığında değiştiği görülmüştür ve diğer çalışmalara ek olarak Mott-Schottky ölçümlerine göre üretilen filmlerin n-tipi yapıda olduğu ve ayrıca -0,9 V kaplama voltajında üretilmiş ince filmin de p-tipi yapıda olduğu belirlendi. Mott-Schottky ölçümlerinin yanı sıra NaCl içeren sulu çözelti yardımıyla CdTe ince filmlerine ait Nyquist eğrileri elde edilerek, oluşturulan bu sisteme ait en uygun elektronik devre belirlendi.

Sonuç olarak, ürettiğimiz filmlerin bant aralığı enerji değerleri başta olmak üzere, optik ve yapısal özelliklerinin literatür taramamızla uyumlu olduğu ve yaptığımız detaylı çalışmalar, CdTe ince filmlerinin elektrodepozisyonundaki optimizasyonu ile ilgili önemli sonuçlarını literatüre kazandırmıştır.

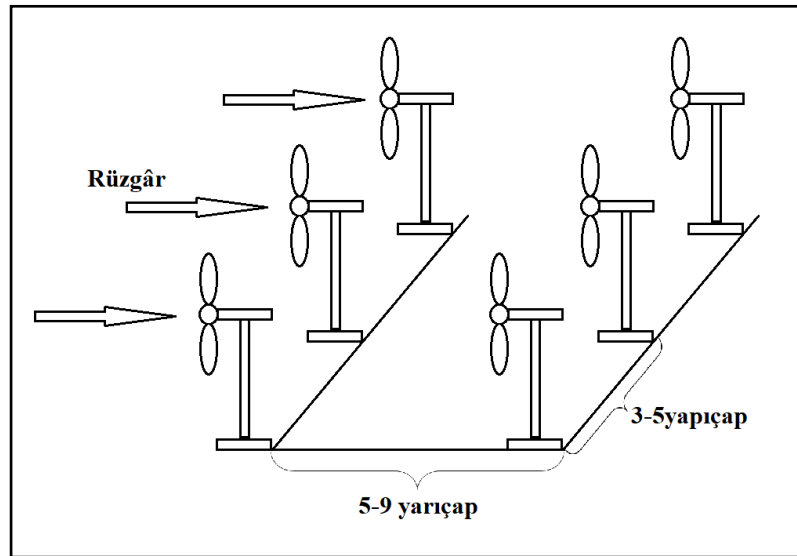


2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Günümüzün değişen iklim şartları ve kullandığımız enerji kaynaklarının çevreye verdiği zararın artması ve miktarlarının azalması, enerji gereksiniminin her geçen gün daha da artması nedeniyle yeni enerji kaynaklarının arayışı başlamıştır. Kullanılmaya ve elde edilen enerji miktarının her geçen gün daha da artırılması için çalışılan bu enerji kaynaklarının sürekliliğinin devamlı olması ve yenilenebilir olması tercih sebebidir. Sayılan bu sebeplerden dolayı rüzgârdan, güneşten, okyanus/deniz dalgalarından, jeotermal kaynaklardan, vb. yararlanarak temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır.

Rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesidir. Son yıllarda geniş bir şekilde geliştirilen ve kullanılan bir enerji kaynağıdır. Çevre kirliliğine sebep olmaması, genel anlamda düşük maliyet ve kısa sürede enerji elde edilebilmesi avantajlarından sayılabilir. İlk rüzgâr tribünü 19. yy sonlarında geliştirilmiştir ve 1940 yılından 1950 yılına gelindiğinde üç yapraklı rüzgâr tribünü modeliyle alternatif akım (AC) modelinden doğru akım (DC) modelinin geliştirilmesine geçilmiştir. 1990 yılının sonlarında rüzgâr enerjisi önemli bir yer almaya başlamıştır ve tüm dünyada kullanılarak, geliştirilmeye başlanmıştır (Zobaa ve Bansal, 2011).



Şekil 2.1. Rüzgâr tarlalarındaki, rüzgâr güllerinin optimum yerleşimi

Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC) verilerine göre, 1997 yılından 2009 yılına kadar 7600 MW enerji miktarından 195,2 GW enerji miktarına artmıştır. Dünya enerji ihtiyacının % 1 kadarı karşılanırken, 2020 yılına kadar bu oran % 20'lere kadar çıkacağı ön görülmektedir (Zobaa ve Bansal, 2011).

Bir başka enerji kaynağı olan biyokütle enerjisi, güneş enerjisinin bitkilerde ve hayvanlarda kimyasal olarak depolanmış şeklidir. Nüfusun artması ve endüstriyel gelişmeler sebebiyle enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte gelişmiş ülkeler de artan enerji ihtiyacını karşılayamamaktadır. Enerji, temel olarak kömür, petrol, doğal gaz, vb. gibi kaynaklardan sağlanmaktadır. Bütün ülkelerin klasik olarak kullandığı yakıtlardan dolayı oluşan iki temel problem,

- 1) Bu enerji kaynakları bitme sınırındadır. Dünyanın bilinen petrol rezervleri, yapılan hesaplamalara göre yaklaşık olarak 2050 yılında bitecektir.
- 2) Bu enerji kaynaklarını kullanmak kirliliğe sebep olmaktadır. Fosil yakıtlarının kullanılmasından dolayı, çok iyi bilinen SO₂ oluşması ve sonrasında da asit yağmurlarının oluşması temel problemlerinden birisidir (Zobaa ve Bansal, 2011).

Enerji kaynağı olarak biyokütle kullanımının avantajları: 1) Biyokütle yenilenebilir, potansiyel olarak sürdürülebilir ve doğa dostu bir enerji kaynağıdır. 2) Çeşitli materyallerin büyük çoğunluğunda, çoğunlukla stereokimyasal¹ olarak anılan, yapılan çalışmalar sonucu biyokütlenin yeni yapısal özellikleri elde edilmiştir:

- 1) Azalan ham petrolün sonucunda, biyokütle enerjisinin kullanımı artmaktadır.
- 2) Biyokütle yakıtlarının oluşturduğu sülfür miktarı göz ardı edilebilir seviyededir ve asit yağmuruna sebep olan sülfürdioksit oluşumuna sebep olmamaktadır.

¹ Kimyanın bir moleküldeki atomlarının bağlantı şekillerini ve atomların uzayda diziliş şekillerini inceleyen kısmıdır. Genelde atom sayısı ve bağ yapıları aynı olmakla birlikte, uzaysal dizilişlerinin farklılığını anlatan izomerlik kelimesi ile birlikte anılır (w3.balikesir.edu.tr/~hnamli/okdn6/okdn6.htm, 2019).

- 3) Biyokütle kullanımı atmosferde daha fazla karbondioksit oluşmasını ve atmosferik karbondioksit seviyesinin artışı engelleyebilir (Zobaa ve Bansal, 2011).

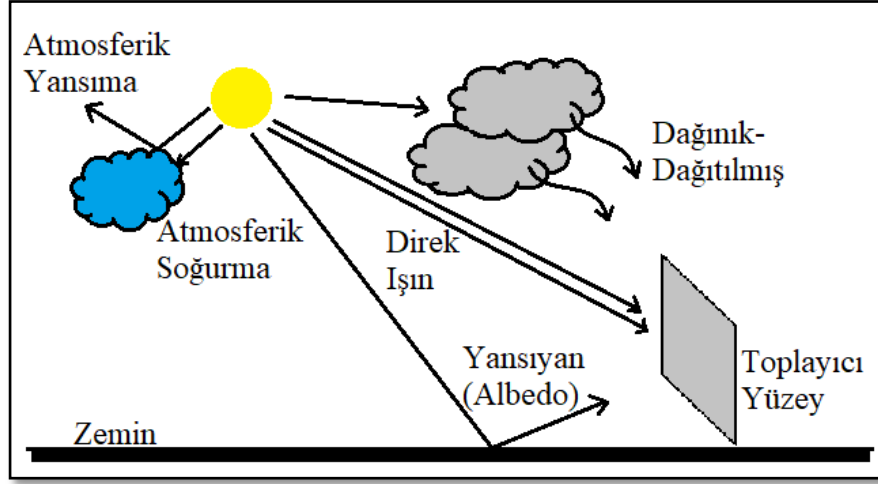
İklim değişiminden dolayı ve uluslararası karbondioksit salınımının artışından dolayı bir başka enerji kaynağı olarak dalga enerji kullanılmaktadır. 2000 yılından bu yana, dünyanın birçok yerinde büyük ölçeklerde dalga ve gelgitten akım elde edebilen prototipler üzerinde çalışılmaktadır, fakat dalga enerji teknolojisi, rüzgâr enerjisinden 10-15 yıl daha geridedir. Bununla birlikte dalga enerjisiyle ilgili çalışmalar sürdürülmektedir (Zobaa ve Bansal, 2011).

Üzerinde çalışmalar yapılan ve birçok alanda da kullanılan bir diğer enerji kaynağı da güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin yapılan hesaplamalarında bulunulan konum, saat, tarih gibi değişkenler önemlidir. Bunların yanında soğurma, yansıma ve bunları gerçekleştiren yüzey de önemlidir. Güneş enerjisinde, enerji dönüşümünü sağlayarak geniş yer tutan fotovoltaik (PV) yapılar kullanılmaktadır (Zobaa ve Bansal, 2011).

Güneş enerjisinde enerji dönüşümünü sağlayan üç yöntem vardır:

- 1) *Güneş-kimyasalı*: Prensip olarak fotosentez sürecidir.
- 2) *Güneş-elektrikseli*: Çoğunlukla güneş hücrelerinde çalıştırılan yapılar (fotovoltaik yapılar).
- 3) *Güneş-termali*: Güneş ışığını, konsantre güneş gücü (CSP) hücrelerinde termal ısıya çeviren sistemler (Zobaa ve Bansal, 2011).

Güneş enerjisinde önemli olan güneş panelinin pozisyonu ve beklenen enerji miktarıdır. Bunların yanı sıra atmosferik şartlar da önemlidir.



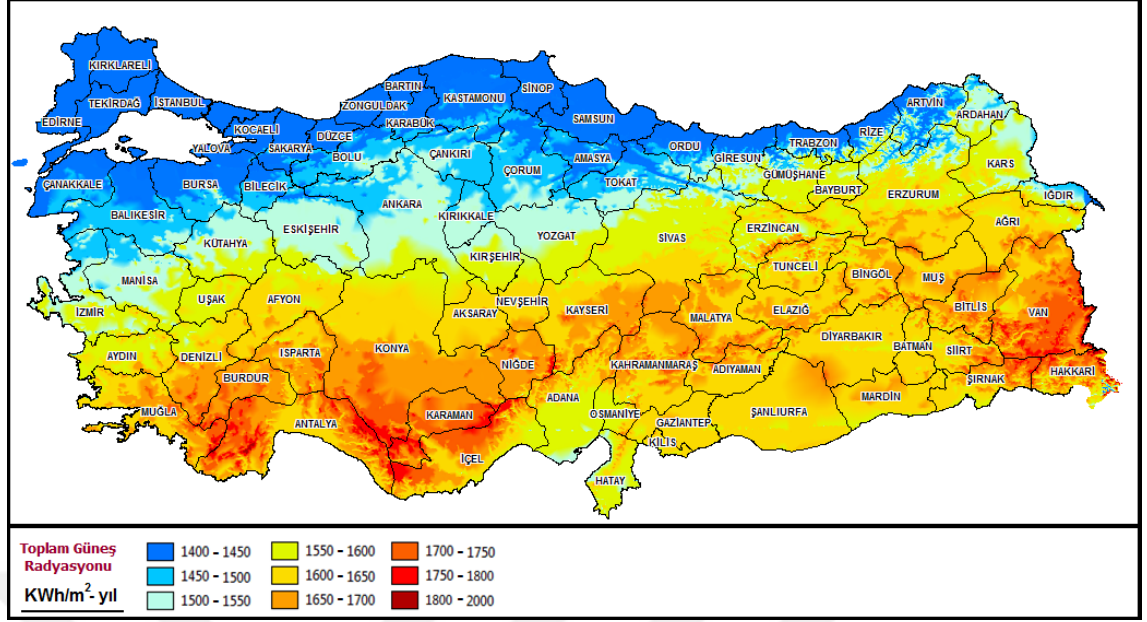
şekil 2.2. Güneş radyasyonunun bileşenleri

Her türlü yenilenebilir enerji kaynağı için de bilinmesi gereken bazı kuramsal bilgiler vardır. Bu bilgiler rüzgâr enerjisi için farklı, dalga enerjisi için farklı, güneş enerjisi için farklıdır (Zobaa ve Bansal, 2011).

2.1.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi sınırsız ve sonsuzdur. Ancak bu enerjinin kullanılabilmesi için depolanabilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra güneş enerjisinin kullanılmak istenildiği bölgenin de güneşlenme miktarının yeterli seviyede olması gerekmektedir. Ülkemizin güneşlenme miktarını aşağıdaki şekilden de görmekteyiz (Bkz. şekil 2.3).

Türkiye'deki güneşlenme sürelerinin ve güneşlenme miktarının kullanılabilir seviyede olduğu güneşlenme atlasından da görölmektedir. Ancak yukarıda da belirttiğimiz gibi güneş enerjisinin kullanılabilir hale gelebilmesi için depolanması gerekmektedir ve bu depolanma dört şekilde olur: 1) Mekanik enerji depolama (Hidroelektrik, vola, vs.), 2) Isıl enerji depolama (Hissedilir ısı ve gizli ısı), 3) Elektrik enerji depolama (Manyetik alanla), 4) Kimyasal enerji depolama (Termokimyasal ve elektrokimyasal).



Şekil 2.3. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlası
(www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx, 2019)

2.1.2. Güneş Enerjisi Depolama Şekilleri

1) *Mekanik Enerji Depolanması*: Fazla enerji mekanik enerjiye ve sonradan kinetik veya potansiyel enerjiye dönüştürülerek depolanır. Amaca göre bir pompa ile suya yükseklik kazandırılır veya kompresörle sıkıştırılan havanın basıncı artırılır veya bir volanla kinetik enerji depolanır (Anonim, 2008).

2) *Isıl Enerji Depolanması*: Termodinamiğin 1. Kanunu'na göre sabit basınçta ısıl enerji depolanması:

$$q_d = \int_{T_1}^{T_e} C_k \cdot dT + h_{ks} + \int_{T_e}^{T_2} C_s \cdot dT \quad (2.1)$$

olarak verilir. Bu denklem, faz değiştiren bir sistemde, kimyasal değişme yoksa geçerlidir. Bu denklemdeki, T_1 , ilk sıcaklık; T_2 , son sıcaklık; T_e , erime sıcaklığı; C_k , katının ısınma ısısı; C_s , sıvının ısınma ısısı, h_{ks} , erime gizli ısısını göstermektedir (Anonim, 2008).

Denklem 2.1'e göre ısı enerji;

- a) Maddenin ısı kapasitesiyle sıcaklığı artarak,
- b) Maddenin erime ısıyla sabit sıcaklıkta depolanabilmektedir.

Isının, maddenin ısı kapasitesiyle depolanmasına *Hissedilir Isı Depolanması*; erime ısıyla depolanmasına da *Gizli Isı Depolanması* denir (Anonim, 2008).

3) *Elektrik Enerji Depolanması*: Elektrik enerjisinin diğeri bir enerji şekline dönüştürülmeden depolanmasıdır. Elektromanyetik sargıdan elektrik akımı geçirilerek manyetik alanda depolanır. Sargıdaki direnç nedeniyle güç kayıpları olduğundan bobin sargılarının süper iletken malzemeden olması ve dirençlerinin giderilmesi gerekmektedir (Anonim, 2008).

4) *Kimyasal Enerji Depolanması*: Enerjinin kimyasal olarak depolanması termokimyasal ve elektrokimyasal olarak gerçekleştirilir (Anonim, 2008).

a) Termokimyasal enerji depolanması, enerjiden endotermik reaksiyonlarla alkol, metan veya hidrojen gibi yakıtların üretilmesidir. Enerji ihtiyacı olduğu zaman bu ürünlerden ekzotermik reaksiyonlarla enerji geri alınır (Anonim, 2008).

b) Enerjinin bataryalarda depolanması elektrokimyasaldır. Elektrik enerjisi bataryaya doğru akım olarak girer, kimyasal enerjiye dönüşür. Boşaltma sırasında tekrar doğru akıma çevrilir. *Yeniden Doldurulabilir Batarya* ve *Yeniden Doldurulamaz Batarya* olmak üzere iki tip batarya vardır (Anonim, 2008).

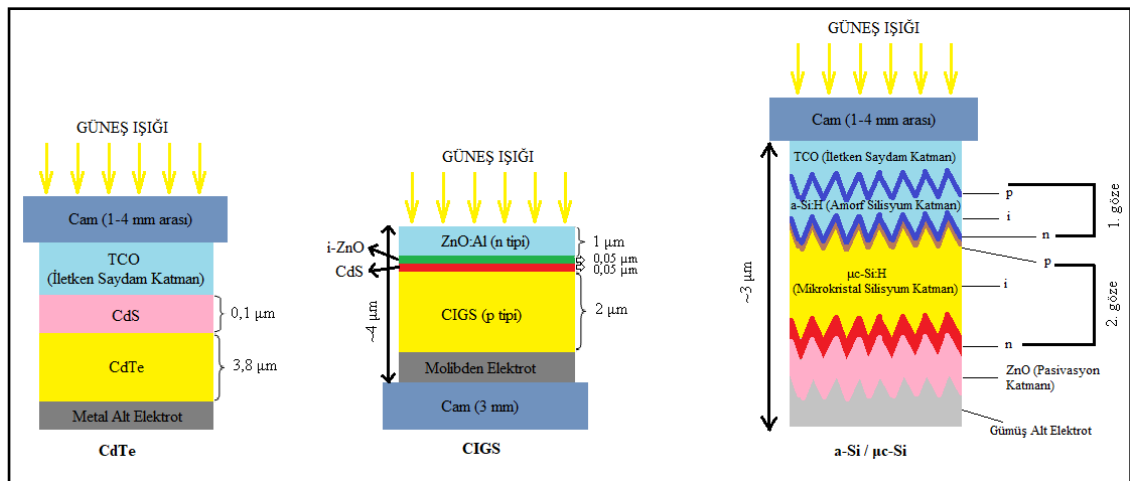
2.2. İnce Filmler

Kalınlıkları nanometre ile mikrometre mertebesi arasında ifade edilen ve çeşitli katman malzemelerine ince film denmektedir. İnce film yapılarının temel olarak yararlanıldığı uygulamalar, elektronik yarıiletken cihazlar ve optik kaplamalar olarak sayılabilir. İnce filmlerin en bilindik uygulaması olarak, her gün kullandığımız ve çeşitli boyutlarda da

gördüğümüz bir cam ve arka yüzünde de yansıtmayı sağlayan ince, metal bir kaplamadan oluşan aynaları söyleyebiliriz. İnce film kaplamaları ile (50 nm'den daha da ince) çift yönlü aynalar da oluşturulabilmektedir (www.fizikmakaleleri.com/2013/10/ince-filmler-ve-kaplama-teknikleri.html, 2017).

İnce film güneş hücreleri 1980'li yıllarda ticari olarak ortaya çıkmasına karşılık, günümüzde kristal tabanlı güneş hücreleriyle rekabet edebilecek duruma gelmiştir. Bunun yanında, ince film güneş hücreleri, kristal tabanlı silisyum hücrelerin verimlerine yetişememiş olsa da üretim maliyeti açısından daha ucuza üretilmektedir. Ayrıca, daha az materyal kullanılmakta ve daha kolay şekilde üretilmektedir. Çelik, cam, kumaş gibi birçok malzeme üzerine kaplanabilecekleri gibi, güneş tarlaları da oluşturulabilir ve ayrıca da binaların dış yüzeylerine, çatılara da kaplama olarak kullanılabilirler. Üretim yöntemleri açısından birleşik bir yöntem sahiptir, bu yüzden de yerli olarak da üretilirler. Bu sebepten dolayı da son yıllarda ince film konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır.

İnce film güneş gözelerinde üç farklı teknoloji kullanılmaktadır ve bu teknolojiler Şekil 2.4'te görülmektedir. Bu teknolojiler, a-Si (amorf silisyum), CuInGa-Se (bakır indiyum galyum selenyum) ve CdTe (kadmiyum tellür) malzemelerine dayanmaktadır. Görülen bu üç teknoloji kristal Si güneş gözeleriyle de, birbiriyle de yarışmaktadırlar (Parlak ve Günam, 2011).



Şekil 2.4. Fotovoltaik güç sistemlerinde kullanılan üç farklı ince film teknolojisi: CdTe/CdS, CIGS ve a-Si ince film güneş gözeleri

Şekil 2.4'te görülen film teknolojilerden birisi olan ve bu tez kapsamında çalışılan CdTe ince filmini kısaca inceleyelim.

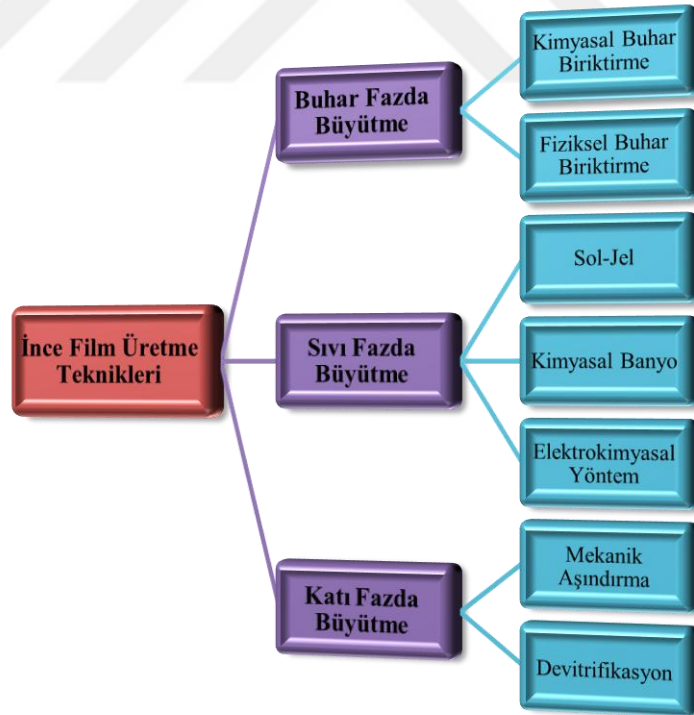
Kadmiyum sülfür/kadmiyum tellür (CdS/CdTe) ince film güneş hücreleri: CdTe, yapısı bakımından güneş ışığının tayfı yapısına en uygun yarıiletkenlerden birisidir ve genellikle CdS (kadmiyum sülfür) ile birlikte kullanılmaktadır. Bu birlikte oluşturulan yapıda, CdS ışığı kolay bir şekilde geçirdiğinden dolayı pencere görevi görmektedir. Bunun dışında, CdS/CdTe eklemi de akım oluşturabilmek için gerekli olan elektrik potansiyelini sağlamaktadır. Bu şekilde oluşturulan güneş panellerindeki verim değeri % 11 civarındadır ve maliyet açısından dünyadaki tüm teknolojiler arasındaki en düşük maliyete sahiptir. Diğer yandan, CdS/CdTe yapılarındaki en büyük kaygı Cd elementinin zehirli olmasıdır; ancak Cd elementinin bileşik oluşturmadığı zaman zehirli olduğu ve fakat CdS ve CdTe bileşiklerindeki haliyle zehirli olmadığı üzerinde durulmaktadır (Parlak ve Günam, 2011).

CdTe, ince film güneş hücrelerinde aşağıdaki sayılan dört özelliği nedeniyle tercih edilmektedir:

- CdTe'ün en duyarlı olduğu bölge, güneş tayfının en güçlü olduğu dalga boylarına karşılık gelmektedir.
- CdTe'ün yapısı ışığı güçlü bir şekilde soğurmaktadır.
- CdTe'ün üretimi oldukça kolaydır ve Cd ile Te elementleri kolay bir şekilde CdTe yapısını oluşturabilmektedir.
- Basit biriktirme, kaplama teknikleri sayesinde düşük maliyetli üretim teknikleri geliştirilmiştir. CdTe güneş gözeleri için AM 1,5 (ışığın atmosferde aldığı yolun atmosfer kalınlığına oranı) şartı altında % 18 verimlilik veren, $27 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ kadar akım yoğunluğu ve 880 mV kadar açık devre voltajı beklenebilir (Parlak ve Günam, 2011).

2.2.1. İnce Film Üretim Yöntemleri

Bilimsel olarak olsun, endüstriyel olarak olsun önemli bir yere sahip olan ince filmler ilk olarak, cam ve seramik üzerine süsleme amaçlı olarak kullanılmıştır. Daha sonrasında, gümüş tuzları kullanarak, cam yüzeylerine gümüş filmleri üretilmiştir. 19. yüzyıl sonrasında bilimsel çalışmalardaki gelişmeler, ince filmlerde yeni ve çeşitli üretim tekniklerini ortaya çıkartmıştır. İnce film, ilk olarak “elektroliz” yöntemiyle 1838 yılında üretilmiştir. Sonrasında 1852 senesinde, Bunsen “kimyasal reaksiyon” adındaki yöntemle, Faraday “asal gaz içerisinde buharlaştırma” yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt ise “Joule ısıtma” olarak isimlendirilen yöntemlerle ince film üretmişlerdir. Vakum cihazlarının üretilmesine kadar olan süreçteki yapılan çalışmalar yalnızca laboratuvar ortamında kalmış; vakum cihazlarındaki gelişmelerin sonrasında üretilen ince filmlerin üretim teknikleri, yüzey yapılarının özellikleri, kimyasal özellikleri incelenebilmiş ve değiştirilebilmiştir. İnce film üretim tekniklerinin alt grupları aşağıdaki tabloda da görülmektedir (Bkz. Şekil 2.5) (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

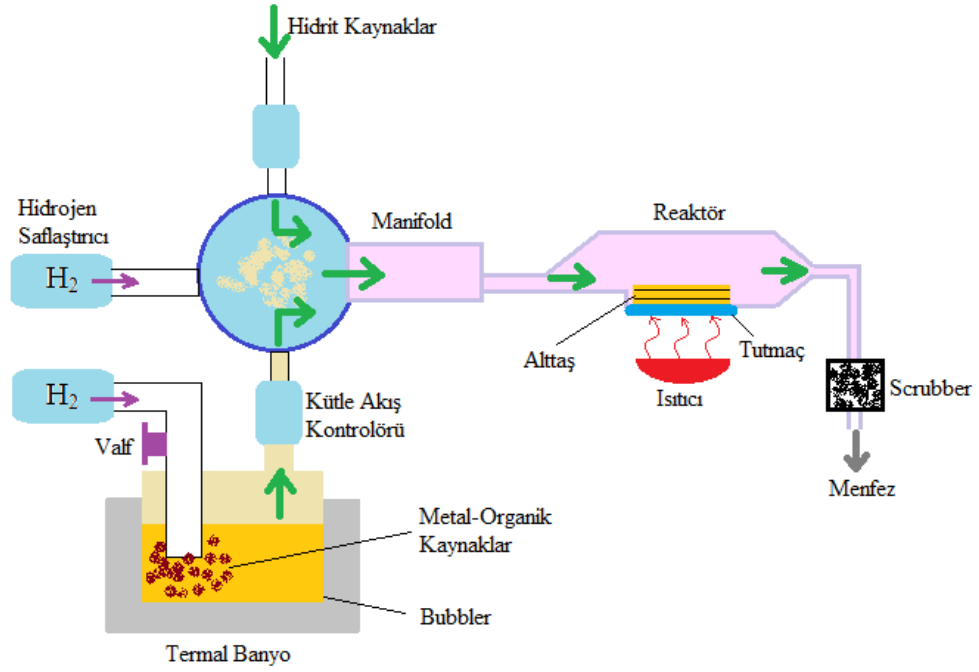


Şekil 2.5. İnce film üretim teknikleri (Sönmezoğlu ve ark., 2012)

2.2.1.1. Buhar Fazda Büyütme

Bu yöntemdeki yapılan kaplamalarda, altlık olarak kullanan malzemelere, kaplamaya bir sınırlama getirilmez ve kaplamanın kalitesinin yüksek seviyelerde olması sağlanır. Buhar fazda yapılan kaplama yöntemleri ikiye ayrılır: 1) Fiziksel buhar biriktirme (PVD), 2) Kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

1) *Kimyasal buhar biriktirme*: MOCVD (metal-organik kimyasal buharlaştırma depozisyonu) tekniği MOVPE (metal-organik buhar fazı epitaksisi) tekniği olarak da bilinir. Bu teknik MBE (moleküler ışın epitaksisi) ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir verimliliğe sahiptir ve aslında yüksek parlaklıklı LED gibi bileşenli yarıiletkenler için seçilen bir üretim tekniğidir. Dünya çapında, MOVCD ile üretim hakkında çeşitli araştırma seviyelerinde birçok çalışma vardır. MOCVD yöntemi, gaz fazında materyalin altlık üzerine depozit edilmesidir ya da kapalı bir kap içerisinde ısıtılmış altlık üzerine buhar halinde olan bir taşıyıcı gazın kimyasal reaksiyonuyla oluşan katı bir malzemeyle kaplanmasıdır. Depozisyon, kimyasal bir reaksiyon ile altlık yüzeyinde ve yüksek kalitede, epitaksiyel ince film depozisyonu olarak gerçekleşmektedir. Çünkü bu yöntem, tipik büyütme için altlık sıcaklıklarını, ısıtılmış gaz akışını ve yüzey kimyasal reaksiyonunu kullanmaktadır. Bu da 500 °C – 1500 °C civarında, MBE yönteminden daha yüksek kalitededir. Ek olarak, örnek kaliteli bir film ve yüksek düzenlilik için 1500 rpm hıza kadar bir süratle döndürebilir. Dahası, optik geçiş 10 mm'den daha az bir mesafededir ve optik yol mesafesi kısadır (250 mm veya daha az). Ek olarak, MOCVD depozisyonu atmosferik basınca yakın bir basınçta uygulanır (www.k-space.com/applications/mocvd/, 2019).



Şekil 2.6. Tipik bir MOCVD (Metal organik kimyasal buhar biriktirme) sisteminin şeması (Sönmezoğlu ve ark., 2012)

- 2) *Fiziksel buhar biriktirme:* Bu yöntem, 19. yüzyılın başlarında kullanılmaya başlansa da endüstride son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Gelişmeleri süren ve günümüze de gelen ve de farklı kaplama işlemleriyle de uygulanan bu teknikteki mekanizma: *i)* Vakumlu bir ortam içerisinde bir ısıtıcı ve buharlaştırılan kaplamada kullanılacak malzeme, kaplanacak olan malzeme üzerine ince bir film katmanı olarak biriktirilir. *ii)* Katı halde bulunan ham madde, yüksek enerjiyle iyonlaştırılmış ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma haline getirildikten sonra, kontrollü bir şekilde kaplanacak olan malzemenin yüzeyine yapıştırılır. Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri aşağıdaki tabloda da görülmektedir (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



Şekil 2.7. Fiziksel buhar biriktirme teknikleri (Sönmezoğlu ve ark., 2012)

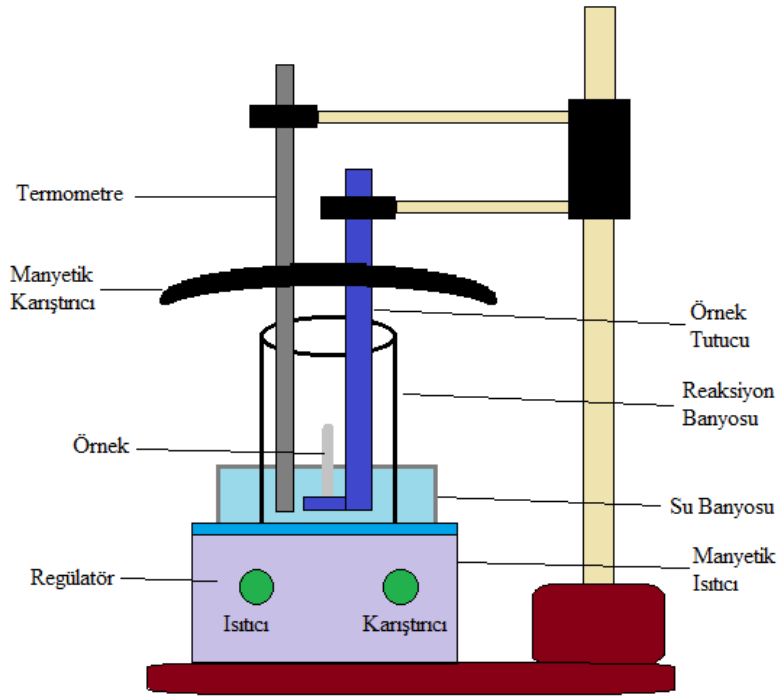
2.2.1.2. Sıvı Fazda Büyütme

Sıvı fazda büyütme yöntemleri, 1) Sol-jel yöntemi, 2) Kimyasal banyo yöntemi ve 3) Elektrokimyasal yöntem olmak üzere 3'e ayrılır.

- 1) *Sol-Jel yöntemi:* İnorganik ürünler oluşturmak için geniş bir yelpazede kullanılan bu yöntem, moleküler ön başlatıcıların hidroliz ve kondenzasyonuna dayanmaktadır. Bu yöntem, hem inorganik hem de organik-inorganik hibrit polimerleri elde edebilmek için çok kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntemin temel avantajı, tüm prosesin oldukça ılımlı koşullarda yürütülmesi sayılabilir. Diğer yöntemlerden birisi olan katı hal süreçlerinin aksine, sol-jel yönteminin süreci, son ürüne ön başlatıcı türlerinin dönüşümü esnasında reaksiyon yolunda moleküler seviyede kontrol imkanı sunmaktadır. Böylece sol-jel süreci, üst düzeyde saflık ve homojenlikte, düzenli kristal yapısında ve iyi şekilde tanımlanmış nanoparçacıkların sentezine olanak sağlar. Sol-jel kimyası çok karmaşık bir prosestir. Bu karmaşıklığın sebebi, suyun ligand oluşturma ve

çözücü olarak çift rolü, suya karşı metal oksit önbaşlatıcılarının reaktivitesi, diğer bir yandan da sentezleme işleminin iyi bir şekilde tekrarlanabilirliğini sağlayabilmek için çok ciddi bir şekilde kontrol edilmesi gereken parametrelerin sayısının fazla olması (metal alkokst ön başlatıcılarının hidroliz ve kondenzasyon hızı, pH, sıcaklık, karıştırma yöntemi, oksidasyon hızı, vb.) sayılabilir. Bu nedenden dolayı da derlemenin temel amacı sol-jel prosesinin temel prensibini anlatmak ve süreçte etkili olan parametleri irdelemektir (Toygun ve ark., 2013).

- 2) *Kimyasal banyo yöntemi*: Kimyasal banyo kaplama yönteminde (CBD) şekilde de gösterildiği gibi bir ısıtıcıli magnetik karıştırıcı, bir su banyosu, bir reaksiyon banyosu, altlık ve altlık tutucusu, bir termometre ve bir de pH metreden oluşmaktadır (Bkz. Şekil 2.8) (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



Şekil 2.8. Kimyasal banyo metodu blok diyagramı (Sönmezoğlu ve ark., 2012)

Kimyasal banyo yığma yöntemi, filmi oluşturacak çözeltideki iyonların reaksiyonunun hızının yavaşlatılması yöntemiyle açıklanır. Temizlenmiş cam altlıklar çözeltilerin içine daldırılır ve cam yüzeyi üzerine ince filmler kaplanır. İnce film oluşturma yöntemleri

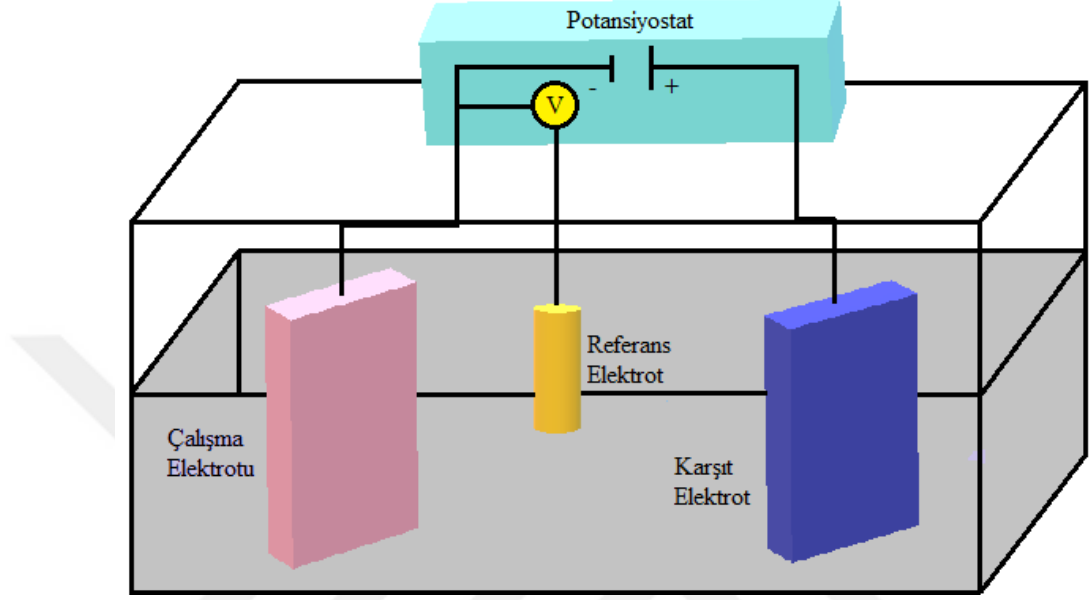
arasında, kimyasal yığma yöntemi maliyet açısından ucuzdur ve basit bir yöntemdir. Bu üretim sürecinde, üretilen filmin kalitesini, filmin kalınlığını etkileyen faktörleri; çözeltinin pH değeri, çözelti sıcaklığı, reaksiyon zamanı, çözücü konsantrasyonu, kullanılan katalizörlerin yapısı ve konsantrasyonu, tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi, kurutma ve kurutma atmosferi olarak sıralayabiliriz (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

Son olarak da, bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran avantajları şu şekilde sıralayabiliriz: *i)* Düşük sıcaklıklarda ve atmosfer basıncında uygulanabilirler. *ii)* Yüksek maliyetli deney araç-gereçlerine ihtiyaç duyulmaz. *iii)* Ucuz, tehlikesiz, hızlı ve basit bir uygulama sürecine sahiptir. *iv)* Geniş yüzeylere yarıiletken film kaplayabilmek için uygun bir yöntemdir (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

3) *Elektrokimyasal yöntem:* Bu yöntemde, çözeltilerden ince filmin kaplanması, maddenin metalik olmayan veya metalik altlıklar üzerine toplanması sonucunda gerçekleşir. Eğer ki, istenilen bir şekil varsa ya da büyük alanların kaplanması isteniyorsa bu yöntem idealdir. Bu yöntem, potansiyel kontrollü veya akım kontrollü elektroliz olarak ikiye ayrılır. Akım kontrollü metotta, madde derişimi azalmasına rağmen akımın sabit tutulması gerekmektedir, bu durum potansiyelin artırılması ile sağlanmaktadır. Fakat potansiyel artışının meydana getireceği olumsuzlukları ortadan kaldırmak için, derişimi sabit tutabilmek için tüketilen madde sürekli olarak eklenir. Diğer yandan potansiyel kontrollü metotta, toplanma tekniği ardı ardına elektron değişimi gerektiren durumlarda üstünlük sağlar. Bundan başka analitik yöntemlerin uygulanmasında belirlenmek için yeteri kadar reaksiyon ürünü hazırlarken de kullanılır. Farklı potansiyelerde farklı tepkimelerin oluşma olasılığının olduğu elektroliz ortamında, potansiyel kontrolünün sağlandığı elektroliz metoduyla istenilen ürün elde edilir (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

Elektrokimyasal biriktirme yönteminin basitçe yapısını Şekil 2.9'daki gibi gösterebiliriz. Bu sistemde bir potansiyostat, voltmetre, çalışma elektrotu, karşıt elektrot ve referans elektrot bulunmaktadır (Bkz. Şekil 2.9). Elektrokimyasal biriktirme yöntemindeki üretilen ince filmin kalitesine etki eden faktörleri depozisyon potansiyeli, elektrolite katılan maddelerin türü ve miktarı, çözelti pH'ı, akım yoğunluğu, elektrolit

sıcaklığı, çözelti içine katılan kimyasal katkı maddeleri olarak sayabiliriz. Bu sayılan faktörleri değiştirerek istenilen özellikte ince filmler üretilebilir (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



Şekil 2.9. Elektrokimyasal yöntem düzeneği

2.2.1.3. Katı Fazda Büyütme

Katı fazda büyütme yöntemi, buhar fazda ve sıvı fazda büyütme yöntemine göre daha az tercih edilen bir yöntemdir. Katı fazda büyütme tekniği, mekanik aşındırma ve devitrifikasyon olarak ikiye ayrılır:

- 1) *Mekanik aşındırma*: Mekanik öğütücülerle boyut küçültme işleminin temelinde örneğe, öğütücü ortam ve örnek arasındaki etkileşimler sonucu enerji uygulaması vardır. Öğütücü ortam denilen kısımda toz bulutu, toz parçacıkları ve bilyeler vardır. Tozlar bilyeler arasında sıkışarak ilk aşamada yeniden düzenlenir ve yığın oluştururlar. Parçacıkların birinden diğerine doğru en az bozulmayla ve kırılmayla kayması sonucunda ince ve düzensiz parçacıklar oluşur. Sıkışmanın ikinci kısmında da parçacıklar plastik ve elastik bozulmaya uğrarlar. Bu aşamada metalik olan sistemlerde soğuk kaynama meydana gelir. Üçüncü aşamada da parçacıklar daha da fazla bozulmaya uğrarlar veya parçalara

ayrılarak, kırılmalar meydana gelir. Öğütme işleminin sonunda oluşan tozlardan, çeşitli nano boyutlardaki malzemeler oluşur. Üretilen bu tozların içlerinden nano boyutta olanları ayırmak gerekir ve bu öğütme metotlarıyla 20 nm boyutlara kadar olan parçacıklar elde etmek mümkündür (Ateş ve Bahçeci, 2015).

- 2) *Devitrifikasyon*: Bu yöntem, sıralı kristalografik düzenleme yardımıyla düzensiz (camsı) katıların kristal haline dönüşümüdür. Amorf malzemelerin (kristal latis içinde kısa-mesafeli düzen varlığı ve uzun-mesafeli düzen yokluğu ile karakterizedir) devitrifikasyonu, belirli bir kristalografik yapı (uzun-mesafeli düzen) ile başlangıçta nano boyutlu yapıların oluşumuna ve sonrasında da büyümesine sebep olur. Oluşan bu parçacıkların kimyasal bileşimi, ilk olarak düzensiz yani amorf fazın bileşimiyle aynı ya da farklı olabilir. Böylelikle devitrifikasyon esnasında, farklı kimyasal bileşimine sahip bir ya da birkaç kristal faz oluşabilir (bilsenbesergil.blogspot.com/p/devitrifikasyon-devitrification.html, 2019).

2.3. Yarıiletkenlerde Bant Yapısı

2.3.1. Periyodik Bir Alandaki Elektron

Elektron özelliklerini anlayabilmek için öncelikle elektron ve atom sisteminin tamamı için, etkileşimlerini de içerecek şekilde, Schrödinger eşitliğinin (SE) çözülmesi gerekir. Bununla birlikte çok önemli basitleştirmeler vardır (Galperin, 2014).

- Atomik kütle M , elektronun kütlesi m 'den çok çok büyüktür. Bu yüzden, başlangıçta, atomların sabit olduğu düşünülürse atomik kinetik enerjiyi ihmal etmek doğaldır. Bu yolda devam edersek elektron dalga fonksiyonu olarak SE yazılırsa;

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \nabla_i^2 + V(r, R) \right] \psi = \epsilon \psi \quad (2.2)$$

atomik düzeltmeler, dış parametreler olarak dikkate alınmıştır, Burada,

$$\psi(r, R), \varepsilon(R)$$

olarak verilebilir.

- Göreceğimiz, etkileşen elektronların özelliği, örgü iyonları ve diğer elektronların oluşturduğu devamlı dış alan içindeki etkileşim halinde olmayan parçacıklarla (gaz gibi) çok benzerdir. Bu alanı hesaplamak çok zordur, fakat örgüyle aynı simetriye sahiptir. Böylece bu faktör bize avantaj sağlamaktadır ve elektron hareketinin genel özelliklerini çalışmaktayız (Galperin, 2014).

2.4. Bloch Elektronlarının Temel Özellikleri

2.4.1. Etkin Kütle

Periyodik bir potansiyeldeki elektronların genel özelliklerini inceleyelim. İşleri kolaylaştırmak için öncelikle, sıkı bağlı limitlerdeki basit kübik kristal yapı durumunu düşünelim. SC örgü yapısında, $\mathbf{k} = 0$ BZ merkezinde bir minimum b değeri olduğu görülür. $\mathbf{k}_i a \ll 1$ küçük çarpımı için, SC örgü yapısı için eşitlik aşağıdaki hali alır,

$$\varepsilon = \varepsilon_b + W \mathbf{k}^2 a^2, \quad \mathbf{k} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad (2.3)$$

Burada ε_b , minimum enerjidir. Bu yüzden, spektrum efektif kütleli bir parçacığına benzerdir,

$$m_n^*(b) = \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial p_x^2} \right)_b^{-1} = \frac{\hbar^2}{2W a^2} \quad (2.4)$$

(alt indis n n-tipi materyali göstermektedir, elektron gibi). Şimdi de $\mathbf{k}_i \approx \pi/a$ değerindeki BZ sınırı için analiz yapalım. $\mathbf{k}'_i = \pi/a - \mathbf{k}_i$ yerine yazmayı ve SC örgü yapısı için geçerli olan eşitliği, $\mathbf{k}'_i a \ll 1$ değeri için,

$$\varepsilon = \varepsilon_a - W a^2 \mathbf{k}'^2 \quad (2.5)$$

elde ederiz. Aynı yolla, efektif kütle ifadesini,

$$m_n^*(a) = -\frac{\hbar^2}{2W a^2} \quad (2.6)$$

negatif olarak elde ederiz. Parçacık-benzeri, boşluk olarak adlandırılır ve kütlelerini elektron kütlelerinin zıt işaretlisi olarak tanımlarız. Bu yüzden, basit kübik kristaldeki boşluk kütleleri, $m_p^* = |m_n^*|$, bant tepesi, elektron kütlelerinin dibinin yakınındakiyle aynıdır (Galperin, 2014).

Genel olarak durumlardan birisi, enerji ekstramum noktasındaki l th bant değerine genişleyebilir,

$$\varepsilon_l(\mathbf{k}) = \frac{1}{2} \sum_{\alpha, \beta} \left(\frac{\partial^2 \varepsilon(\mathbf{k})}{\partial k_\alpha \partial k_\beta} \right)_0 (\mathbf{k}_\alpha - \mathbf{k}_{\alpha 0})(\mathbf{k}_\beta - \mathbf{k}_{\beta 0}) \quad (2.7)$$

ve ters efektif kütle tensörünü açıklarsak,

$$(m^{-1})_{\alpha\beta} = \left(\frac{\partial^2 \varepsilon(\mathbf{k})}{\partial k_\alpha \partial k_\beta} \right)_0 \quad (2.8)$$

olarak elde ederiz (Galperin, 2014).

2.4.2. Wannier Teorisi – Etkin Kütle Yaklaşımı

k -uzayındaki periyodik olarak verilmiş bir bant enerjisini ve ters örgü uzayında da aynı olduğunu biliyoruz. Bu yüzden şu şekilde gösterebiliriz,

$$\varepsilon_l(\mathbf{k}) = \sum_a c_a e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{a}} \quad (2.9)$$

bu denklemdaki \mathbf{a} örgü vektörüdür. $\exp(\mathbf{a}\cdot\nabla)$ operatörünü Bloch fonksiyonuna uygularsak ne olur? Doğrudan doğruya bize sadece bir operatör olduğunu gösterebilir. Örgü vektörü \mathbf{a} ile düzenli olan durumu devam ettirdiğini de gösterebilir (Galperin, 2014).

$$\exp(\mathbf{a}\nabla)\psi_l(\mathbf{r}) = \psi_l(\mathbf{r} + \mathbf{a}) \quad (2.10)$$

Sonrasında çok önemli bir formüle geliyoruz,

$$\varepsilon_l(-i\nabla)\psi_l(\mathbf{r}) = \varepsilon_l(\mathbf{k})\psi_l(\mathbf{r}) \quad (2.11)$$

Bu eşitlik Wannier Teoremi olarak adlandırılır. Bu eşitlik yalnızca k-noktasındaki dejenere olmayan spektrum için geçerlidir (Galperin, 2014).

Bu yüzden sonraki kanuna geçelim. Spektrum $\varepsilon_l(\mathbf{k})$ 'den olabildiğince uzakta, SE denkleminde $\mathbf{k} \rightarrow -i\nabla$ değişimini yapabiliriz ve elektronun kuantum dinamiklerini analiz edebiliriz. Eğer durumu ikinci dereceden açılımın olası olduğu duruma dönüştürürsek, serbest elektron kütlesi m_0 'dan çok farklı olan efektif kütleli (anizotropik) bir parçacık problemine gelmiş oluruz. Bu kanun olarak adlandırabileceğimiz aslında tekli-bant karakteridir ve eğer bantlar dejenere ise (veya aralıklar çok dar ve bantlar arası bölgede geçişler olası ise) çok ciddi bir genellemeye ihtiyaç vardır. Bu durum yarıiletken kristallerdeki benzeri durumlarda çok önemlidir (Galperin, 2014).

2.5. Elektron Hızı

Şimdi kuantum mekaniksel olarak ortalama elektron hızını $\langle \mathbf{v} \rangle$ bir Bloch durumunda $\gamma \equiv l\mathbf{k}$ hesaplayalım. Bir serbest elektron için,

$$\langle \mathbf{v} \rangle = \frac{1}{m_0} \langle \mathbf{p} \rangle = -\frac{i\hbar}{m_0} \langle \gamma | \nabla | \gamma \rangle = \frac{\hbar \mathbf{k}}{m_0} \quad (2.12)$$

elde ederiz (Galperin, 2014).

Bir kuantum parçacığı için, ortalama hızın yalnızca, kuantum parçacığını temsil eden dalga paketinin grup hızı olması doğaldır,

$$\mathbf{v} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{k}} \quad (2.13)$$

Eğer spektrum, ikinci derece bir açılımla belirleniyorsa, m^* kütlelerine sahip bir parçacık için klasik bir ifade elde ederiz,

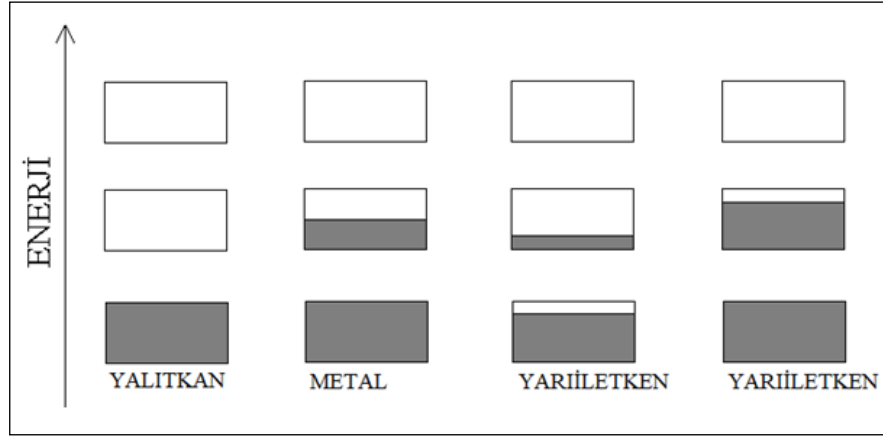
$$m^* \frac{\partial v}{\partial t} = F \quad (2.14)$$

2.6. Bantlara Yerleşme ve Materyal Sınıflandırılması

İzinli bantların ve yasak aralıkların resmini tartışmaktayız. Şimdi bu bantlardaki elektronların gerçek bulunma durumlarını tartışmak için hazırlanalım. Aşağıdaki varyasyonları tartışabiliriz:

1. Her hücrede bir atom vardır. Bu yüzden, $T = 0$ 'da bant yarı-doludur.
2. Hücre başına bir atom ve atom başına iki elektron vardır. Bu durumda bant doludur, bant aralığı ve diğer bant boştur.
3. Hücre başına iki atom vardır ve her atom bir elektron katkı yapar. Önceki durum içinde aynıdır (Galperin, 2014).

1 numaralı durumda düşük sıcaklıklarda, yüksek iletkenliğe sahip materyal vardır. Bu *metaldir*. 2 ve 3 numaralı durumlar yalıtkan olarak adlandırılır ve iletkenlikleri düşük sıcaklıklarda üssel olarak azalmaktadır. Bu durum Şekil 2.10'da gösterilmektedir (Galperin, 2014).

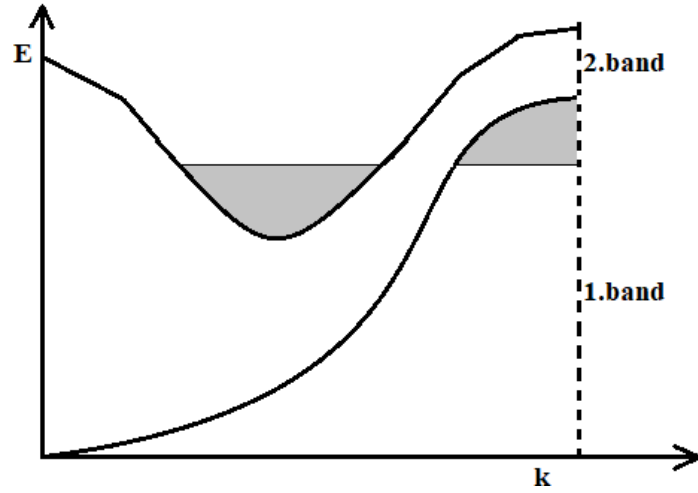


Şekil 2.10. Bantlardaki elektron durumu (Şematik olarak)

Bütün bu şema bantlar çakışmadığında geçerlidir. Eğer bantlar çakışıksa iletkenlik metaliktir (Bkz. Şekil 2.11). Eğer taşıyıcıların efektif sayıları küçükse, benzer malzemeler *yarı-metal* olarak adlandırılır. Yarı-metalin tipik bir örneği olarak Bi verilebilir (Galperin, 2014).

Yarıiletkenler, küçük yasak enerji aralıkları nedeniyle yalıtkan olarak nitelendirilirler. Sınırlı sıcaklıklarda bazı elektronlar daha düşük olan *valans* bandından daha yukarıdaki *iletim* bandına uyarılırlar. Bu yüzden valans bandında boşluklar oluşur ve iletim bandında da elektronlar vardır. Bazı yarıiletkenler, *intrinsic* (özgün) olarak adlandırılır. Elektronikte kullanılan malzemeleri geliştirmenin modern bir yolu olarak, *katkılı* yarıiletken malzemeler kullanılır. Kontrol edilebilir yöntemlerle, taşıyıcı denilen katkı atomları eklenebilir (Galperin, 2014).

Katkılama seviyesi genellikle yasak enerji aralığı seviyesindedir. Yeterince düşük sıcaklıklarda iyonize edilmiş bir atom ve banda fazladan elektron ekleme koşuluyla, katkılama seviyesi iletim bandının alt seviyesi yakınlarında olur (benzer katkılama, *donör* olarak adlandırılır). Tam tersi olarak, eğer seviyeler valans bandının üst seviyelerine yakınsa, elektronlar geçiş yaparak boşluklar oluştururlar (alıcı, akseptör olarak adlandırılır) (Galperin, 2014).



Şekil 2.11. Bant çakışması durumu

2.7. Kristal Yapıları – Periyodiklik

Çoğu katı malzeme kristalin yapıya sahiptir. Kristalin yapı, *üç boyutta periyodiklik* veya *öteleme simetrisi* anlamına gelmektedir. Bütün örgüler temel olarak adlandırılan bir yapı bloğu tekrarından elde edilebilir. Biz, \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 ve \mathbf{a}_3 olarak adlandırılan üç eş düzlemli olmayan vektör olduğunu varsayalım. Herhangi bir örgü noktası \mathbf{R}' başka bir nokta olan \mathbf{R} ile açıklanabilir,

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} + m_1\mathbf{a}_1 + m_2\mathbf{a}_2 + m_3\mathbf{a}_3 \quad (2.15)$$

Burada, m_i tamsayı değişkeni göstermektedir. Yapı bloğu örgüsü gibi örgüler, *Bravais örgüsü* olarak adlandırılır. Kristal yapısı, yapı bloklarının (temel) ve Bravais örgüsünün özelliklerinin kombinasyonları ile anlaşılabilir. Bunun yanı sıra aşağıdaki temel bilgiler de önemlidir:

- \mathbf{a}_i vektörünü seçmek için tek bir yol yoktur. \mathbf{a}_1 vektörünü seçerken örgü periyodunun en kısa mesafesini seçeriz; \mathbf{a}_2 vektörünü seçerken \mathbf{a}_1 vektörüne paralel olmayan en kısa periyodu seçeriz; \mathbf{a}_3 vektörünü seçerken de \mathbf{a}_1 ve \mathbf{a}_2 vektörleriyle aynı düzlemde olmayan en kısa periyodu seçeriz.
- \mathbf{a}_i vektörlerinin çeşitli yollarla seçilmesine *ilkel* denir.

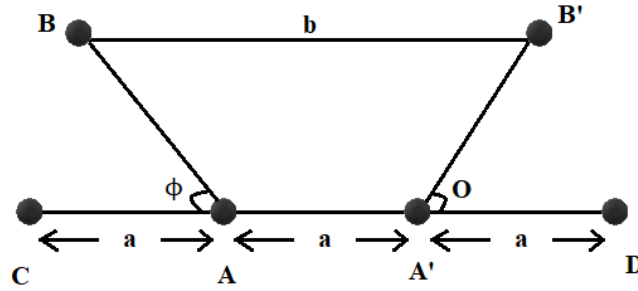
- İlkel vektörlerle kapatılmış hacimsel hücre, *ilkel birim hücre* olarak adlandırılır.
- İlkel hücrenin hacmi, V_0 ,

$$V_0 = (\mathbf{a}_1[\mathbf{a}_2\mathbf{a}_3]) \quad (2.16)$$

olarak gösterilir (Galperin, 2014).

Bir kristal yapısını, örgünün bir noktası etrafında uygulanan operasyonları içeren *nokta grup* operasyonları takımı ile açıklamak doğal bir yoldur. Simetrinin, titreşim ve elektron özellikleri üzerinde önemli bir kısıtlamaya sebep olacağını görmeliyiz (özellikle, sektrum dejenerasyonu). Genellikle tartışılan konular:

Dönme, C_n : Belirli bir ekseninde, $2\pi/n$ açı değerinde dönme. n için *kısıtlamalar* vardır. Aslında, a bir örgü sabiti ise, $b = a + 2a \cdot \cos\phi$ eşitliği yazılabilir (Bkz. Şekil 2.12). Sonuç olarak, $\cos\phi = i/2$ olur ve buradaki i bir değişkendir (Galperin, 2014).



Şekil 2.12. Rotasyon simetrisinin saptanması

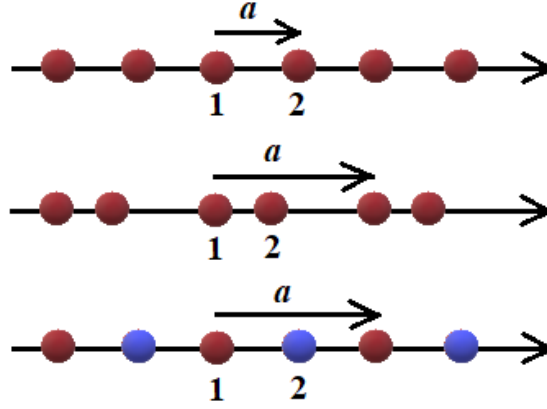
Ters dönme, I : $r \rightarrow -r$ dönüşümü, sabit nokta orijin olarak seçilmiştir (dönüşüm simetrisinin eksikliği, bizi piezoelektriğe götürebilir).

Yansıma, σ : Bir düzleme göre yansıma.

Yansımahlı dönme, S_n : Rotasyon C_n , dönme ekseninin normal düzlemindeki yansıma ile devam eder (Galperin, 2014).

Örnekler: Şimdi örgülerle ilgili birkaç örnek inceleyelim.

Bir Boyutlu Örgüler – Zincirler



Şekil 2.13. Bir boyutlu örgüler

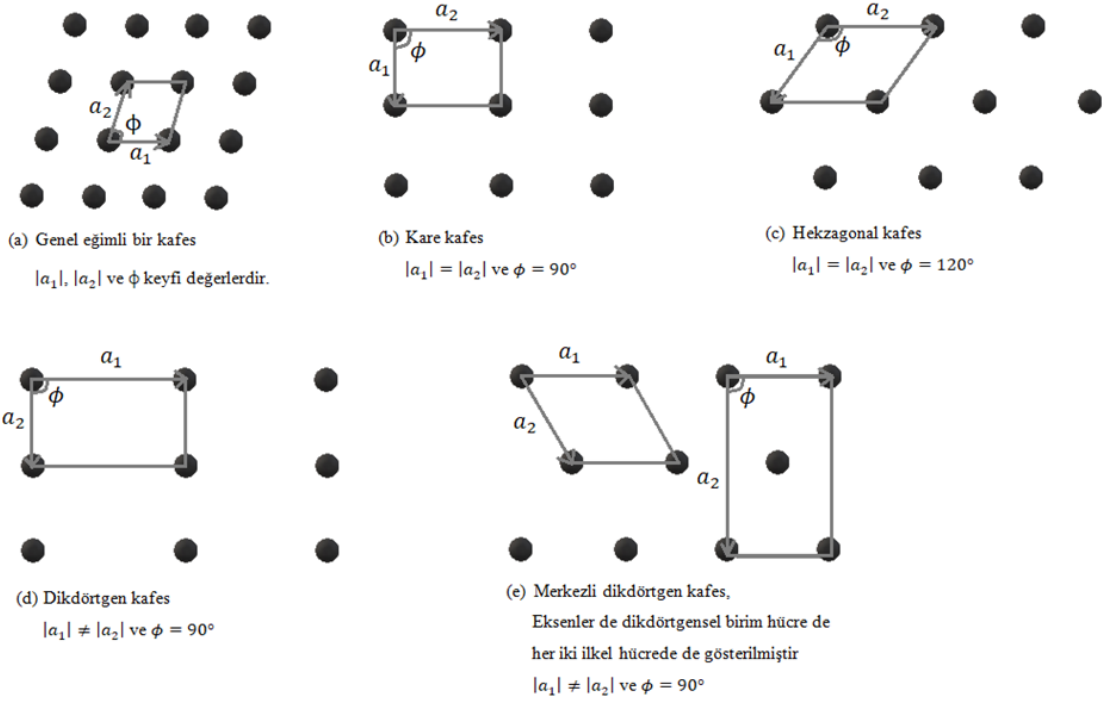
Bir boyutlu zincirler Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Yalnızca bir öteleme vektörümüz vardır, $|\mathbf{a}_1| = a, V_0 = a$ yazılır. Mavi ve kahverengi renkler farklı atomları göstermektedir. a , ilkel bir hücredeki atomla birlikte ilkel örgüyü göstermektedir; b ve c iki atomlu bir hücredeki bileşik örgüyü göstermektedir (Galperin, 2014).

İki Boyutlu Örgüler

Şekil 2.14'te iki boyutta 5 temel örgü tipi görülmektedir.

Üç Boyutlu Örgüler

3 boyutta 14 örgü tipi vardır. Bunlar alttaki tablo da gösterilmiştir (Bkz. Çizelge 2.1). Örgü tipleri a_i uzunlukları ve α_i açıları arasındaki bağımlılıkların farklılaşmasıyla farklılık gösterir (Galperin, 2014).

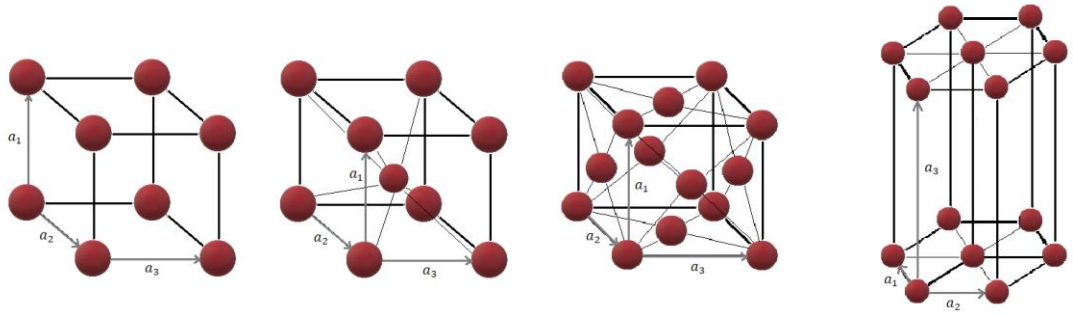


Şekil 2.14. 2 boyutlu örgülerde 5 örnek

Birçok yapı arasında birçok materyal için de önemli olan kübik örgü tipindeki yapılardır (Galperin 2014).

Kübik ve Hekzagonal Örgüler:

Bazı ilkel kafes yapıları Şekil 2.15'te gösterilmiştir. a , b ve c kübik kafes yapıları göstermektedir. a , basit kübik kafes yapı (her ilkel hücrede 1 atom); b , cisim merkezli kübik kafes yapı ($1/8 \times 8 + 1 = 2$ atom); c , yüzey merkezli kafes yapı ($1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ atom) durumunu göstermektedir (Galperin, 2014).



Şekil 2.15. İlkel hücreler

Çizelge 2.1. 3 boyutlu örgü tipleri

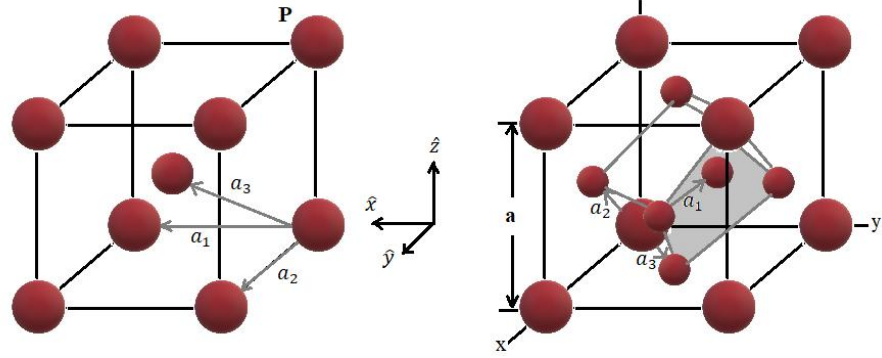
Kristal Sistemi	Birim Hücre Boyutları ve Açıları	Bravais Örgü
Triklinik	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	P (İlkel)
Monoklinik	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	P (İlkel) I (Cisim Merkezli)
Ortorombik	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P (İlkel) I (Cisim Merkezli) C (Taban Merkezli) F (Yüzey Merkezli)
Tetragonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P (İlkel) I (Cisim Merkezli)
Kübik	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	P (İlkel) I (Cisim Merkezli) F (Yüzey Merkezli)
Trigonal	$a_1 = a_2 = a_3$ $120^\circ > \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	R (Rombahedral-Eşkenar Üçgen Tabanlı)
Hekzagonal (Altıgen)	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma = 120^\circ$	P (İlkel)

Wigner–Seitz Hücresi

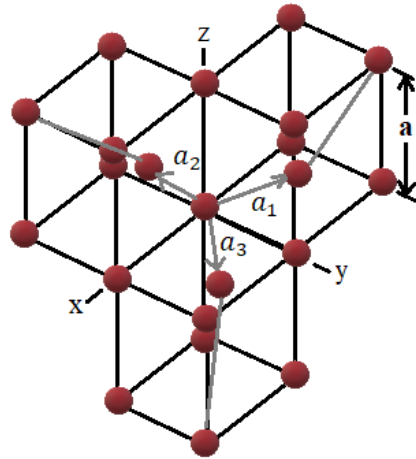
En temel hücreyi seçmenin süreci tek bir tane değildir ve bazen keyfi bir hücre örgü simetrisini göstermez (Bkz. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17, kübik kafesler için spesifik olarak seçilmiş). Örgü simetrisini gösteren bir hücreyi seçmenin uygun bir yöntemi vardır. Bu yöntemin aşamaları:

1. Bütün komşu noktalarına, verilen bir örgü noktasından çizgiler çizilir.
2. Çizgileri tam ortasından ikiye bölün (ya da düzlemleri)

şeklinde sıralanabilir (Galperin, 2014).

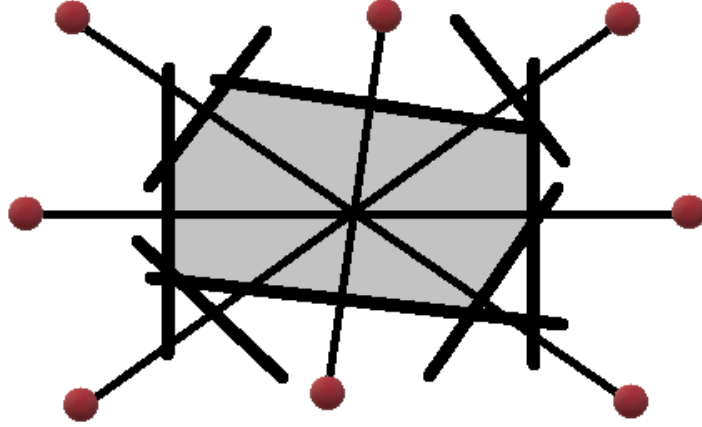


Şekil 2.16. BCC yapı için ilkel vektörler (sol) ve kafesler (sağ)



Şekil 2.17. BCC kafes yapısı için örgü vektörlerinin daha simetrik seçimi

Ayrıca yukarıda sözünü ettiğimiz süreç Şekil 2.18’de özetlenmiştir (Galperin, 2014).



Şekil 2.18. Wigner–Seitz hücresinin belirlenmesi

2.8. Ters Örgü

Kristal periyodikliği bizi bazı önemli sonuçlara götürür. Yani, bütün özellikler, elektrostatik potansiyel V gibi, hep periyodiktir,

$$V(r) = V(r + a_n), a_n \equiv n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3 \quad (2.17)$$

Bu, Fourier dönüşümleri anlamına gelir. Genellikle a_i eksenini boyunca yönlendirilmiş eğik koordinat sistemi tanımlandı. Eğer koordinatları ξ_s olarak ifade edersek a_s periyotlarını aşağıdaki gibi elde ederiz,

$$V(r) = \sum_{k_1, k_2, k_3 = -\infty}^{\infty} V_{k_1, k_2, k_3} \cdot \exp \left[2\pi i \cdot \sum_s \frac{k_s \cdot \xi_s}{a_s} \right] \quad (2.18)$$

Sonrasında da kartezyen koordinat sistemine geçiş yaparsak,

$$\xi_i = \sum_k a_{ik} \cdot x_k \quad (2.19)$$

elde ederiz. Sonuç olarak,

$$V(r) = \sum_b V_b \cdot e^{ibr} \quad (2.20)$$

elde ederiz ve periyodiklik koşulundan,

$$V(r + a_n) = \sum_b V_b \cdot e^{ibr} \cdot e^{iba_n} \quad (2.21)$$

elde ederiz. e^{iba_n} 1'e eşit olmalıdır ve bu durumda,

$$b \cdot a_1 = 2\pi \cdot g_1, b \cdot a_2 = 2\pi \cdot g_2, b \cdot a_3 = 2\pi \cdot g_3 \quad (2.22)$$

elde ederiz. Bu eşitlikteki g_i tam sayı değişkendir ve

$$b_g \equiv b = g_1 \cdot b_1 + g_2 \cdot b_2 + g_3 \cdot b_3 \quad (2.23)$$

elde ederiz ve bu denklemler,

$$b_1 = \frac{2\pi \cdot [a_2 \cdot a_3]}{V_0}, b_2 = \frac{2\pi \cdot [a_3 \cdot a_1]}{V_0}, b_3 = \frac{2\pi \cdot [a_1 \cdot a_2]}{V_0} \quad (2.24)$$

halini alır. Skaler oluşumlar da kolayca gösterilir,

$$a_i \cdot b_k = 2\pi \cdot \delta_{i,k} \quad (2.25)$$

b_k vektörleri *ters örgü vektörleri* olarak adlandırılır. Sonuç olarak, bu vektörleri kullanarak ters örgü elde edilebilir, temel hücre hacmi $(b_1[b_2, b_3]) = (2\pi)^3/V_0$ şeklindedir (Galperin, 2014).

Kübik yapılar için ters örgüler: Basit kübik yapı (SC) basit kübik ters örgüye sahiptir ve ters örgü vektörlerinin uzunlukları $b_i = 2\pi/a_i$ olarak verilir. Şimdi de cisim merkezli kübik yapı (BCC) ve yüzey merkezli kübik yapı (FCC) örnekleri için genel yöntemi ispat edelim (Galperin, 2014).

İlk olarak BCC yapı için örgü vektörlerini yazalım,

$$a_1 = \frac{a}{2} \cdot (y + z - x),$$

$$a_2 = \frac{a}{2} \cdot (z + x - y),$$

$$a_3 = \frac{a}{2} \cdot (x + y - z) \quad (2.26)$$

Buradaki x, y, z birim vektörleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Hücre hacmi $V_0 = a^3/2$ olarak verilir. Örgü vektörleri,

$$b_1 = \frac{2\pi}{a} \cdot (y + z),$$

$$b_2 = \frac{2\pi}{a} \cdot (z + x),$$

$$b_3 = \frac{2\pi}{a} \cdot (x + y) \quad (2.27)$$

elde edilir. Şekil 2.16’nın sağ tarafında yüzey merkezli kübik yapı görülmektedir. Bu yüzden BCC ters örgü için Wigner-Seitz hücresini elde edebiliriz (Galperin, 2014).

2.9. Periyodik Yapılarda X–Işını Difraksiyonu

2.9.1. Laue Koşulu

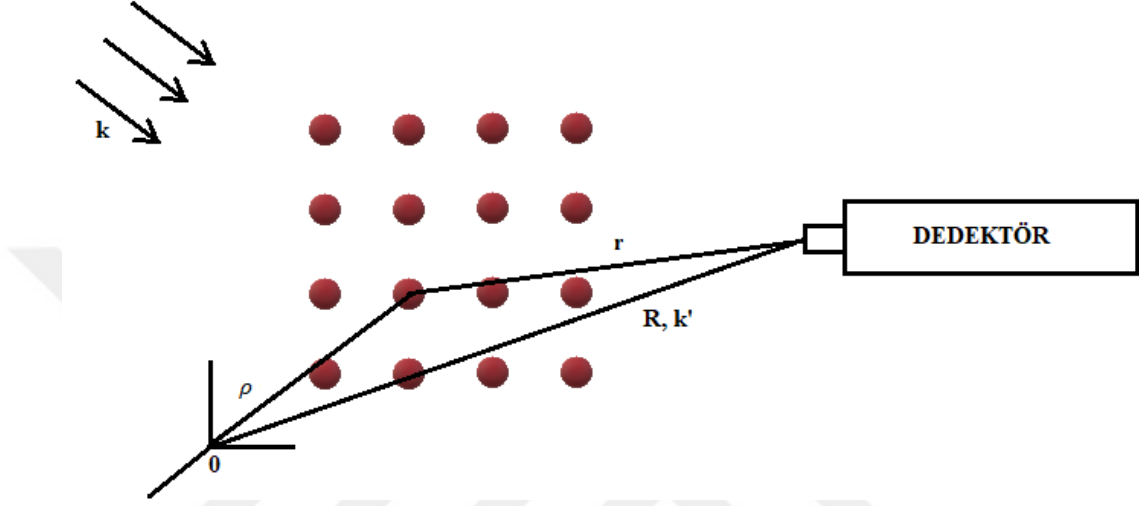
Bir düzlem dalgayı,

$$F(\mathbf{r}) = F_0 \cdot \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t) \quad (2.28)$$

şeklinde dikkate alırız ve periyodik bir yapıda kullanılır. ρ noktasına konumlandırılmış her atom, saçılmış bir küresel dalga oluşturur,

$$F_{sc}(\mathbf{r}) = fF(\rho) \cdot \frac{e^{ikr}}{r} = fF_0 \cdot \frac{e^{ik \cdot \rho \cdot e^{i(kr-\omega t)}}}{r} \quad (2.29)$$

bu denklemde $r = R - \rho \cdot \cos(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{R})$ olarak verilir ve \mathbf{R} dedektörün pozisyonudur (Bkz. Şekil 2.19) (Galperin, 2014).



Şekil 2.19. Periyodik atomik yapısının saçılma geometrisi

$R \gg \rho$ olduğunu varsayalım ve sonuç olarak $r \approx R$ olsun; böylece r yerine R yazarız. Ayrıca, faz daha kesin bir davranışa ihtiyaç duyar,

$$k \cdot \rho + k \cdot r = k \cdot \rho + k \cdot R - k \cdot \rho \cdot \cos(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{R}) \quad (2.30)$$

Şimdi de \mathbf{R} yöneliminde saçılmış vektör olan k' , $k' \cdot \rho$ yerine $k \cdot \rho \cdot \cos(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{R})$ değişimi yapalım. Sonuç olarak, faz eşitliği,

$$kR - \rho \Delta k, \Delta k = k - k' \quad (2.31)$$

halini alır. Şimdi de bütün atomlardan gelen katkıları toplayalım,

$$F_{sc}(\mathbf{R}) = \sum_{m,n,p} f_{m,n,p} \left(F_0 \cdot \frac{e^{i(kR-\omega t)}}{R} \right) \cdot \exp(-i \cdot \rho_{m,n,p} \cdot \Delta k) \quad (2.32)$$

Eğer bütün saçılma faktörleri $f_{m,n,p}$ yalnızca faz faktörlerine eşit ise bu durum önemlidir ve güçlü difraksiyon şu şekilde karşımıza çıkar,

$$\rho_{m,n,p} \cdot \Delta \mathbf{k} = 2\pi \cdot n \quad (2.33)$$

Bu denklemdeki n tam sayı değişkendir. Denklem 2.33'teki durum ters vektörlerin tanımıyla aynıdır. Bu yüzden, eğer transfer edilmiş momentum ters örgü faktörüyle orantılıysa saçılma zordur. Laue koşulu (Bkz. Eşitlik 2.33) ünlü, periyodik yapılardaki Bragg koşuluyla aynıdır (Galperin, 2014).

2.9.2. Düzensizlik Etkisi

Saçılma yoğunluğu, genliğin karesiyle orantılıdır. $\mathbf{G} = \Delta \mathbf{k}$ eşitliğinde \mathbf{G} ters örgü vektörüdür ve böylece,

$$I_{sc} \propto \left| \sum_i e^{i\mathbf{G}\mathbf{R}_i} \right| \cdot \left| \sum_i e^{-i\mathbf{G}\mathbf{R}_i} \right| \quad (2.34)$$

veya

$$I_{sc} \propto \left| \sum_i 1 + \sum_i \sum_{j \neq i} e^{i\mathbf{G}(\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_j)} \right| \quad (2.35)$$

yazılır. İkinci terim korelasyonu içerirken, ilk terim N durumlarının toplam sayısına eşittir. Eğer,

$$\mathbf{G}(\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_j) \equiv \mathbf{G}\mathbf{R}_{ij} = 2\pi n \quad (2.36)$$

ikinci terim $N(N - 1) \approx N^2$ olursa ve,

$$I_{sc} \propto N^2 \quad (2.37)$$

olur. Eğer düzenleme rastgele olursa bütün fazlar yok sayılır ve ikinci terim de yok sayılır. Bu durumda,

$$I_{sc} \propto N \quad (2.38)$$

ve bu *açısal bağımsızdır*. Zayıf bir düzensizliğin etkisini tartışırsak eğer,

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_i^0 + \Delta\mathbf{R}_i \quad (2.39)$$

buradaki $\Delta\mathbf{R}_i$ küçük *zaman-bağımsız* değişimdir. Ayrıca şu tanımlamayı da yaparsak,

$$\Delta\mathbf{R}_{ij} = \Delta\mathbf{R}_i - \Delta\mathbf{R}_j \quad (2.40)$$

Difraksiyonun maksimum değeri civarında şunu yazabiliriz,

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}^0 + \Delta\mathbf{G} \quad (2.41)$$

Denklem 2.35'i kullanarak ve $\propto N$ terimini ihmal edersek,

$$\frac{I_{sc}(\mathbf{G}_0 + \Delta\mathbf{G})}{I_{sc}(\mathbf{G}_0)} = \frac{\sum_{i,j} \exp[i(\mathbf{G}^0 \Delta\mathbf{R}_{ij} + \Delta\mathbf{G} \mathbf{R}_{ij}^0 + \Delta\mathbf{G} \Delta\mathbf{R}_{ij})]}{\sum_{i,j} \exp[i\mathbf{G}^0 \Delta\mathbf{R}_{ij}]} \quad (2.42)$$

elde ederiz. Bu yüzden, *salınım yapan eğri* olarak adlandırılan *saçılma yapısının* sonlu genişliği olduğunu görürüz. Genişlik, düzensizlik miktarının karakteristiğidir (Galperin, 2014).

Bir başka düzensizlik kaynağı ise örneğin sınırlı boyutudur (küçük yarıiletken örnekleri için önemlidir). Bir a mesafesiyle ayrılmış N atomlu bir yapıyı göz önüne alırsak,

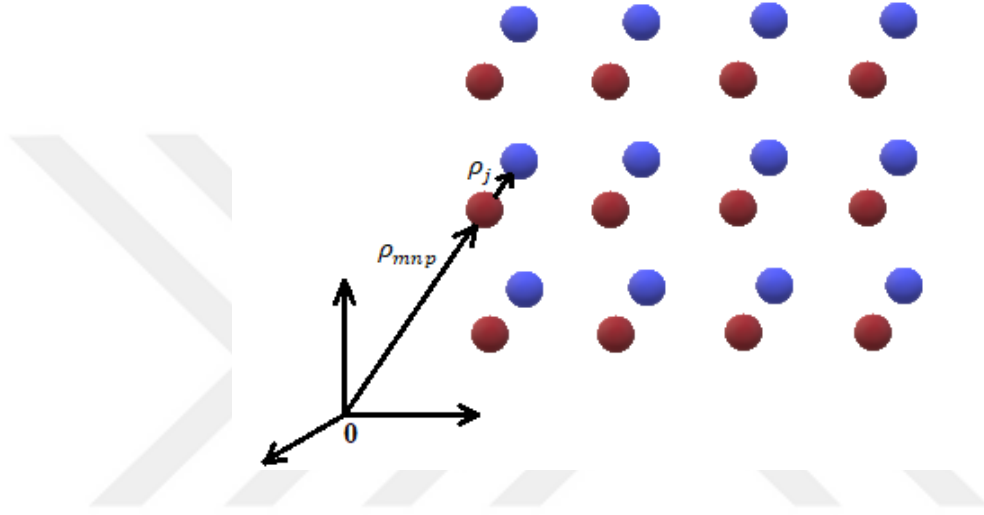
$$|\sum_{n=0}^{N-1} \exp(ina\Delta k)|^2 \propto \frac{\sin^2(Na\Delta k/2)}{\sin^2(a\Delta k/2)} \quad (2.43)$$

sonucunu elde ederiz. Bu fonksiyon $a\Delta k = 2m\pi$ değerinde maksimumdur ve N^2 'ye eşit olunca (L'Hospital kuralı) genişlik $\Delta k' a = 2,76/N$ değerini alır (Galperin, 2014).

2.9.3. Saçılma Faktörü, f_{mnp}

Şimdi her bir temelde birden fazla atom olan karmaşık yapılara bakalım. Bu durumu açıklamak için,

- Birim hücrenin başlangıç noktasının koordinatları, ρ_{mnp} (Bkz. Şekil 2.20),
- ρ_j, j 'inci atomun birim hücre içindeki koordinatını göstermektedir.



Şekil 2.20. Her bir temelde birden fazla atom olan bir kristalin saçılması

Türettiğimiz eşitliğe geri dönersek,

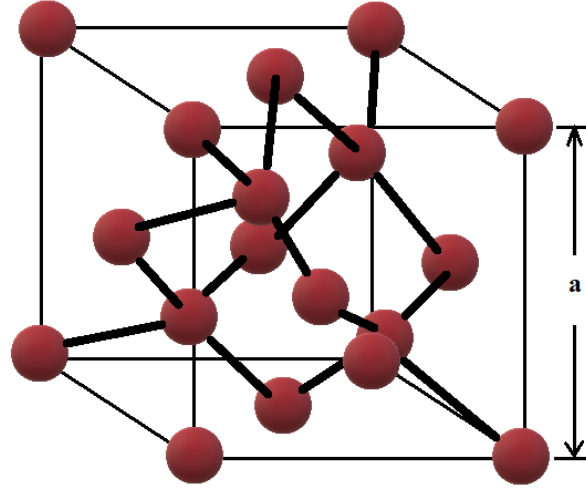
$$F_{sc}(\mathbf{R}) = F_0 \frac{e^{i(kR - \omega t)}}{R} \sum_{m,n,p} \sum_j f_j \exp[-i(\rho_{m,n,p} + \rho_j)\Delta k] \quad (2.44)$$

buradaki f_j hücre içindeki farklı atomların genel farklılıklarıdır. Şimdi de yapı faktörü denen, $\Delta \mathbf{k} = \mathbf{G}$ için tüm hücrelerin toplamını çıkartabiliriz,

$$S_G = \sum_j f_j \exp(-i\rho_j G) \quad (2.45)$$

İlk toplam tek atomlu kafes yapısıyla aynıdır. Bu yüzden, kurala bakarsak,

- X-ışını deseni kafes bölgelerinin yapı faktörlerinin sonuçlarının oluşmasıyla elde edilebilir (Galperin, 2014).



Şekil 2.21. Birbiri içine geçmiş FCC yapılarının iki atomlu yapısı

[Elmas ve Sfalerit yapılar örnek olarak verilebilir.]

Basit bir örnek yapabilmek için iki atomlu bir kafes yapıyı inceleyelim. İki temel atomun koordinatları (000) ve $(a/4)(111)$ 'dir ve bu yüzden 2 iç içe geçmiş FCC kafes yapısı cisim köşegeni boyunca $(a/4)(111)$ uzaklığına kayar. Eğer atomlar özdeş ise yapı *elmas yapı* olarak adlandırılır (temel yarıiletkenler: Si, Ge ve C). Eğer atomlar farklı ise yapı *sfalerit yapı* olarak adlandırılır (GaAs, AlAs ve CdS) (Galperin, 2014).

Elmas yapı için,

$$\rho_1 = 0$$

$$\rho_2 = \frac{a}{4}(x + y + z) \quad (2.46)$$

yazabiliriz ve ayrıca ters örgü vektörlerini,

$$b_1 = \frac{2\pi}{a}(-x + y + z),$$

$$b_2 = \frac{2\pi}{a}(-y + z + x),$$

$$b_3 = \frac{2\pi}{a}(-z + x + y) \quad (2.47)$$

olarak elde ederiz. Genel ters örgü vektörü,

$$\mathbf{G} = n_1 \mathbf{b}_1 + n_2 \mathbf{b}_2 + n_3 \mathbf{b}_3 \quad (2.48)$$

şeklinde yazılabilir ve sonuç olarak,

$$S_G = f \left(1 + \exp \left[\frac{i\pi}{2} (n_1 + n_2 + n_3) \right] \right) \quad (2.49)$$

şeklinde yazılabilir. Bu,

$$S_G = \begin{cases} 2f, n_1 + n_2 + n_3 = 4k; \\ (1 \pm i)f, n_1 + n_2 + n_3 = (2k + 1); \\ 0, n_1 + n_2 + n_3 = 2(2k + 1) \end{cases} \quad (2.50)$$

yukarıdaki denkleme eşittir. Bu yüzden, elmas yapı FCC yapı ile karşılaştırıldığında bazı kayıp noktalar vardır (Galperin, 2014).

Sfalerit yapıda atomik faktör, f_i farklıdır. X-ışınları için, Coulomb yük yoğunluğundan dolayı ve kısmi yük yoğunluğunun Fourier bileşenlerindeki orantılılık sebebiyle farklıdır. Bu durumda,

$$S_G = \begin{cases} f_1 + f_2, n_1 + n_2 + n_3 = 4k; \\ (f_1 \pm if_2), n_1 + n_2 + n_3 = (2k + 1); \\ f_1 - f_2, n_1 + n_2 + n_3 = 2(2k + 1) \end{cases} \quad (2.51)$$

yazabiliriz. X-ışını saçılmasından yapı hakkında birçok bilgi elde edilebileceğini görürüz (Galperin, 2014).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu kısımda yapılan çalışmanın, konusu olan CdTe ince filmlerinin hazırlığı ve deney sırasında kullanılan cihazlar, hazırlanan ince film örneklerinin ölçümlerinde kullanılan cihazlar ve üretim sırasında kullanılan yöntemler incelenmiştir.

3.2. Deneysel

İnce film örneklerinin üretimine başlanırken üzerine kaplama yapılacak, ITO altlıkları 1 cm genişlikte kesildi. Altta görülen, laboratuvarımızdaki cihazla ultrasonik olarak temizleme işlemi gerçekleştirildi. Her bir ITO altlık öncelikle ultrasonik temizleme cihazında sıralamaya uygun şekilde; ilk önce 15 dakika süre ile 50 mL saf su içinde, daha sonra 15 dakika süre ile 50 mL aseton içinde, sonrasında 15 dakika süre ile 50 mL propan içinde ve son olarak da yine 10 dakika süre ile 50 mL saf su içinde ultrasonik olarak temizlendi. Altlıkların iletken olan kısımları avometre ile belirlenerek yukarıya bakacak şekilde kurumaya bırakıldı. Altlık olarak kullanılacak ITO'ların iletken olan yüzeylerine kaplama yapıldı.

Temizlenen altlıklar oda sıcaklığında ve açık hava ortamında kurumaya bırakıldı. Altlıklar kururken, 50 mL hacimde saf suların olduğu beherler hazırlanarak içlerine kaplama işleminde kullanılacak kimyasallar eklendi ve 5 mM molaritedeki elektrolitler hazırlandı.



Şekil 3.1. Deney öncesinde ITO camlarımızı ultrasonik temizleme aşaması

Kadmiyum kaynağı olarak CdCl_2 (Sigma-Aldrich, cadmium chloride, % 99.99) bileşiği kullanıldı. Hazırlanılan elektrolitin hacmi, 50 mL'lik beher kullandığı için, $5,0 \cdot 10^{-3}$ L olarak alınırken, kadmiyumun molaritesi ise $5,0 \cdot 10^{-3}$ M olarak seçildi. Aşağıdaki matematiksel işlemler yapılarak $5,0 \cdot 10^{-3}$ L'lik elektrolit içine, moleküler ağırlığı $MW=183,32$ g/mol olan CdCl_2 bileşiğinden kaç gram eklenmesi gerektiği hesaplandı.

$$M = \frac{n}{V}$$

Burada, M, molariteyi; n, mol değerini ve V, elektrolitin hacmini vermektedir. Öncelikle eklenmesi gereken CdCl_2 bileşiğinin kaç mol olduğu,

$$5,0 \cdot 10^{-3} M = \frac{n}{5,0 \cdot 10^{-2} L}$$

$$n = 25 \cdot 10^{-5} \text{ mol}$$

olarak hesaplandı. Bulunan mol sayısı yardımıyla da eklenmesi gereken CdCl_2 bileşiğinin miktarı aşağıdaki matematiksel işlemlerle hesaplanmıştır,

$$n = \frac{m}{MW}$$

Burada, n, mol sayısını; m, bileşik kütlesini ve MW, bileşiğin moleküler ağırlığını vermektedir. Eklenmesi gereken CdCl_2 bileşiğinin kütlesini aşağıdaki şekilde,

$$25 \cdot 10^{-5} \text{ mol} = \frac{m}{183,32 \text{ g/mol}}$$

$$m = 0,04583 \text{ g}$$

olarak hesaplandı.

Aynı şekilde tellür kaynağı olarak Na_2TeO_3 (Sigma-Aldrich, sodium tellurite, % 99) bileşiği kullanıldı. Moleküler ağırlığı $MW=221,58 \text{ g/mol}$ olan Na_2TeO_3 bileşiğinden eklenmesi gereken miktar, yukarıdaki şekilde CdCl_2 bileşiğinden eklenmesi gereken miktarı hesaplandığı gibi aşağıdaki şekilde hesaplandı. Öncelikle gerekli olan mol miktarı,

$$5,0 \cdot 10^{-3} \text{ M} = \frac{n}{5,0 \cdot 10^{-2} \text{ L}}$$

$$n = 25 \cdot 10^{-5} \text{ mol}$$

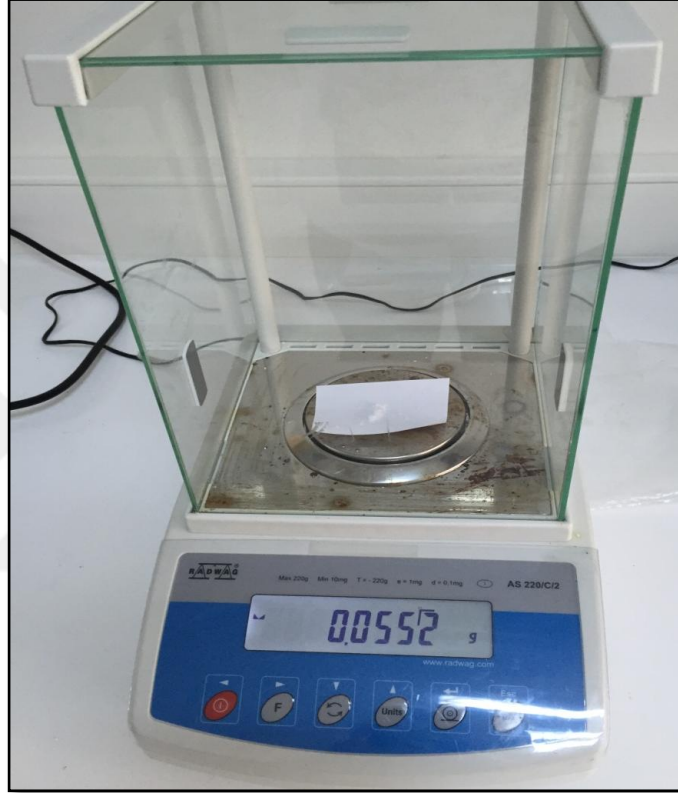
olarak bulunurken, sonrasında $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ M}$ 'lık molaritedeki tellür oluşması için eklenmesi gereken Na_2TeO_3 miktarı,

$$25 \cdot 10^{-5} \text{ mol} = \frac{m}{221,58 \text{ g/mol}}$$

$$m = 0,055395 \text{ g}$$

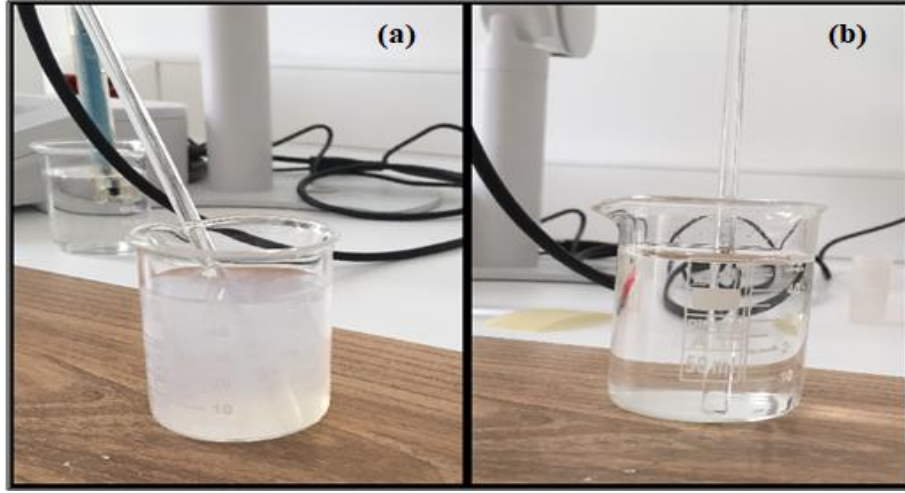
olarak hesaplandı.

Altıklar kururken hazırlanılan 50 mL'lik beherlere sırasıyla hassas terazide tartılarak 0,04583 g kadmiyum kaynağından ve 0,055395 g tellür kaynağından eklendi.



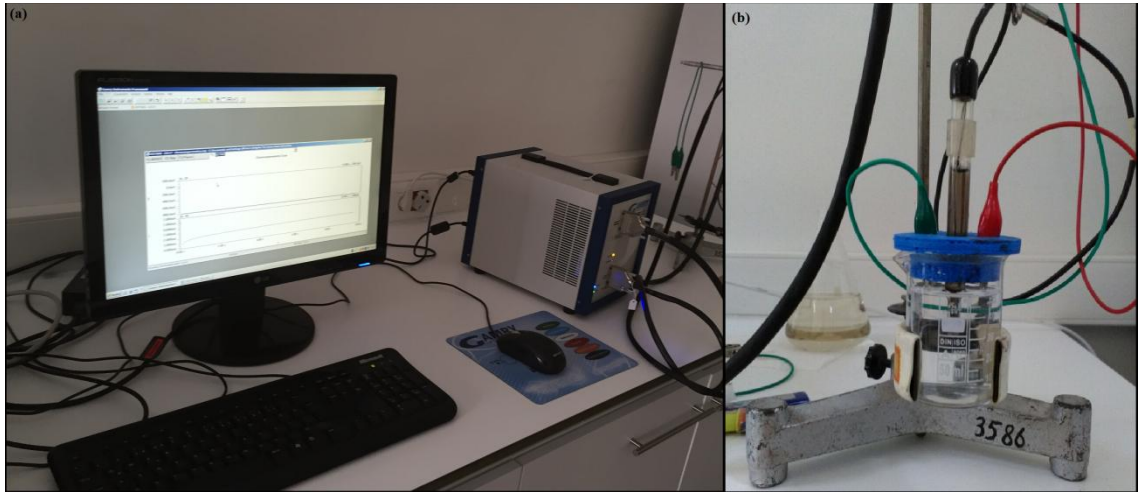
Şekil 3.2. İnce filmler için kullandığımız kimyasalların kütlelerin ölçüldüğü hassas terazi

İçinde saf su bulunan beherlere eklenen kimyasallar oda sıcaklığında elle karıştırılarak çözülmesi sağlandı. Çözeltinin homojen olmasını ve daha hızlı çözünme için mikropipet yardımıyla hidroklorik asit eklendi. Asit ekmeden ve karıştırma işlemini gerçekleştirmeden önce çözelti heterojen haldeyken (Bkz. Şekil 3.3-a), asit ekleyerek karıştırma işlemi yapıldıktan sonra çözelti homojen hale geldi (Bkz. Şekil 3.3-b). Elektrolitler hazırlandıktan sonra asitlik derecesi pH-metre ile ölçüldü.



Şekil 3.3. (a) Karıştırma öncesinde elektrolit, (b) Karıştırma sonrasında elektrolit

Farklı kaplama potansiyelleri uygulanarak üretilecek ince film örneklerinin üretim aşamasına geçmeden önce kadmiyumun ve tellürün kaplanma voltajlarını görebilmek için ayrı ayrı hazırlanılan kadmiyum ve tellür elektrolitleri Gamry 3000 sistemine bağlandı. Döngüsel voltametri yardımıyla iki ayrı bileşenin ve CdTe'ün de kaplanma potansiyelleri belirlendi. Kaplama potansiyellerinin belirlenmesinin ardından kullanılan sistemdeki kironoamperometri yöntemiyle ince film örnekleri, -0,4 V ile -1,1 V arasında 0,1 V aralıklarla değişen farklı kaplama potansiyellerinde, 8'er dakikalık kaplama sürelerinde gerçekleştirildi. Her bir örneğin üretilmesi öncesinde elektrolitlerin dirençleri kullanılan sistem yardımıyla ölçüldü.



Şekil 3.4. (a) Gamry 3000 sistemimiz ve (b) sistemimizde kullandığımız elektrolit

İnce film örnekleri hazırlandıktan sonra, uygulama laboratuvarımızda bulunan AFM cihazıyla ölçümleri yapıldı. İnce filmlerin yüzey pürüzlülükleri, film kalınlıkları ölçüldü. Farklı kaplama potansiyellerinde hazırlanmış ince filmlerin yüzey görüntüleri alındı.



Şekil 3.5. Laboratuvarımızdaki AFM cihazı

AFM ölçümleri yapıldıktan sonra, üretilen ince film örneklerinin yasak enerji band aralıklarının hesaplanabilmesi için, örneklerin UV ölçümleri, uygulama laboratuvarımızdaki UV cihazıyla yapıldı.



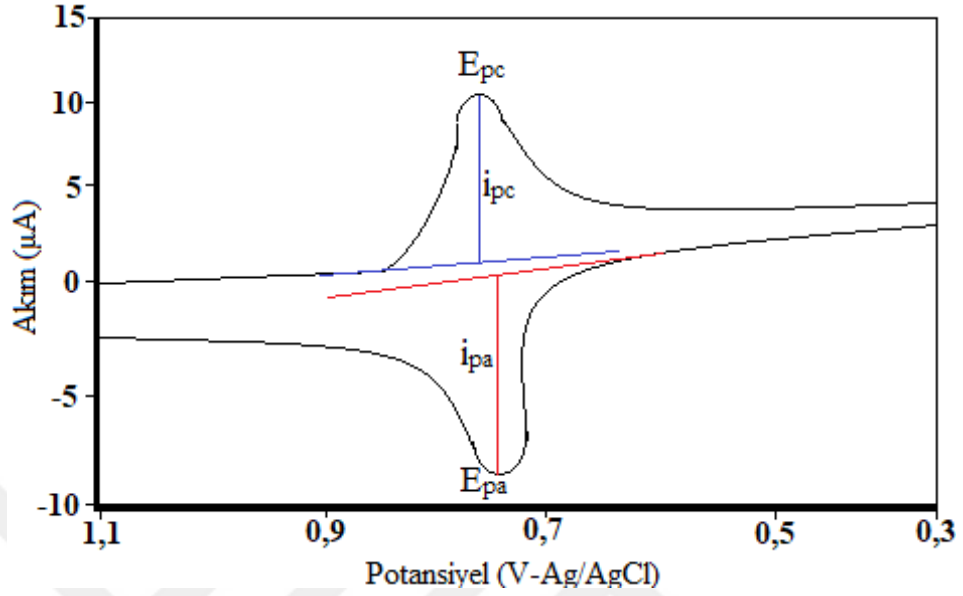
Şekil 3.6. Laboratuvarımızdaki UV ölçüm cihazı

Farklı kaplama potansiyellerinde üretilmiş ince film örneklerinin UV ölçümleri alınıp, yasak enerji band aralıkları da bu sonuçlar yardımıyla hesaplandıktan sonra, üretilen ince filmlerin SEM-EDX ölçümleri alındı. Bu ölçümlerin ardından kullanılan sistemdeki Mott-Schottky özelliği kullanılarak üretilen ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonları, film tipleri ve bu üretime en uygun olan elektronik devre bilgisayar yazılımı yardımıyla oluşturuldu.

3.3. Döngüsel Voltametri Yöntemi

Döngüsel voltametri, potansiyodinamik elektrokimyasal ölçüm tiplerinden biridir. Bir döngüsel voltametri deneyinde çalışma elektrodunun potansiyeli zamana bağlı olarak artar. Döngüsel voltametri deneyinde ayarlanılan potansiyele ulaşıldıktan sonra, çalışma elektrodunun potansiyeli başlangıçtaki potansiyelin zıddına dönecek şekilde eğim alır. Potansiyeldeki bu eğimlerin döngüleri istenildiği kadar tekrarlanabilir. Çalışma elektrodundaki akım, uygulanan voltaja karşı olarak yani çalışma elektrodundaki potansiyel, döngüsel voltamogram şeklinde çizilir. Döngüsel voltametri genellikle

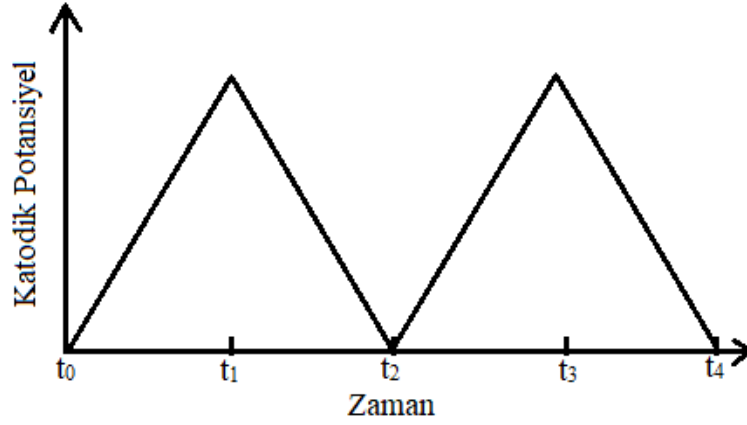
çözeltilerdeki analitin elektrokimyasal özelliklerini çalışmada kullanılır (en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry, 2019).



Şekil 3.7. Tipik bir döngüsel voltamogram (Çift taraflı bir reaksiyon için sırasıyla, i_{pc} , katodik akım; i_{pa} , anodik akım)

3.3.1. Deneysel Yöntem

Döngüsel voltametri, elektrot potansiyelinin zamana karşı lineer olarak, döngüsel fazlardaki değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Bkz. Şekil 3.8). Voltaj oranının bu fazların her biri boyunca zamanla değişimi deneysel tarama oranı olarak bilinir (V/s). Potansiyel, çalışma elektrotu ile sayaç elektrotu arasındaki akım ölçülürken, çalışma elektrotu ile referans elektrotu arasına uygulanır. Bu datalar akımın (i) uygulanan potansiyele (E) göre değişimini gösterir. Aşağıdaki şekilde, başlangıçtan ileriye doğru tarama boyunca (t_0 'dan t_1 'e) artan şekilde azalan bir potansiyel uygulanmıştır, böylece katodik akım, en az başlangıçtaki kadar, sistemdeki indirgenen analitlerin olduğu farz edilen bu zaman periyodunun üzerinde artacaktır. Bazı noktalarda, analitin azalan potansiyelinden sonra ulaşıldı, katodik akım tüketilen azalan analitin konsantrasyonuna karşılık olarak azalacaktır. Eğer redoks çifti tersinebilir ise tersinme taraması boyunca (t_1 'den t_2 'ye) geri kutupluluğun akımına verilen yükseltmesi (anodik akım) sayesinde indirgenen analit yeniden oksitlenmeye başlayacaktır (en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry, 2019).



Şekil 3.8. Döngüsel voltametri potansiyel dalga formu

Daha tersinebilir redoks çifti, daha benzer oksidasyon piki azalma pikindeki şekilde olacaktır. Bundan dolayı, döngüsel voltametri dataları redoks potansiyelleri ve elektrokimyasal reaksiyon oranları hakkında bilgi verebilir.

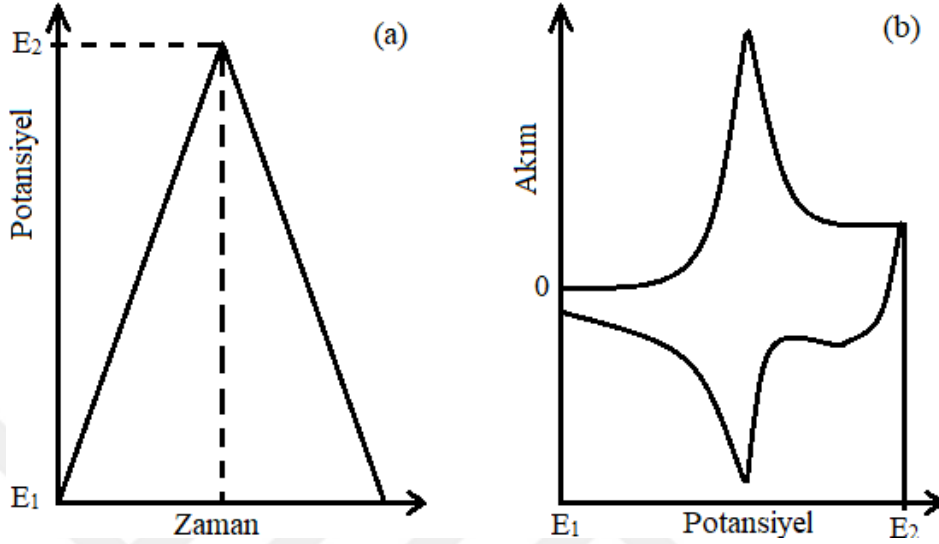
Örneğin, eğer çalışma elektrotunun yüzeyindeki elektron transferi hızlı ve akım, elektrot yüzeyindeki analit çeşitlerinin difüzyonuyla sınırlanırsa, pik akımı tarama oranının kökünün karesi ile orantılı olacaktır. Bu ilişki *Cottrell Eşitliği* ile açıklanır. Bu durumda, döngüsel voltametri deneyi yalnızca, çözeltinin küçük bir kısmı için, yani elektrot yüzeyindeki difüzyon tabakası için örnektir.

Cottrell eşitliği,

$$i(t) = \frac{n \cdot F \cdot A \cdot c_j^0 \cdot \sqrt{D_j}}{\sqrt{\pi \cdot t}} = k \cdot t^{-1/2}$$

olarak verilir. Bu eşitlikte, i , A alanı başına akım; n , redoks sürecindeki elektron sayısı; F , Faraday sabiti (98485 C/mol); A , elektrod alanı; c_j^0 , redoks türlerinin yığın konsantrasyonu; D_j , redoks türleri için difüzyon katsayısı; t , zaman anlamına gelmektedir (en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry, 2019).

Döngüsel voltametri datalarının birbirlerine dönüşümünün şekli aşağıdaki gibidir. Zamana karşılık potansiyeli incelerken aynı zamanda akıma karşılık potansiyeli de inceleyebiliriz.



Şekil 3.9. Döngüsel voltametri voltamogramları

Voltametri tekniğinin çalışma ilkesi, elektrokimyasal bir hücredeki bir çalışma elektrodu ile karşılaştırma elektrodu arasına uygulanan ve değeri zaman içinde değişen bir potansiyelin uygulanması sonucunda oluşan akımın ölçülmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu akım, üç elektrotlu sistemlerde çalışma elektrodu ile karşıt elektrot arasında oluşurken, iki elektrotlu sistemlerde çalışma elektrodu ile karşılaştırma elektrodu arasında oluşmaktadır (Balcı ve ark., 2011).

Destek elektroliti: Yukarıda adı geçen voltametri tekniğinde elde ettiğimiz akımın sadece difüzyon kontrolü ile elde edilebilmesi için ortamda iyonik değişimin tamamını sağlayabilecek bir destek elektroliti eklenir. Bu nedenle ortama KCl, KNO₃ gibi bir inorganik tuz, bir mineral asidi veya baz katılabilir. Diğer yandan pH kontrolü gerekliliği olan durumlarda da destek elektroliti olarak sitrik asit/sitrat ya da asetik asit/asetat gibi tampon sistemleri kullanılabilir (Balcı ve ark., 2011).

Çalışma (working) elektrodu: Voltametrizde kullanılan elektrotların fiziksel özellikleri de kimyasal özellikleri de önemlidir. Bu sebeple voltametri yönteminde kullanılan ve

polarlanabilir elektrot sayısı sınırlıdır. Kullanılabilen elektrotlar soy metal elektrotlar, çeşitli karbon elektrotlar ve modifiye elektrotlardır. Sabit olarak veya döndürülerek kullanılabilen bu tarz elektrotların potansiyel çalışma aralıkları birbirlerinden farklıdır. Bahsedilen bu çalışma aralığı elektrodun türüne bağlı olduğu gibi, çözücünün cinsine, kullanılan elektrolite ve pH değerine de bağlıdır. Sistemdeki katodik sınır hidrojenin oluşumuyla veya destek elektrolitinin indirgenmesiyle, anodik sınır ise elektrot cinsinin veya çözücünün yükseltgenmesiyle belirlenebilir (Balcı ve ark., 2011).

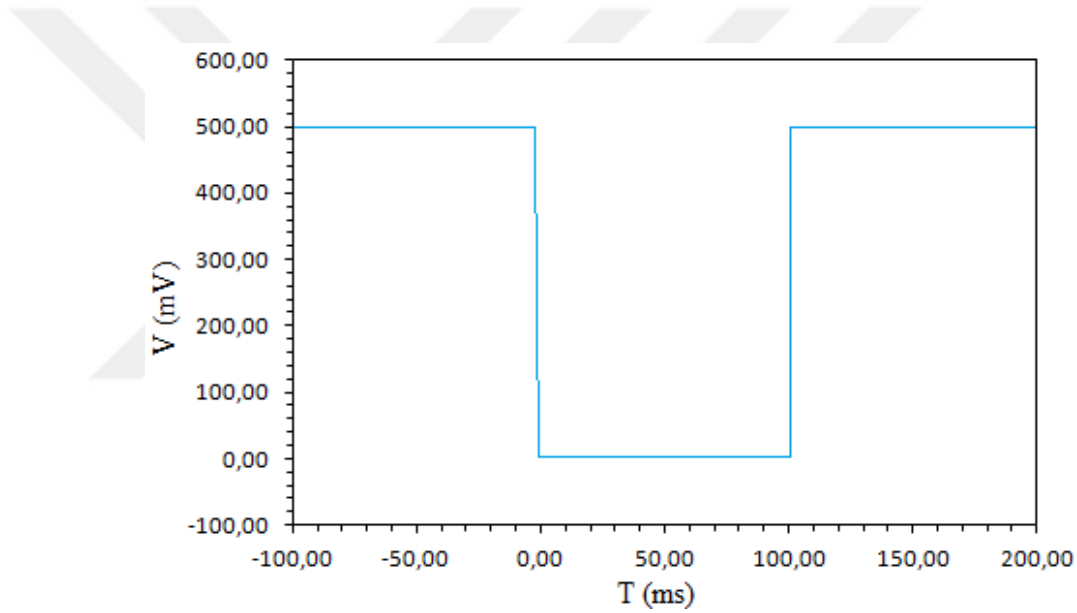
Karşılaştırma (referans) elektrodu: Voltametri yönteminde, ikinci sınıf metal-metal iyonu elektrotları referans elektrot olarak kullanılır. Kullanılan bu elektrotlar küçük akım şiddetlerinde polarlanmazlar ve akım şiddeti artınca da olması gereken konumlarından saparlar. Sık kullanılan referans elektrotlar kalomel elektrot ve Ag/AgCl elektrotlardır. Sayılan bu elektrotlardan anodik akım geçince metaller yükseltgenmekte ve ortamda bulunan fazla klorür ile çökelmelerinden dolayı, elektrot yüzeyindeki derişimleri değişmez kalır ve sonucunda da potansiyeller de akımdan bağımsız olur. Diğer yandan bu elektrotlardan katodik akım geçtiği zaman, çözünürlükten gelen metal iyonları indirgenir ve elektrot yüzeyinde çökelek ayrışarak tekrar aynı denge seviyesinde metal iyonları oluşturur ve böylece de potansiyel değişime uğramadan kalır (Balcı ve ark., 2011).

Yardımcı (karşıt) elektrot: İki elektrotlu sistemlerde üzerinden akım geçen ve polarlanmayan elektrot, yüksek akımlar geçtiğinde polarlanır. Ayrıca elektrolit direncinin yüksek olması sebebiyle bu direnci yenmek için gerekli olan potansiyel (IR) önemli bir seviyeye çıkmaktadır. Saydığımız bu iki sebepten dolayı da çalışma elektrodunun polarizasyon potansiyeli yanlış okunabilir. Bu sebeple de $i=f(E)$ eğrileri yatıklaşır ve belli bir nokta sonrasında da pikler yok olur. Değinilen bu sorun, sisteme üçüncü bir elektrot eklenerek çözülebilir. Akım, yardımcı elektrodu ile çalışma elektrodundan geçirilerek, çalışma elektrodunun potansiyeli karşılaştırma elektroduna karşı sıfır akım altında tespit edilir. Geçirilen akım, yardımcı elektrot üzerinden geçtiği için, yardımcı elektrotların soy metal olmaları gerekmektedir. Bundan dolayı, platin, grafit, tantal veya tungsten tel çubuklar elektrot olarak kullanılır. Kullanılan bu elektrotların alanları, çalışma elektrotlarınınkinin en az 50 katı olmalıdır. Ayrıca çok küçük hacimlerde çalışıldığı için yardımcı elektrotta oluşan ürünler, çalışma

elektrodunda girişim yapmayacağı şekilde olan elektrot türleri seçilmesi önemlidir (Balcı ve ark., 2011).

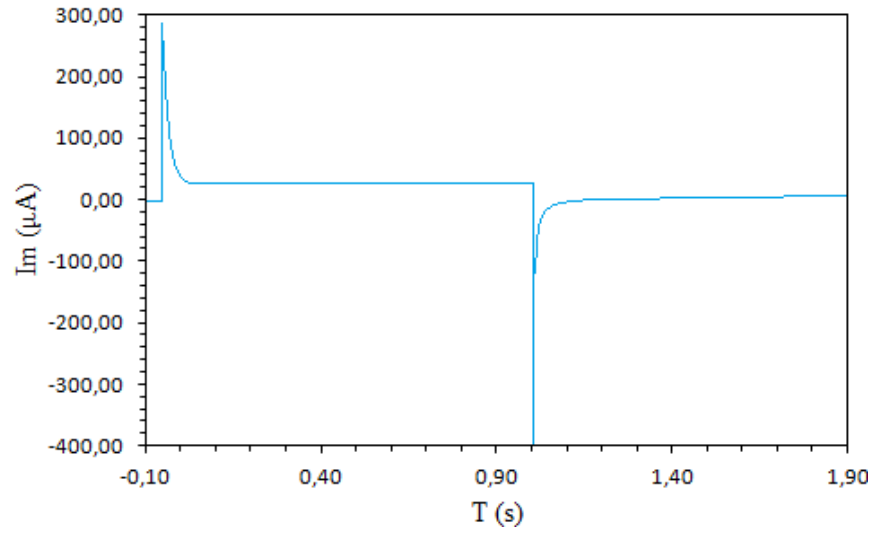
3.4. Kıranoamperometre

Bu teknik, kimyasal reaksiyonların, difüzyon süreçlerinin ve soğurma kinetiklerinin çalışmalarında kullanılır. Bu yöntemde, elektroda bir potansiyel adımı uygulanır ve zamana karşı akım değerleri gözlemlenir. Fiziksel Elektrokimyasal Kıranoamperometri (PEC) deneyi, hem tek-basamaklı hem de çift-basamaklı deneyler için uygulanabilir bir yöntemdir. Bu durum aşağıdaki şekilde de gösterilmektedir (Bkz. Şekil 3.10) (www.gamry.com, 2019).



Şekil 3.10. Kıranoamperometredeki zamana karşı potansiyeldeki değişim

Genel olarak, deneye başlamadan önce elektrod faradayik sürecin oluşmadığı bir potansiyelde tutulur, sonrasında potansiyel bir redoks reaksiyonunun meydana geleceği bir değere doğru artırılır. Sıfır zamanı, potansiyelin artırılmaya başlatıldığı zaman olarak alınır. Difüzyon kontrolü altında olan reaksiyonlar için, akım değeri, $t^{1/2}$ düşüşü ile düşmektedir. Bu durum aşağıdaki şekilde de gösterilmektedir ve Cottrell eşitliğine uymaktadır (www.gamry.com, 2019).

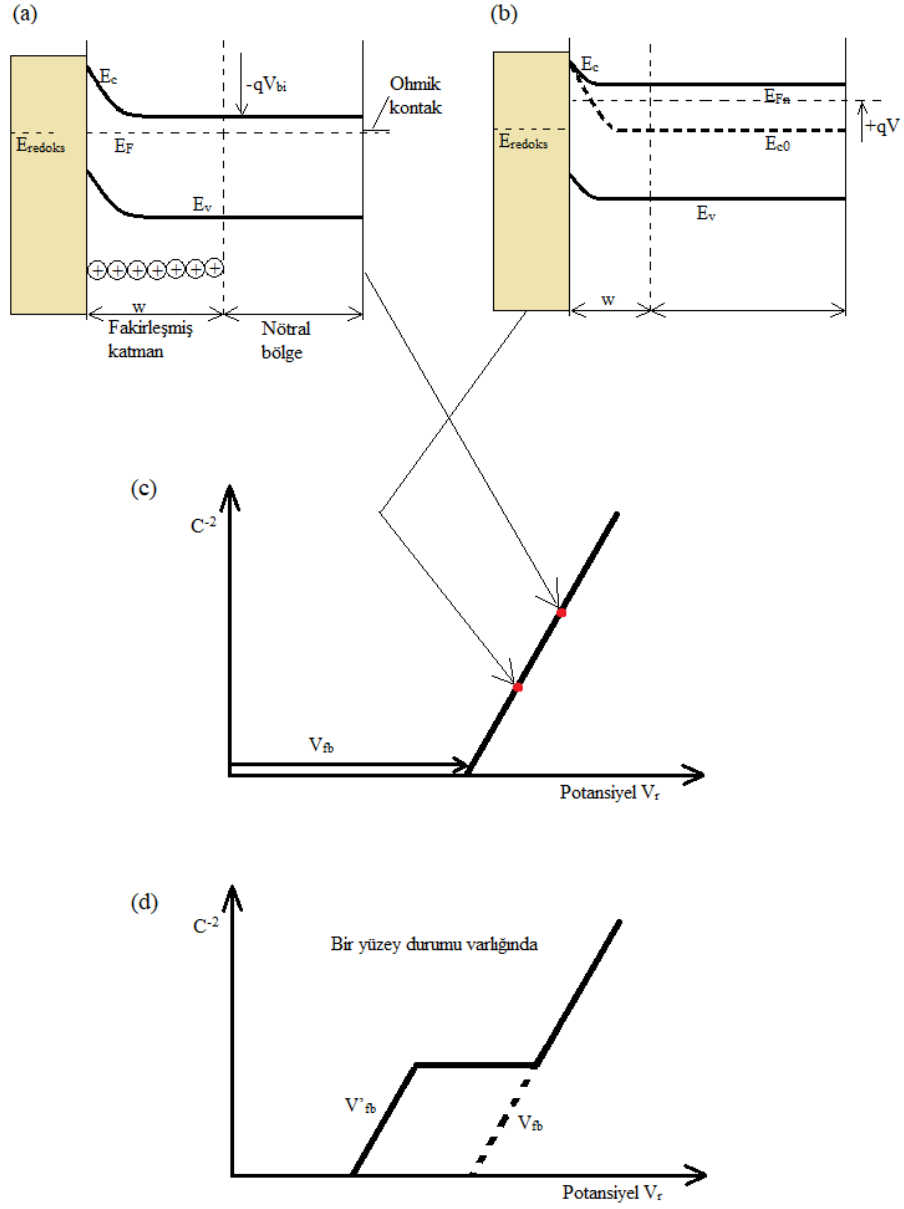


Şekil 3.11. Kırnoamperometri yönteminde zamana karşı akım değişimi

Kırnoamperometri deneyi doğru bir şekilde Cottrell eşitliğindeki iki değişken bilindiği sürece, herhangi bir değişkeni (elektrot alanı, difüzyon katsayısı veya örnek konsantrasyonu) belirlemede kullanılabilir ve soğurulan materyallerden gelen katkılar göz ardı edilebilir. Bazı durumlarda çift potansiyel adımlı kırnoamperometri deneyleri, iki potansiyel adımının sonuçlarıyla karşılaştırma yaparak bir reaksiyonun tersine çevrilebilirliğini göstermek için kullanılır (www.gamry.com, 2019).

3.5. Mott-Schottky

Yarıiletken elektrokimyasında, Mott-Schottky grafiği, kapasitansın karesinin tersi ($1/C^2$) ile esas elektrolit ile esas yarıiletken arasındaki potansiyel farkının karşılaştırılmasını göstermektedir. Çoğu teoride ve çoğu deneysel sonuçta, elde edilen grafik doğrusaldır. Mott-Schottky grafikleri, sistem özelliklerini (düz band potansiyeli, doping yoğunluğu gibi) belirlemek için kullanılır (en.wikipedia.org/wiki/Mott%E2%80%93Schottky_plot, 2019).



Şekil 3.12. (a) Sol tarafta (renkli) redoks elektroliti ve sağ tarafta metalik ohmik bağlantılı, n-tipi yarıiletkenine ait enerji diyagramı; E_c , iletim bandı değeri; E_v , yarıiletkenin valans band enerjisi; E_F , yarıiletkendeki Fermi seviyesi dengesi ve E_{redoks} , elektrolitin redoks enerjisi ile yarıiletken/elektrolit arayüzeyinde Schottky engeli şekillenmiştir. Enerji diyagramındaki engelin düşey boyutu, yerleşik potansiyele, V_{bi} , karşılık gelmektedir. Fermi seviyelerinin uzaysal eksen denkliği bir uzay yük bölgesi veya w boyutunun fakirleşmiş bölgesini oluşturur. Geri kontağa pozitif bir voltaj uygulandığında (b) elektronların Fermi seviyesi, E_{Fn} , yükselmektedir ve fakirleşmiş bölgenin boyutu azalmaktadır. Bu nedenle eklem kapasitansı artar ve lineer Mott-

Schottky eğrisindeki kapasitansın karesinin tersi azalmaktadır. (c) x-ekseniyle kesişen yer, elektrolit tarafındaki voltajın referans değerine bağlı olan, yerleşik voltaj değerini oluşturan düzband durumunu göstermektedir. (d) Yüzey durum yoğunluğunun varlığında, N_{ss} , Fermi seviyesi band aralığı durumu seviyesine ulaşınca deşarj edilir ve eklemnin elektrolit tarafında Helmholtz tabaka kapasitansının değerine bağlı olarak bir düzlük oluşur. Yüzey durumu şarj edildiğinde Mott-Schottky çizgisi devam eder, fakat düzband voltajı açılan Fermi seviyesinin açılımla açıklanan şekilde değiştirilir.

Yarıiletken/elektrolit bağlantısı Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Uygulanan voltaj V , fakirleşen katmanın boyutu w ,

$$w = \left[\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V + V_{bi}) \right]^{1/2}$$

Bu denklemde ε dielektrik sabiti, q temel yük, N_D doping yoğunluğu, V_{bi} varolan potansiyeldir. Pozitif yük içeren fakirleşmiş bölge, yarıiletkenin yüzeyindeki (sıvı elektrolit taraftaki) iyonik negatif yük sayesinde oluşturulmuştur. Yük ayrımı, metal/yarıiletken kontağın ara-yüzeyindeki bir dielektrik kapasitörü olarak şekillenir. Elektrot alanı A olan bir elektrot için kapasitans,

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} = qN_D A \frac{\partial w}{\partial V}$$

Yukarıdaki ilk eşitlikten elde edilen $\frac{\partial w}{\partial V}$ yerine koyulursa, her birim alan başına kapasitans,

$$C = A \frac{\varepsilon}{w}$$

halini alır. Bu eşitlik, w mesafesiyle ayrılmış, A alanına sahip iki paralel levhayla oluşturulmuş bir kapasitörün kapasitansını açıklamaktadır. En son eşitlik, ilk eşitlikte yerine yazılırsa,

$$C^{-2} = \frac{2}{qA^2\epsilon N_D} (V + V_{bi})$$

elde ederiz. Bu yüzden, kapasitansın karesinin tersinin açıklaması, Şekil 3.12c'de gösterilen Mott-Schottky grafiğindeki gibi, voltajın lineer bir fonksiyonudur (en.wikipedia.org/wiki/Mott%E2%80%93Schottky_plot, 2019).

Mott-Schottky deneyleri bizi iki önemli bilgiye götürür,

- 1) Eğim, bize katkılama (yarıiletken) yoğunluğunu (dielektrik sabiti bilinirken) verir.
- 2) Eğrinin x-ksenini kestiği yer, varolan potansiyeli veya düzband potansiyelini (burada yüzey engelli düzleştirilmiştir) ve referans potansiyelindeki güzel bir seviyede yarıiletken iletim band seviyesinin saptanmasına izin verir.

Çalışma fonksiyonu bilinirse, bu bizi fiziksel ölçekteki tam enerji diyagramına götürür. Mott-Schottky eğrisi, çözeltideki kontaktaki elektrot yüzeyine bağlı bir hassasiyete sahiptir (Bkz. Şekil 3.13) (en.wikipedia.org/wiki/Mott%E2%80%93Schottky_plot, 2019).

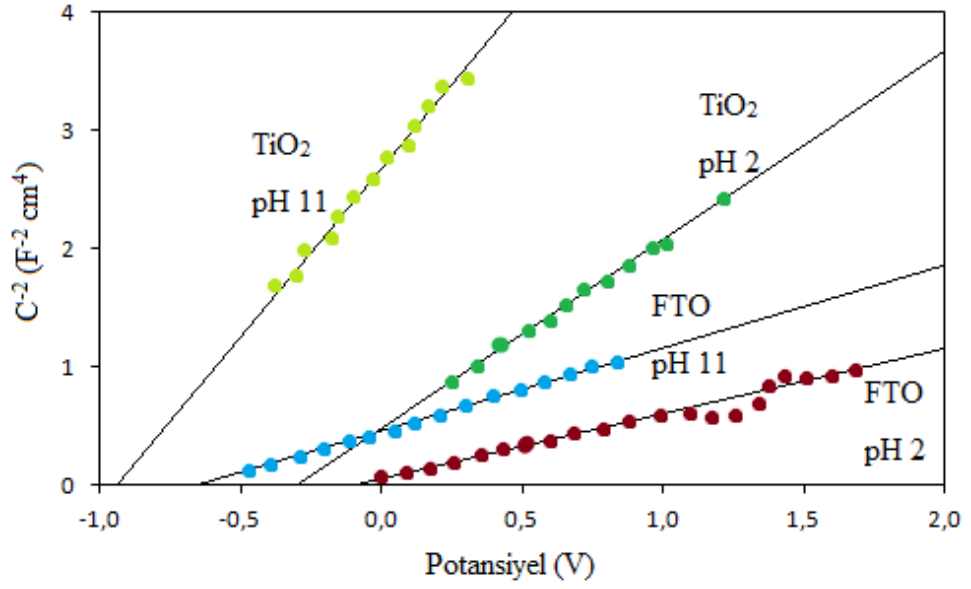
Fakirleşmiş bölgenin boyutu için daha kesin bir sonuç için,

$$w = \left[\frac{2\epsilon}{qN_D} \left(V_{bi} + V - \frac{k_B T}{q} \right) \right]^{1/2}$$

Buna bağlı olarak Mott-Schottky eşitliği,

$$C^{-2} = \frac{2}{qA^2\epsilon N_D} \left(V_{bi} + V - \frac{k_B T}{q} \right)$$

Ara yüzey engel seviyesi $k_B T$ seviyesinde olduğunda, kapasitans değerinin özel bir değerinin alındığına yorumlanır.



Şekil 3.13. Standart Ag/AgCl elektrotlu, farklı pH değerlerindeki sulu elektrolit içindeki FTO üzerindeki yarıiletken elektrotun Mott-Schottky eğrisi

pH değişimi, 570 mV değerinde görünen düz band potansiyelini, 59 mV'a karşılık gelecek şekilde pH değerinin birim başına değiştirmektedir. Eğimden donör yoğunluğu $N_D=1,1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Daha sonra aynı örnek, FTO üzerine depozit edilmiş nano yapılı TiO_2 ile de ölçülmüştür. Eğimin gözlenen değişimi, elektrolit ile direk kontaktaki yüzey azalışına bağlı olduğu görülmüştür (en.wikipedia.org/wiki/Mott%E2%80%93Schottky_plot, 2019).

3.6. EIS (Elektrokimyasal Empedans Sistemi)

3.6.1. AC Akım Teorisi ve Kompleks Empedans Değerlerinin Temsili

Empedans tanımı: Kompleks empedans kavramıdır. Hemen herkes elektriksel empedans tanımını bilir, devre elemanının elektrik akımının akmasına karşı gösterdiği dirençtir. Ohm Yasası, direnci voltaj, E ve akım, I arasındaki oran olarak tanımlar:

$$R \equiv \frac{E}{I}$$

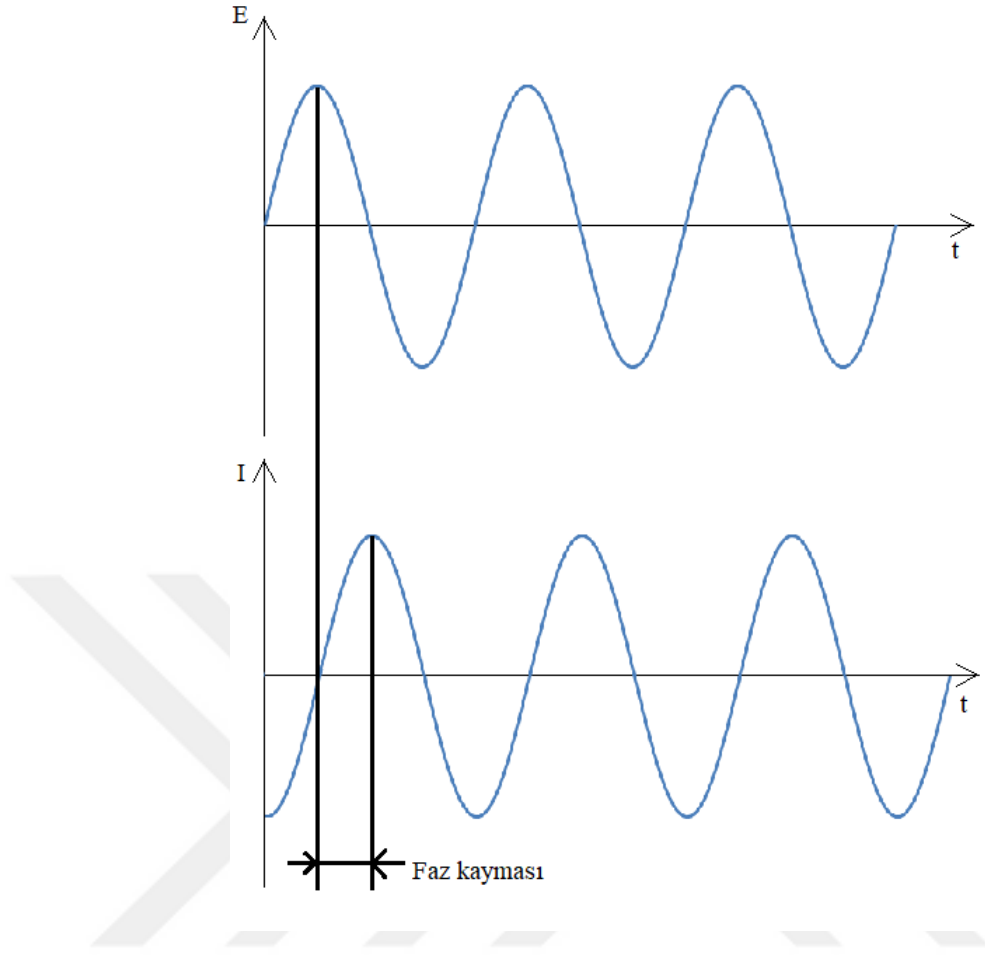
İdeal bir direnç olarak, bu ilişki yalnızca tek bir devre elemanı ile sınırlıdır. İdeal bir direncin basitçe bazı özellikleri vardır:

- Bütün akım ve voltaj değerlerinde Ohm Yasası'na uyar.
- Direncin değeri frekanstan bağımsızdır.
- Bir dirence karşılık AC akım ve voltaj sinyalleri her bir diğeri ile eş fazlıdır.

Bununla birlikte, devre elemanlarının yapısının çok daha karmaşık olduğu bir gerçektir. Bu elemanlar bizi basit rezistans kavramına gitmeye zorlar ve bu durumda da daha genel bir parametre olan empedansı kullanırız. Tıpkı rezistans gibi, empedans da akan elektrik akımına karşı gösterilen direncin bir ölçüsüdür, fakat rezistans gibi yukarıda basitçe listelenen özelliklerle sınırlı değildir (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).

Elektrokimyasal empedans, bir elektrokimyasal hücreye bir AC potansiyel uygulanarak ölçülür ve sonra akım hücre boyunca uygulanır. Bir sinüzoidal potansiyel uyguladığımızı varsayalım, bu potansiyele karşılık olan bir AC akım sinyalidir. Bu akım sinyali, sinüzoidal fonksiyonların bir toplamı olarak analiz edilebilir (bir Fourier Serisi).

Elektrokimyasal empedans normalde küçük bir sinyal uygulanarak ölçülür. Sonrasında hücrenin yanıtının gerçek olmayan bir lineerlik olduğu görülür. Lineer (veya gerçekte lineer olmayan) bir sistemde, akım, sinüzoidal potansiyele karşılık aynı frekansta bir sinüzoidaldir, fakat faz olarak kaymıştır (Bkz. Şekil 3.14) (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).



Şekil 3.14. Linear bir sistemdeki sinüzoidal akım karşılığı

Çıkış sinyali, zamanın bir fonksiyonu olarak,

$$E_t = E_0 \sin(\omega t)$$

olarak verilir. Burada E_t , t zamanındaki potansiyeli; E_0 , sinyalin genliğini ve ω , radyal frekansı göstermektedir. Radyal frekans, ω (radyan/saniye) ile frekans, f (hertz) arasındaki ilişki,

$$\omega = 2\pi f$$

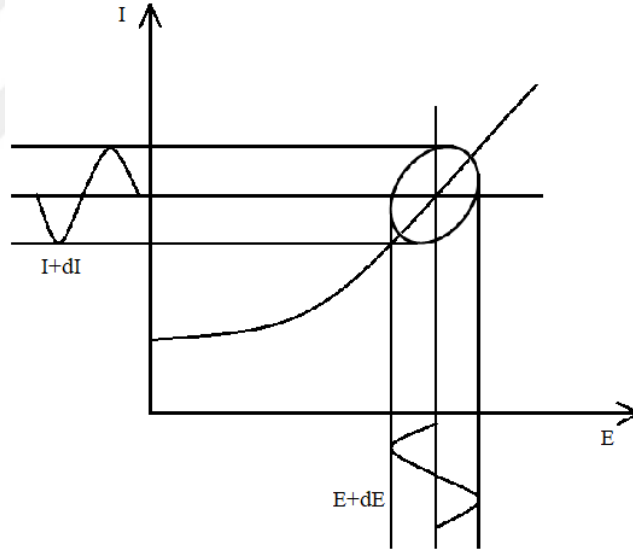
olarak verilir. Linear bir sistemde, alınan sinyal, I_t , faz (Φ) olarak kayar ve I_0 , olarak farklı bir genliğe sahip olur.

$$I_t = I_0 \sin(\omega t + \Phi)$$

Ohm Yasası'ndan yararlanarak sistemin empedansını;

$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \Phi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \Phi)}$$

şeklinde bulabiliriz. Empedans, Z_0 büyüklüğünün bir terimi ve bir faz kayması, Φ ile gösterilmektedir. Eğer $E(t)$ sinüzoidal sinyali x-eksenine ve $I(t)$ sinüzoidal sinyali y-eksenine yerleştirirsek aşağıdaki grafiği elde ederiz (Bkz. Şekil 3.15). Bu oval, “Lissajous Şekli” olarak bilinmektedir. Lissajous şekillerinin osiloskop ekranlarından analizi, modern EIS cihazlarının kullanılabilirliklerinde geçerli olan bir empedans ölçüm metodudur (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).



Şekil 3.15. Lissajous şeklinin orijini

Eulers ile ilişkisi;

$$\exp(j\Phi) = \cos\Phi + j\sin\Phi$$

olarak verilir. Empedans, kompleks bir fonksiyon olarak ifade edilir. Potansiyel ise;

$$E_t = E_0 \exp(j\omega t)$$

şeklinde verilir ve akım ise;

$$I_t = I_0 \exp(j\omega t - \Phi)$$

olarak verilir. Empedans ise kompleks şekilde,

$$Z(\omega) = \frac{E}{I} = Z_0 \exp(j\Phi) = Z_0(\cos\Phi + j\sin\Phi)$$

olarak ifade edilir (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).

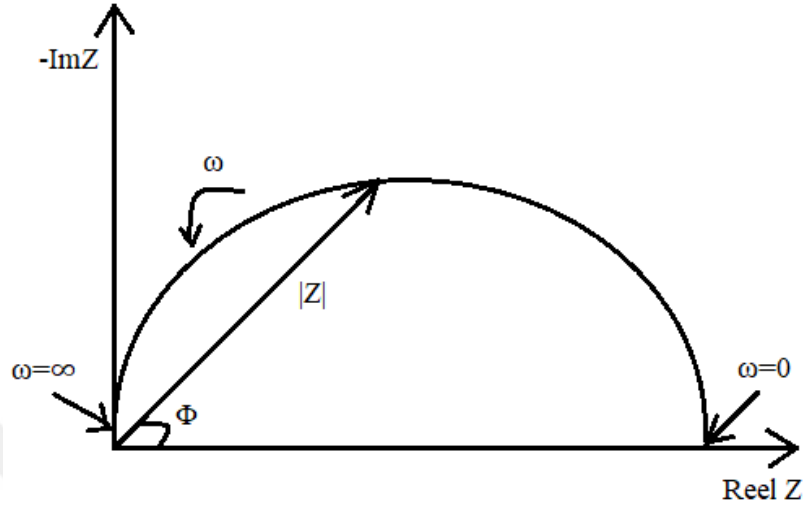
Dataların Sunumu

En son denkleme bakılırsa, $Z(\omega)$ bir reel kısım bir de sanal kısımdan oluşmaktadır. Eğer reel kısım x-eksenine ve sanal kısım da y-eksenine konulursa, “*Nyquist Eğrisi*”ni elde ederiz (Bkz. Şekil 3.16). Bu eğride y-ekseninin negatif ve Nyquist eğrisindeki her bir noktanın bir frekanstaki empedans olduğu dikkat çekmektedir. Aşağıdaki şekilde, eğrinin sağ tarafında düşük frekans datalar ve daha yüksek frekanstaki datalar ise eğrinin sol tarafında olduğu görülmektedir (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).

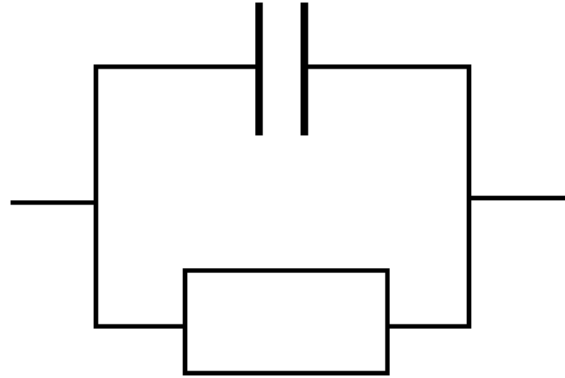
Nyquist Eğrisinde empedans, $|Z|$ uzunluğunun vektörü olarak ifade edilebilir. Bu vektör ile x-ekseni arasındaki açı ve x-ekseni, faz açısı ($f(=\arg Z)$) olarak isimlendirilir. Nyquist Eğrisinin önemli bir eksikliği vardır, o da eğride herhangi bir dataya baktığımız zaman, o noktadaki kaydın hangi frekans değerinde olduğunu söyleyemezsiniz.

Şekil 3.17’deki elektriksel devrenin sonucu olarak Şekil 3.16’daki Nyquist Eğrisi çizilmiştir. Bir tekli “zaman sabiti”nin karakteristiği olarak yarım dairedir. Elektrokimyasal empedans eğrileri, değişik yarım daireleri içermektedir ve genelde bri

yarım dairenin bir parçası görülmektedir (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).



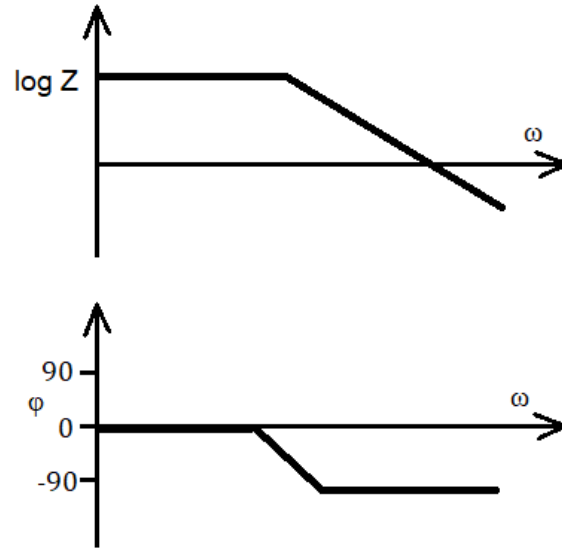
Şekil 3.16. Empedans vektörü ile Nyquist eğrisi



Şekil 3.17. Tek zaman sabitli basit eşdeğer devre

Diğer yaygın sunuş metodu ise *Bode Eğrisi*'dir. Empedans, frekansın log değeriyle x-ekseninde ve empedansın mutlak değerleri ($|Z|=Z_0$) ve faz kayması da y-eksenindedir.

Şekil 3.17'deki elektrik devresinin Bode Eğrisi Şekil 18'de görülmektedir. Nyquist Eğrisinden farklı olarak Bode Eğrisi frekans hakkında bilgi vermektedir (www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/, 2019).

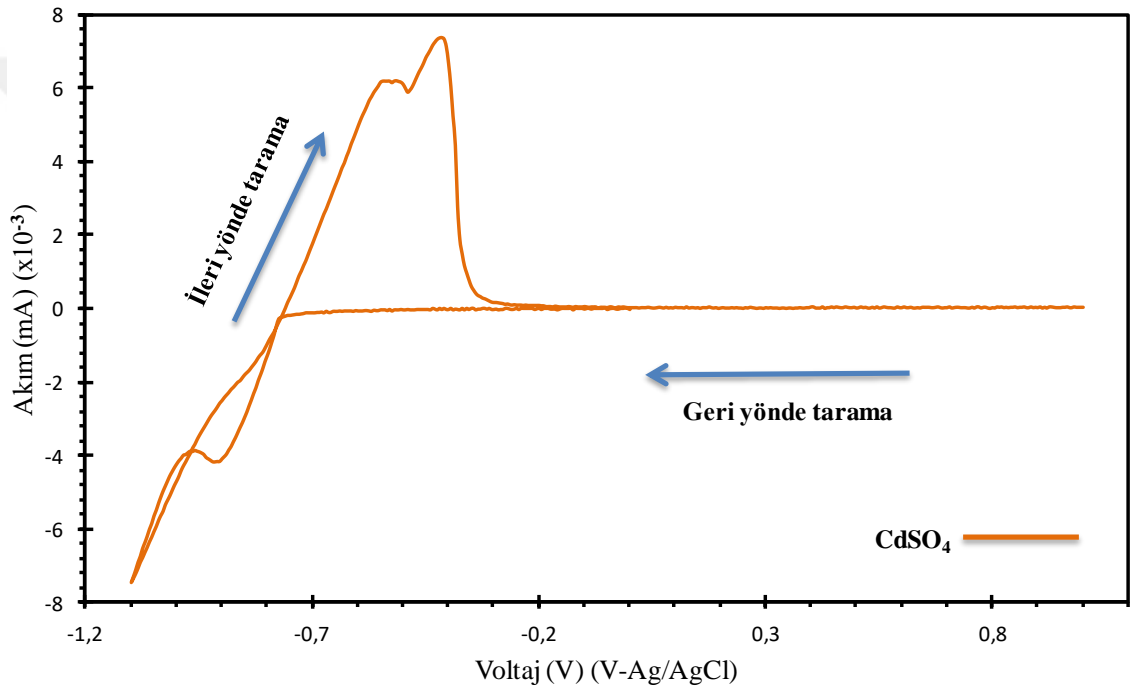


Şekil 3.18. Tek zaman sabitli Bode eğrisi

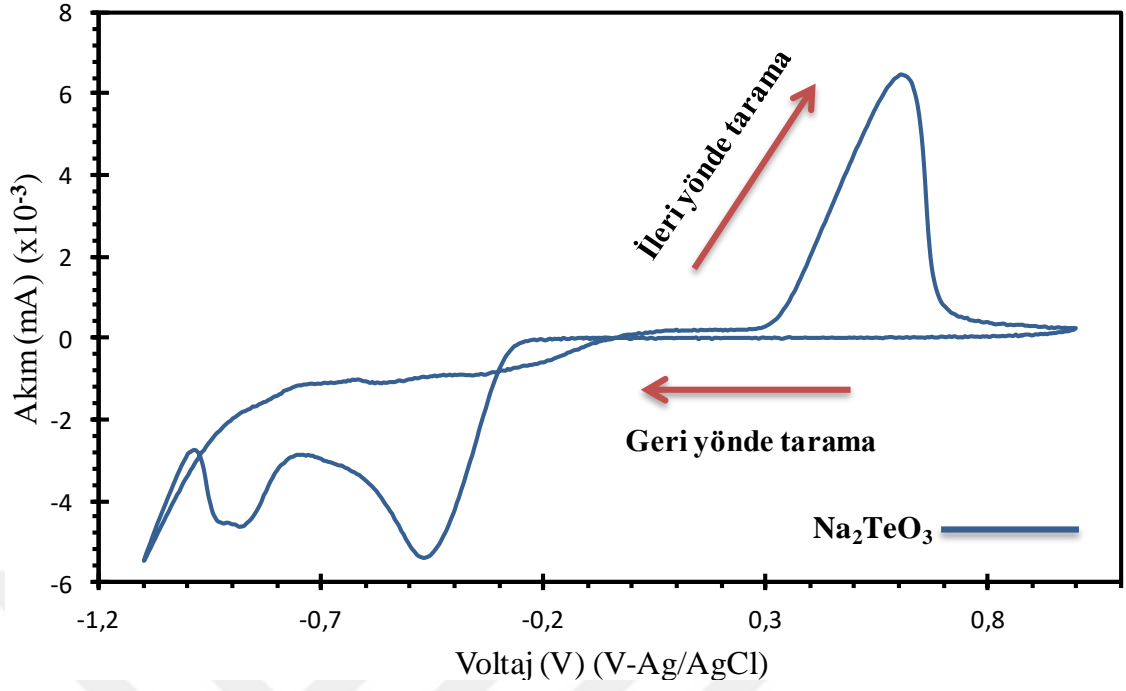
4. BULGULAR

4.1. Döngüsel Voltametri Çalışmaları

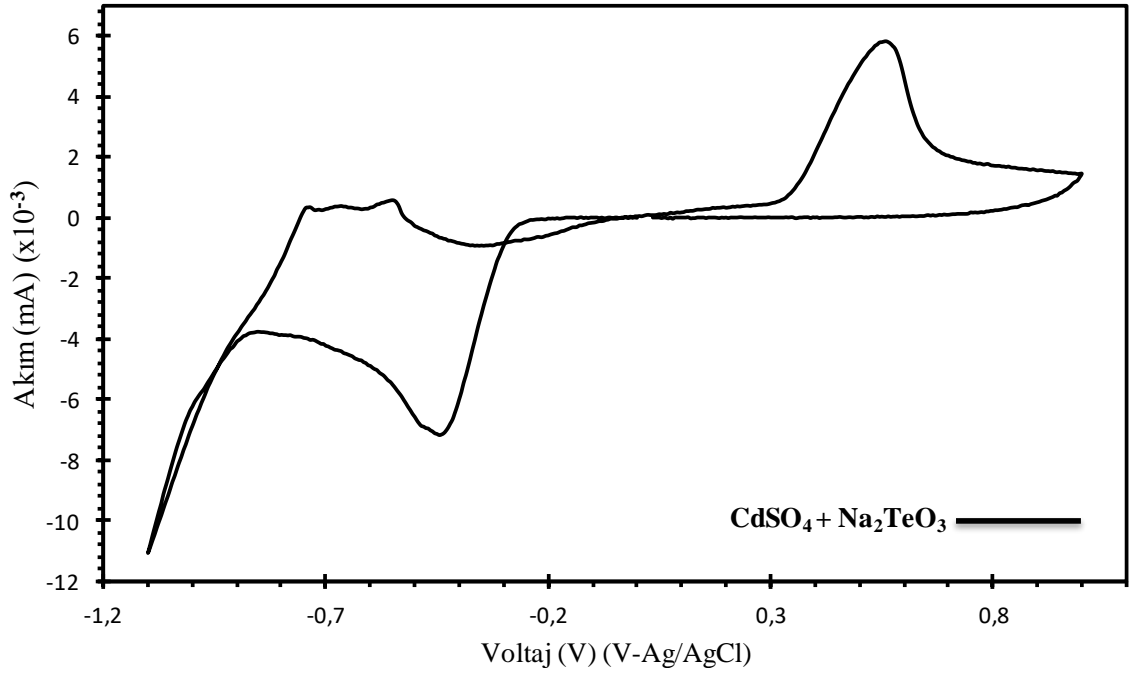
Kaplama potansiyeli -0,4 V ile -1,1 V arasında değiştirilerek üretilen ince filmlerin, ilk olarak kadmiyum ve tellürün ayrı ayrı kaplama potansiyellerinin belirlenebilmesi için döngüsel voltametri yöntemiyle, kadmiyum ve tellür sırasıyla ITO üzerine elektrodepozit edildi. Bunun sonrasında da aşağıdaki voltamogramlar elde edildi (Bkz. Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3).



Şekil 4.1. Kadmiyuma ait voltamogram



Şekil 4.2. Tellüre ait voltamogram



Şekil 4.3. Kadmiyum tellüre ait voltamogram

CdTe ince filminin elektrodepozisyonu aşağıdaki reaksiyonlarla açıklanabilir,



Döngüsel voltametri karakterizasyonu, ITO üzerine depozit edilmiş CdTe ince filminin depozisyon mekanizmasını ve çekirdeklenmesini anlamada önemlidir. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 elektrolitlerin döngüsel voltamogramlarıdır. Saniyede 20 mV'luk tarama adımıyla -1,2 V ile -1,0 V arasında bir tarama yapılmıştır. İleri yönlü olan taramada, Cd^{2+} 'nın Cd'a dönüşmesi reaksiyonu -0,89 V'ta görülmektedir (Bkz. Şekil 4.1). Bu durum Denklem 1 ile verilen kimyasal reaksiyon ile açıklanır. Ters yönlü taramada ise Cd atomunun oksidasyon piki -0,38 V'ta görülmektedir (Bkz. Şekil 4.1). -0,90 V ve -0,43V'ta gözlenen iki katodik pik sırasıyla Te'ün H_2Te 'ye ve Te^{4+} 'ün Te'ye dönüşmesine atfedilebilir (Bkz. Şekil 4.2). 0,62 V'taki oksidasyon piki ITO yüzeyinden ayrılan Te'a aittir (Bkz. Şekil 4.2). İleri yönlü taramada, -0,40 V'taki keskin akım piki CdTe öncü ince filmine ait birlikte-elektrodepozisyonunu göstermektedir (Bkz. Şekil 4.3). Ters yönlü taramada ise sırasıyla ITO altlıktan ayrılan CdTe, Cd ve Te'e ait -0,72 V, -0,51 V ve 0,55 V'ta oluşan oksidasyon pikleri görülmektedir (Bkz. Şekil 4.3). Ters yönlü taramada, -1,0 V ötesindeki bütün eğrilerde, katodik akım H^+ ve H_2 oluşumundan dolayı lineer olarak artmaktadır, yani katotta hidrojen gazı oluşmaktadır.

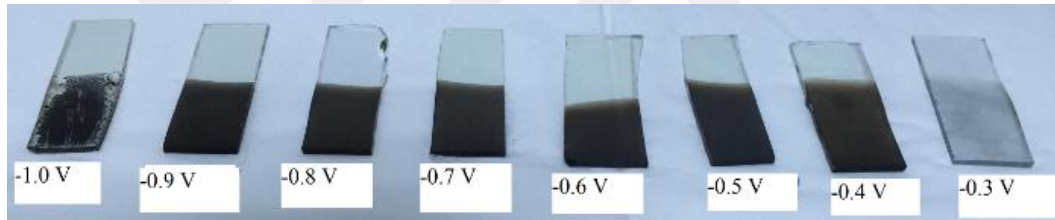
4.2. Kıronoamperometri Tekniği ile Filmlerin Sentezlenmesi

Döngüsel voltametri yöntemiyle kaplanma potansiyelleri incelendikten sonra, kıronoamperometri yöntemiyle -0,4 V ile -1,1 V arasında 0,1 V artışla değiştirilen kaplanma potansiyellerinde CdTe ince filmler sentezlendi. İnce filmlerinin üretiminde kullanılan elektrolitlerin pH değerleri ~1,5 değeri olarak ölçüldü. Her bir elektrolitin elektrolit direnci, bilgisayardaki yazılım yardımıyla ~50 Ω olarak ölçüldü. Bu ölçümlere ait tablo aşağıdaki gibidir (Bkz. Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Değişen voltaj değerlerine karşılık elektrolit dirençleri

Depozisyon	
Voltaj	-1,1 -1,0 -0,9 -0,8 -0,7 -0,6 -0,5 -0,4
Değerleri (V)	
Elektrolit	
Dirençleri (Ω)	51,17 53,52 33,17 54,05 46,46 46,70 43,27 50,47

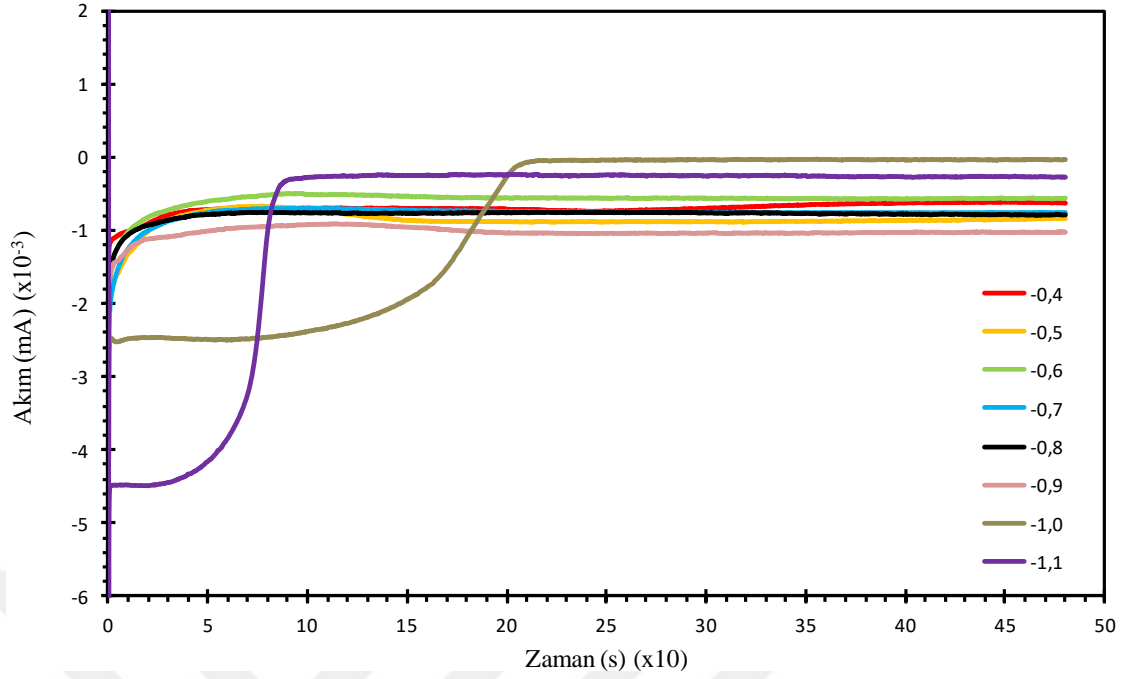
Elektrolit dirençleri, pH değerleri ölçüldükten sonra, hazırlanılan 5 mM'lık elektrolitlerde 8 dakika sürelerde -0,4 V ile -1,1 V arasındaki kaplama potansiyellerinde, her bir örnek için kaplama potansiyelini 0,1 V azaltarak CdTe ince filmler üretildi. İnce filmler hazırlanırken kırınoamperometri yöntemi kullanıldı ve örneklere ait kırınoamperometri eğrileri Şekil 4.5'te görüldüğü gibidir.



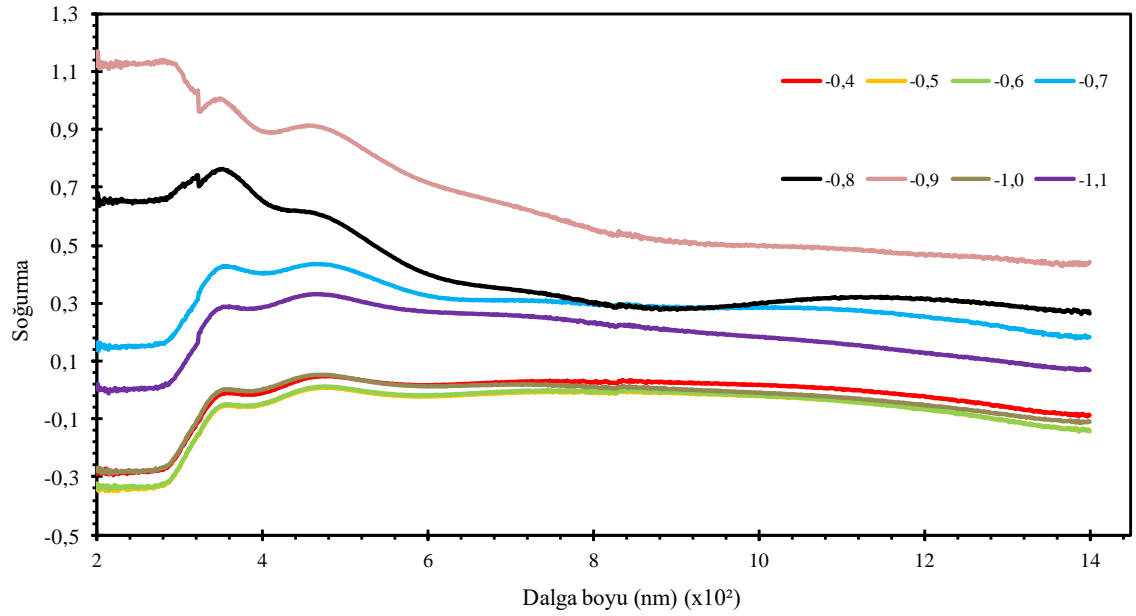
Şekil 4.4. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilmiş Cd-Te ince filmleri

4.3. CdTe İnce Filmlerinin Optik Sonuçları

Kırınoamperometre sonuçlarından elde edilen grafiğe bakıldığında üretilen örneklerin bu tez kapsamında yapılan çalışmadaki beklenenlere uygun olduğu görüldü. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen örneklerin ölçümlerine UV ölçümleriyle başlandı. UV ölçümlerinden, ince filmlere ait soğurma ve transmittans (geçirgenlik) grafikleri elde edildi. Bu grafikler yardımıyla ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları hesaplandı. UV sonuçlarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde soğurmanın görünür bölgede maksimum olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 4.6). Transmittans, yani geçirgenlik değerlerinin de soğurma değerleriyle paralel olarak, anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.5. Farklı kaplanma potansiyellerinde üretilmiş CdTe ince filmlere ait kironoamperometri eğrileri



Şekil 4.6. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilmiş ince film örneklerine ait UV-Vis soğurma sonuçları

UV-Vis spektroskopisinden elde edilen sonuçların sonrasında buradaki verilerin de yardımıyla farklı kaplama potansiyellerinde üretilen ince filmlerin yasak enerji bant

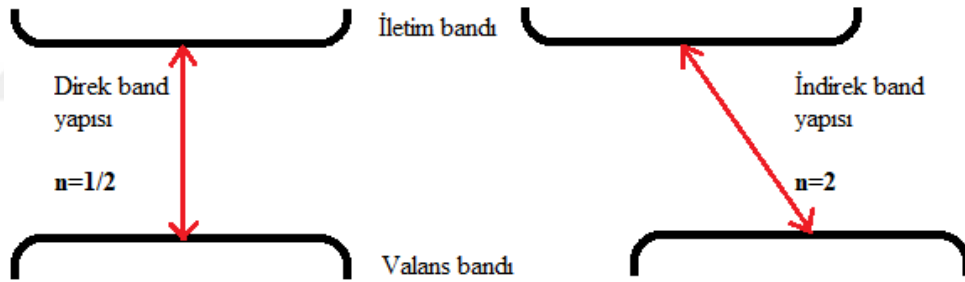
aralıkları hesaplandı. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları Tauc yaklaşımı kullanılarak hesaplandı. Tauc denklemi,

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n \quad (4.1)$$

şeklinde verilmektedir (Tauc ve ark., 1966). Bu eşitlikteki, A, enerjiye bağlı bir sabiti; E_g , materyalin yasak bant aralığını; hv , gelen foton enerjisini; α , soğurma katsayısını belirtmektedir. Bu denklemdeki soğurma katsayısı,

$$\alpha = \frac{1}{t} \cdot \left(\frac{A}{T}\right) \quad (4.2)$$

şeklinde verilmektedir. Bu denklemdeki, t, film kalınlığı; A, soğurma; T, transmittans; n ise doğrudan bant yapısına sahip filmler için 1/2, doğrudan olmayan bant yapısına sahip filmler için de 2 olan bir sabit olarak alınmaktadır.



Şekil 4.7. Doğrudan ve doğrudan olmayan band yapısı modeli

Tauc denklemi düzenlenerek, yasak enerji bant aralığının nasıl elde edileceğinin eşitliği aşağıdaki şekilde çıkartılmıştır. Eşitlikteki n değeri, üretilen örnekler direkt bant yapısına sahip olduğu için 1/2 olarak alındı.

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^n \quad (4.3)$$

n=1/2 olarak yerine yazılırsa,

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^{1/2} \quad (4.4)$$

elde edilir. Her iki tarafın da karesini alınırsa,

$$(\alpha hv)^2 = A^2(hv - E_g) \quad (4.5)$$

olur ve E_g olan parantezli kısmı yalnız bırakılarak, E_g değeri yalnız bırakılırsa,

$$hv - E_g = \frac{(\alpha \cdot h \cdot v)^2}{A^2} \quad (4.6)$$

$$E_g = hv - \frac{(\alpha \cdot h \cdot v)^2}{A^2} \quad (4.7)$$

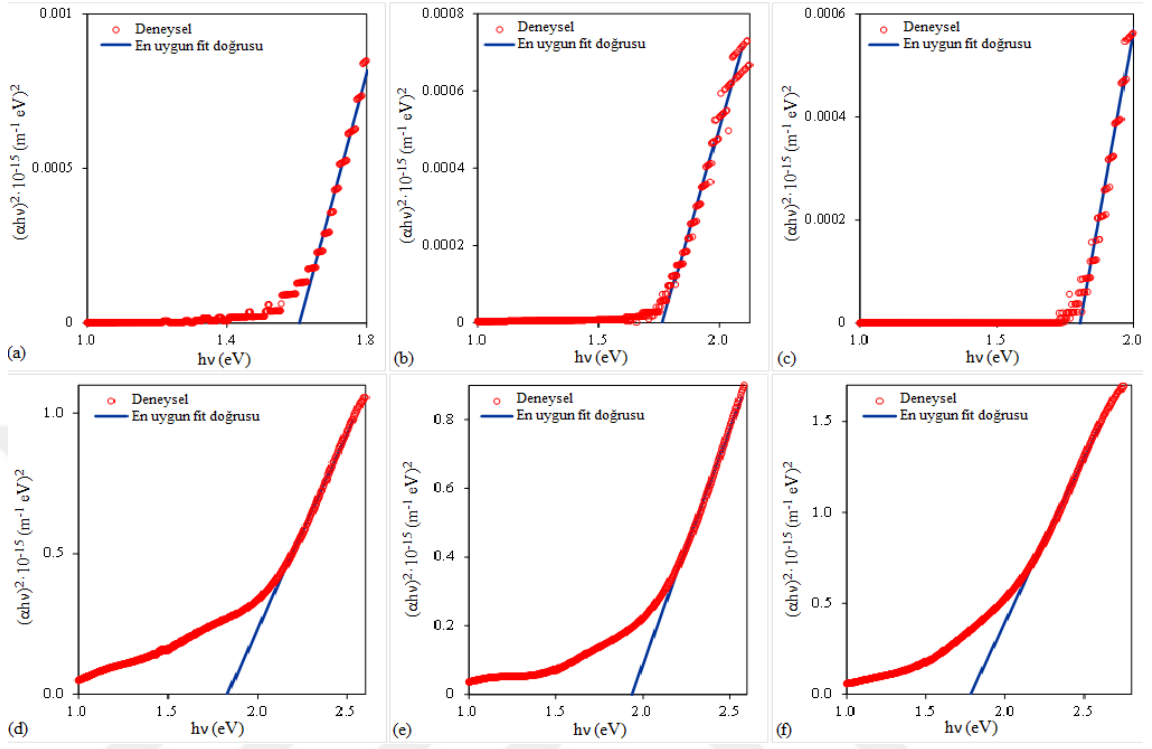
olarak E_g değerleri hesaplanır.

Çizelge 4.2. Farklı potansiyellerde yapılan CdTe ince filmlerin E_g değerleri ve film kalınlıkları

Kaplama Voltajı (V)	E_g (eV)	Kalınlık (nm)
-0,4	1,61	72
-0,5	1,76	120
-0,6	1,81	86
-0,7	1,83	80
-0,8	1,94	118
-0,9	1,78	140

Hesaplanan değerlere ait grafikler aşağıdaki gibi hazırlandı ve bu grafiklerdeki kırmızı olan kısım deneysel verileri gösterirken, mavi olan kısım ise en uygun fit doğrularını göstermektedir. En uygun fit doğruları, MatLab programı yardımıyla elde edildi. Elde edilen fit doğrularının $h\nu$ -eksenini kestiği değerler, üretilen CdTe ince filmlerinin yasak enerji bant aralıklarını vermektedir. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince

filmlerin yasak enerji bant aralıkları ve film kalınlıkları tabloda da görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.2).



Şekil 4.8. Farklı depozisyon potansiyellerinde üretilen CdTe ince filmlerinin Tauc eğrileri: **a)** -0,4 V, **b)** -0,5 V, **c)** -0,6 V, **d)** -0,7 V, **e)** -0,8 V ve **f)** -0,9 V.

Çizelge 4.2’den de görüldüğü gibi üretilen ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları 1,61 eV ile 1,94 eV aralığında değişmektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca üretilen ince filmler, vakumsuz ortamda, fırınlanma olmadan incelendi ve yapılan ölçümler de bu şekilde, yani fırınlamadan ya da tavlamadan yapıldı. Normal, hava ortamında ve oda sıcaklığında yapılan ölçümlerin başlamasına kadar geçen zamanda oksidasyon meydana gelmiştir ve bu sebeple yapılan ölçümlerde de, hesaplanan yasak enerji bant aralığında farklılıklar görülmüştür. Bu durum, yani oksidasyonun üretilen ince filmlerdeki etkileri, oksijen içeriği sebebiyle kadmiyum tellür çoklu-kristal ince filmlerindeki kübik yapıdan hegzagonal faz yapısına geçiş isimli çalışmada incelenmiştir (Chavez ve ark., 1996). Üretilen örneklerdeki oksijen miktarı % 0’dan % 15’e artış gösterdiğinde kristal yapının

bozulduğu ve amorf yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum XRD ve optik soğurma ölçümleri ile incelenerek Çizelge 4.3'te verilmiştir (Chavez ve ark., 1996).

Çizelge 4.3. Kadmiyum tellürdeki kübik yapıdan hekzagonal faz yapısına geçiş (Chavez ve ark., 1996)

Örnek	Nitrojen kısmının basıncı (Torr)	Tanecik boyutu (Å)	Oksijen içeriği (%)	CdTe'ün (Å), (002) H ve/veya (111) C'a olan düzlemsel mesafeleri	E _g (eV)
Z0	4,0x10 ⁻⁷	408±113	0,01	3,7682	1,56
Z1	5,0x10 ⁻⁶	241±45	0,15	3,7991	1,54
Z2	1,0x10 ⁻⁵	230±41	0,3	3,8100	1,52
Z3	5,0x10 ⁻⁵	295±64	1,5	3,8058	1,55
Z4	1,0x10 ⁻⁴	265±53	3,0	3,8140	1,56
Z5	2,0x10 ⁻⁴	212±35	3,5	3,8052	1,65
Z6	4,0x10 ⁻⁷	118±12	4,0	3,7971	1,95
Z7	5,0x10 ⁻⁷	-	15	Amorf	2,15

Çizelge 4.3'ten görüldüğü gibi üretilen CdTe ince filmlerde oksijen miktarı arttıkça yasak enerji bant aralığı artmaktadır. Bu da göstermektedir ki, meydana gelen oksidasyon faz değişimine ve oluşan kristal yapının, amorf yapıya dönüşmesine sebep olmaktadır (Chavez ve ark., 1996).

Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen ince filmlerin film kalınlıkları AFM yardımıyla belirlendi ve ayrıca film kalınlığı,

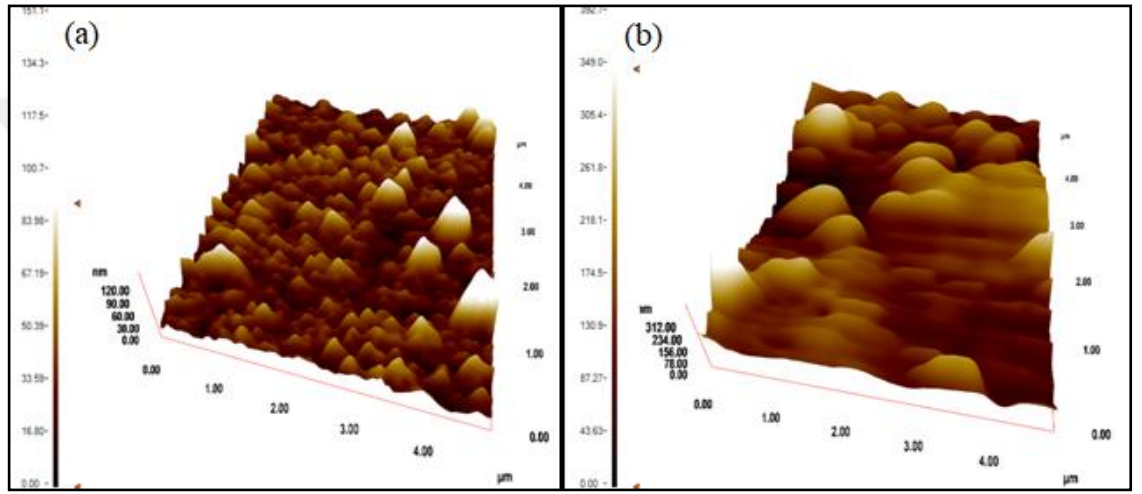
$$d = \frac{J \cdot M \cdot t}{n \cdot F \cdot \rho} \quad (4.8)$$

eşitliği yardımıyla da hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikteki J, mA/cm² cinsinden akım yoğunluğunu; M, gram cinsinden moleküler ağırlığı; t, saniye cinsinden depozisyon zamanını; n, elektron sayısını (Cd²⁺'nın CdTe'deki Cd'a dönüşümünden dolayı

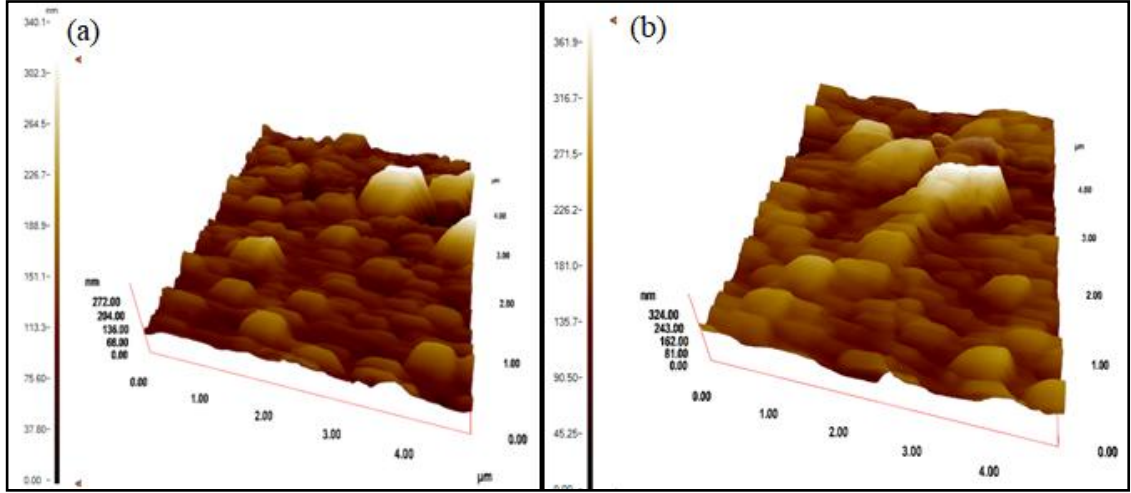
$n=2$ 'dir.); F , Faraday sabitini ($F=96500$ C); ρ , CdTe yoğunluğunu ($\rho=5,85$ g/cm³) belirtmektedir.

4.4. CdTe İnce Filmlerinin Yüzey İncelemeleri

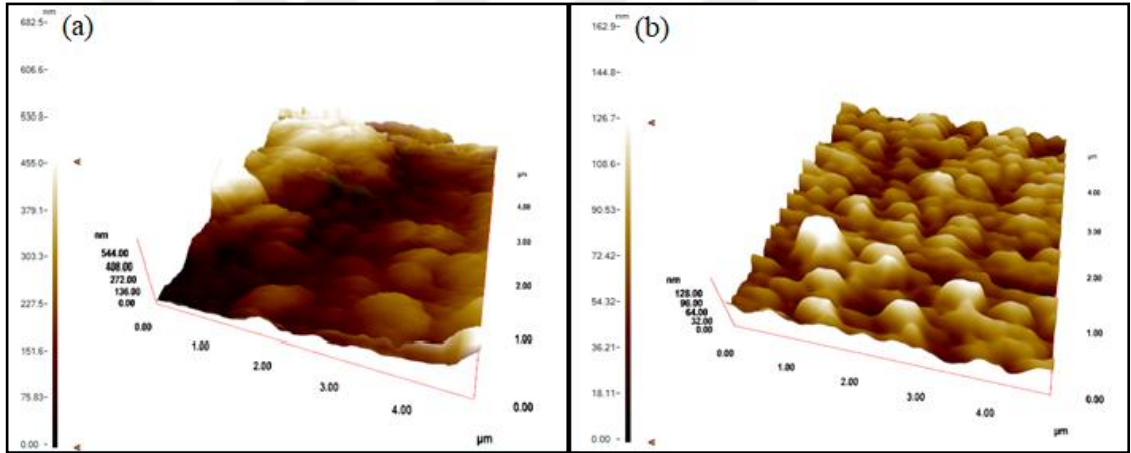
Üretilen ince filmlerin yasak bant aralıkları belirlendikten sonra ve oluşan oksidasyonun etkisine dair yapılan literatür çalışmasıyla da karşılaştırıldıktan sonra, farklı kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince filmlerin AFM görüntüleri alındı ve pürüzlülük değerleri belirlendi.



Şekil 4.9. 5x5 µm büyüklüğünde, (a) -0,4 V kaplama potansiyelinde ve (b) -0,5 V kaplama potansiyelinde elektrodepozit edilmiş CdTe ince filmlerinin AFM görüntüleri



Şekil 4.10. 5x5 μm büyüklüğünde, (a) -0,6 V kaplama potansiyelinde ve (b) -0,7 V kaplama potansiyelinde elektrodepozit edilmiş ince film örneklerinin AFM görüntüleri



Şekil 4.11. 5x5 μm büyüklüğünde, (a) -0,8 V kaplama potansiyelinde ve (b) -0,9 V kaplama potansiyelinde elektrodepozit edilmiş ince film örneklerinin AFM görüntüleri

AFM görüntülerinden üretilen örneklerin yüzey pürüzlülükleri Çizelge 4.4'teki gibi elde edilmiştir ve üretilen film yüzeylerinin homojen bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. AFM ölçümlerinde de olduğu gibi, üretim sonrasındaki ölçümlerde de -1,0 V ve -1,1 V kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince film örneklerinin bazı ölçümleri alınmadı. Bu kaplama voltajlarında üretilen ince film örneklerinde gözle görülür şekilde dökülmelerin olmasından dolayı, yani bu kaplama potansiyellerinde üretilmeye çalışılan filmlerdeki dökülmelerin oluşması sebebiyle bu kaplama voltajlarında üretilen CdTe ince filmlerinin bazı ölçümleri alınmamıştır. Ölçümleri alınan ince filmlerin AFM

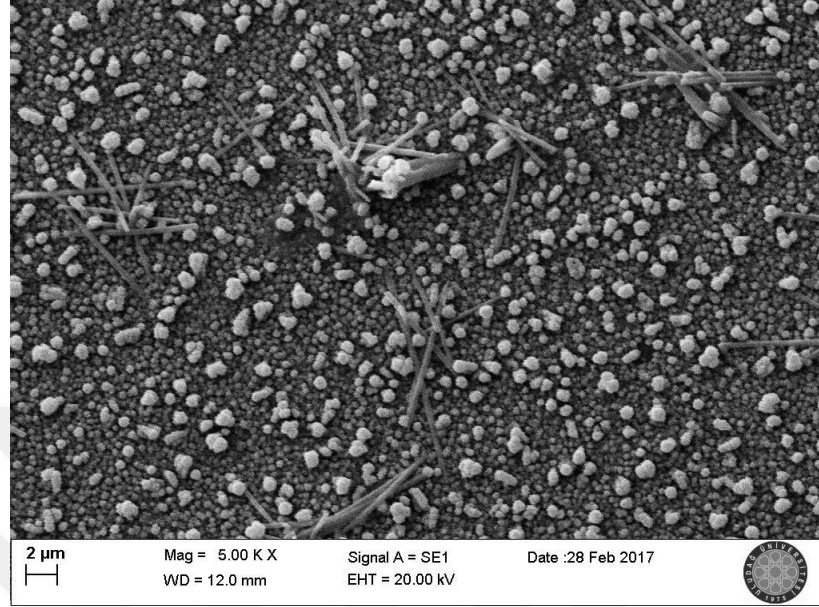
sonuçlarından, pürüzlülük değerlerinin 35 nm ile 191 nm arasında değiştiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince filmlerine ait pürüzlülük değerleri

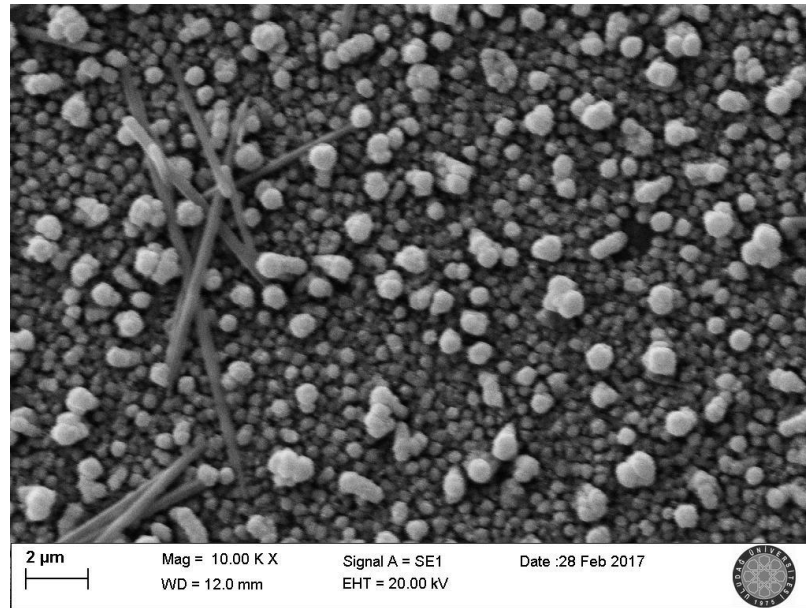
Kaplama potansiyeli (V)	Pürüzlülük (nm)
-0,4	35,02
-0,5	140,68
-0,6	119,82
-0,7	166,68
-0,8	73,05
-0,9	191,36

Üretilen ince filmlerini AFM ölçümlerinin sonrasında, SEM-EDAX ölçümleri alındı. Şekil 4.12 ile Şekil 4.19 arasındaki görüntüler, depozit edilmiş CdTe ince filmlerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Elde edilen şekillere ve Çizelge 4.5'e bakıldığında CdTe ince filmlerinin yüzey yapısı ve elemental birleşimlerinin hassas bir şekilde depozisyon potansiyeline bağlı olduğu söylenebilir. -0,4 V'ta üretilmiş CdTe filminin, 80 nm ile 1 µm arasında değişen çaplara sahip küresel bir yapıya ve uzun silindirik çubuk şekilli yapılara sahip olduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 4.12a/b/c). Depozisyon potansiyeli -0,5 V'a düşürüldüğünde çubuk şekilli yapıların oluşumunun görülmediği ve görülen küresel yapıların yarıçaplarının 40 nm ile 500 nm arasında değişerek oluştuğu görülmektedir. -0,6 V, -0,7 V ve -0,8 V'ta depozit edilmiş CdTe filmlerin daha düzgün olduğu görülmektedir ve bu filmlerin yapısında, yaklaşık olarak 30 nm ile 200 nm arasında değişen yarıçaplara sahip küresel yapıların olduğu görülmektedir. -0,9 V'ta depozit edilmiş CdTe filminin, çiçeksi yapılara benzeyen, daha pürüzlü bir yüzeye ve ince uzun çubuksu yapılara sahip olduğu görülmektedir. Filmleri incelerken görüntülenmesini iyileştiren Au ve Pd bileşenleri Çizelge 4.5'te görülmektedir. Kaplama potansiyeline bağlı olarak, Cd'un birleşim oranı % 33,20 ile % 45,22 arasında değişirken, Te'nin birleşim oranının % 27,92 ile % 36,32 arasında değiştiği görülmektedir. Cd/Te oranı, depozisyon potansiyelinin azalmasıyla birlikte artmaktadır

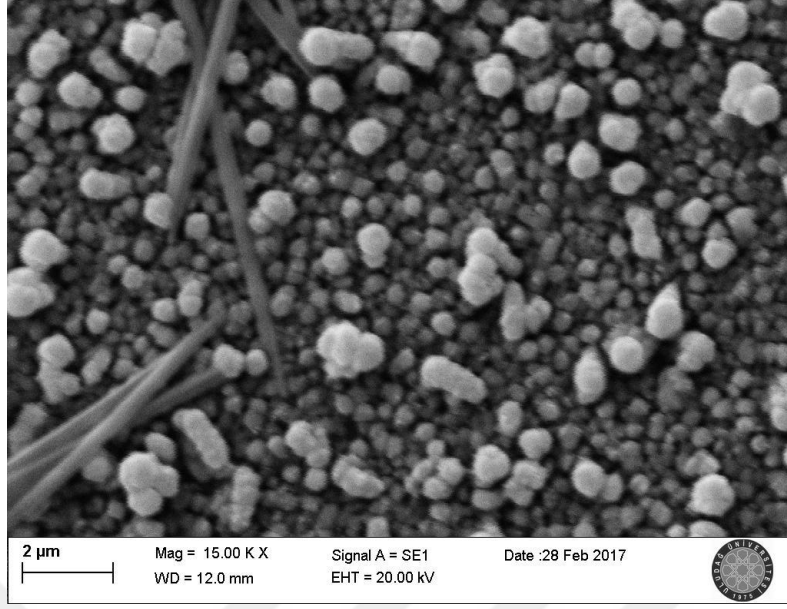
(Bkz. Çizelge 4.5). Potansiyelin azalmasıyla birlikte Cd/Te oranının artması, düşük potansiyellerde oluşan Te deposisyonundan kaynaklandığı söylenebilir.



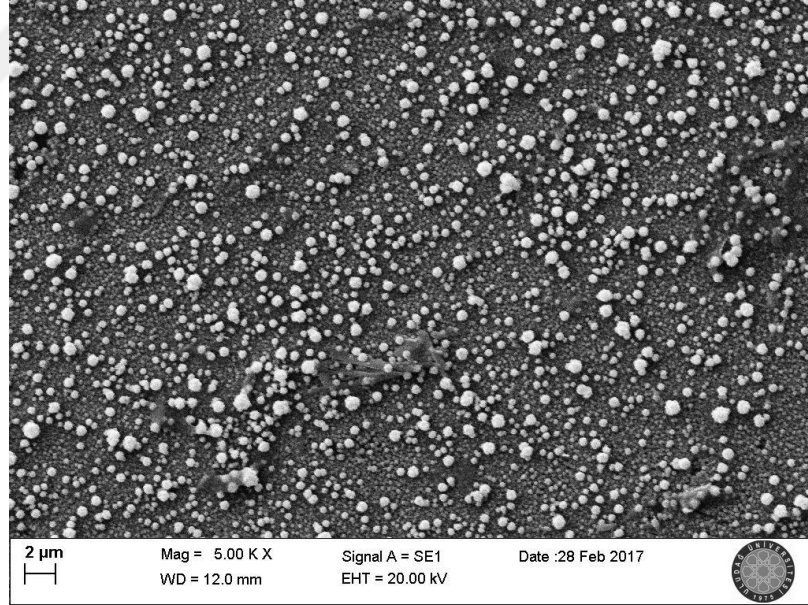
Şekil 4.12. (a) -0,4 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



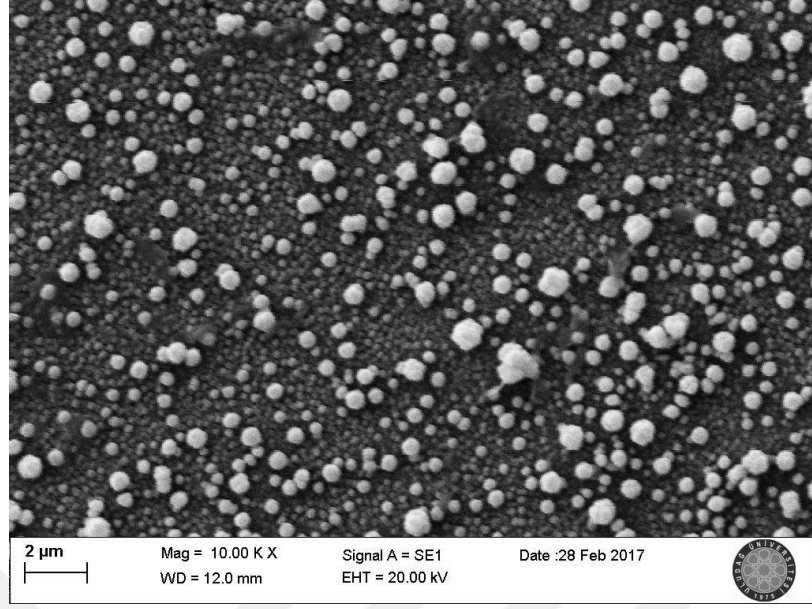
Şekil 4.12. (b) -0,4 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



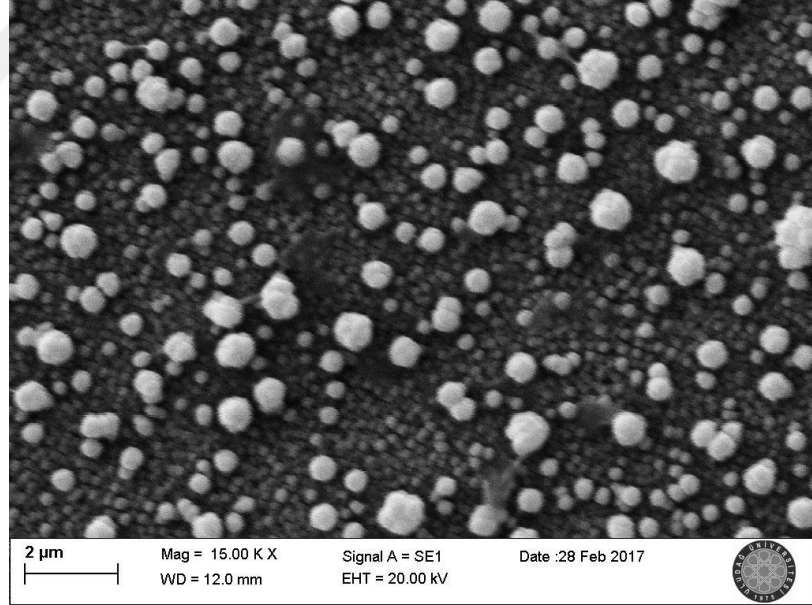
Şekil 4.12. (c) -0,4 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



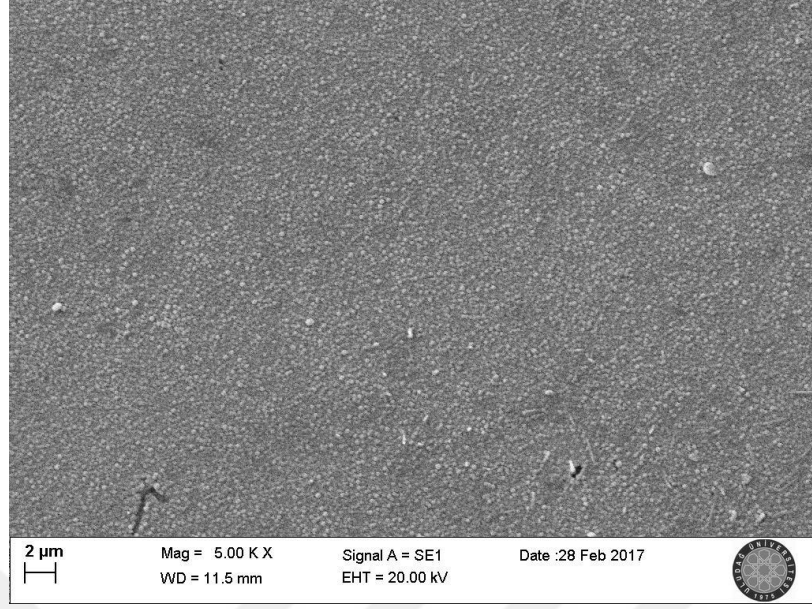
Şekil 4.13. (a) -0,5 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



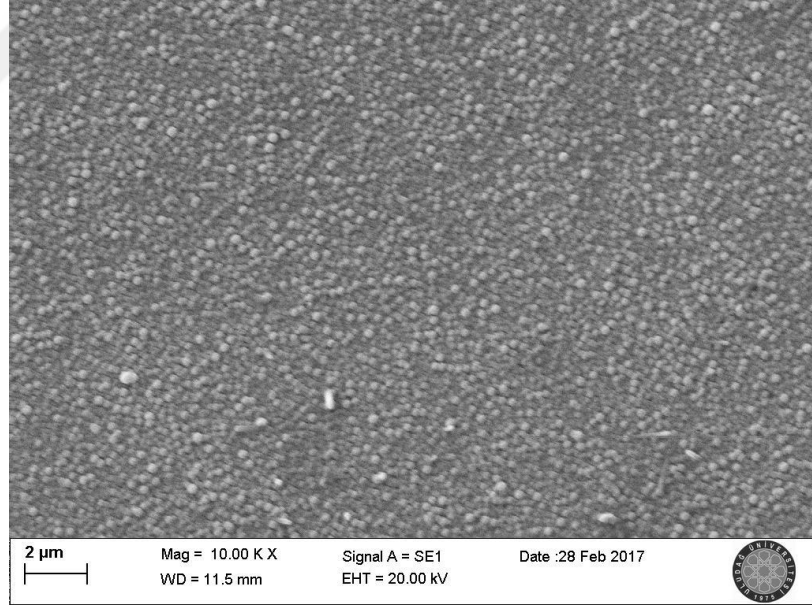
Şekil 4.13. (b) -0,5 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



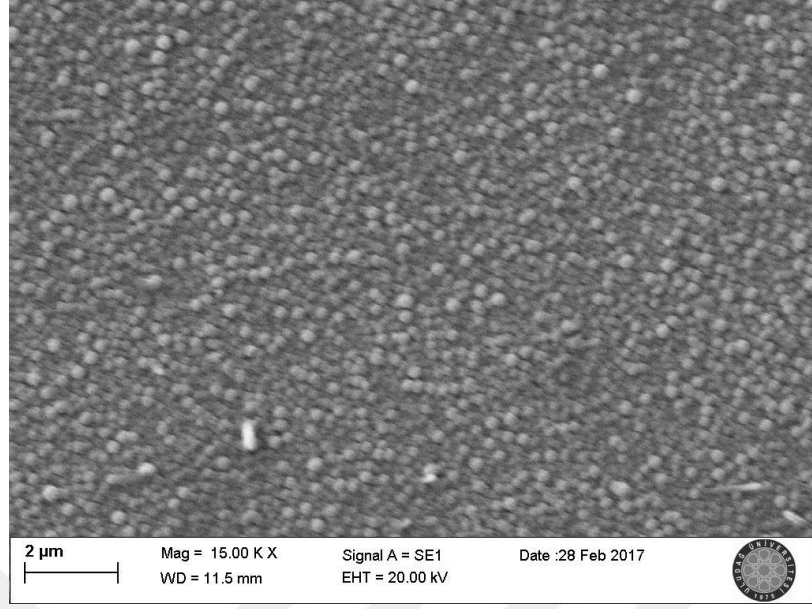
Şekil 4.13. (c) -0,5 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



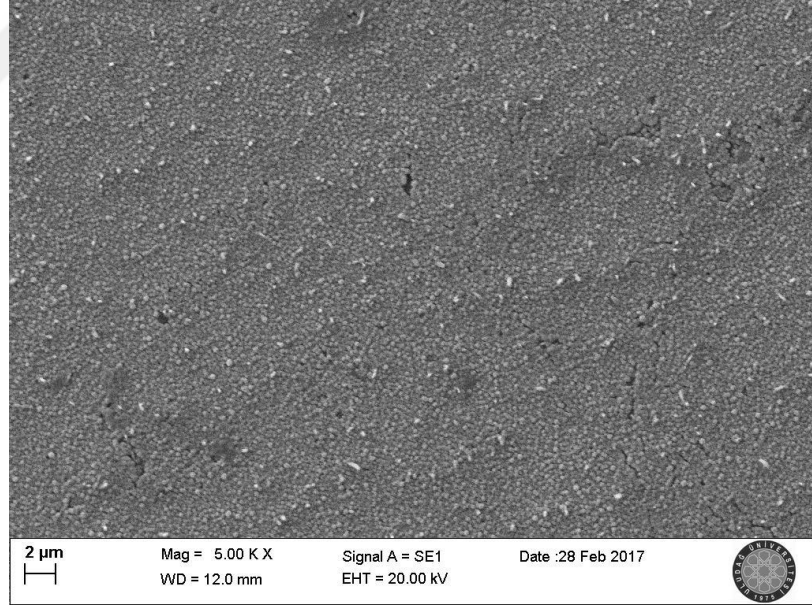
Şekil 4.14. (a) -0,6 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



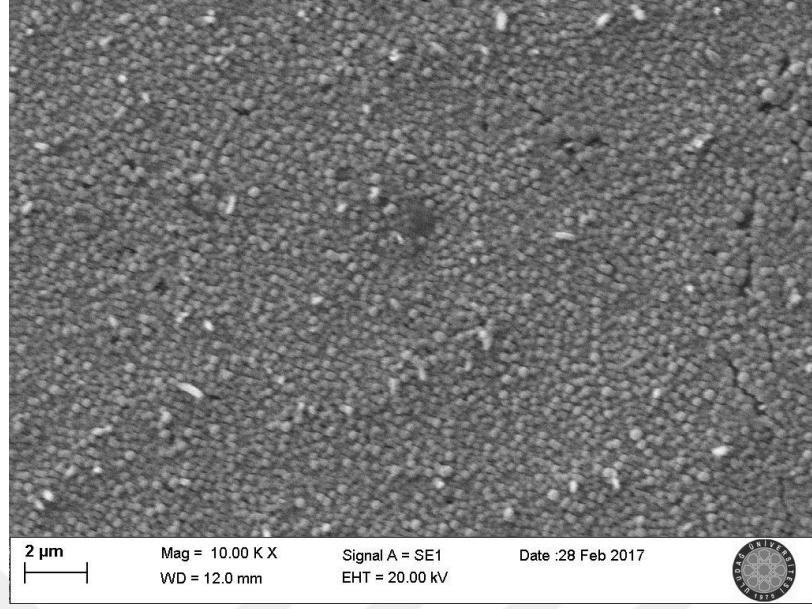
Şekil 4.14. (b) -0,6 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



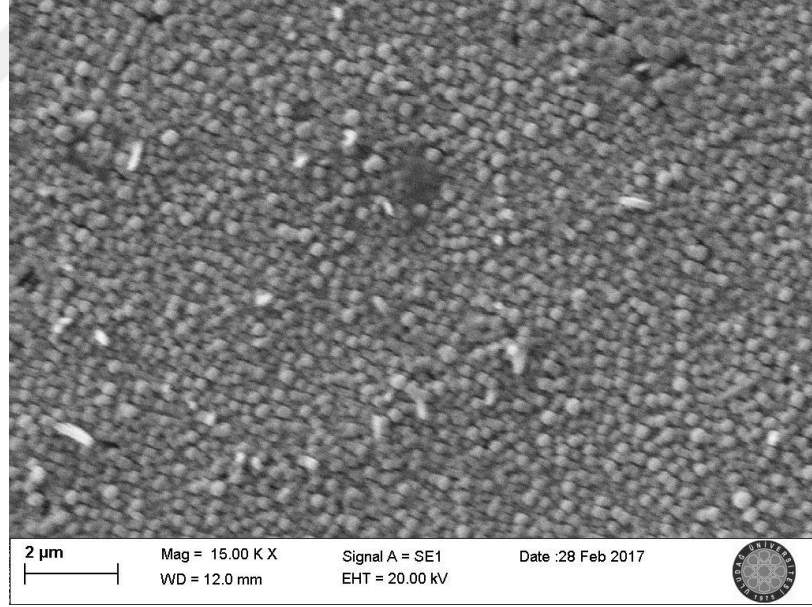
Şekil 4.14. (c) -0,6 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



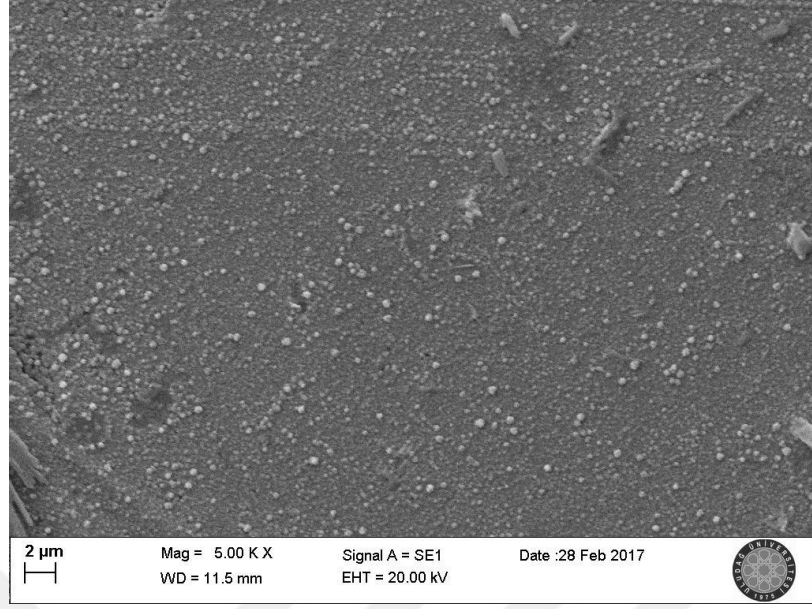
Şekil 4.15. (a) -0,7 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



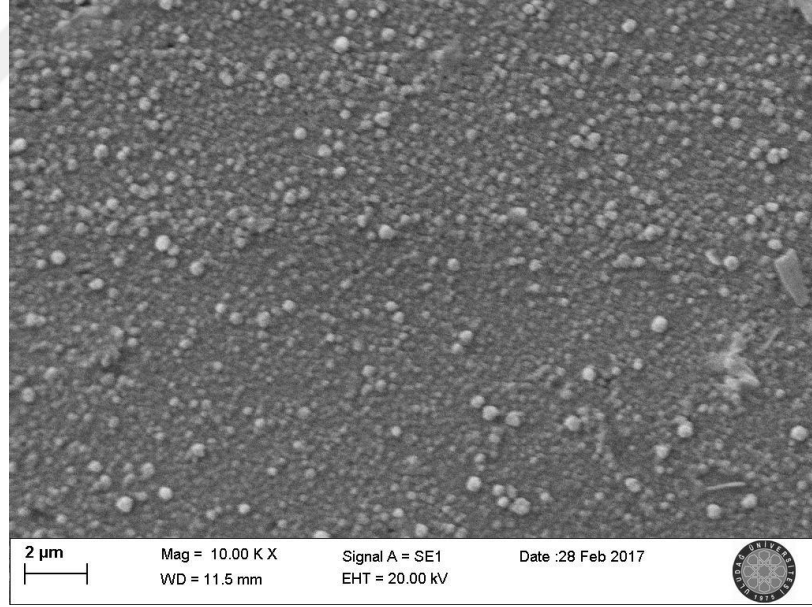
Şekil 4.15. (b) -0,7 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



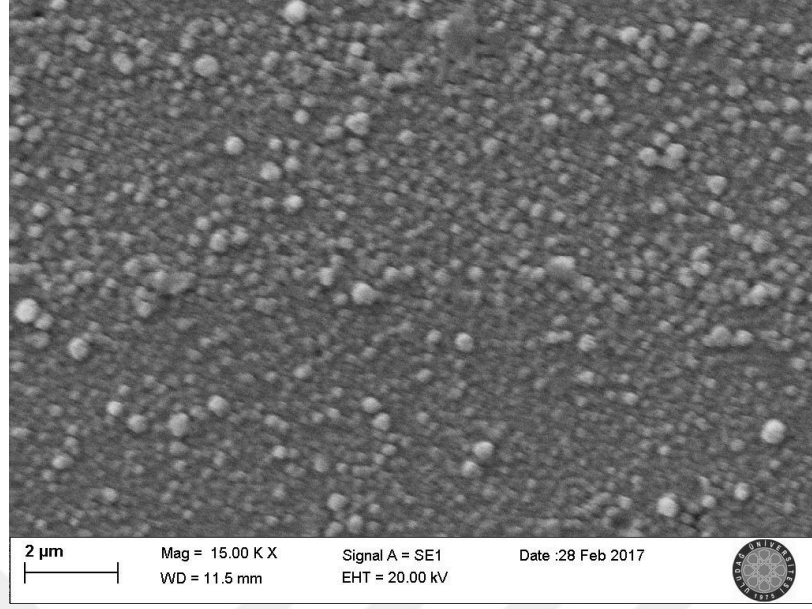
Şekil 4.15. (c) -0,7 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



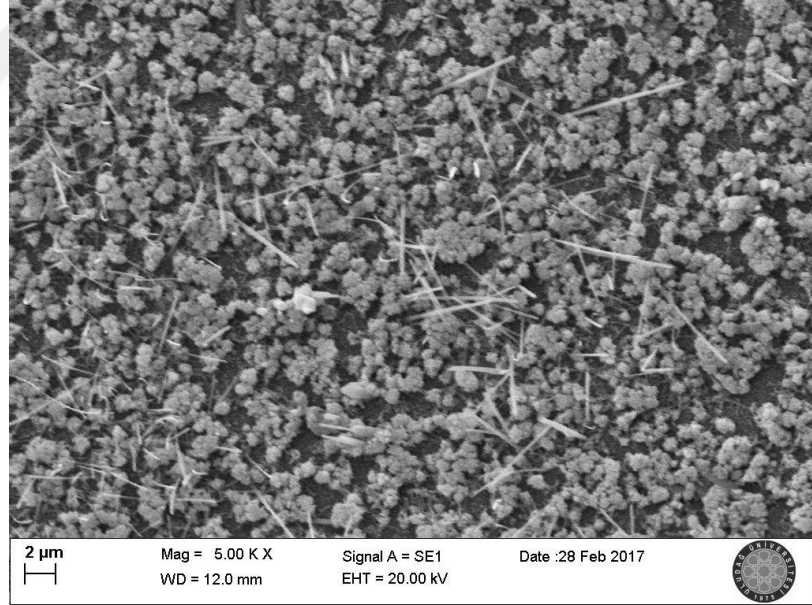
Şekil 4.16. (a) -0,8 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



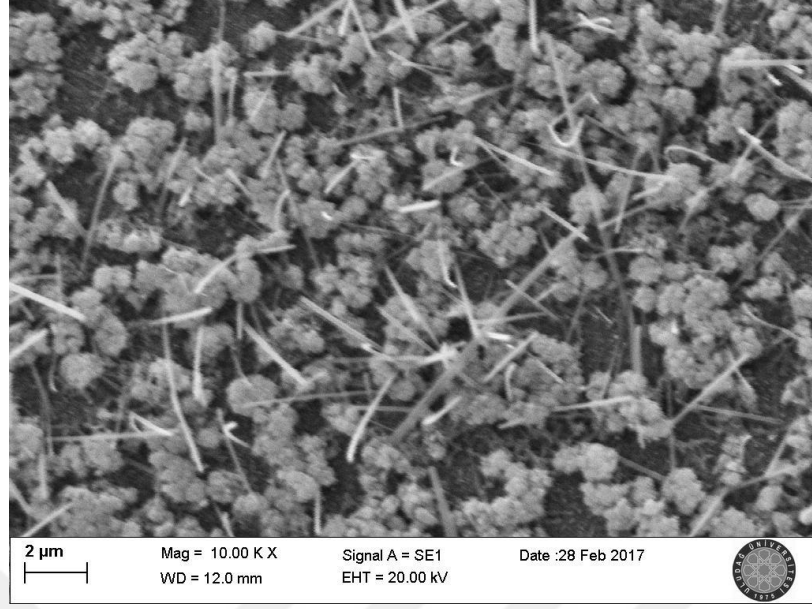
Şekil 4.16. (b) -0,8 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



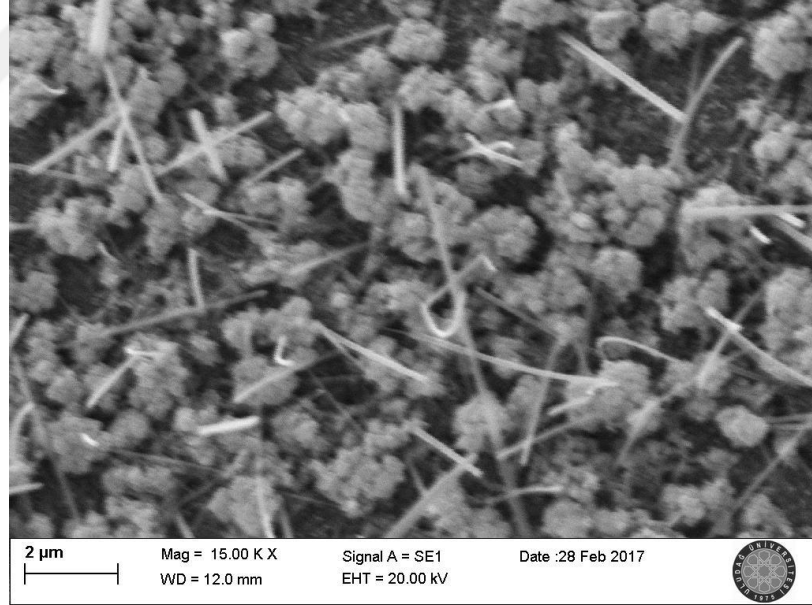
Şekil 4.16. (c) -0,8 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



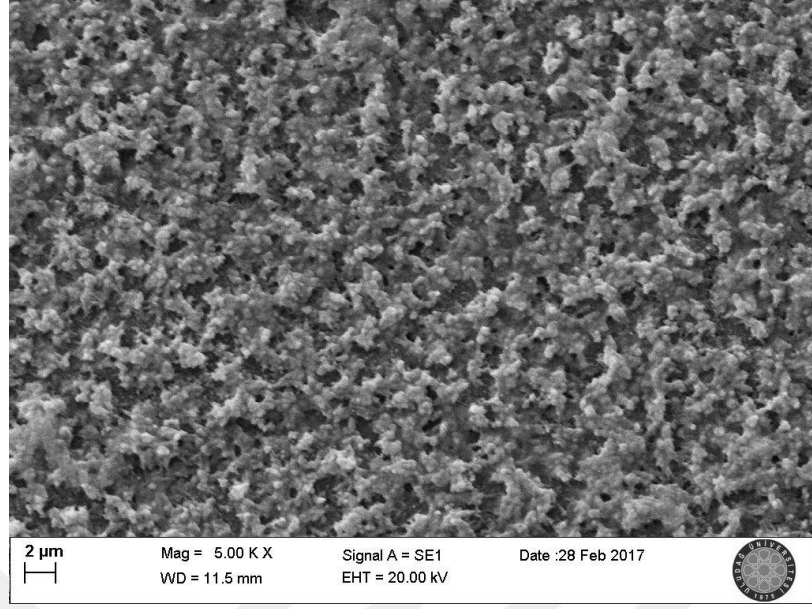
Şekil 4.17. (a) -0,9 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



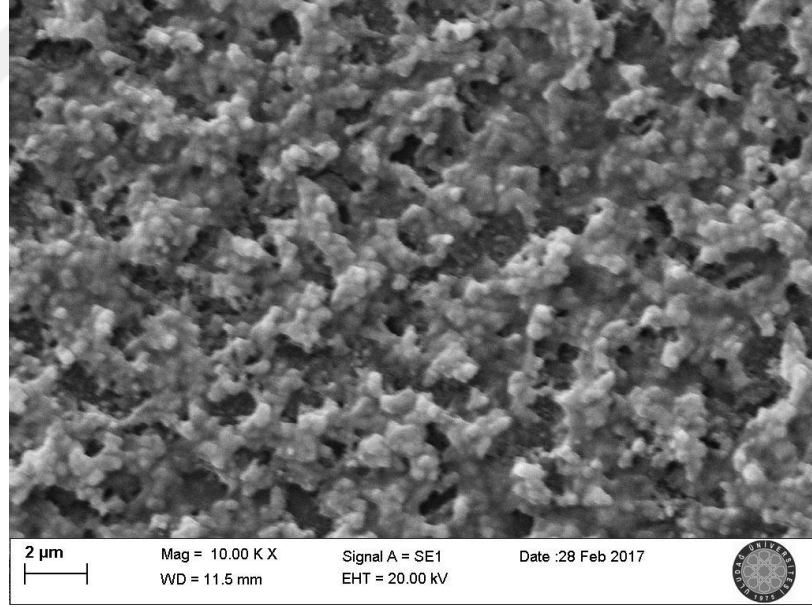
Şekil 4.17. (b) -0,9 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



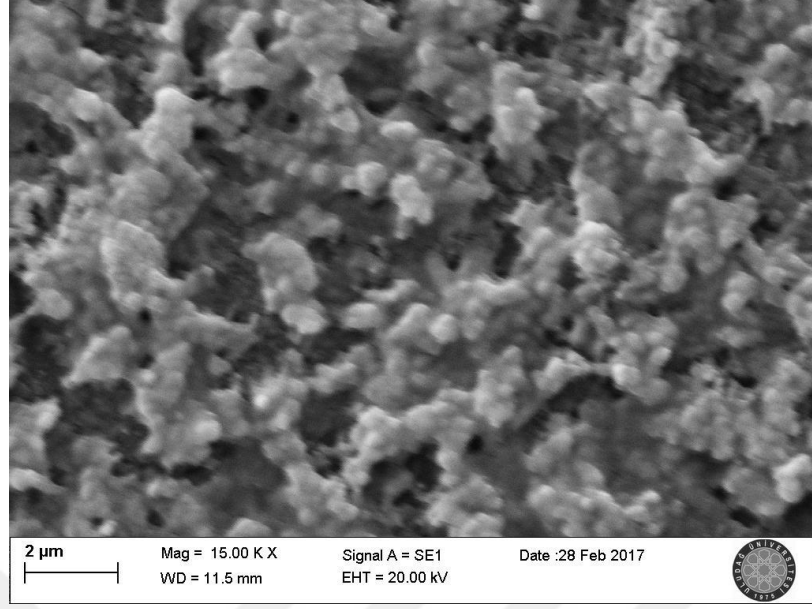
Şekil 4.17. (c) -0,9 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



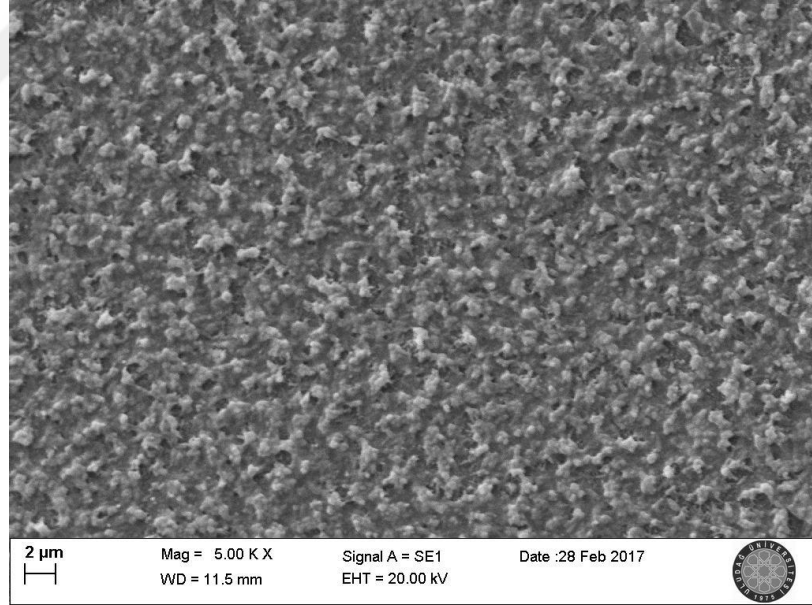
Şekil 4.18. (a) -1,0 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



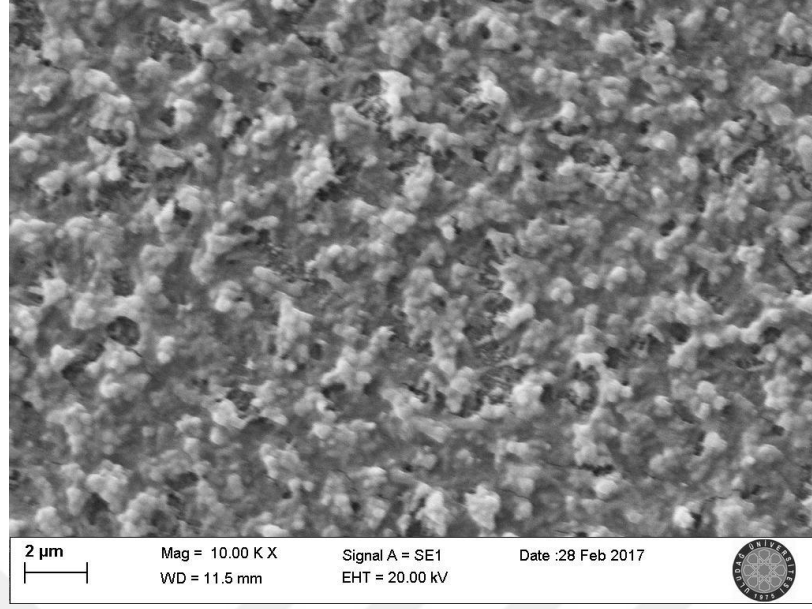
Şekil 4.18. (b) -1,0 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



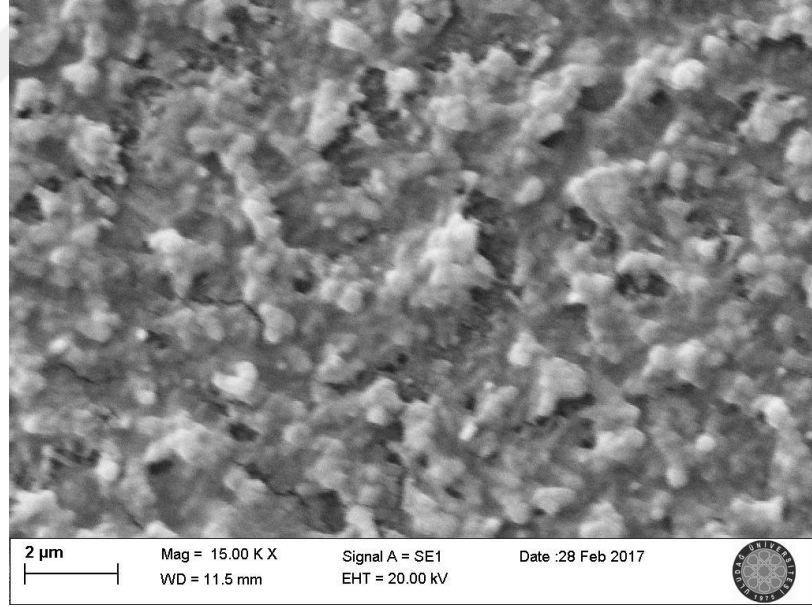
Şekil 4.18. (c) -1,0 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



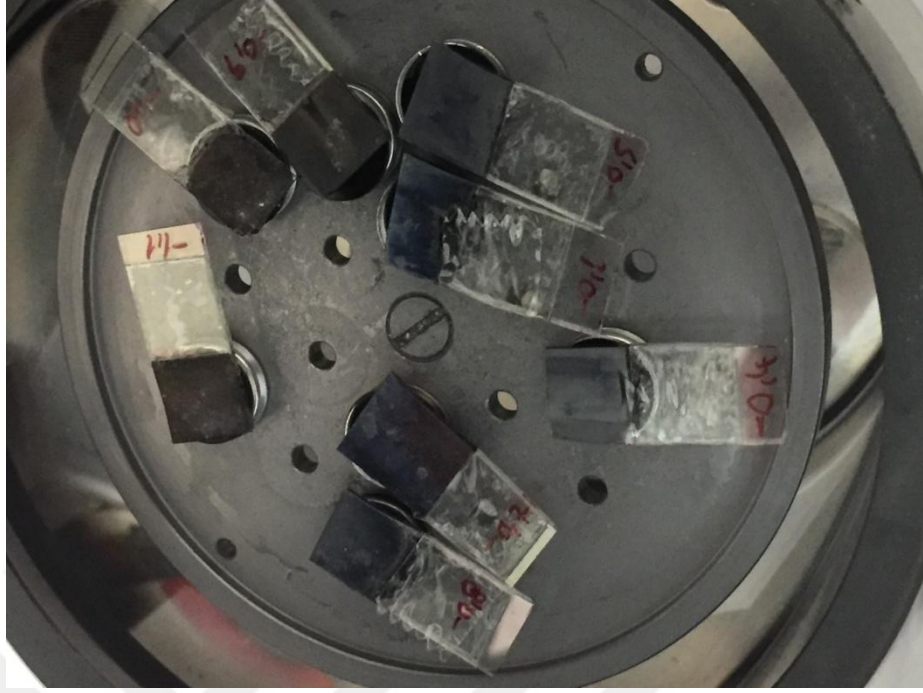
Şekil 4.19. (a) -1,1 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 4.19. (b) -1,1 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü

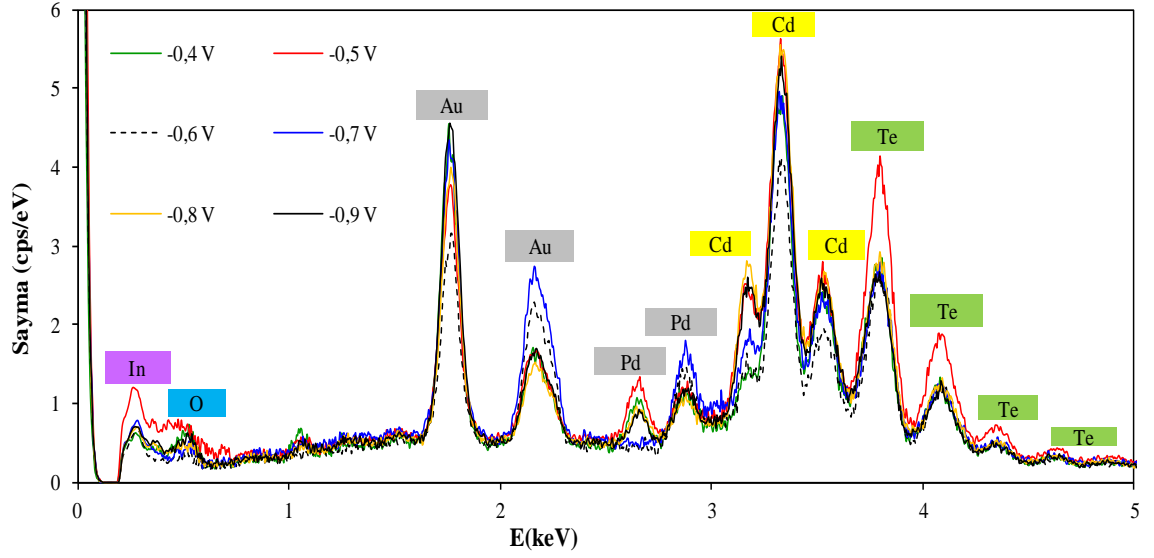


Şekil 4.19. (c) -1,1 V kaplama potansiyelinde kaplanmış CdTe ince filmine ait 15000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 4.20. Farklı kaplama potansiyellerinde hazırlanmış CdTe ince film örneklerinin Au-Pd kaplanarak SEM-EDAX ölçümlerini almaya hazırlanışı

SEM-EDX ölçümleri yapılmadan önce farklı kaplama potansiyellerinde üretilen örneklerin yüzeyleri, vakumlu ortamda altın paladyum ile kaplandı (Bkz. Şekil 4.20). Örneklerin üzerine yapılan kaplamadan dolayı EDAX ölçümlerinde altın ve paladyum olduğunu gösteren sonuçlar da elde edildi. Bunun yanı sıra tavlama veya fırınlama yapılmadığı, hazırlanan örnekler oda sıcaklığında ve açık havada üretildiği için, Au ve Pd dışında, oksidasyondan dolayı bileşenler içinde oksijen de bulunduğu görülmektedir (Bkz. Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Farklı kaplama potansiyellerinde hazırlanmış CdTe ince filmlerinin EDAX spektrumu

Çizelge 4.5. CdTe ince filmlerinin elemental bileşenleri

Depozisyon potansiyeli	% Cd	% Te	% O	% Au	% Pd	Cd/Te
-0,4 V	36,55	29,85	5,65	23,11	4,85	1,24
-0,5 V	37,25	36,32	6,19	16,25	3,99	1,03
-0,6 V	33,10	31,79	1,88	27,08	6,15	1,04
-0,7 V	37,83	28,04	3,48	24,70	5,96	1,35
-0,8 V	45,22	30,08	4,18	17,18	3,33	1,50
-0,9 V	43,22	27,92	6,32	18,74	3,79	1,55

4.5. Mott-Schottky (MS) ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Analizleri

Farklı depozisyon potansiyellerinde hazırlanan CdTe ince filmlerinin taşıyıcı yoğunlukları, oluşan yarıiletken tipleri ve oluşturulan sisteme eşdeğer bir elektronik devre fitlemesinin belirlenmesi için MS ve EIS ölçümleri alındı. Şekil 4.22, CdTe ince filmlerinin depozisyon potansiyeline göre Mott-Schottky grafiklerini göstermektedir.

Mott-Schottky eşitliği, n-tipi CdTe ince filmlerdeki donör (elektron) yoğunluğunu ve p-tipi CdTe ince filmlerdeki akseptör (boşluk) yoğunluğunu hesaplamada kullanılır,

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_r N_D} \right) \left(V - V_{FB} - \frac{kT}{e} \right) \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{-2}{e\epsilon_0\epsilon_r N_A} \right) \left(V - V_{FB} - \frac{kT}{e} \right) \quad (4.10)$$

Bu eşitliklerde, C, kapasitansı; e, elektron yükünü; ϵ_0 , boşluğun dielektrik sabitini ($8,85 \times 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}$); ϵ_r , depozit edilmiş yarıiletkenin dielektrik sabitini (CdTe için ~ 12); k, Boltzmann sabitini ($8,617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$); T, sıcaklık değerini (K); N_D ve N_A sırasıyla yarıiletkenin donör ve akseptör yoğunluklarını; V, uygulanan voltajı ve V_{FB} düz bant potansiyelini göstermektedir. Grafikteki eğrinin $1/C^2=0$ olduğu yer bize düz bant potansiyelini vermektedir. Buna göre, düz bant gerilimleri -0,30 V ile 0,60 V arasında değişmektedir (Bkz. Çizelge 4.6). Hazırlanılan CdTe ince filmlerinin donör ve akseptör yoğunlukları Mott-Schottky eğrilerinin lineer bölgelerinden belirlendi ve belirlenen bu yoğunluklar aşağıdaki eşitliklerle ilişkilendirilebilir,

$$\text{Eğim 1} = \frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_r N_D} \quad n - \text{tipi filmler için} \quad (4.11)$$

$$\text{Eğim 2} = \frac{2}{e\epsilon_0\epsilon_r N_A} \quad p - \text{tipi filmler için} \quad (4.12)$$

Negatif eğime sahip olan ve -0,9 V potansiyelde kaplanmış olan CdTe ince filmi p-tipi yarıiletkendir ve pozitif eğime sahip diğer potansiyellerde kaplanmış olan CdTe ince filmler n-tipi yarıiletken özelliği göstermektedir. Taşıyıcı yoğunlukları, N_D ve N_A Çizelge 4.6'da listelenmiştir. Donör yoğunluğu, depozisyon potansiyeline bağlı olarak $\sim 10^{17}$ ile $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ arasında değişirken, -0,9 V potansiyelde kaplanan ince filmdeki akseptör yoğunluğu $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, tür.

n-tipi yarıiletken için, N_{CB} , iletkenlik bandındaki yoğunluk durumları aşağıdaki şekilde hesaplanabilir,

$$N_{CB} = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.13)$$

Eşitlikteki h , Planck sabitini ($4,1356 \times 10^{-15}$ eV·s) ve m_e^* , iletkenlik bandındaki elektronun etkin kütleini belirtirken, bu değer CdTe ince filmi için $m_e^* = 0,14m_0$ değerindedir. Ayrıca m_0 , serbest elektron kütleisidir ($9,109 \times 10^{-31}$ kg). N_{CB} değeri n-tipi CdTe ince filmi için, $1,32 \times 10^{18}$ cm⁻³ olarak bulunur. İletkenlik bandı değerleri, Fermi enerji seviyesi değeri kullanılarak hesaplanabilir,

$$E_{CB} - E_F = -kT \ln \left(\frac{N_D}{N_{CB}} \right) \quad (4.14)$$

Valans bandı için, iletkenlik bandı için ve Fermi enerji seviyeleri için hesaplanan değerler Çizelge 4.6'da görülmektedir.

p-tipi CdTe ince filmi için, valans bandındaki boşlukların yoğunluğu, N_{VB} , aşağıdaki eşitlikle verilebilir,

$$N_{VB} = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.15)$$

Eşitlikteki m_h^* , valans bandındaki etkin kütleiyi simgelerken, bu değer CdTe için $m_h^* = 0,37m_0$ değerindedir. p-tipi CdTe ince filmi için N_{VB} değeri $5,64 \times 10^{18}$ cm⁻³ olarak belirlenmiştir. N_A/N_{VB} oranı p-tipi yarıiletken filmlerde dejener bir karakter gösterdiklerinde 0,05'ten küçüktür ve valans bant değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir,

$$E_{VB} = E_F + kT \ln \left(\frac{N_{VB}}{N_A} \right) \quad (4.16)$$

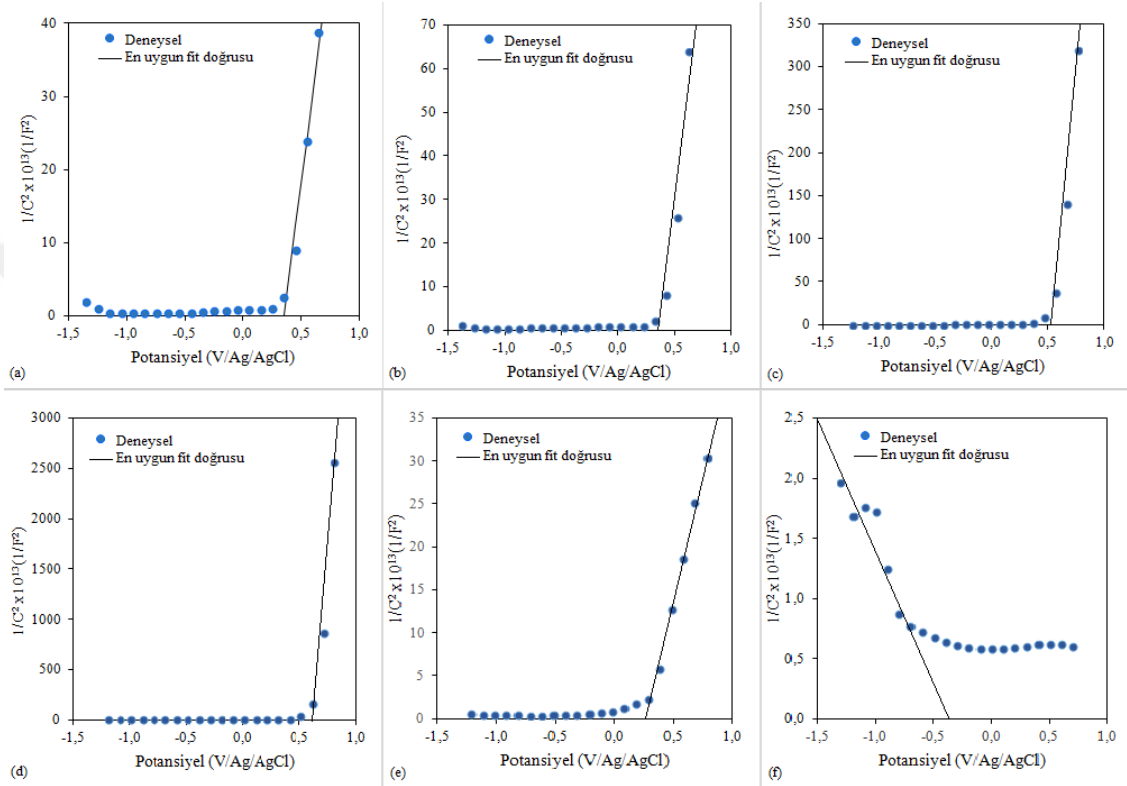
Çizelge 4.6. CdTe ince filmlerine ait Mott-Schottky parametreleri

Depozisyon potansiyeli→ Fiziksel parametreler↓	-0,4 V	-0,5 V	-0,6 V	-0,7 V	-0,8 V	-0,9 V
Film kalınlığı (nm)	72	125	86	80	118	140
İletkenlik tipi	n	n	n	n	n	p
Düz bant potansiyeli, V_{FB} (V/Ag-AgCl)	0,35	0,40	0,54	0,60	0,28	-0,30
Donör yoğunluğu (1/cm³)	1,04x10 ¹⁹	4,60x10 ¹⁸	9,14x10 ¹⁷	1,07x10 ¹⁷	2,20x10 ¹⁹	-
Akseptör yoğunluğu (1/cm³)	-	-	-	-	-	6,31x10 ²⁰
Enerji bant aralığı, E_g (eV)	1,54	1,59	1,81	1,78	1,92	1,78
$E_{CB}-E_F$ (eV)	0,0536	0,0325	0,0094	0,0649	0,0729	-
E_F-E_{VB} (eV)	-	-	-	-	-	0,0199
İletkenlik bant kenarı (V/Ag-AgCl)	0,4036	0,4324	0,5494	0,6649	0,3529	1,4600
Valans bant kenarı (V/Ag-AgCl)	-1,2436	-1,2225	-1,2794	-1,2449	-1,7129	-0,3199

Eğer p-tipi yarıiletkenler dejenere olmayan bir karaktere sahip olsaydı, N_A/N_{VB} oranı 0,05'ten büyük olurdu ve bu durumda da valans bandın pozisyonunu belirlemek için şu bağıntı kullanılabilir,

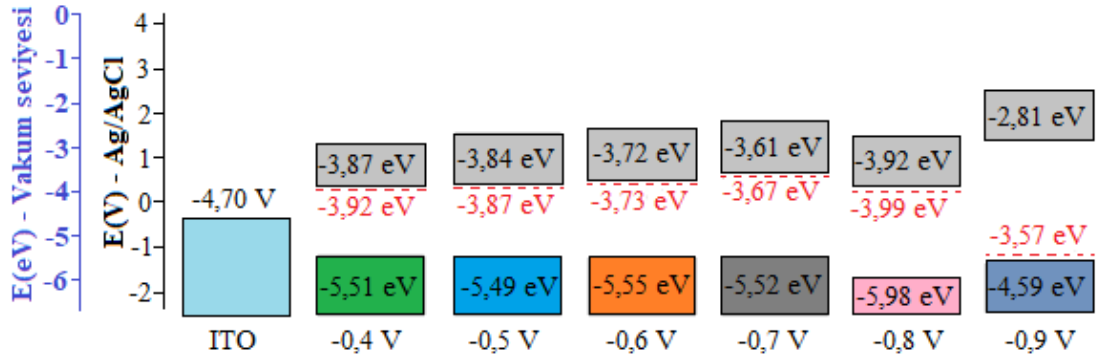
$$E_{VB} = E_F - kT \left[\ln \left(\frac{N_A}{N_{VB}} \right) + 2^{-2/3} \left(\frac{N_A}{N_{VB}} \right) \right] \quad (4.17)$$

Eşitliklerin yardımıyla N_A/N_{VB} oranı, p-tipi CdTe ince film için ~ 112 olarak bulundu. Bu yüzden bir sonraki eşitlik $-0,9$ V'ta üretilmiş CdTe ince filminin valans bant pozisyonunu belirlemek için kullanıldı. Kim ve ark. (2007) ITO ince filminin çalışma fonksiyonunu $-4,70$ eV olarak bulmuştur. Temiz bir ITO ince filmi göz önüne alınırsa, üretilmiş CdTe ince filmlerinin Fermi enerji seviyeleri hesaplanabilir.



Şekil 4.22. Farklı depoziyon potansiyellerinde üretilmiş CdTe ince filmlerine ait Mott-Schottky eğrileri, (a) $-0,4$ V, (b) $-0,5$ V, (c) $-0,6$ V, (d) $-0,7$ V, (e) $-0,8$ V, (f) $-0,9$ V, (Ölçümler, 1 M NaCl içeren elektrolit içinde 20 kHz'e karşılık 5 mV'luk bir genliğe sahip AC voltajında yapıldı.)

Bir yarıiletken ince filmdeki bir düz bant durumunda, düz bant potansiyelindeki bir eV_{FB} enerjisi Fermi enerjisi seviyesine eşittir. Buna bağlı olarak, elektrodepozit edilmiş ince filmlere ait hesaplanmış Fermi enerji seviyeleri $-3,57$ eV ile $3,99$ eV arasında değişmektedir (Bkz. Şekil 4.23). Şekil 4.23'teki kesikli çizgiler, CdTe filmlerinin Fermi enerji seviyelerini göstermektedir. p-tipi CdTe ince filminin iletkenlik bandının pozisyonu $E_g = E_{CB} - E_{VB}$ eşitliği ile hesaplanabilir. Şekil 4.23, elektrodepozit edilmiş bütün CdTe ince filmlerinin bant görünüşlerindeki yakınlığı göstermektedir.



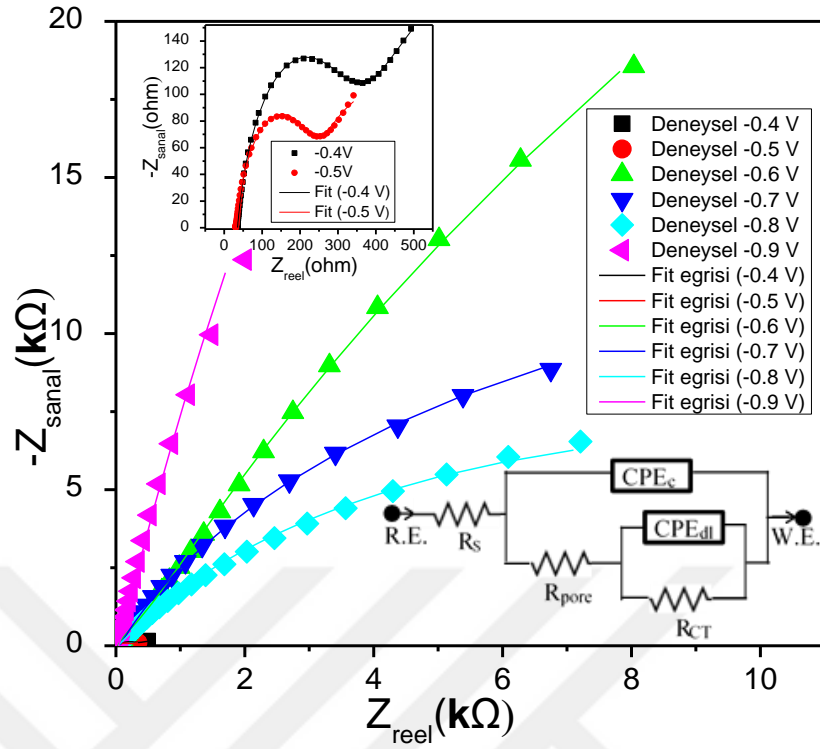
Şekil 4.23. Depozisyon potansiyeline bağlı olarak üretilmiş CdTe ince filmlerinin elektronik enerji diyagramı

CdTe yarıiletken ince filmlerinin elektrolit iletkenliklerinin analizi, EIS ölçümleri yardımıyla 0,01 Hz ile 300 kHz arasında gerçekleştirildi. Şekil 4.24, 1 M NaCl sulu çözeltisi içinde CdTe ince filmlerine ait Nyquist eğrilerini göstermektedir. Echem programı yardımıyla ve EIS verileri kullanılarak, bu duruma eşdeğer bir elektronik devre fit edildi (Bkz. Şekil 4.24). 10^{-4} 'ten daha düşük olan χ^2 (deneysel verilerle fit değerleri arasındaki uyumun derecesi), yapılan fit işlemlerinin doğru olduğunu göstermektedir. Böylece, bu çalışmamız için fit doğruluğunun kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.7). Bu devre modelinde R_s , elektrolitin ohmik direncini; R_{pore} , boşluk direncini; CPE_c , CdTe tabakasındaki sabit faz elementini; R_{CT} , CdTe ince filmi ile elektrolit arasındaki yük geçiş direncini ve CPE_{dl} , elektrik çift tabakası için sabit faz elementini belirtmektedir. Devre elemanlarının değerleri Çizelge 4.7'de görülmektedir. Çözelti direnci $30,58 \Omega \cdot cm^2$ (-0,5 V'ta depozit edilmiş CdTe için) ile $46,98 \Omega \cdot cm^2$ (-0,9 V'ta depozit edilmiş CdTe için) arasında değişmektedir. Yük geçiş direnci en büyük değerini -0,9 V'ta üretilmiş olan CdTe filmde görülmektedir (Bkz. Çizelge 4.7). Bu nedenle -0,5 V'ta depozit edilmiş CdTe ince filmlerle yapılan ölçümlere göre elektrik yükleri elektrolite kolayca geçebilmektedir. Boşluk direnci de bir dirençtir, çünkü fiziksel boşluklar depozit edilmiş filmlerdeki çözelti ile dolmaktadır. Boşluk direnci $0,787 \Omega \cdot cm^2$ (-0,4 V'ta depozit edilmiş CdTe için) ile $306,1 \Omega \cdot cm^2$ (-0,5 V'ta depozit edilmiş CdTe için) arasında değişmektedir.

Saf kapasitans ile sabit faz elementi arasındaki eşitlik aşağıdaki şekilde verilebilir,

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (4.18)$$

Eşitlikteki j , $\sqrt{-1}$ 'dir; Z , kapasitörün empedansını; Y_0 frekans-bağımsız CPE parametresini; ω , rad/s biriminde açısal frekansı göstermektedir. Saf kapasitör ile sabit faz elementi arasındaki ilişkiyi gösteren parametre n olarak verilmektedir. Z_{CPE} saf bir kapasitör ($n=0$), bir Warburg elementi ($n=0,5$) ve ideal bir kapasitör ($n=1$) için uygundur. Bir elektronik devre modelinde, bir sabit faz elementi, homojen olmayan, yüksek pürüzlülüğe sahip ve gözenekli yapıya sahip bir ince film olarak tanımlanabilirken, saf kapasitör yalnızca homojen yüzeylerde kullanışlıdır. CdTe ince filmiyle ilişkili n_1 değerleri 0,81 ile 0,93 arasında değişmektedir (Bkz. Çizelge 4.7). Film homojenliği, n_1 ile 1 arasındaki sapmayla ters orantılıdır. -0,9 V'ta depozit edilmiş CdTe filmi/elektrolit sistemi için n_2 değeri ~ 0 'dır ve bu saf bir kapasitör gibi davrandığı anlamına gelmektedir. -0,4 V'ta depozit edilmiş CdTe filmi/elektrolit sistemi için n_2 değeri $\sim 0,5$ 'tir ve bu nedenle, bu sistem CPE_{dl} Warburg davranışı göstermektedir. -0,7 V'ta depozit edilmiş CdTe filmi/elektrolit sistemi, 0,83 değeri ile diğer filmlere göre ideal bir kapasitöre çok daha yakındır (Bkz. Çizelge 4.7). Wang ve ark. (2016) üç elektrotlu sistemle grafit ve Ni altlık üzerine CdTe filmini elektrokimyasal olarak hazırlamışlardır ve hazırlanan filmleri yarım saat süreyle 300 °C, 350 °C, 400 °C ve 450 °C sıcaklıkta nitrojen atmosferinde tavlamışlardır. 0,25 mol/L Na₂S ve 0,35 mol/L Na₂SO₃ içeren sulu bir elektrolit hazırlamışlardır. Nyquist eğrilerini farklı sıcaklıklarda tavlanan her bir CdTe filmi/elektrolit sistemi için elde etmişlerdir. Bu tez kapsamındaki yapılan çalışmadaki Nyquist eğrileri ile Wang ve ark. (2016) yaptığı çalışmadaki eğrilerin benzer olduğu görülmektedir.



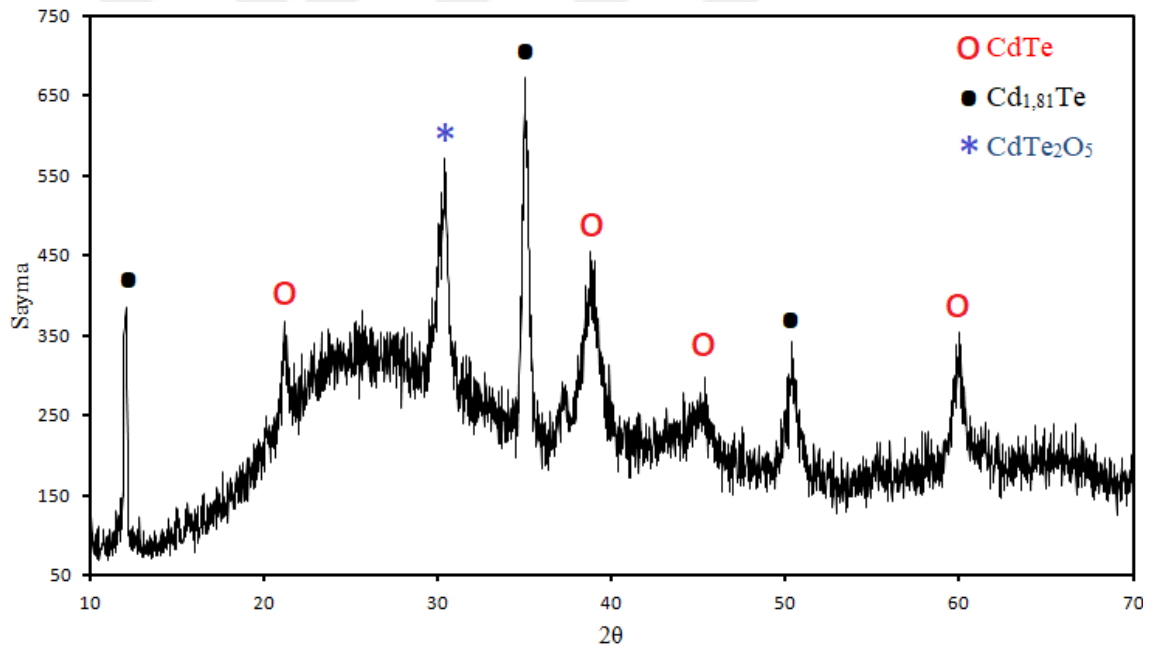
Şekil 4.24. CdTe ince filmlerinin fit edilmiş eğrileri ve Nyquist eğrileri

Tablo 4.7. CdTe ince filmlerinin fitlenmesi sonrasındaki eşdeğer elektronik devre elemanlarının değerleri (Her bir CdTe ince filmi için alınan EIS verilerinin değişmesiyle model elemanlarının değerleri değişmektedir.)

Depozisyon potansiyeli	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{CT} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{pore} ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_c ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	n_1	CPE_{dl} ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$)	n_2	χ^2
-0,4 V	35,01	0,312	0,787	91,2	0,82	3430,0	0,56	$4,18 \times 10^{-5}$
-0,5 V	30,58	0,222	306,1	141,0	0,81	4870,0	0,68	$1,38 \times 10^{-4}$
-0,6 V	32,25	2,64	167,1	25,7	0,86	16,9	0,77	$3,95 \times 10^{-5}$
-0,7 V	40,97	89,39	30,38	37,6	0,82	26,8	0,83	$1,67 \times 10^{-4}$
-0,8 V	41,36	417,7	20,43	24,6	0,87	46,2	0,66	$1,31 \times 10^{-5}$
-0,9 V	46,98	512,6	54,33	70,2	0,93	277,4	$0,13 \times 10^{-4}$	$1,02 \times 10^{-4}$

Son olarak farklı kaplama potansiyellerinde hazırlanan CdTe ince filmlerinin XRD ölçümleri alındı. Şekil 4.25, -0,8 V kaplama potansiyelinde ITO üzerine depozit edilmiş CdTe ince filmine ait, 10° ile 70° arasında değişen 2θ açılarındaki değerlerde alınan XRD görüntüsünü göstermektedir. Depozit edilmiş filmde CdTe'ün çeşitli fazları

vardır. $\text{Cd}_{1,81}\text{Te}$ ve CdTe_2O_5 (Bkz. Şekil 4.25). JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) veri kaynağı, PDF01-083-1320 numaralı veri kartına göre, $12,04^\circ$, $35,06^\circ$ ve $50,40^\circ$ açılarda gözlemlenen pikler, $\text{Cd}_{1,81}\text{Te}$ hekzagonal yapıdaki kristal fazına ait (003), (026) ve (226) difraksiyon düzlemlerinden elde edilmektedir. Buna bağlı olarak örgü parametreleri $a=b=8,37 \text{ \AA}$ ve $c=21,60 \text{ \AA}$ olarak ölçülmüştür. JCPDS veri kaynağına göre, PDF00-019-0193 numaralı veri kartına göre $2\theta=21,18^\circ$, $39,02^\circ$, $45,46^\circ$ ve $60,00^\circ$ açılarda, CdTe hekzagonal fazına ait (100), (110), (200) ve (203) düzlemlerinden elde edilen pikler görülmektedir. Örgü parametreleri $a=b=4,58 \text{ \AA}$ ve $c=7,50 \text{ \AA}$ olarak ölçülmüştür. Gene JCPDS veri kaynağı, PDF00-043-0343 numaralı veri kartına göre, en şiddetli pik $2\theta=30,42^\circ$ açısında, CdTe_2O_5 monoklinik fazında gözlemlenmiştir. Bu pik (006) düzleminde alınmaktadır ve örgü parametreleri ise $a=6,81 \text{ \AA}$, $b=26,88 \text{ \AA}$ ve $c=19,70 \text{ \AA}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.25. -0,8 V kaplama potansiyelinde üretilmiş CdTe ince filmine ait XRD görüntüsü

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

İnce filmleri üretebilmenin birçok tekniği vardır. Kadmiyum tellür (CdTe) ince filmleri 2 elektrotlu elektrodepozisyon yöntemiyle, buharlaştırma yöntemiyle, 3 elektrotlu elektrodepozisyon yöntemiyle, RF magnetronlu püskürtme yöntemiyle, vakumlu ve kapalı alanda süblimleştirme yöntemiyle, sulu çözelti içindeki elektrodepozisyon yöntemiyle, ardışık yüzey yazma yöntemiyle FTO, ITO, Mo folyo altlık üzerine, cam altlık üzerine, esnek Cu folyo altlıklar üzerine, Ni folyo altlıklar gibi altlıklar üzerine kaplanabilmektedir. Bu tez kapsamındaki örnekler ITO kaplı cam altlık üzerine 8 farklı kaplama potansiyelinde kimyasal kaplama yöntemlerinden birisi olan elektrodepozisyon ile elde edildi. CdTe ince filmler 3 elektrotlu, tek adımda birlikte-depozisyon tekniğiyle tek çözelti içerisinde üretildi. Döngüsel voltametri tekniğiyle CdTe'ün elektrodepozisyonu ve reaksiyon mekanizması başarılı şekilde elde edildi.

Üretilen CdTe ince filmlere ait XRD spektrumuna göre, -0,8 V kaplama voltajında depozit edilmiş CdTe ince filmde, CdTe₂O₅ ve Cd_{1,81}Te fazlarının oluştuğu görülmektedir ve oluşan fazların kristal yapısının genel olarak hekzagonal kristal yapıda olduğu belirlendi. İncelenen çalışmalardaki sonuçlara baktığımızda CdTe kübik yapılı olan ince filmlerin olduğu (Chander ve ark., 2016, Luo ve ark., 2016, Akbarnejad ve ark., 2016); kübik yapıda olan ince filmlerin olduğu (Daza ve ark., 2017, Dharmadasa ve ark., 2017, Selvakumar ve ark., 2016, Fathy ve ark., 2015, Salim ve ark., 2015) ve koraloid (mercana benzer) yapıda (Shenouda ve ark., 2015) ince filmler elde edildiği görülmüştür. Dharmadasa ve ark. (2017) ürettikleri ince film örneklerinin XRD sonuçlarından aldıkları pikin (111) yönünde yönlenmiş olduğunu gösterirken; Akbarnejad ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada aynı şekilde elde ettikleri piki (111) düzleminden elde ettiklerini göstermişlerdir. Bu tez kapsamındaki üretilen ince film örneklerinden, hekzagonal yapıdaki Cd_{1,81}Te fazından elde edilen pikler (003), (026) ve (226) difraksiyon düzlemlerinden elde edilirken; bu yapıya ait örgü parametreleri 8,37 Å ve 21,60 Å olarak elde edildi. Benzer şekilde CdTe hekzagonal fazına ait pikler (100), (110), (200) ve (203) düzlemlerinden elde edildi ve bu faza ait parametreler 4,58 Å ve 7,50 Å olarak ölçüldü. Oksit içeren diğer bir faz olan CdTe₂O₅ monoklinik fazına ait elde edilen pik de (006) düzleminden, 2θ=30,42°'lik difraksiyon açısındaki ölçümden elde edilirken, bu faza ait örgü parametreleri 6,81 Å, 26,88 Å ve 19,70 Å

olarak elde edildi. Aynı şekilde, Selvakumar ve ark. (2016) yaptıklarını ölçümler sonucunda kristal parametresini 6,30 Å olarak elde etmişlerdir.

Farklı kaplama potansiyellerinde üretilen ince filmlerin SEM sonuçları CdTe ince filmlerinin yüzey yapısının homojen olduğunu göstermektedir ve EDX sonuçları incelendiği zaman Cd/Te birleşme oranı 0,81 ile 1,09 arasında değiştiği görülmüştür. Razmjoo ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada Cd:Te oranını 1:1 olarak bulmuş ve ürettikleri ince filmlerin sitokiyometrik yapıda olduğunu göstermişlerdir. Bu tez kapsamında, farklı kaplama potansiyellerinde üretilen CdTe ince film örneklerinin SEM görüntülerinden küresel yapıda ve uzun silindirik çubuk şekilli yapılar, çiçeksi yapılara benzeyen yapılar, ince uzun çubuksu yapılar olduğu görüldü. Bu tez çalışmamıza benzer şekilde yapılan, Daza ve ark. (2017) yaptıkları çalışmanın SEM ve AFM ölçümleri sonrasında ürettikleri örneklerin sütun biçimli yapılara sahip olduğunu elde ederken, Salim ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada ürettikleri örneklerin sütun biçiminde yapılara sahip olduğunu göstermişlerdir.

Tavlama, fırınlama, kimyasal dağlama gibi hiçbir işlem yapmadan, vakumsuz ortamda ve oda sıcaklığında, farklı kaplama potansiyellerinde üretilen ince filmlere ait SEM-EDX sonuçlarında oksidasyona bağlı olarak bileşenlerde oksijen olduğu görüldü. Oksijen içeriğindeki artışın, % 15'i geçtikten sonra, ince filmin enerji bant aralığının artmasına sebep olduğu gösterilmiştir (Chavez ve ark., 1996). Bu tez çalışmasındaki EDAX sonuçlarına göre, hazırlanılan CdTe ince filmlerindeki oksijen içeriğinin en fazla % 6,32 olduğu görülmektedir. Bu değer de enerji bant aralığının çok fazla artmasına sebep olmamaktadır.

Farklı kaplanma potansiyellerinde üretilen CdTe ince filmlerinin, Tauc eşitliğiyle hesaplanan enerji bant aralıkları, kaplama potansiyeline bağlı olarak 1,54 eV ile 1,92 eV arasında hesaplandı. Bu değerler de solar enerji spektrumu ile eşleşmektedir. Benzer şekilde, Olusola ve ark. (2017), Daza ve ark. (2017) ve Selvakumar ve ark. (2016) yaptıkları çalışmalarda ürettikleri CdTe ince filminin enerji bant aralıklarını 1,50 eV olarak belirlerken; Razmjoo ve ark. (2017) ve Dharmadasa ve ark. (2016) ise yaptıkları çalışmalarda ürettikleri ince filmlere ait yasak enerji bant aralıklarını 1,45 eV olarak hesaplamışlardır. Chander ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada CdTe ince filmine ait

yasak enerji bant aralıklarını 1,78 eV ile 1,54 eV arasında bulmuşlardır. Salim ve ark. (2015) enerji bant aralıklarını işlem görmemiş CdTe ince filmleri için 1,50 eV ile 1,54 eV arasında bulurken, CdCl₂ ile üretilmiş CdTe ince filmleri için enerji bant aralıklarının 1,46 eV ile 1,51 eV arasında olduğunu göstermiştir. Yapılan CdTe ince film üretimlerinin, hesaplanan enerji bant aralıklarının 1,5 eV ile 2,0 eV arasında değerlerde olması solar enerji spektrumu içinde olduğunun göstergesidir.

Mott-Schottky verileri ve bazı eşitlikler sonucunda üretilen CdTe ince film örneklerinin, $1/C^2$ 'ye karşılık potansiyel grafiklerinden, -0,4 V ile -0,8 V arasındaki potansiyelerde üretilen örneklerin n-tipi olduğu, donör yoğunluklarının $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ile $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ arasında olduğu belirlendi ve -0,9 V kaplama potansiyelinde üretilen örneğin de p-tipi olduğu, akseptör yoğunluğunun da $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ olduğu belirlendi. Bunların yanı sıra, $1/C^2$ -V grafiğinden düz bant potansiyellerinin, -0,4 V ile -0,8 V arasındaki kaplama potansiyellerinde üretilmiş ince filmler için 0,28 V ile 0,60 V arasında olduğu; -0,9 V kaplama potansiyelinde üretilmiş ince film örneğinin de düz bant potansiyelinin -0,30 V olduğu belirlendi. Yapılan diğer çalışmalarda üretilen ince film örneklerinin n-tipi ve p-tipi olduğu (Dharmadasa ve ark., 2017) ve 1,247 mV ile 1,258 mV aralığındaki katodik voltajla üretilen ince film örneklerinin n-tipi, p-tipi ve i-tipi olduğu (Salim ve ark., 2015) gösterilmiştir.

EIS verileri yardımıyla, üretilen CdTe ince filmler için en uygun eşdeğer elektronik devre modellendi. CdTe ile elektrolit sistemi arasındaki en yüksek elektronik yük transferinin -0,5 V kaplama potansiyelinde hazırlanan CdTe ince filmde olduğu belirlendi.

Sonuç olarak, farklı kaplanma potansiyellerinde, vakumsuz ortamda, oda sıcaklığında, tavlama, kimyasal dağlama gibi üretim öncesinde ve sonrasında hiçbir işlem yapılmadan, elektrokimyasal yöntemlerden birisi olan elektrodepozisyon yöntemiyle CdTe ince filmleri üretildi. Üretilen CdTe ince filmlerinin Cd/Te oranı, filmlerin yüzey oluşumları, filmlerin yapısal özellikleri, iletkenlik tipleri, taşıyıcı sayıları, optik özellikleri, yasak enerji band aralıkları ve elektrokimyasal empedans verilerine ait özellikler incelendi. Üretilen CdTe ince filmlerine ait incelenen özelliklerinin kaplama potansiyellerine bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, elektrodepozisyon ile üretilen CdTe

ince filmlerine ait EIS analizleri, enerji bant yapısı ve Mott-Schottky ölçümleri ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu yönden de, bu tez kapsamındaki çalışmamız literatüre katkı sağlayacaktır. Ayrıca, yaptığımız çalışmanın diğer benzer çalışmalardan farkı şu şekilde sıralanabilir: 1) İlk olarak, yapılan çalışmaların hemen hepsi yüksek sıcaklıklarda ve genellikle vakumlu ortamlarda yapılmıştır (yaklaşık ~80 °C). Bu çalışmadaki ince film örnekleri vakumsuz ve oda sıcaklığında hazırlandı. 2) Çalışmalarda elektrolitler hazırlanırken, karıştırmada çeşitli cihazlar kullanıldığı görülürken; bu çalışmada elektrolit hazırlamada karıştırıcı olarak bir cihaz kullanılmamıştır. 3) Deneylerde yapılan kaplamalardaki uygulama süreleri saatlerle belirtilirken, bu çalışmada öncelikle 2 dakikalık bir süre, sonrasında da 8 dakikalık bir kaplama zamanı kullanıldı.

Görülmektedir ki, üretim yöntemi olarak kullanılan elektrodepozisyon ile hazırlanan CdTe ince filmlerinin EIS analizleri, enerji bant yapısı, Mott-Schottky ölçümleri ile ilgili çalışma sayısının sınırlılığı, ince filmlerin hazırlanma şekli, kaplama süreleri, elektrolit hazırlama detayları, ince filmlerin üretim öncesi ve sonrasında işlem görmeden ölçüm yapılması gibi özelliklerden dolayı literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2018.** Solar kelimesinin anlamı. <http://www.nrel.gov/workingwithus/re-solar.html>-(11.10.2018).
- Anonim, 2019.** Güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA). <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>-(05.04.2019).
- Olusola, O.I., Madugu, M.L., Dharmadasa, I.M., 2017.** Investigating the electronic properties of multi-junction ZnS/CdS/CdTe graded bandgap solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 191 (2017): 145–150.
- Olusola, O.I., Madugu, M.L., Ojo, A.A., Dharmadasa, I.M., 2017.** Investigating the effect of GaCl₃ incorporation into the usual CdCl₂ treatment on CdTe-based solar cell device structures. *Current Applied Physics*, 17 (2017): 279–289.
- Daza, L.G., Castro-Rodriguez, R., Martin-Tovar, E.A., Iribarren, A., 2017.** CdTe films grown using a rotating sublimate vapor effusion source in glancing angle deposition mode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 59 (2017) : 23–28.
- Dharmadasa, I.M., Madugu, M.L., Olusola, O.I., Echendu, O.K., Fauzi, F., Diso, D.G., Weerasinghe, A.R., Druffel, T., Dharmadasa, R., Lavery, B., Jasinski, J.B., Krentsel, T.A., Sumanasekera, G., 2017.** Electroplating of CdTe Thin Films from Cadmium Sulphate Precursor and Comparison of Layers Grown by 3-Electrode and 2-Electrode Systems. *Coatings*, 2017: 7–17.
- Razmjoo, O., Bahrololoom, M.E., Najafisayar, P., 2017.** The effect of current density on the composition, structure, morphology and optical properties of galvanostatically electrodeposited nanostructured cadmium telluride films. *Ceramics International*, 43 (2017): 121–127.
- Diso, D.G., Fauzi, F., Echendu, O.K., Olusola, O.I., Dharmadasa, I.M., 2016.** Optimisation of CdTe electrodeposition voltage for development of CdS/CdTe solar cells. *J Mater Sci: Mater Electron*, 27 (2016): 12464–12472.
- Chander, S., Dhaka, M.S., 2016.** Thermal evolution of physical properties of vacuum evaporated polycrystalline CdTe thin films for solar cells. *J Mater Sci: Mater Electron*, 27 (2016): 11961–11973.
- Ojo, A.A., Dharmadasa, I.M., 2016.** The Effect of Fluorine Doping on the Characteristic Behaviour of CdTe. *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, No. 11, (2016): 5728–5738.
- Ojo, A.A., Dharmadasa, I.M., 2016.** 15.3% efficient graded bandgap solar cells fabricated using electroplated CdS and CdTe thin films. *Solar Energy*, 136 (2016): 10–14.
- Luo, H., Ma, L.G., Xie, W.M., Wei, Z.L., Gao, K.G., Zhang, F.M., Wu, X.S., 2016.** Synthesis of CdTe thin films on flexible metal foil by electrodeposition. *Applied Physics A*, 122 (2016): 444.
- Selvakamur, C., Venkatachalam, T., Kumar, E.R., 2016.** Preparation, characterization and ab-initio study of CdSnTe₂ thin films by closed space sublimation technique. *Superlattices and Microstructures*, 90 (2016): 38–44.
- Echendu, O.K., Okeoma, K.B., Oriaku, C.I., Dharmadasa, I.M., 2016.** Electrochemical Deposition of CdTe Semiconductor Thin Films for Solar Cell Application Using Two-Electrode and Three-Electrode Configurations: A Comparative Study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016: 1–8.

- Akbarnejad, E., Ghoranneviss, M., Elahi, A.S., 2016.** Cadmium Telluride Nanostructure Deposition by RF Magnetron Sputtering on Flexible Cu Foils. *J Inorg Organomet Polym*, 26 (2016): 270–275.
- Abdul-Manaf, N.A., Salim, H.I., Madugu, M.L., Olusola, O.I., Dharmadasa, I.M., 2015.** Electro-Plating and Characterisation of CdTe Thin Films Using CdCl₂ as the Cadmium Source. *Energies*, 8 (2015): 10883–10903.
- Fathy, M., Elyamny, S., Mahmoud, S., Kashyout, A.E.B., 2015.** Effect of Thermal and Chemical Treatment on Electrodeposited CdTe Thin Films for Solar Cell Applications. *International Journal of Electrochemical Science*, 10 (2015): 6030–6043.
- Wang, J., Li, Q., Mu, Y., Li, S., Yang, L., Lv, P., Su, S., Liu, T., Fu, W., Yang, H., 2015.** Fabrication of CdTe thin films grown by the two-step electrodeposition technique on Ni foils. *Journal of Alloys and Compounds*, 636 (2015): 97–101.
- Yao, H., Ma, J., Mu, Y., Su, S., Lv, P., Zhang, X., Zhou, L., Li, X., Liu, L., Fu, W., Yang, H., 2015.** CdTe polycrystalline films on Ni foil substrates by screen printing and their photoelectric performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 634 (2015): 19–23.
- Salim, H.I., Patel, V., Abbas, A., Walls, J.M., Dharmadasa, I.M., 2015.** Electrodeposition of CdTe thin films using nitrate precursor for applications in solar cells. *J Mater Sci: Mater Electron*, 26 (2015): 3119–3128.
- Shenouda, A.Y., Sayed, E.S.M.E., 2015.** Electrodeposition, characterization and photo electrochemical properties of CdSe and CdTe. *Ain Shams Engineering Journal*, 6 (2015): 341–346.
- Yao, F., Bansal, R.C., Dong, Z.Y., Saket, R.K., Shakya, J.S., 2011.** Wind Energy and Their Applications: Handbook of Renewable Energy Technology, Editörler: Zobaa, A.F., Bansal, R., Singapore, s. 4–14.
- Seveda, M.S., Rathore, N.S., Kumar, V., 2011.** Bio Fuels: Handbook of Renewable Energy Technology, Editörler: Zobaa, A.F., Bansal, R., Singapore, s. 323–325.
- Kiranben, V.P., Suvin, M.P., 2011.** Ocean and Small Hydro Energy Systems: Handbook of Renewable Energy Technology, Editörler: Zobaa, A.F., Bansal, R., Singapore, s. 435–436.
- Holbert, K.E., Srinivasan, D., 2011.** Solar Energy Systems: Handbook of Renewable Energy Technology, Editörler: Zobaa, A.F., Bansal, R., Singapore, s. 189–201.
- Anonim, 2019.** Stereokimya. [http:// w3.balikesir.edu.tr/~hnamli/okdn6/okdn6.htm](http://w3.balikesir.edu.tr/~hnamli/okdn6/okdn6.htm)-(05.03.2019).
- Anonim, 2008.** Güneş Enerjisi Ders Notları, Uludağ Üniversitesi-Fizik Bölümü, 2008. Bursa.
- Anonim, 2017.** İnce Filmler ve Kaplama Teknikleri. [http:// www.fizikmakaleleri.com/2013/10/ince-filmler-ve-kaplama-teknikleri.html](http://www.fizikmakaleleri.com/2013/10/ince-filmler-ve-kaplama-teknikleri.html)-(16.12.2017).
- Parlak, M., Turan, R., 2011.** İnce Film Güneş Gözelleri. *Bilim ve Teknik*, Haziran (2011): 54–55.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S., 2012.** İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (5): 389 – 401.
- Anonim, 2019.** Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD). [http:// www.k-space.com/applications/mocvd/](http://www.k-space.com/applications/mocvd/)-(20.03.2019).
- Toygun, Ş., Köneçoğlu, G., Kalpaklı, Y., 2013.** General Principles of Sol–Gel. *Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma*, 31 (2013): 456–476.
- Ateş, H., Bahçeci, E., 2015.** Nano Malzemeler için Üretim Yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (2): 483–499.

- Beşergil, B., 2019.** Devitrifikasyon (Devitrification). [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/devitrifikasyon-devitrification.html-\(20.03.2019\)](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/devitrifikasyon-devitrification.html-(20.03.2019)).
- Galperin, Y.M., 2014.** Introduction to Modern Solid State Physics. Department of Physics, P.O. Box 1048 Blindern, Oslo, 469 s.
- Anonim, 2019.** Cyclic Voltammetry. [http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry-\(10.01.2019\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry-(10.01.2019)).
- Balcı, B., Özyol, S., Kurt, M., 2011.** Kalem Grafit Elektrotla C Vitamini Tayini. Kimya Lisans Öğrencileri (Kimyagerlik, Kimya Öğretmenliği, Kimya Mühendisliği) Araştırma Projesi Eğitimi Çalıştayı, 20–28 Temmuz 2011, Kepez, Çanakkale.
- Anonim, 2019.** Chronoamperometry Purpose. [https://www.gamry.com/Framework%20Help/HTML5%20-%20Tripane%20-%20Audience%20A/Content/PE/Experimental_Techniques/Chronoamperometry/Purpose.htm-\(10.04.2019\)](https://www.gamry.com/Framework%20Help/HTML5%20-%20Tripane%20-%20Audience%20A/Content/PE/Experimental_Techniques/Chronoamperometry/Purpose.htm-(10.04.2019)).
- Anonim, 2019.** Mott-Schottky Plot. [https://en.wikipedia.org/wiki/Mott%E2%80%93Schottky_plot-\(10.02.2019\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mott%E2%80%93Schottky_plot-(10.02.2019)).
- Anonim, 2019.** Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. [http://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/-\(05.01.2019\)](http://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/-(05.01.2019)).
- Grigorovici, J.T., Vancu, A., 1966.** Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Phys. Stat. Sol.*, 15 (1966): 627–637.
- Chi, K., Meng, Q.L.X., Liu, L., Ding, D., Yang, H., Fu, W., 2017.** Morphological control and characterization of CdTe microstructure arrays synthesized by one-step electrodeposition. *Mater. Lett.*, 194 (2017): 78–80.
- Li, Q., Tian, L., Chi, K., Yang, H., Sun, M., Fu, W., 2013.** Electrochemical growth and characterization of CdTe nanorod arrays. *Appl. Surf. Sci.*, 270 (2013): 707–711.
- Ojo, A.A., Salim, H.I., Olusola, O.I., Madugu, M.L., Dharmadasa, I.M., 2017.** Effect of thickness: a case study of electrodeposited CdS in CdS/CdTe based photovoltaic devices. *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, 28 (2017): 3254–3263.
- Shan, B., Wu, W., Feng, K., Nan, H., 2016.** Electrodeposition of wurtzite CdTe and the potential dependence of the phase structure. *Mater. Lett.*, 166 (2016): 85–88.
- Dharmadasa, I.M., Madugu, M.L., Olusola, O.I., Echendu, O.K., Fauzi, F., Diso, D.G., Weerasinghe, A.R., Druffel, T., Dharmadasa, R., Lavery, B., Jasinski, J.B., Krentsel, T.A., Sumanasekera, G., 2017.** Electroplating of CdTe Thin Films from Cadmium Sulphate Precursor and Comparison of Layers Grown by 3-Electrode and 2-Electrode Systems. *Coatings*, 7 (2) (2017): 1–17.
- Gómez, H., Henríquez, R., Schrebler, R., Córdova, R., Ramírez, D., Riveros, G., Dalchiele, E.A., 2005.** Electrodeposition of CdTe thin films onto n-Si(1 0 0): nucleation and growth mechanisms. *Electrochim. Acta.*, 50 (3) (2005): 1299–1305.
- Dharmadasa, I.M., Echendu, O.K., Fauzi, F., Abdul-Manaf, N.A., Salim, H.I., Druffel, T., Dharmadasa, R., Lavery, B., 2015.** Effects of CdCl₂ treatment on deep levels in CdTe and their implications on thin film solar cells: a comprehensive photoluminescence study. *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, 26 (2015): 4571–4583.
- Echendu, O.K., Dharmadasa, I.M., 2015.** Graded-Bandgap Solar Cells Using All-Electrodeposited ZnS, CdS and CdTe Thin-Films. *Energies*, 8 (2015): 4416–4435.
- Firat, Y.E., Peksöz, A., 2017.** Electrochemical synthesis of polyaniline/inorganic salt binary nanofiber thin films for electrochromic applications. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28 (2017): 3515–3522.

- Firat, Y.E., Yıldırım, H., Ertürk, K., Peksöz, A., 2017.** Ultrasonic Spray Pyrolysis Deposited Copper Sulphide Thin Films for Solar Cell Applications. *Scanning*, 2017 (2017): 1–8.
- Krol, R.V.D, Goossens, A., Schoonman, J., 1997.** Mott-Schottky analysis of nanometer-scale thin-film anatase TiO₂. *J. Electrochem. Soc.*, 144 (1997): 1723–1727.
- Strzalkowski, I., Joshi, S., Crowell, C.R., 1976.** Dielectric constant and its temperature dependence for GaAs, CdTe, and ZnSe. *Appl. Phys. Lett.*, 28 (1976): 350–352.
- Greenham, N.C., Peng, X., Alivisatos, A.P., 1996.** Charge separation and transport in conjugated-polymer/semiconductor-nanocrystal composites studied by photoluminescence quenching and photoconductivity. *Phys. Rev. B*, 54 (1996): 17628–17637.
- Nobel, D.D., 1959.** Phase equilibria and semiconducting properties of cadmium telluride. *Philips Res. Repts*, 14 (1959): 361–399.
- Colinge, C.A., Jean-Pierre, Colinge, 2002.** Physics of Semiconductor Devices. Kluwer Academic Publishers, Newyork, 2002.
- Sze, S.M., Ng, K.K., 2007.** Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed. Wiley-Interscience: Hoboken, NJ, 2007.
- Kim, J.S., Park, J.H., Lee, J.H., Jo, J., Kim, D.Y., Cho, K., 2007.** Control of the electrode work function and active layer morphology via surface modification of indium tin oxide for high efficiency organic photovoltaics. *Appl. Phys. Lett.*, 91 (2007): 1–4.
- Al-Enizi, A.M., Elzatahry, A.A., Abdullah, A.M., Vinu, A., Iwai, H., Al-Deyab, S.S., 2017.** High electrocatalytic performance of nitrogen-doped carbon nanofiber-supported nickel oxide nanocomposite for methanol oxidation in alkaline medium. *Appl. Surf. Sci.*, 401 (2017): 306–313.
- Wang, J., Lv, P., Mu, Y., Ding, D., Liu, L., Runa, A., Feng, F., Feng, S., Fu, W., Yang, H., 2016.** A novel cage-like CdTe film with enhanced photoelectrochemical performance. *RSC Adv.*, 6 (2016): 43489–43495.
- Chavez, H.A., Beltran, F.J.E., Bon, R.R., Angel, O.Z., Hernandez, J.G., 1996.** Cubic to Hexagonal Phase Transition in CdTe Polycrystalline Thin Films by Oxygen Incorporation. *Solid State Communications*, Vol. 101 (1996): 39–43.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tolga Murat DEMİRİZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırıkkale – 18.11.1984
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Kırıkkale Süleyman Demirel Lisesi (YDA)
Lisans : Uludağ Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/
Fizik Bölümü
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/
Fizik Anabilim Dalı/Atom ve Molekül Fiziği Bilim Dalı/
Lisansa Dayalı Doktora Programı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Sıla Kalite-NDT Uzmanı; İris Osgb-İş Güvenliği
Uzmanı; Burtom Osgb-İş Güvenliği Uzmanı

İletişim (e-posta) : tolgademiriz@hotmail.com

Yayınları : The sensitive control of semiconductor properties of non-
vacuum and electrochemically synthesized CdTe thin
films (Journal of Materials Science: Materials in
Electronics)