

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**CdIn₂Te₄/CdS VE In KATKILI CdTe/CdS İNCE FİLM GÜNEŞ
PİLLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE VERİMİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İBRAHİM KIRBAŞ

DENİZLİ, ARALIK - 2016

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**CdIn₂Te₄/CdS VE In KATKILI CdTe/CdS İNCE FİLM GÜNEŞ
PİLLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE VERİMİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İBRAHİM KIRBAŞ

DENİZLİ, ARALIK - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

İbrahim KIRBAŞ tarafından hazırlanan “**CdIn₂Te₄/CdS VE In KATKILI CdTe/CdS İNCE FİLM GÜNEŞ PİLLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE VERİMİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 09.12.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Rasim KARABACAK

Üye

Doç. Dr. Koray YILMAZ

Pamukkale Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Mustafa Serhan KÜÇÜKA

Dokuz Eylül Üniversitesi

Üye

Prof. Dr. Fethi HALICI

Pamukkale Üniversitesi

Üye

Yrd. Doç. Dr. Habib GÜRBÜZ

Süleyman Demirel Üniversitesi

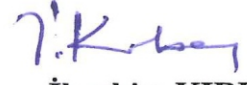
Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 16/12/2016 tarih ve 46/28 sayılı kararıyla onaylanmıştır..

Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından 2014FBE007 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



İbrahim KIRBAŞ

ÖZET

CdIn₂Te₄/CdS VE In KATKILI CdTe/CdS İNCE FİLM GÜNEŞ PİLLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE VERİMİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

İBRAHİM KIRBAŞ

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI:Prof. Dr. RASİM KARABACAK)

DENİZLİ, ARALIK - 2016

Bu çalışmada II-III-VI ve II-VI yarıiletken sınıfına ait CdIn₂Te₄ ve %1 In katkılı CdTe bileşikleri kaynak malzeme olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler ile hem ısısal buharlaştırma yöntemi hem de elektron demeti yöntemleri kullanılarak ITO kaplı cam alttaş üzerine ince filmler elde edilmiştir. İnce filmler üzerine pencere tabakası olarak CdS bileşiği kullanılmış ve güneş pili yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen güneş pillerinin yapısal, elektriksel ve yüzeysel özellikleri çeşitli test metodları ile incelenmiş ve bu özelliklere tavlamanın etkisi araştırılmıştır.

Filmlerin yüzey morfolojisi ve kompozisyonları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri ile incelenmiştir. Yarıiletken filmlerin kristal yapıları X-ışını kırınım ölçümleri (XRD) metodu ile araştırılmıştır. Güneş pillerine ait akım-voltaj karakteristikleri solar simülatör cihazı ile oda sıcaklığında incelenmiştir.

Isısal buharlaştırma yöntemi ve elektron demeti yöntemi ile üretilen tavllanmış ve tavlansız ince film güneş pillerinin yapısı elektriksel özellikleri incelendi. Yüzey pürüzlülüğünün tavlama sonucunda arttığı topaklanmanın azaldığı görülmektedir. Yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı tespit edildi. XRD analizleri ile ortaya çıkan piklerin pozisyonlarından filmlerin polikristal olduğu tespit edildi. Elektriksel özellikleri incelendiğinde ise güneş pili yapısının oluştuğu tespit edildi. Elektron demeti yöntemi ile üretilen tavllanmış güneş pilinin ideal diyot karakteristiği gösterdiği belirlendi. Verimlilik bakımından %1'in altında bir değer elde edildi.

ANAHTAR KELİMELELER: İnce Film Güneş Pili, Isısal Buharlaştırma, Elektron Demeti, CdIn₂Te₄, In Katkılı CdTe

ABSTRACT

INVESTIGATION OF STRUCTURAL PROPERTIES AND EFFICIENCY OF CdIn₂Te₄/CdS AND In DOPED CdTe/CdS THIN FILM SOLAR CELLS

PH.D THESIS

İBRAHİM KIRBAŞ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:Prof. Dr. RASİM KARABACAK)

DENİZLİ, DECEMBER 2016

In this study, II-III-VI and II-VI semiconductor class CdIn₂Te₄ of 1% In doped CdTe compounds were used as the source material. Thin films on the ITO coated glass substrate were obtained with both thermal evaporation method and electron beam methods with these materials. CdS compound was used as window layer on the thin films and structure of solar cells were obtained. The structural, electrical and surface properties of solar cells were investigated with various test methods and the effects of annealing on these properties were also investigated.

The surface morphology and compositions of films were examined by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analysis. The crystal structure of semiconductor films investigated by X-ray diffraction measurements (XRD) method. The current-voltage characteristics of the solar cells were examined by solar simulator at room temperature.

The structural and electrical properties of the solar cells which were produced by thermal evaporation and electron beam methods with annealing and as-deposited. Surface roughness increased and aggregation was decreased with annealing. It was detected that there was no impurity atoms in the structure of solar cells were obtained with the positions of the peaks of XRD analysis. It was determined that the solar cells structure was obtained when the electrical properties were investigated. The annealed solar cells produced by electron beam showed ideal diode characteristic. The efficiency of this solar cells was achieved below 1 %.

KEYWORDS: Thin Films Solar Cells, Thermal Evaporation, Electron Beam, CdIn₂Te₄, In-doped CdTe

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür.....	2
1.2 Yarıiletkenler	4
1.3 II-VI Yarıiletkenler	5
1.4 Katkısız (Saf) Yarıiletkenler	6
1.5 Katkılı Yarıiletkenler	7
1.6 CdTe Özellikleri.....	7
1.7 CdS Özellikleri.....	9
2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ (GÜNEŞ PİLİ)	12
2.1 Giriş.....	12
2.2 Güneş Pili ve Çalışma Prensibi.....	13
2.3 Güneş Pili Türleri.....	14
2.4 Fotovoltaik Teknolojisinin Dünya ve Türkiye'deki Durumu	14
2.5 İnce Film Üretim Teknikleri	16
2.5.1 Buhar Fazda Büyütme	17
2.5.2 Fiziksel buhar biriktirme (PVD)	17
2.5.2.1 Isısal Buharlaştırma.....	18
2.5.2.2 Elektron Demeti (E-Beam)	23
3. YÖNTEM.....	28
3.1 Sinterleme Tüplerinin Temizlenmesi.....	29
3.2 Numunelerin Hazırlanması ve Sinterleme İşlemi	30
3.2.1 CdIn ₂ Te ₄ 'ün hazırlanması ve sinterlenmesi.....	30
3.2.2 %1 In katkılı CdTe'nin hazırlanması ve sinterlenmesi.....	31
3.3 Alttaşların Temizlenmesi	33
3.4 Güneş Pili Üretimi	34
3.4.1 CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pili üretimi	35
3.4.1.1 Isısal buharlaştırma yöntemi ile CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pili üretimi.....	35
3.4.1.2 Elektron demeti (E-beam) yöntemi ile CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pili üretimi	36
3.4.2 %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pili üretimi	38
3.4.2.1 Isısal buharlaştırma yöntemi ile %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pili üretimi	38
3.4.2.2 Elektron demeti (E-beam) yöntemi ile %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pili üretimi.....	39
3.5 Tavlama İşlemi.....	40
3.6 Kontak Alma İşlemi.....	40

3.7	Yüzey Yapısı ve Element Analizi.....	41
3.7.1	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	41
3.7.2	Enerji dağılımlı X-ışınları analizi (EDS)	42
3.7.3	X-ışını kırınımı (XRD) analizi.....	43
4.	DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
4.1	Isısal Buharlaştırma ile Üretilen CdIn ₂ Te ₄ /CdS Güneş Pillerinin Analizi.....	45
4.1.1	CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi	45
4.1.1.1	SEM ve EDS analizi	45
4.1.1.2	XRD analizi.....	51
4.1.2	CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi	52
4.2	Elektron Demeti ile Üretilen CdIn ₂ Te ₄ /CdS Güneş Pillerinin Analizi.....	55
4.2.1	CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi	55
4.2.1.1	SEM ve EDS analizi	55
4.2.1.2	XRD analizi.....	59
4.2.2	CdIn ₂ Te ₄ /CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi	61
4.3	Isısal Buharlaştırma ile Üretilen %1 In katkılı CdTe/CdS Güneş Pillerinin Analizi.....	63
4.3.1	%1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi	63
4.3.1.1	SEM ve EDS analizi	63
4.3.1.2	XRD analizi.....	67
4.3.2	%1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi	69
4.4	Elektron Demeti ile Üretilen %1 In katkılı CdTe/CdS Güneş Pillerinin Analizi.....	70
4.4.1	%1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi	70
4.4.1.1	SEM ve EDS analizi	70
4.4.1.2	XRD analizi.....	74
4.4.2	%1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi	76
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	78
6.	KAYNAKLAR.....	80
7.	ÖZGEÇMİŞ.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Enerji-düzey band diyagramları (a) iletken, (b) yalıtkan, (c) yarıiletken	5
Şekil 1.2: Yarıiletkenler periyodik tablodaki yeri	6
Şekil 1.3: Elementlerin kabuk modeli, (a) Cd (b) Te	8
Şekil 1.4: CdTe kristal yapısı	9
Şekil 1.5: CdS kristal yapısı	11
Şekil 2.1: Güneş pili çalışma prensibi	14
Şekil 2.2: İnce film üretim teknikleri	16
Şekil 2.3: Buhar fazda Büyütme Yöntemleri	17
Şekil 2.4: Isısal buharlaştırma sistemi	20
Şekil 2.5: Paslanmaz çelik vakum çemberi	21
Şekil 2.6: Isısal buharlaştırma sisteminin vakum alt birimleri	21
Şekil 2.7: Isısal buharlaştırma sisteminin elektronik kabin ünitesi	22
Şekil 2.8: Elektron demeti buharlaştırma ünitesi	24
Şekil 2.9: Elektron Demeti (E-beam) Sistemi	25
Şekil 2.10: Vakum odasının iç görünümü	25
Şekil 2.11: E-beam buharlaştırma sisteminin alt birimleri	26
Şekil 2.12: E-beam buharlaştırma sisteminin elektronik kabin ünitesi	27
Şekil 3.1: Güneş Pili Yapısı.	28
Şekil 3.2: Kuartz tüp	29
Şekil 3.3: Protherm marka yatay tüp fırın	31
Şekil 3.4: Protherm marka yatay tüp fırın kontrol ünitesi	32
Şekil 3.5: Protherm marka yatay tüp fırında sinterleme işlemi	32
Şekil 3.6: Protherm marka yatay tüp fırında kuartz tüpün çalkalanması.	33
Şekil 3.7: Külçe halindeki bileşiğin agat havanda toz haline getirilmesi.	33
Şekil 3.8: İndiyum Kalay Oksit (ITO) Kaplı Alttaş	34
Şekil 3.9: ITO Kaplı Alttaşların Saf Su ve Ultrasonik Temizleme Cihazında Temizlenmesi	34
Şekil 3.10: Isısal Buharlaştırma yöntemi ile CdS pencere tabakasının depolanması.	36
Şekil 3.11: Elektron demeti yöntemiyle CdS pencere tabakasının depolanması.	37
Şekil 3.12: Tavlama İşlemi	40
Şekil 3.13: (a) kontak almak için kullanılan bakır maske (b) kontak alma işlemi tamamlanmış numune	41
Şekil 3.14: SEM cihazının şematik görüntüsü	42
Şekil 3.15: SEM'de gelen elektronların numune ile etkileşimi sonucu oluşan saçılmalar	43
Şekil 3.16: Kristal düzleminde X-ışını kırınımının meydana gelmesi	44
Şekil 4.1: (a) IB0 ait SEM görüntüsü (b) IB0_400 ait SEM görüntüsü	46
Şekil 4.2: (a) IB0 alt filme (CdIn ₂ Te ₄) ait EDS spektrumu (b) IB0 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu	47

Şekil 4.3:	(a) IB0_400 alt filme (CdIn_2Te_4) ait EDS spektrumu	
	(b) IB0_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu	48
Şekil 4.4:	$\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ güneş pilinin alan taraması element yerleşimi	50
Şekil 4.5:	$\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ güneş pilinin çizgi tarama analizi grafiği	50
Şekil 4.6:	IB0 ve IB0_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği	51
Şekil 4.7:	İdeal güneş pili akım gerilim eğrisi a) karanlık ve b) ışık	52
Şekil 4.8:	IB0 ve IB0_400 numunelerinin dark I-V karakteristiği	54
Şekil 4.9:	IB0 ve IB0_400 numunelerinin I-V karakteristiği	54
Şekil 4.10:	(a) ED0 ait SEM görüntüsü (b) ED0_400 ait SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.11:	(a) ED0 alt filme (CdIn_2Te_4) ait EDS spektrumu	
	(b) ED0 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu.....	57
Şekil 4.12:	(a) ED0_400 alt filme (CdIn_2Te_4) ait EDS spektrumu	
	(b) ED0_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu.....	58
Şekil 4.13:	ED0 ve ED0_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği.....	60
Şekil 4.14:	ED0 ve ED0_400 numunelerinin dark I-V karakteristiği	62
Şekil 4.15:	ED0 ve ED0_400 numunelerinin I-V karakteristiği	62
Şekil 4.16:	(a) IB1 ait SEM görüntüsü (b) IB1_400 ait SEM görüntüsü	64
Şekil 4.17:	(a) IB1 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu	
	(b) IB1 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu	65
Şekil 4.18:	(a) IB1_400 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu	
	(b) IB1_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu	66
Şekil 4.19:	IB1 ve IB1_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği	68
Şekil 4.20:	SEM görüntülerinde elde edilen tanecik büyüklüğü.....	69
Şekil 4.21:	(a) ED1 ait SEM görüntüsü (b) ED1_400 ait SEM görüntüsü.....	71
Şekil 4.22:	(a) ED1 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu	
	(b) ED1 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu.....	72
Şekil 4.23:	(a) ED1_400 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu	
	(b) ED1_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu.....	73
Şekil 4.24:	ED1 ve ED1_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği.....	75
Şekil 4.25:	SEM görüntülerinde elde edilen tanecik büyüklüğü.....	76
Şekil 4.26:	ED1 ve ED1_400 numunelerinin dark I-V karakteristiği	77
Şekil 4.27:	ED1 ve ED1_400 numunelerinin I-V karakteristiği	77

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Cd ve Te elementlerinin Elektronik ve yapısal özellikleri.....	8
Tablo 1.2: Çinko sülfür CdTe'in yapısal özellikleri	9
Tablo 1.3: CdS'in yapısal özellikleri.....	11
Tablo 1.4: CdS ve CdTe bileşikleri için hesaplanan enerji band aralıkları ile teorik ve deneysel çalışmalar	11
Tablo 2.1: Güneş pili verimlilikleri	15
Tablo 2.2: Malzemeleri oluşturan elementlerin rezerv durumları ve dünyadaki yıllık üretimi	15
Tablo 2.3: E-beam buharlaştırma sisteminin alt birimleri	26
Tablo 3.1: Güneş Pili Üretim Özellikleri.....	28
Tablo 3.2: Isıtma işlemi	30
Tablo 4.1: Hazırlanmış numunelerin isimlendirilmesi	45
Tablo 4.2: CdIn ₂ Te ₄ bileşiğinin EDS sonucu	49
Tablo 4.3: Alt filmlere (CdIn ₂ Te ₄) ait EDS sonucu.....	49
Tablo 4.4: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu	50
Tablo 4.5: IB0 ve IB0_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları	52
Tablo 4.6: Alt filmlere (CdIn ₂ Te ₄) ait EDS sonucu.....	59
Tablo 4.7: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu	59
Tablo 4.8: ED0 ve ED0_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları	61
Tablo 4.9: Alt filmlere (%1 In katkılı CdTe) ait EDS sonucu.....	67
Tablo 4.10: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu.....	67
Tablo 4.11: IB1 ve IB1_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları	69
Tablo 4.12: Alt filmlere (%1 In katkılı CdTe) ait EDS sonucu	74
Tablo 4.13: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu.....	74
Tablo 4.14: ED1 ve ED1_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları	75

SEMBOL LİSTESİ

A	:	Amper
Å	:	Angstrom
AlO₂	:	Alüminyum oksit
cc	:	Santimetreküp
Cd	:	Kadmiyum
CdInTe	:	Kadmiyum indiyum tellür
CdS	:	Kadmiyum sülfür
CdTe	:	Kadmiyum tellür
cm	:	Santimetre
eV	:	Elektrovolt
Fe	:	Demir
g	:	Gram
Ga	:	Galyum
Ge	:	Germanyum
HNO₃	:	Nitrik Asit
In	:	İndiyum
K	:	Kelvin
kV	:	Kilovolt
kW	:	Kilowatt
kWh	:	Kilowatt saat
mm	:	Milimetre
Mo	:	Molibden
MW	:	Megawatt
°C	:	Santigrat
s	:	Saniye
Se	:	Selenyum
Si	:	Silisyum
T	:	Tesla
Ta	:	Tantal
Te	:	Tellür
W	:	Tungsten
µm	:	Mikrometre
Ω	:	Ohm
P_m	:	Maksimum güç (Watt)
I_m	:	Pilin maksimum gücüne karşılık gelen akım (Amper)
V_m	:	Pilin maksimum gücüne karşılık gelen gerilim (Volt)
V_{oc}	:	Açık devre gerilimi (Volt)
I_{sc}	:	Kısa devre akımı (Amper)
P_{in}	:	Pil üzerine gelen ışınım enerjisi (W/m ²)

KISALTMALAR LİSTESİ

AFM	:	Atomik kuvvet mikroskopisi
CVD	:	Kimyasal buhar biriktirme
E-beam	:	Elektron demeti
EBPVD	:	Elektron demeti fiziksel buharlaştırma
EDS	:	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EİE	:	Elektrik idaresi etüd işleri
ITO	:	İndiyum kalay oksit
PV	:	Fotovoltaik
PVD	:	Fiziksel buhar biriktirme
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	:	X ışını kırınımı

ÖNSÖZ

Bu çalışmada benden hiçbir desteğini esirgemeyen, tez konumun tespitinden sonuçlanmasına kadar olan süreçte yardım ve katkılarını sürdüren, beni en doğru şekilde yönlendiren, kendisini örnek aldığım danışman hocam sayın Prof. Dr. Rasim KARABACAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında görüş ve önerilerinden dolayı tez izleme komitesi üyesi hocalarım, sayın Doç. Dr. Koray YILMAZ ve sayın Doç. Dr. Sinan KIVRAK'a, laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Prof. Dr. Orhan KARABULUT'a ve Süleyman Demirel Üniversitesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Murat KALELİ'ye yardımlarını esirgemeyen arkadaşım ve aynı zamanda doktora öğrencisi olan Duygu TAKANOĞLU'na, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi'ndeki çalışma arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Bilal AYDOĞAN ve Öğr. Gör. Muharrem USTA'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına BAP-2014FBE007 nolu proje kapsamında desteğinden dolayı Pamukkale Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarım esnasında; göstermiş olduğu sonsuz destek ve sabrından dolayı sevgili eşim Canan KIRBAŞ'a ve her zaman yanımda olan benden sevgilerini ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İbrahim KIRBAŞ

1. GİRİŞ

İnsanlık yakında ciddi bir enerji krizi ile karşı karşıya kalacaktır. Dünya petrol rezervinin 2050, doğalgaz rezervinin 2070 ve kömür rezervinin de 2150 yılında tükenmesi beklenmektedir. Bu durum, dikkatlerin alternatif enerji kaynaklarının üzerine odaklanmasına sebep olmaktadır (Kelek 1996).

Alternatif enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi çevreyle dost ve uzun süreli bir enerji kaynağıdır. Bu kaynaktan yararlanmak isteyen insanlık, yeni teknolojiler geliştirmeye başlamıştır (Kelek 1996). Bu yüzden geliştirilen güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirmesi nedeni ile önem kazanmıştır. Güneş pilleri arasında da üretiminin kolay ve teknolojisinin ucuz olması nedeni ile ince film güneş pilleri ilgi görmekte ve verimlerinin artırılması yönünde yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Çalışkan 2006).

Son yıllarda teknolojik ve bilimsel çalışmalar için de önemli bir yer tutan yarıiletken ince filmler 1950'li yıllardan beri çeşitli yöntemlerle elde edilmişlerdir (Gölcür 2012). Elde edilen bu yarıiletken malzemeler sayesinde elektronik devre elemanlarının boyutları küçülmüş ve daha verimli hale getirilmiştir. Teknolojinin birçok dalında yer alan yarıiletken malzemelerin üretim tekniklerinin geliştirilmesi veya istenen özelliklerde yeni malzemeler bulunması yeni teknolojik ürünlerin geliştirilmesinde veya mevcut ürünlerin verimlerinin artırılmasında büyük önem taşımaktadır (Altındemir 2011).

Periyodik cetvelin II-VI yarıiletken grubuna dahil bileşiklerin çoğu oldukça iyi elektriksel iletkenliğe sahip olup, enerji band aralığında çok miktarda taşıyıcı iyon sürüklenmesine sahiptir (Takanoglu 2011). Bu yüzden optoelektronik ve fotovoltaik sektöründeki uygulamalarda yoğun olarak incelenmiştir (Lalitha ve diğ. 2007). Bu ailenin en çok çalışılan bileşiklerden biri olan CdTe güneş enerjisi dönüşüm için 1,5 eV civarındaki band aralığına sahip olduğundan güneş pili üretiminde kullanımının uygun olduğunu Fritsche ve diğ. (2002) belirtmişlerdir. CdTe bileşiği ile yapılan ince film güneş pilleri için en uygun yapı p-tipi CdTe ve n-tipi CdS eşleşmesi ile olmuştur

(Rajendra ve Kekuda 2012). II-VI bileşiklerinin yanı sıra, üçlü II-III₂-VI₄ bileşikleri CdIn₂Te₄ gibi bileşikler son yıllarda büyük ilgi toplamaktadır (Jain ve diğ. 2003).

Bu çalışmada ısısal buharlaştırma yöntemi ve elektron demeti (E-beam) yöntemleri ile CdIn₂Te₄/CdS ve %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pilleri üretilmiştir. Üretilen bu pillerin yapısal özelliklerine ve verimliliklerine tavlamanın etkisi incelenmiştir.

1.1 Literatür

Krishnakumar ve diğ. (2013), ince film modülünün üretim maliyetini azaltmak için bugünkü ince film güneş pili araştırmalarının güçlü bir odak noktası olduğunu söylemişlerdir. Maliyeti azaltmak için bir şekilde film kalınlığı azaltarak malzeme tüketiminin minimize edileceğini. Ultra ince CdTe tabakasının da p-i-n yapısı güneş pillerini tasarlamak için yardımcı olacağını belirtmişlerdir. Standart CdTe tabaka kalınlığı normal olarak 4-5 µm aralığındadır. Deneysel çalışmalar yakın aralıklı süblime tekniği kullanılarak CdTe tabaka kalınlığını 1 mikron azaltmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sadece CdTe tabakası kalınlığının azaltılması cihaz performansını olumsuz etkilemiş CdTe katmanında delik oluşumuna neden olduğunu saptamışlardır. Film kalınlığındaki azalmanın 1,5 mikron altına indirilmesini çift katmanlı yapı kullanılarak elde etmişlerdir. CdTe çift kat yapma sürecinde, ilk katı daha yüksek yüzey sıcaklığında (~ 520 °C) biriktirilmiş ve ikinci katı ise (~ 350 °C) düşük yüzey sıcaklığında biriktirerek elde etmişlerdir. Maksimum hücre verimini ~ 3 mikron CdTe katmanı için % 12,5 olarak elde etmişlerdir. Film kalınlığının 1,5 mikron altında daha fazla azaltılmasının cihazın performansını düşüreceğini belirtmişlerdir. Güneş pili verimliliğini ~ 0,8 mikron ve 0,5 mikron CdTe katmanları için sırasıyla % 9,5 ve %5,2 olarak elde etmişlerdir. Kapasite-Voltaj ölçümleri, kalınlığın 1 mikrondan daha az olduğu durumlarda CdTe katmanı etkisinin de ortadan kalktığını tespit etmişlerdir (Krishnakumar ve diğ. 2013).

Salavei ve diğ. (2013) Yüksek ölçeklenebilirlik ve düşük üretim maliyeti nedeniyle, CdTe güneş pillerinin büyük ölçekli enerji üretimi için çok güçlü bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir. Üretilen modül sayısı tellür kıtlığından dolayı sınırlı olduğu durumlarda, CdTe kalınlığını 1,5 mikron azaltılmasının bu

sorunu çözeceğini belirten Salavai ve arkadaşları; kalınlığın azaltılmasıyla arayüzleri düşük kristalizasyon ve malzeme difüzyon farkı etkileri ile ortaya çıkan delik oluşumuna dikkat edilmesi gerektiğini bildirmişleridir. Vakumda buharlaşma tekniği kullanılarak imal edilen CdTe güneş pillerine ait yapmış oldukları çalışmalarında 0,7-6 mikron arasında değişen kalınlığa sahip CdTe'li birçok hücre imal etmişlerdir. Kaplama işlemini bu kalınlıklara göre optimize etmişler ve fiziksel ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. İnce hücrelerin dolgu faktörü ve açık devre gerilimi açısından farklı bir elektriksel davranış göstermediğini, verimlerin ise ince CdTe hücreleri için % 7, standart kalınlığı için % 13,5 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Salavei ve diğ 2013).

Siddiquee ve diğ. (2013) CdTe/CdS heteroeklem güneş pili yapısını imal etmek için, CdS ve CdTe ince filmleri sırasıyla, kimyasal banyo biriktirme (CBD) ve elektrodepozisyon yöntemi ile FTO kaplı iletken cam alttaşlar üzerine biriktirmişlerdir. CdS ve CdTe filmlerin optimize büyüme koşullarını, hem biriktirilmiş hem de tavlanmış filmlerin optik, yapısal ve morfolojik özelliklerini belirlemişlerdir. Optik ölçümler sonucu CdS filmler kızılötesine yakın bölgede daha yüksek geçirgenlik ve düşük soğurma, CdTe filmlerin düşük geçirgenlikli ve daha yüksek absorblama özelliğine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. CdS filmlerinin band aralığı 2,29-2,41 eV ve CdTe filmlerinin ise 1,53-1,55 eV arasında olduğu belirlenmiştir. X-ışınımı kırınımı (XRD) çalışmasında ise CdS ve CdTe filmlerin tercihli yöneliminin polikristal (111) düzlemi olduğunu ortaya koymuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışması ile ikinci film yüzeyinde serbest boşluklu bir yapı oluştuğunu, alt filmin yüzeyi üzerine düzgün dağılmış bir yapıda olduğunu ortaya koymuşlardır. İmal edilen CdTe/CdS yapısının beklenen düzgün bir davranış gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Siddiquee ve diğ. 2013).

Ikhmayies ve Ahmad-Bitar (2013) Çok kristalli kadmiyum tellür (CdTe) ince filmleri, oda sıcaklığında cam yüzeylere vakumda buharlaşma yöntemi ile biriktirmişlerdir. X-ışını kırınım deseni (XRD) incelendiğinde filmlerin baskın çinko kristalli yapıya sahip bir karışım da olduğunu tespit etmişlerdir. Üç farklı bölgede pik yakalamışlardır. Kübik fazın (111) düzleminde olduğunu, ikinci güçlü yansımaların (220) ve zayıf yansımaların da (311) fazda olduklarını tespit etmişlerdir. Temelde tellürün karakteristiğinde oldukça zayıf üç pik gözlemlemişlerdir. Ortalama tane

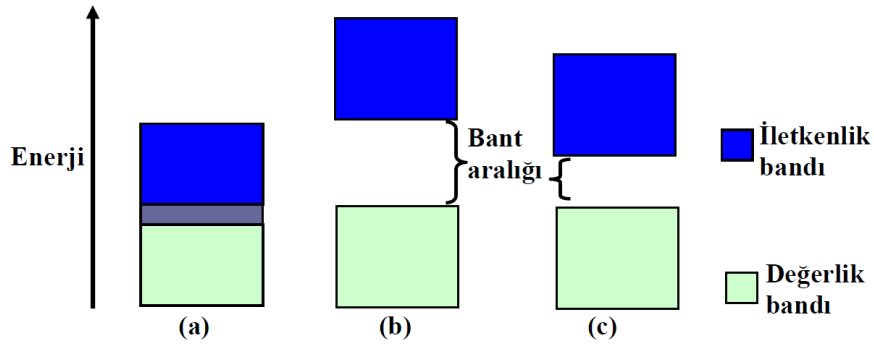
büyükliğini Sherrer formülü kullanılarak hesaplamışlar ve 24 ± 1 nm olduğunu bulmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünde tanecik boyutunun mikrondan küçük olduğunu ve yüzey yapısının düzgün dağılımlı olduğunu belirlemişlerdir. Geçirgenliği λ , 400–1100 nm dalga boyu aralığında ölçmüşler ve optik band aralık enerjisini de $E_g=1,48 \pm 0,01$ eV olarak tespit etmişlerdir

Chander ve Dhaka (2015^a) ise ısısal vakumda buharlaştırma yöntemi ile büyütülmüş ve tavllanmış CdTe ince filmlerin fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Kalınlığı 500 nm olan ince filmleri, indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam üzerine ısısal vakum buharlaştırma tekniği kullanarak büyütmüşler ve takiben 450 °C sıcaklıkta tavlamışlardır. Büyütülen ve tavlanan filmleri, X-ışını kırınımı (XRD), UV-Vis spektrometre ve atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) ölçümlerine tabi tutarak onların optik, elektrik ve yüzey morfolojisi analizlerini yapmışlardır. Filmlerin X-ışını kırınım desenlerinin doğadaki tercih edilen yönü (111) ve tek kristalli kübik faz çinko-blend yapısını ortaya koyduğunu belirlemişlerdir. Optik band aralığı ise sırasıyla tavllanmış ve tavlammamış filmler için 1,62 eV ve 1,52 eV olduğunu tespit etmişlerdir. Son olarak I-V özellikleri incelendiğinde tavllanmış ince filmlerin iletkenliğinde azalma olduğunu, AFM çalışması sonuçlarına göre de tavllanmış filmlerde yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir (Chander ve Dhaka 2015^a).

1.2 Yarıiletkenler

İletkenliği, katkı atomlarının yoğunluğu ve sıcaklık ile değişebilen maddelere yarıiletken madde denmektedir. Bilindiği üzere maddeler iletkenliklerine göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üçe ayrılırlar (Şekil 1.1). Metaller, elektrik ve ısı iletkenlikleri çok iyi olduğu için iletken sınıfı teşkil ederler (Şekil 1.1.a). Isıtılan veya belirli dalga boylarında ışığa maruz bırakılan metaller enerji yayar. Metallerin aksine ametaller yalıtandır (Şekil 1.1.b). İletken maddelerde örtüşen bandlar yalıtkan maddelerde örtüşmez. Yalıtkan özellik gösteren elementlerde enerji düzeyleri elektronlarla hemen hemen dolu durumdadır. Dolayısıyla, elektronların değerlik bandı içinde serbestçe hareket edebilme imkanı olmadığı gibi, bir üst düzeydeki band ile bir örtüşme de olamayacağından, iletkenlik

bandına geçemezler. Kısaca yalıtkanlarda, değerlik bandı ile iletkenlik bandı birbirinden bir band aralığı (band gap) ile ayrılmış durumdadır. Yarıiletkenlerde ise değerlik bandı ile iletkenlik arasında yine bir band aralığı vardır (Şekil 1.1.c). Ancak, bu enerji aralığı elektronların ısı enerjisi olarak geçebilecekleri kadardır. Diğer bir deyişle, yarıiletkenlerin çoğu 0 K de yalıtkan gibi davranırken, 298 K de (oda sıcaklığında) iletken gibi davranır. Dolayısıyla metallerin aksine yarıiletkenlerin iletkenliği sıcaklıkla artar. Sonuç olarak, uyarılarak iletkenlik bandına geçen elektronların geride bıraktığı boşluklar (hole), değerlik bandında kalan elektronların elektrik alanı etkisinde hareket etmelerini sağlar. İletkenlik bandına geçen elektronlar da iletkenliği sağlarlar (Şişman 2006).



Şekil 1.1: Enerji-düzey band diyagramları (a) iletken, (b) yalıtkan, (c) yarıiletken (Şişman 2006).

1.3 II-VI Yarıiletkenler

Yarıiletkenler tek atomlu ve bileşik yarıiletkenler olmak üzere iki sınıfta incelenir.

- Tek atomlu yarıiletkenler: silikon (Si), germanyum (Ge),
- Bileşik Yarıiletkenler

İkili => HgTe, CdTe, ZnSe, CdS

Üçlü => $Cd_xHg_{(1-x)}Te$, $CdIn_2Te_4$

		III	IV	V	VI	VII
		B	C	N	O	F
		Al	Si	P	S	Cl
I	II	Ga	Ge	As	Se	Br
Cu	Zn	In	Sn	Sb	Te	I
Ag	Cd	Tl	Pb	Bi	Po	At
Au	Hg					

III-V Bileşik Yarıiletkenler
GaAs, GaAlAs, InP
II-VI Bileşik Yarıiletkenler
ZnS, CdS

Şekil 1.2: Yarıiletkenler periyodik tablodaki yeri (Sarı 2008).

1.4 Katkısız (Saf) Yarıiletkenler

Katkı atomu (safsızlık) veya örgü kusuru içermeyen yarıiletken malzemeler katkısız (saf) yarıiletken olarak adlandırılırlar. Saf yarıiletkenlerde 0 Kelvin sıcaklığında serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır yani değerlik bandı elektronlar ile tam olarak doldurulmuş iletim bandı ise tamamen boştur. 0 Kelvin sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda ise değerlik bandından iletim bandına geçen elektrona karşılık değerlik bandında bir boşluk oluşur. Yani saf yarıiletkenler de iletim bandındaki elektron konsantrasyonu ile değerlik bandındaki boşluk konsantrasyonu eşittir. Saf yarıiletkenlerde Fermi seviyesinin (0 °K sıcaklıkta değerlik bandının sahip olabileceği en yüksek enerji), enerji aralığının hemen hemen ortasında bulunması ve yasak enerji aralığının küçük olması nedeniyle önemli sayıda elektron değerlik bandından iletim bandına uyarılır. İletim bandında birbirine yakın, çok sayıda boş seviye olduğundan uygulanan küçük bir potansiyel, elektronların enerjilerini kolayca iletim bandına çıkarabilir ve orta büyüklükte bir akım meydana getirebilirler. Katkısız yarıiletkenlere örnek olarak germanyum (Ge) ve silisyum (Si) verilebilir.

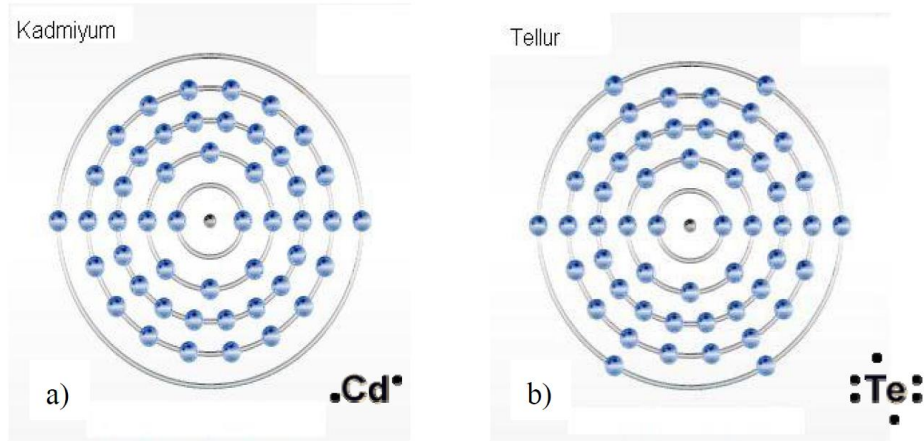
1.5 Katkılı Yarıiletkenler

Bazı yarıiletkenlerde oda sıcaklığında iletkenlik, katkı atomlarının etkisiyle değişir. İletkenliği katkılarla sağlanan yarıiletkenlere katkılı yarıiletken denir. Katkılı bir yarıiletken, doping veya katkılama olarak bilinen bir işlemle, kristale katkı atomları eklenerek saf bir yarıiletkenden elde edilebilir.

Yarıiletkende elektron veren katkı atomuna verici veya donör denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olunan yarıiletkene elektron veya n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları boşluklardır. Verici (donör) tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde izin verilmiş enerji düzeyinin oluşmasına yol açar. Bu enerji düzeyi iletim bandının dibinden biraz aşağıda yerleşmektedir. Yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomlarına alıcı veya akseptör denir ve iletkenliği alıcı tipli katkıyla belirlenen yarıiletken, boşluk veya p-tipi yarıiletken olarak tanımlanır. p-tipi yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları boşluklardır ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır. Alıcı tipli katkı, yarıiletkenin yasak enerji aralığının içinde (değerlik bandının tavanının üstünde) enerji düzeyi (E_a) oluşturur. Alıcı atomlarının iyonlaşmasıyla değerlik bandında serbest boşluklar oluşur (Kara 2008).

1.6 CdTe Özellikleri

Kadmiyum Tellür (CdTe) yüz yılı aşkın bir süredir bilinmekte olup ilk olarak Marottet tarafından 1879 yılında yapılmış, oluşum ısısı Fabre tarafından rapor edilmiş ve 1946 yılında Frerichs ve Warminsky tarafından Cd elementinin ince film kalkojenitlerinin beta ve gamma radyasyonlarına duyarlı olduğunu tespit edilmiştir. 1948 yılında CdTe den fotosel yapılmıştır. CdTe nin üretiminde sıcaklık ve stokiyometrenin değişimi foto pilin performansını etkilemektedir. CdTe yarı iletkeninin yapısını oluşturan Cd periyodik tabloda II. grupta, Te ise periyodik tabloda VI. grupta yer alır. Elementlerin kabuk modeli Şekil 1.3'de gösterilmiştir (Çalışkan 2006).



Şekil 1.3: Elementlerin kabuk modeli, (a) Cd (b) Te

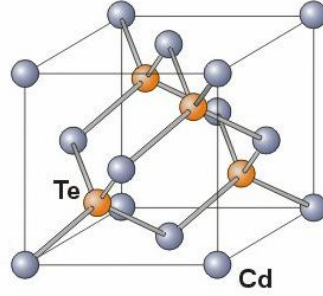
Tablo 1.1: Cd ve Te elementlerinin Elektronik ve yapısal özellikleri(Çalışkan 2006)

Element	Cd	Te
Kristal yapısı	Hekzagonal	Hekzagonal
Elektron Sayısı	48	52
Proton Sayısı	48	52
Değerlik Elektronları	$5s^2$	$5s^2p^4$

Periyodik tablonun II. grubunda bulunan kadmiyum ve VI. grubunda bulunan tellür elementleri aralarında kovalent ve iyonik bağ yaparak kadmiyum tellür (CdTe) bileşimini oluştururlar. Kovalent bağ son yörüngedeki değerlik elektronlarının ortak kullanımıyla kararlı bir hal oluşturan kuvvetli bir bağdır. CdTe iyonik bağ oranı 0,64 olarak verilmektedir. CdTe ince film şeklinde iken ya kübik çinko sülfür yapısında ya da hegzagonal yapıda bulunur. CdTe üzerine termodinamik çalışmalar birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır. CdTe nin erime noktası 1092 ± 1 °C olarak belirlenmiştir (Çalışkan 2006).

Kübik çinko sülfür yapısı (birbiri içine giren iki yüzey merkezli kübik yapı) CdTe kristalinin atmosferik basınçta en kararlı halidir (Sekil 1.4). Birim hücrede dört atom bulunur: Te atomları: $000, 0\frac{11}{22}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ ve $\frac{11}{22}0$ ve Cd atomları: $\frac{111}{444}, \frac{333}{444}, \frac{313}{444}, \frac{331}{444}$. Her atom $\sqrt{3a/4}$ kadar mesafede diğer 4 komşu atomla tetrahedral olarak çevrelenir. Birbirine alternatif sadece Cd'dan (veya Te) oluşan iki farklı (111) yüzeyi vardır. (110) yüzeyi 2 farklı elementi eşit miktarda içerir. {111} doğrultusuna yönelmiş CdTe'in bir yüzeyi sadece Cd atomlarından ({111}A yüzeyi olarak tanımlanır) diğeri Te atomlarından oluşur ({ $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ }B yüzü). Moleküler orandaki değişimlere bağlı olarak

oda sıcaklığında CdTe' in örgü sabiti, $a_o = 6,481 \text{ \AA}$ 'dır. Çinko sülfür yapısı hacimli CdTe'in kararlı bir formu olmasına karşın atmosferik basınçlarda ince film CdTe, Sphalerite ve Wurtzite [(Zn,Fe)S] formundadır. Wurtzite formu çinko sülfür yapısına çok yakındır ve her üçüncü çift {111} düzleminin yanal olarak yer değiştirmesiyle ayrılır (Zencir 2007). Çinko sülfür yapıları CdTe'nin bazı kristal parametreleri Tablo 1.2'de özetlenmiştir.



Şekil 1.4: CdTe kristal yapısı (Ördek 2007).

Tablo 1.2: Çinko sülfür CdTe'in yapısal özellikleri (ZB: ZnS, WZ: (Zn,Fe)S) (Ördek 2007).

Kristal Yapısı	ZB,WZ
Örgü Sabiti (\AA)	6,481
Moleküler Ağırlık (amu)	240,01
Atom sayısı/birim hücre	4
Molar hacmi (cm^3)	40.99
Kristal yoğunluğu (g/cm^3)	5,856 @ 300 K
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1092
Kaynama noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1130

1.7 CdS Özellikleri

Yarıiletken CdS bileşiği periyodik tablonun II. grup elementlerinden Cd ile VI grup elementlerinden S'den oluşan bir II-VI grubu bileşiktir. Özellikle güneş pilleri, fotodetektörler ve alan etkin transistörler gibi aygıtlarda istenen elektrik ve optik özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir (Ebenezer ve diğ. 1988).

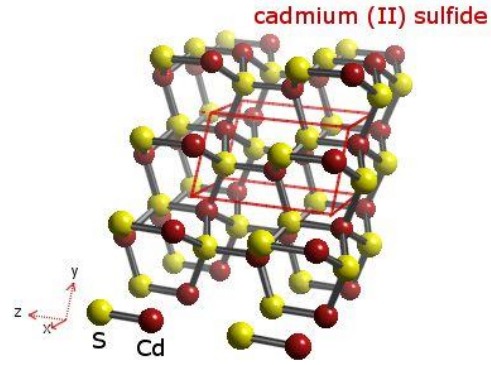
CdS filmlerinin elektrik ve optik özellikleri kübik ve hegzagonal fazda olmasına göre değişir. Düşük özdirence sahip CdS ince filmlerinin ucuz tekniklerle elde edilmesi fotovoltaiik uygulamalar için çok önemlidir (Martinez ve diğ.1997; Vigil ve diğ.1998).

CdS yarıiletken filmi, oda sıcaklığında geniş bir yasak enerji aralığına ve direk band geçişine sahip n tipi bir fotoiletken yarıiletken malzemedir. CdS filminin yasak enerji aralığı değeri 2,42-2,5 eV arasında değişmektedir (Kittel 1996; Chavez ve diğ. 1997; Sahu 1995). Kendisine oranla nispeten daha dar bat aralığına sahip olan CdTe (1,45 eV) gibi yarıiletkenler ile birlikte heteroeklem ince film güneş pillerinde gelen ısınları toplayıp ilettime sokan pencere materyali olarak tercih edilmektedir (Valyomana ve diğ. 1990; Chavez ve diğ. 1997; Galloway ve diğ. 1999).

CdS ince filmlerindeki azınlık taşıyıcılarının ömrü güneş pillerinin üretiminde önemli bir parametredir. n-tipi yarıiletken materyallerde elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan büyük olacağından elektriksel iletkenliğe elektronlardan gelen katkı daha fazla olacaktır.

Güneş pillerinde pencere materyali olarak kullanılacak malzemenin düşük özdirence sahip olması istenir. CdS yarıiletken ince filmlerinin özdirençleri 104 - 108 Ω cm arasında değişmektedir. Yüksek özdirençli CdS filmleri tavlanarak yada katkılama yapılarak özdirençleri düşürülebilir. CdS ince filmleri H₂ atmosferi altında 450 °C de tavlandığında özdirencin 108 Ω cm'den 50 Ω cm'ye düştüğü gözlenmiştir. Çinko veya indiyum katkılıandığında da filmlerin özdirençlerinin düştüğü gözlenmiştir (Süvüt 2005).

CdS ince filmleri hangi teknikle elde edilirse edilsin yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel ilettime sahip olmaları istenir. Yarıiletken CdS ince filmleri yüksek derecede kararlı hegzagonal faz ve kübik faz olmak üzere iki farklı yapısal faz içerir. X-ısnını kırınım desenlerinden elde edilen örgü sabiti hegzagonal fazlı CdS için a=4,136 Å ve c=6,713 Å; Kübik fazlı CdS için a=5,825 Å' dur. Literatürde hegzagonal ve kübik yapının yanı sıra karışık yapıli CdS filmlerinde üretildiği görülmektedir (Kittel 1996; Vazquez luna ve diğ. 1999; Martinez ve diğ. 1997; Bhattacharyya ve diğ. 1996).



Şekil 1.5: CdS kristal yapısı (Web_1)

Tablo 1.3: CdS'in yapısal özellikleri

Kristal Yapısı	Hegzagonal ve Kübik
Moleküler Ağırlık	144,46 g mol ⁻¹
Kristal yoğunluğu (g/cm ³)	4,82 g/cm ³ @ 300 K
Erime noktası (°C)	980 °C
Renk	Sarı veya kahverengi
Fiziksel durum ve görünüm	Katı (Katı toz)
Çözünürlük	Sıcak ve soğuk su içinde çözünmez

Tablo 1.4: CdS ve CdTe bileşikleri için hesaplanan enerji band aralıkları ile teorik ve deneysel çalışmalar (Deligöz 2007; Duan 1998; Zakharov 1994; Madelung 1982).

Madde	Referans	Enerji Band Aralığı Direk (Γ , eV)
CdS	Deney (Deligöz 2007)	1,45
	Teori (Duan 1998)	2,61
	Teori (Zakharov 1994)	1,37- 2,83
	Deney (Madelung 1982)	2,55
CdTe	Deney (Deligöz 2007)	1,88
	Teori (Duan 1998)	1,35
	Teori (Zakharov 1994)	0,80, 1,76
	Deney (Madelung 1982)	1,60, 2,55

2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİ (GÜNEŞ PİLİ)

2.1 Giriş

Fotovoltaik, görünür veya diğer ışık ışınlarına maruz kaldığında, elektriksel gerilim farkı (voltaj) üretimi yapabilme özelliğidir. “Fotovoltaik” sözcüğü, ışık anlamına gelen “foto” ve elektrik anlamına gelen “voltaik” sözcüklerinin birleşmesi ile oluşturulmuştur. Fotovoltaik teknolojisi, yani güneş enerjisini kullanılabilir güce çeviren donanımları açıklamak için kullanılan terimdir.

“Fotovoltaik pil” ise fotovoltaik özellik sonucu elektrik enerjisi üreten yapılardır. Yaygın olarak “Fotovoltaik pil” tanımlaması kullanılmasına rağmen, “güneş pili”, “bariyer tabakalı fotopil”, “kendi kendine üreten pil”, “fototronik fotopil” gibi isimlerle de adlandırılmaktadır. Dolayısıyla güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını kullanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletkenleri içeren ve mevcut yenilenebilir enerji kaynakları arasında en temizlerden birisi olan yapılardır.

Fotovoltaik teknolojisinin avantajlarını ve dezavantajlarını şu şekilde özetleyebiliriz:

Avantajları:

- Kullanılacak enerji kaynağı sonsuz ve bedavadır.
- Sistemi yıpratıcı veya sistemin bozulmasına neden olacak hareket eden parçalar yoktur.
- Sistemi çalışır halde tutmak için çok düşük düzeyde bakım gerekir.
- Sistemler modülerdir ve her yere kolayca monte edilebilir.
- Çalışırken gürültü, zararlı emisyonlar ve kirlenici gazlar açığa çıkarmaz.

Dezavantajları

- Enerji kaynağı dağınık durumda ve sabit değildir.
- Ekonomik enerji depolama sistemleri yoktur.
- Kurulum maliyeti yüksektir
- Geleneksel yakıtlara (özellikle fosil esaslı yakıtlar) göre enerji maliyeti yüksektir.

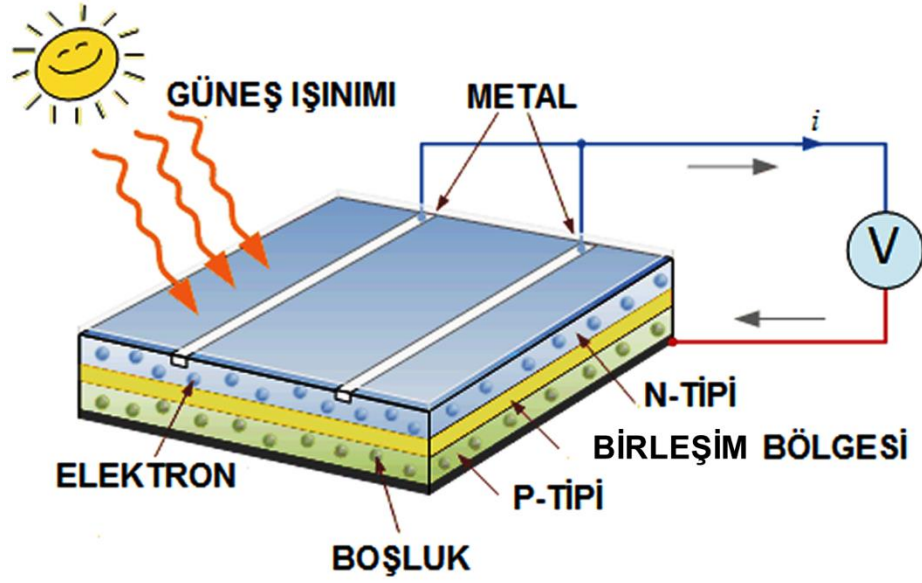
2.2 Güneş Pili ve Çalışma Prensibi

Güneş pillerinin ömürleri ve güç yoğunlukları oldukça yüksektir. Genel olarak 2 yarıiletken tabakadan (p-tipi ve n-tipi) meydana gelir.

P ve n tipi iki yarıiletken bir araya getirilerek oluşturulmuş bir p-n eklemine üzerine yarıiletkenin band aralığına eşit ya da büyük bir foton düşürüldüğünde yarıiletkenin değerlik bandından iletkenlik bandına bir elektron çıkar (Şekil 2.1). Bu çıkan elektron arkasında bir boşluk bırakır yani (e-h) elektron boşluk çifti oluşur. Oluşan bu e-h çifti p-n eklemine arınmış bölgesindeki iç elektrik alanının etkisi ile elektronlar elektrik alanla zıt, boşluklar elektrik alanla aynı yönde hareket ederler.

Bu hareket sonucunda p-n eklemine uçları arasında bir potansiyel fark oluşur. P-N eklemine uçlarını bir devre oluşturacak şekilde bağlanırsa, her gelen fotona karşılık bir e-h çifti oluşacağı için devreden akım geçmeye başlar.

Genellikle silisyum temel malzeme olarak kullanılır. Bu pillerin verimi %15 civarındadır. Güneş pillerinin imalatları kolay olup verimleri sıcaklığa bağlı değildir. En temel problem maliyetlerin yüksek olması ve bir depolama sisteminin gerekliliğidir. Özellikle, elektrik şebekesine çok uzak köylerde, tv istasyonlarında ve uydularda kullanımı uygundur.



Şekil 2.1: Güneş pili çalışma prensibi

2.3 Güneş Pili Türleri

- Kristal Silisyum Güneş Pilleri
- Monokristal Silisyum Güneş Pilleri
- Semikristal (Yarıkristal) Silisyum Güneş Pilleri
- Ribbon Silisyum Güneş Pilleri
- Polikristal Silisyum Güneş Pilleri
- İnce Film Güneş Piller
- Amorf Silisyum Güneş Pilleri

2.4 Fotovoltaik Teknolojisinin Dünya ve Türkiye'deki Durumu

Dünya PV (fotovoltaik) kurulu güç kapasitesi 2010 yılı sonunda, neredeyse Türkiye'nin toplam kurulu gücüne erişmiş, yaklaşık 40000 MW'a ulaşmıştır. Sistem verimleri ise her geçen gün artmaktadır. Dünyada lider konumdaki Almanya, 17000 MW'ı aşan kurulu gücü ile dünya PV kurulu gücünün % 43'ünü kendi ülkesinde kurmuştur.

Türkiye yerli ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından önemli potansiyele sahip bir ülkedir. Elektrik İdaresi Etüd İşleri (EİE) tarafından yapılan çalışmalarda

teknik kapasitesi yıllık 405 milyar kWh, ekonomik potansiyeli 380 milyar kWh olarak tahmin edilen güneşe dayalı elektrik üretim kapasitesi bütünüyle değerlendirmeyi beklemektedir. Güneşten elektrik üretimi konusunda bazı üniversitelerdeki araştırmalar ve sayılı yerel uygulamalar haricinde henüz başlangıç noktasında olduğumuz söylenebilir.

Fotovoltaik güneş pillerinin sürekli gelişimlerine bağlı olarak verimliliklerinin özetlendiği çizgilerin geçerlilik süreleri oldukça kısa olmaktadır. Ancak, karşılaştırılmalı bir kaynak olması amacı ile Fraunhofer Enstitüsü tarafından (ISE PV Charts) yapılan en yüksek verimlilikleri gösteren özet Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Güneş pili verimlilikleri

Fotovoltaik Pilin Cinsi	Alan (cm²)	Verimlilik (%)	Üretilen Birim
Tek Kristalli Silisyum	4,0	24,0	UNSW, Sydney Avustralya
Çok kristalli Silisyum	21,2	17,4	ISE, Freiburg, Almanya
Amorf Silisyum	1,0	14,7	United Solar
Cu/In, Ga)Se ₂	0,4	17,7	NREL, USA
CdTe/CdS		15,8	USA
GaAS Tek kristal	1,0	23,9	K.Univ, Nijmegen Hollanda

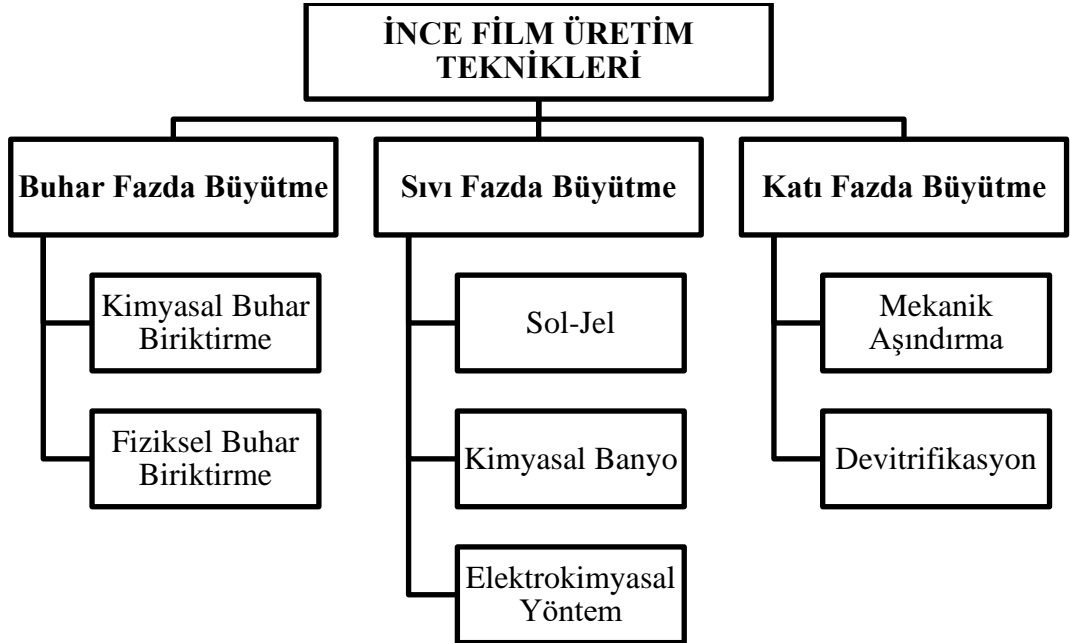
Güneş pili yapımında kullanılan malzemelerin rezerv durumları da oldukça önemli değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Silisyum, doğada en çok bulunan element olması nedeni ile rezerv konusunda geleceğe yönelik bir sorun yoktur. Malzemeleri oluşturan elementlerin rezerv durumları dünyadaki yıllık üretim ve 500MW güç üretimi için gerekli miktar Tablo 2.2’de özetlenmiştir.

Tablo 2.2: Malzemeleri oluşturan elementlerin rezerv durumları ve dünyadaki yıllık üretimi

Element	Dünya Rezervleri Ton	Dünya Yıllık Üretimi Ton	500MW güç için gereken Miktar Ton
Cd	970000	20000	25
Te	39000	404	28
In	5700	180	25
Se	130000	2000	60
Ga	1000000	35	5

2.5 İnce Film Üretim Teknikleri

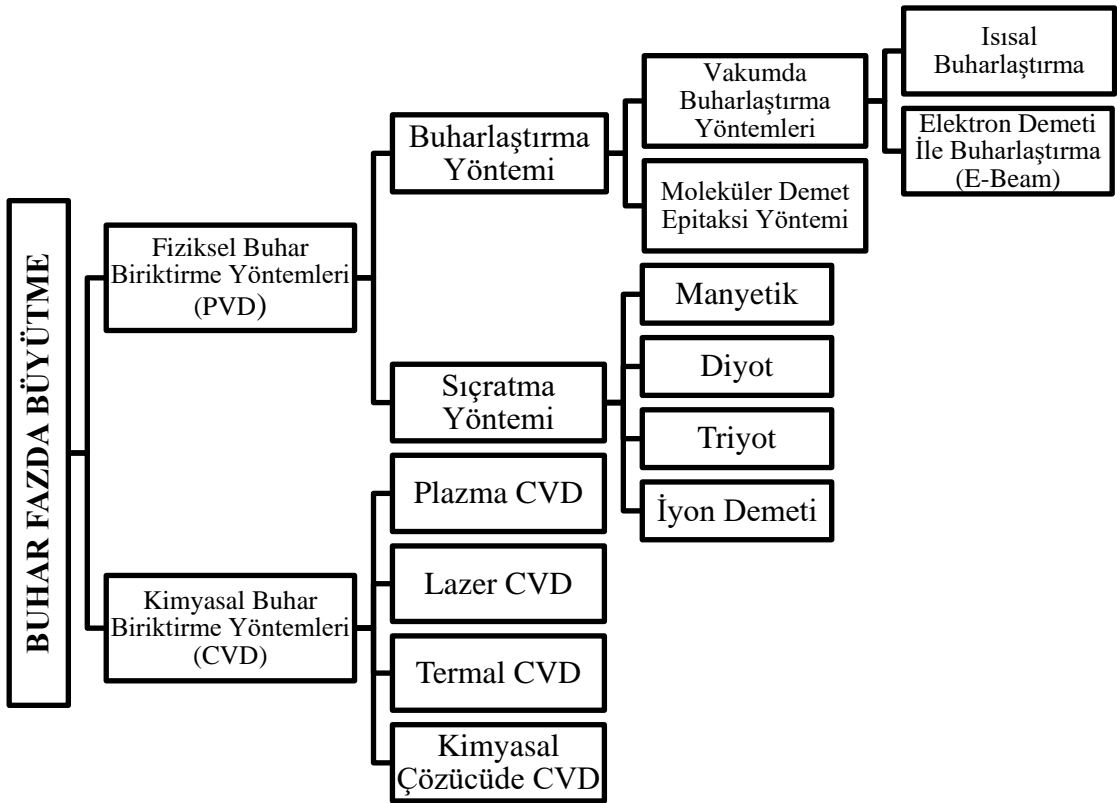
Bilimsel ve endüstriyel çalışmalar için önemli bir yere sahip olan ince filmler, ilk olarak, cam ve seramikler üzerinde dekorasyon olarak kullanılmıştır. Daha sonra, gümüş tuzları kullanılarak, cam yüzeyler üzerinde gümüş filmleri elde edilmiştir. 19.yüzyıldan itibaren bilimsel çalışmalardaki artış, daha yeni ve daha modern ince film elde etme yöntemlerini de beraberinde getirmiştir. İlk ince film, 1838’de “elektroliz” yöntemi ile elde edilmiş olup, daha sonra 1852’de Bunsen “kimyasal reaksiyon” yöntemiyle, Faraday “asal gaz içerisinde buharlaştırma” yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt “Joule ısıtması” yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir. Ancak, ince filmler üzerinde yapılan bu çalışmalar, vakum cihazlarının gelişmesine kadar laboratuvar çalışmaları olarak kalmıştır. Vakum cihazları geliştirildikten sonra modern yöntemlerle elde edilen ince filmlerin kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. Temel olarak ince film üretim teknikleri, malzeme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine imkan sağlayan depolama teknikleri, depolanacak olan malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi çeşitli alt gruplara ayrılmaktadırlar (Sönmezoğlu 2012).



Şekil 2.2: İnce film üretim teknikleri

2.5.1 Buhar Fazda Büyütme

Kaplamaya veya taban malzemeye herhangi bir sınırlama getirmeksizin yüksek kalitede kaplamalar elde etmeyi sağlayan buhar fazında yapılan kaplama teknikleri; kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition - CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition - PVD) olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Buhar fazda büyüme yöntemleri (Takanoğlu 2011).

2.5.2 Fiziksel buhar biriktirme (PVD)

PVD kaplama teknolojisi 19. yüzyılın başlarından beri bilinmesine rağmen, ancak son yıllarda kendisine endüstride bir yer bulabilmiştir. Günümüze kadar geliştirilen farklı kaplama işlemleri ile uygulanan bu tekniğin mekanizması i) Vakumlu ortamda, bir ısıtıcı ile buharlaştırılan kaplayıcı malzeme, kaplanacak olan malzeme üzerinde ince bir film katmanı halinde biriktirilmesi. ii) Katı haldeki ham madde yüksek enerji ile iyonlaştırılmış ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma haline getirilerek, kontrollü olarak, kaplanacak malzemenin üzerine yapıştırılması,

işlemi olarak özetlenebilir. 19. yüzyıl sonlarında özellikle sanayileşmenin artması ile birlikte aşınma dayanımı ciddi anlamda bir ihtiyaç haline gelmiş ve 1960'lı yıllarda günümüzde kullanılan vakum sistemlerin ilk adımları atılmıştır. Yarıiletken endüstrisinin gelişimi ile kendine endüstride yer bulabilen PVD tekniği, günümüzde mikro-elektronik, tıp, dekoratif amaçlı, oksidasyon ve korozyona karşı direnç gerektiren uygulamalar gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır.

Vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan altlık malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanan PVD kaplama yöntemi “Buharlaştırma” ve “Sıçratma” olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Şekil 2.3), (Sönmezoğlu 2012).

2.5.2.1 Isısal Buharlaştırma

Vakum altında ısısal buharlaştırma çalışmaları Edison'un 1884 tarihli akkor halde ısısal buharlaştırma ve film oluşturma patentiyle ortaya çıkmasına rağmen bu yöntem hiçbir uygulamada kullanılmamıştır. O dönemde kaynağın ısıtılması kullanılan vakum malzemelerine zarar verecek nitelikteydi. 1887'de Nahrwold vakumda süblimasyon yoluyla platin film oluşumunu açıkladı ve vakumda ısısal buharlaştırma yöntemini film oluşturmak için kullanan ilk bilim adamı oldu. 1917 yılında ise Stuhlman vakumda ayna oluşturmak için akkor gümüş kablo kullanarak, gümüş çökelttiğini açıkladı (Süvüt 2005).

En basit mantığa sahip olan bu yöntem, kaynak malzemenin sıcaklığının artırılması esasına dayanır. Kaplama işlemi, sarılı bir tel veya açık bir bot yardımı ile kaynak malzemenin buhar fazına geçerek altlık üzerine birikmesi ile gerçekleştirilir. Isısal buharlaştırma sürecinde kaynak malzemeler yaklaşık 10^{-5} torr basınç altında vakum odasında buharlaştırılır ve yoğunlaşmamış alttaş üzerine birikir. Isısal buharlaştırma süreci aynı zamanda vakum buharlaştırma süreci olarak da adlandırılabilir. Isısal buharlaştırma yöntemi ikiye ayrılır. Birincisi rezistans ısıtıcı ile buharlaştırma ikincisi ise elektron demeti ile buharlaştırma yöntemidir (Takanoglu 2011).

Vakum altında ısısız buharlaştırma yöntemiyle;

- Yüksek saflıkta kaynak kullanılarak yüksek saflıkta kaliteli filmler üretilebilir.
- Kaynak malzemenin yüksek saflıkta katı malzeme olması üretim öncesi herhangi bir işleme tabi tutulmaması bu yöntemin avantajlarından biridir.
- Taban üzerine maske uygulanarak film oluşum bölgelerinin belirlenmesine olanak sağlar.
- Çökeltme hızı, takibi ve kontrolü nispeten kolaydır.
- Ucuz üretim tekniklerinden biridir.

Vakum altında buharlaştırma yönteminin dezavantajları;

- Yüksek hacimli vakum bölmelerinde kaynak malzeme ve taban arasında belirgin bir uzaklık olması gerekir.
- Film özelliklerini kontrol etmek için sınırlı sayıda işlem değişkeni vardır.
- Düzgün sabitleme yapılmadığında veya kaynak ve taban arası mesafe yüzünden kötü yüzey kaplama ve geniş alanlarda düzensiz film kalınlığına neden olur.
- Birçok bileşik ve alaşımlar güçlkle oluşturulabilir.
- Kaynak malzemeler buharlaştırma sepetiyle tepkimeye girerek oluşan filmin fiziksel özelliklerini değiştirecek nitelikte bozulmalara yol açabilir (Süvüt 2005).

Rezistans ısıtıcı ile buharlaştırma yöntemi ince film üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemde sıcaklık kontrolü devreye uygulanan akımın ayarlanması veya ısı rezistansı ile sağlanmaktadır.

Sistem; vakum çemberi (tepkime kavanozu), mekanik ve difüzyon pompaları, yüksek akım düşük voltajlı bir devre, hava kompresörü ve bir su soğutma sisteminden oluşur. Şekil 2.4'te kullanılmakta olan Vaksis PVD-Handy ısısal buharlaştırma sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Isısal buharlaştırma sistemi

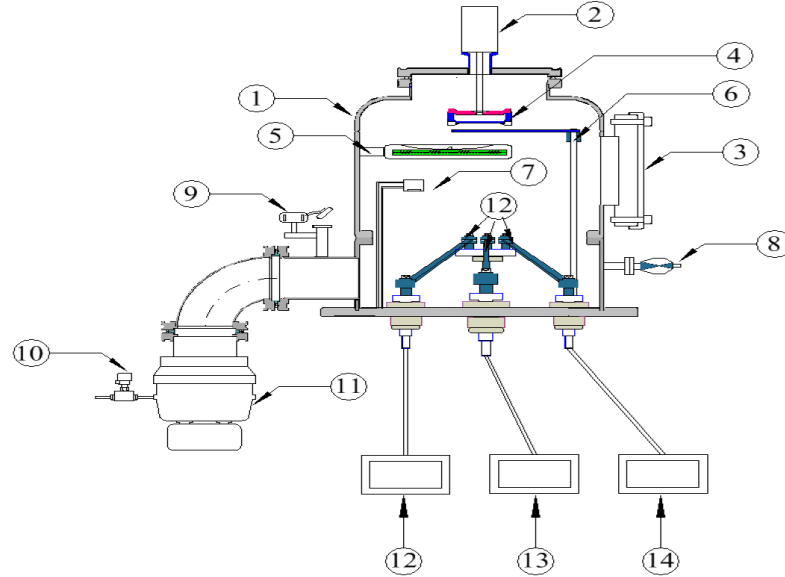
Isısal buharlaştırmada, yüksek buharlaşma sıcaklığına sahip potalar içine yerleştirilmiş kaynak malzeme üzerinden yüksek akım geçirilir. Yüksek akımdan dolayı kaynak malzeme ısınır ve kaynak malzemenin üzerine yerleştirilmiş yüzeylere buharlaşarak yapışmaya başlar. Buharlaşmış malzemeler vakum ortamında hareket ederek alttaş (substrate) üzerine birikmeye başlar. Büyüme sırasında kullanıcı kaplama yapılacak yüzeyin sıcaklığını değiştirerek filmin yapısını değiştirebilir. Isısal buharlaştırma sistem tasarımı üç ana birimden oluşmaktadır:

a) **Vakum Çemberi:** Bu birim pompa istasyonu ve basınç ölçüm sisteminden oluşan vakum çemberidir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Paslanmaz çelik vakum çemberi

b) **Büyütme Kaynakları ve Kontrolleri:** Bu ünite ısısal buharlaştırmayı oluşturan alt öğeleri içerir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Isısal buharlaştırma sisteminin vakum alt birimleri (şematik)

Bunlar; **1)** Vakum çemberi, **2)** DC motor, **3)** ISO 100 gözlem penceresi (View Port), **4)** Alttaş tutucu, **5)** Isıtıcı, **6)** Kesici (shutter), **7)** Kalınlık monitör başlığı, **8)** Basınç ölçüm başlığı (Compact Full Range Gauge Head), **9)** Çemberin atmosfer anahtarı, **10)** Turbo pompa vakum kırma vanası, **11)** Turbo pompa, **12-13-14)** Isısal buharlaştırma güç kaynaklarıdır.

c) **Elektronik Cihaz Kabini:** Bu birim bilgisayar ve büyütme kaynakları kısmında açıklanan öğelerin elektronik kontrollerinden oluşur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Isısal buharlaştırma sisteminin elektronik kabin ünitesi

Burada; **1)** Kontrol bilgisayarı, **2)** Ampermetreler ve ısısal buharlaştırma güç kaynakları göstergeleri, **3)** Turbo pompa kontrolör, **4)** Sıcaklık PID kontrolör, **5)** Ana şalter, **6)** Aç/Kapa Anahtarları

Isısal buharlaşma yönteminde kaplanacak olan kaynak malzeme erime sıcaklığı oldukça yüksek olan metallere (W, Mo, Ta gibi) yapılmış potalara konularak vakum çemberinin içine yerleştirilir. Daha sonra basınç 5×10^{-5} Torr'un altına düşürülür. Basıncı çift pompa kullanarak 10^{-5} Torr veya daha düşük bir seviyeye indirmek mümkündür. İstenilen basınca ulaşıldığında kaynak malzemeyi ısıtma işlemi, malzemenin yerleştirildiği potanın bağlı olduğu iki elektrot arasında elektrik gerilimi uygulanarak sağlanır. Üzerinden geçen yüksek akım (40-100 A) aracılığı ile pota içerisine yerleştirilen malzeme buharlaştırılır.

Vakum çemberi düşük basınçta olduğu için kaynak malzemedan buharlaşarak ayrılan atom ve moleküller bölmenin üst tarafında bulunan döner tabana ulaşır ve homojen film oluşum süreci başlar. Akım değiştirilerek 10-50 Å/s'lik bir hızla

büyütme (deposition) sağlanır. Vakum, moleküllerin bölmede serbestçe yol almasını sağlamak için gereklidir ve buharlaşan malzeme hedef yüzeyde yoğunlaşır. Bu prensip bütün buharlaşma teknolojileri için geçerlidir, sadece kaynak malzemeyi ısıtma yöntemi değişiklik gösterir (Gölcür 2012).

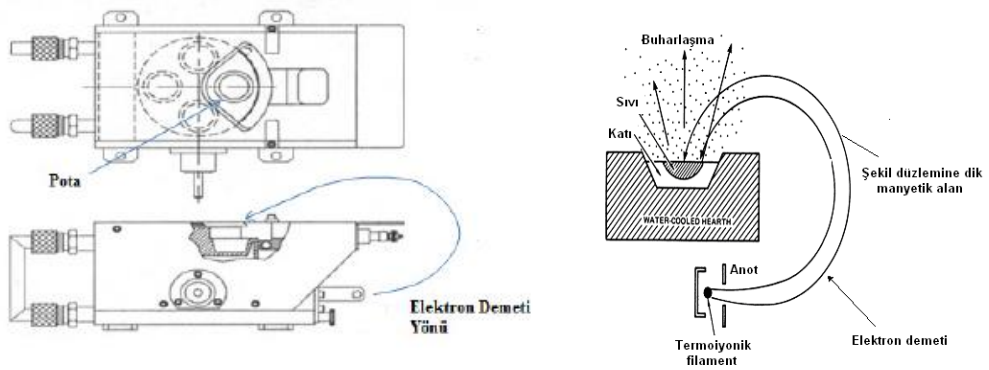
2.5.2.2 Elektron Demeti (E-Beam)

Elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme işlemi, anottaki hedef malzemenin, çok yüksek vakum altında, tungsten flaman ile elektron bombardımanına tutulması ile gerçekleştirilir. Elektron demeti, hedefteki atomların yüzeyden koparak gaz fazına geçmesini sağlar. Buharlaştırılan bu atomlar, vakum çemberi içindeki her noktaya yapışarak ince bir film oluşmasını sağlarlar.

Rezistif olarak ısıtılan buhar kaynakları pota ve ısıtıcılardan bulaşan kalıntılar içerir. Bu da saf filmler elde etmeyi ya da yüksek ergime noktalı malzemelerin buharlaştırılmasını zorlaştırır. Elektron demeti ile buharlaştırma bu dezavantajları ortadan kaldırır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi buharlaştırılacak malzeme su soğutmalı bir gövdenin içindeki potaya yerleştirilir. Erime ve buharlaşma potadaki şarjın elektron demetine maruz kalan yüzey kısmından başladığı için kirlenme veya saflığını kaybetme diğer ısısal buharlaştırma yöntemlerine göre daha az düzeyde olur. Isınan filamandan termioyonik salım ile ayrılan elektronlar direk olarak buhar kaynağı ya da altlığın görüş alanında olmazlar. Filamana uygulanan potansiyel farkı 4-20 kV arasındadır; böylelikle elektronlar ivmelendirilir. Ayrıca manyetik alan uygulamasıyla elektron demetinin yönü 270° kadar bir yay şeklinde saptırılarak buharlaştırılacak malzeme üzerine odaklanır (Aydoğan 2009).

Manyetik alanın diğer bir avantajı da buhar kaynağı üzerinde tarama yapmaya olanak vererek daha homojen bir buharlaşmayı ve erimenin malzeme yüzeyinde kalmasını sağlamaktır. Biriktirilen filmin stokiyometrisinin sağlanması, buhar akısının yönlülüğü, malzemedeki yararlanma verimliliği, ince filmlerin yapısal ve morfolojik kontrolü, yüksek ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerin buharlaştırılabilmesi, yüzeyde tarama yapılarak homojen buharlaştırma yapmanın mümkün olması sistemin diğer avantajlarıdır (Gürlük 2009).

Alttaş ve buharlaştırılacak malzeme (ler) vakum pompalaması başlamadan önce vakum odasına yüklenmiş olur. Vakum odası 10^{-6} Torr ve daha düşük bir seviyeye ulaştığında, sistem büyütme işlemine hazır hale gelir. E-beam ile buharlaştırmada, bir elektron ışını, kaynaktaki malzemenin bölgesel olarak ısınmaya neden olması amaçlanır. Elektron demeti buharlaştırmada malzeme (ler) buharlaşma sıcaklığına ulaşana kadar ısınır. Buharlaştırılan malzeme, vakum içinde hareket eder ve alttaş yüzeyi üzerinde birikir. E-demeti buharlaştırma için tipik bir sistemin bir şematik diyagramı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Elektron demeti buharlaştırma ünitesi (Aydoğan 2009)

Büyütme işlemi boyunca yüzey sıcaklığı ve alttaş sıcaklığı film büyütme yapısı ihtiyaçlarına göre değiştirilebilir. Kullanıcı, buharlaşarak alttaş yüzeyine ulaşan malzeme istenilen oranda kaplandıktan sonra kesici yardımıyla büyütme işlemini durdurabilir.

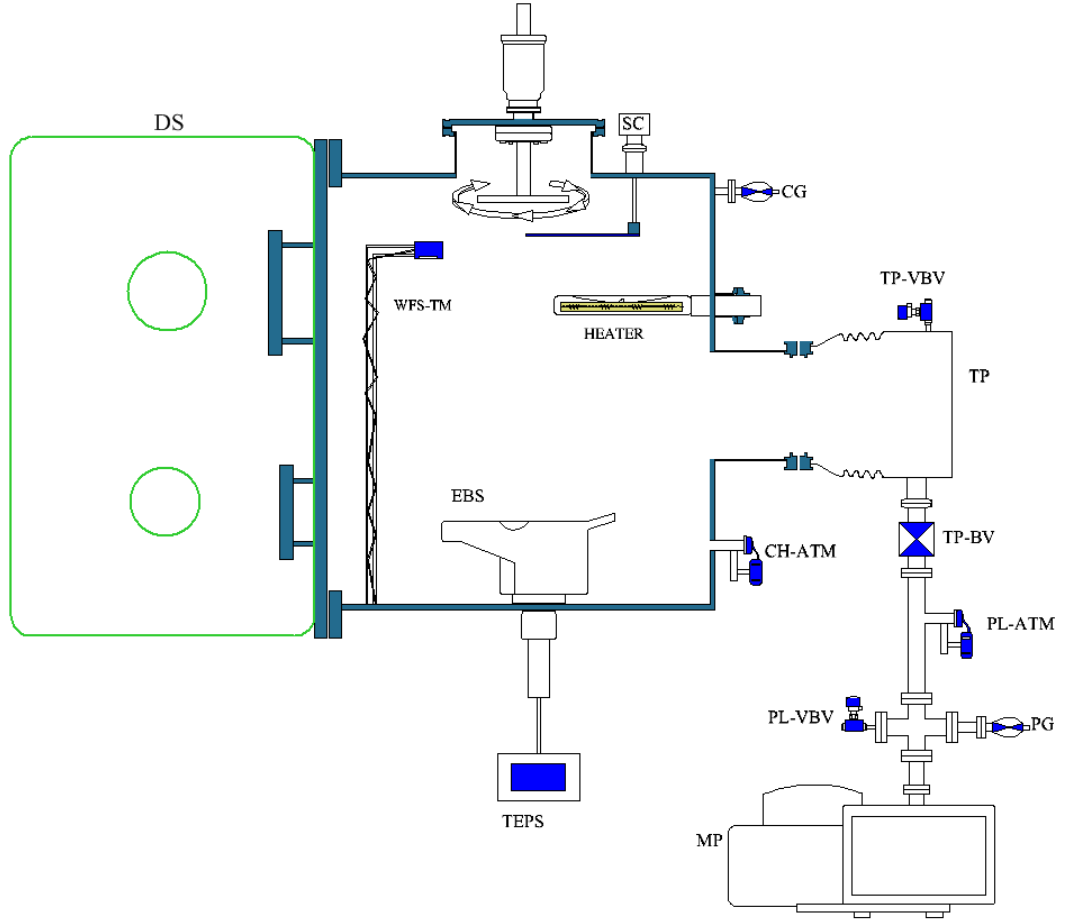
Sistem; her biri 8 cc hacme sahip 4 adet potadan ve tek bir e-beam kaynağından oluşur. Kaplama yönü aşağıdan yukarıya doğrudur. Elektron Demeti (E-beam) buharlaştırma yöntemi, maksimum 4 malzemeyi ard arda tek bir alttaşa kaplayabilmektedir. Tüm prosesler, dokunmatik ekran aracılığıyla kontrol edilebilmektedir. Şekil 2.9'da kullanmakta olan Vaksis Midas Serisi Elektron Demeti sistemi gösterilmiştir. Vakum odası iç bölümü Şekil 2.10'de, E-beam buharlaştırma sisteminin alt birimleri Şekil 2.11'de, buharlaştırma sistemi elektronik kabin ünitesi ise Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Elektron demeti (E-beam) sistemi



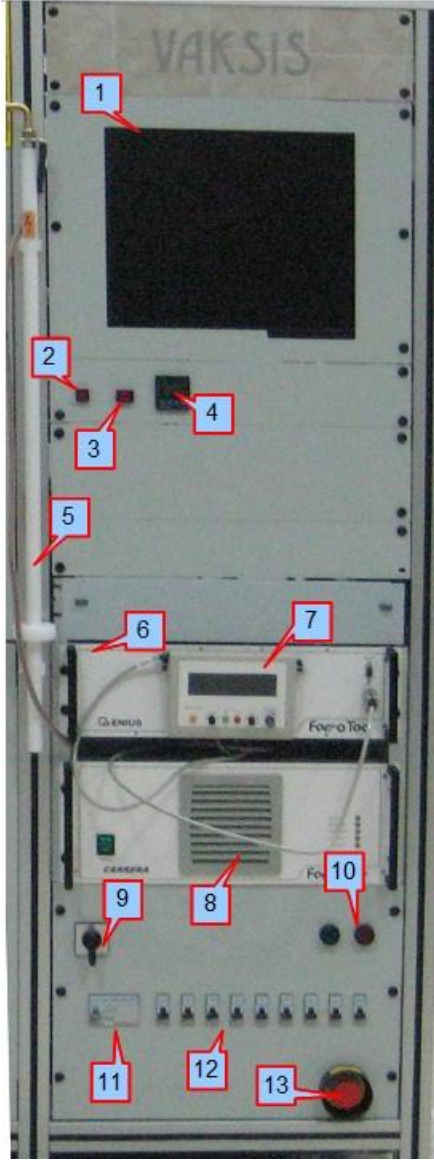
Şekil 2.10: Vakum odasının iç görünümü



Şekil 2.11: E-beam buharlaştırma sisteminin alt birimleri (şematik)

Tablo 2.3: E-beam buharlaştırma sisteminin alt birimleri

CG	Basınç ölçüm başlığı	DS	Kapı anahtarı
MP	Mekanik pompa	TP-BV	Turbo pompa blok vanası
TP	Turbo pompa	TP-VBV	Turbo pompa vakum kırma vanası
TM	Kalınlık monitörü	HEATER	Isıtıcı
EBS	E-beam yüksek voltaj güç kaynağı	TEPS	Su soğutucu
CH-ATM	Çember atmosfer anahtarı	PG	Atmosfer anahtarı
PL-ATM	Boru hattı atmosfer anahtarı	SC	Kesici (Shuter)
WFS	Su akış sensörü		



- 1 Kontrol Bilgisayarı monitörü
- 2 Kontrol Bilgisayarı aç/kapa düğmesi
- 3 Yüksek gerilim güç kilitleme düğmesi
- 4 Sıcaklık PID kontrolörü
- 5 Topraklama çubuğu
- 6 Uzaktan kumanda paneli
- 7 LCD uzaktan kumanda
- 8 E-beam güç kaynağı
- 9 Ana şalter
- 10 Reset butonları
- 11 Kaçak akım rölesi
- 12 Güç dağıtım panosu
- 13 Acil durum butonu

Şekil 2.12: E-beam buharlaştırma sisteminin elektronik kabin ünitesi

3. YÖNTEM

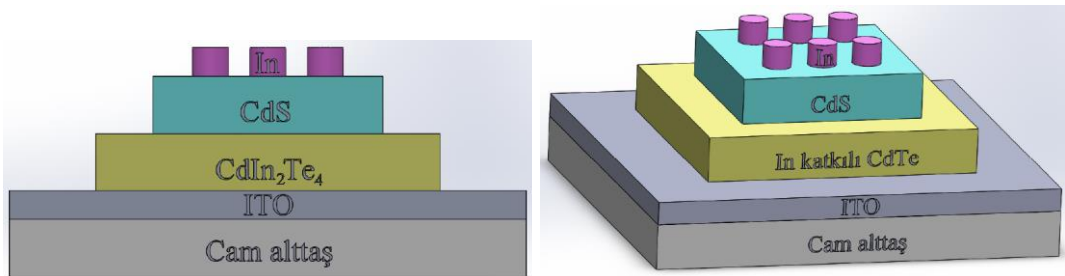
Bu çalışmada iki adet farklı üretim cihazı (Isısal Buharlaştırma ve Elektron Demeti (E-Beam)) kullanılarak $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ ve %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pilleri üretildi.

CdIn_2Te_4 ve %1 In katkılı CdTe ince filmleri, stokiyometrik oranlarda sinterlendikten sonra oluşan polikristalleri kullanılarak ısısal buharlaştırma yöntemi ve elektron demeti yöntemi ile ITO kaplı cam alttaşlar üzerine büyütüldü. Tavlama işlemine tabi tutulduktan sonra pencere tabakası olarak CdS polikristal ince filmi büyütülerek heteroeklem güneş pilleri oluşturuldu. Büyütülen ince film güneş pili numuneleri üzerine yapılacak ölçümler için İndiyum buharlaştırarak metal kontak büyütme işlemleri yapıldı. Son olarak, gerekli ölçümler yapılarak üretilen güneş pillerinin yapısal özellikleri ile verimlilikleri incelendi.

Üretim özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1’de verilmiş olan toplam 8 adet güneş pili üretildi. Güneş pillerinin yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir.

Tablo 3.1: Güneş Pili Üretim Özellikleri

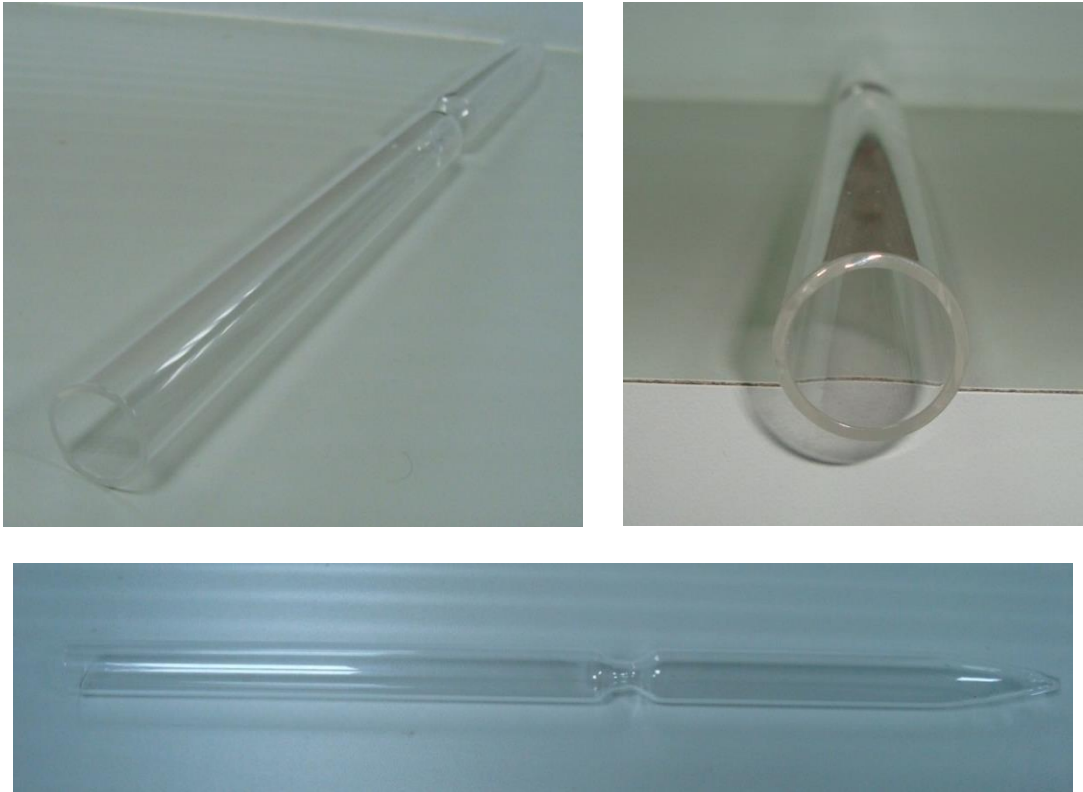
	Isısal Buharlaştırma (PVD) Yöntemi ile İnce Film Depolama	Elektron Demeti Buharlaştırma (EBPVD) Yöntemi ile İnce Film Depolama
Tavlanmamış	CdIn_2Te_4	CdIn_2Te_4
	%1 In katkılı CdTe	%1 In katkılı CdTe
Tavlanmış	CdIn_2Te_4	CdIn_2Te_4
	%1 In katkılı CdTe	%1 In katkılı CdTe



Şekil 3.1: Güneş pili yapısı

3.1 Sinterleme Tüplerinin Temizlenmesi

Toz biçiminde olan malzemeleri ısıtarak topak biçimine getirme işlemine sinterleme denilmektedir. Sinterleme işlemi ile ikili ve üçlü bileşik oluşturmak için sinterleme tüplerine ihtiyaç duyuldu. Yüksek erime sıcaklığına sahip kuartz malzemedan seçilen tüpler 300mm boy 15mm iç çap ve 2 mm et kalınlığına sahiptir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Kuartz tüp

Kuartz tüpler üzerindeki olası toz ve kirlilikten arındırmak için temizleme işlemine tabi tutuldu. Temizlemek için önce ultrasonik temizleme cihazında 30 dakika deterjanlı sıcak su ile bekletilen tüpler daha sonra saf su ile durulandı. Daha sonra %40'lık HNO_3 (Nitirk asit) çözeltisinde 4 saat bekletilen tüpler tekrar detarjanlı sıcak su ile yakanıp saf su ile durulandı. 30 dakika izopropil alkolde bekletilen tüpler son olarakta olası gazları dışarı çıkarmak için 10^{-5} torr vakum altında ısıtıldı.

3.2 Numunelerin Hazırlanması ve Sinterleme İşlemi

Çalışmada üretilmesi düşünülen güneş pilleri için polikristali %99,999 oranında saflığa sahip kadmiyum, tellür ve indiyum malzemeleri kullanılarak $CdIn_2Te_4$ ve % 1 In katkılı CdTe polikristalleri oluşturuldu.

3.2.1 $CdIn_2Te_4$ 'ün hazırlanması ve sinterlenmesi

$CdIn_2Te_4$ bileşiğini oluşturmak üzere, hassas terazi ile 1:2:4 oranında tartılan %99,999 saflıkta kadmiyum (Cd), indiyum (In) ve tellür (Te) elementleri temizlenen kuartz tüpler içerisine yerleştirildi. Tüplerin içerisi, katkı oluşturacak gazları boşaltmak için, 10^{-5} Torr basınca kadar, 2 saat süreyle mekanik pompa ile pompalandı (Takanoğlu 2011). İçerisi pompalanarak boşaltılan tüplerin ağzı cam işleme ocağında eritilerek kapatıldı. Ağzı kapatılan tüpler Protherm marka (PTF 12/50/450) yatay tüp fırın (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) içine yerleştirilerek sinterleme işlemine başlandı (Şekil 3.5). Yatay fırın içerisinde elementlerin buharlaşma sıcaklığının ($1150\text{ }^{\circ}\text{C}$) üzerine yavaş ve kontrollü bir şekilde ısıtılarak bileşiğin oluşması sağlandı (Gölcür 2012). Isıtma işlemine ait ayrıntılı bilgi Tablo 3.2'de verildi. Sıvı halde olan bileşiğin bulunduğu kuartz tüpler ısıtma sırasında çalkalanarak (Şekil 3.6) yapının homojen olması sağlandı. Soğutma işlemi için ise 30°C sıcaklık düşüşü yapılarak 20 dakika bekletildi. Bu şekilde $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye kadar kademeli soğutma yapıldı. Tüp daha sonra oda sıcaklığında kendiliğinden soğumaya bırakıldı. Oluşturulan bileşikler kuartz tüplerin içinden kırılarak külçe halinde çıkartıldı. Tüplerin kırılması ile elde edilen polikristal malzeme agat havan da (Şekil 3.7) dövülerek tekrar toz haline getirildi.

Tablo 3.2: Isıtma işlemi

Isıtma süresi Saat	Ulaşılan sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	Bekleme süresi Saat
1	250	1
4	500	4
12	700	12
16	1000	16
15	1150	24

3.2.2 %1 In katkılı CdTe'nin hazırlanması ve sinterlenmesi

Stokiyometrik oranlarda tartılarak hazırlanan CdTe için 8 gram Cd karşılık 9,08 gram Te ve %1 In katkılıdirmek için 0,17 gram In ilave edilmiş malzemeler 17,25 gram ağırlığa ulaştı. Bu malzemeleri daha önceden temizlenmiş olan kuartz tüplerin içine yerleştirerek tüplerin ağzı kapatıldı. Ağzı kapatılan tüpler yatay tüp fırın içine yerleştirilerek sinterleme işlemine başlandı. Fırın kademeli olarak ısıtıldı. Fırın sıcaklığı 48 saat sonunda 1150 °C ye ulaştığında 24 saat bekletildi (Gölcür 2012). Isıtma işleminde uygulanan süreç daha önce Tablo 3.2'de verilmişti. Belirli aralıklarla fırın içindeki tüpün çalkalanmasıyla homojen bir karışım oluşması sağlandı. Kristal oluşumu sağlandıktan sonra soğutma işlemi de kademeli olarak gerçekleştirildi. Soğutma işlemi için ise 30°C sıcaklık düşüşü yapılarak 20 dakika bekletildi. Bu şekilde 400 °C ye kadar kademeli soğutma yapıldı. Tüp daha sonra oda sıcaklığında kendiliğinden soğumaya bırakıldı. Oda sıcaklığına kadar soğutulan tüplerin kırılması ile elde edilen polikristal malzeme agat havan da dövülerek tekrar toz haline getirildi.



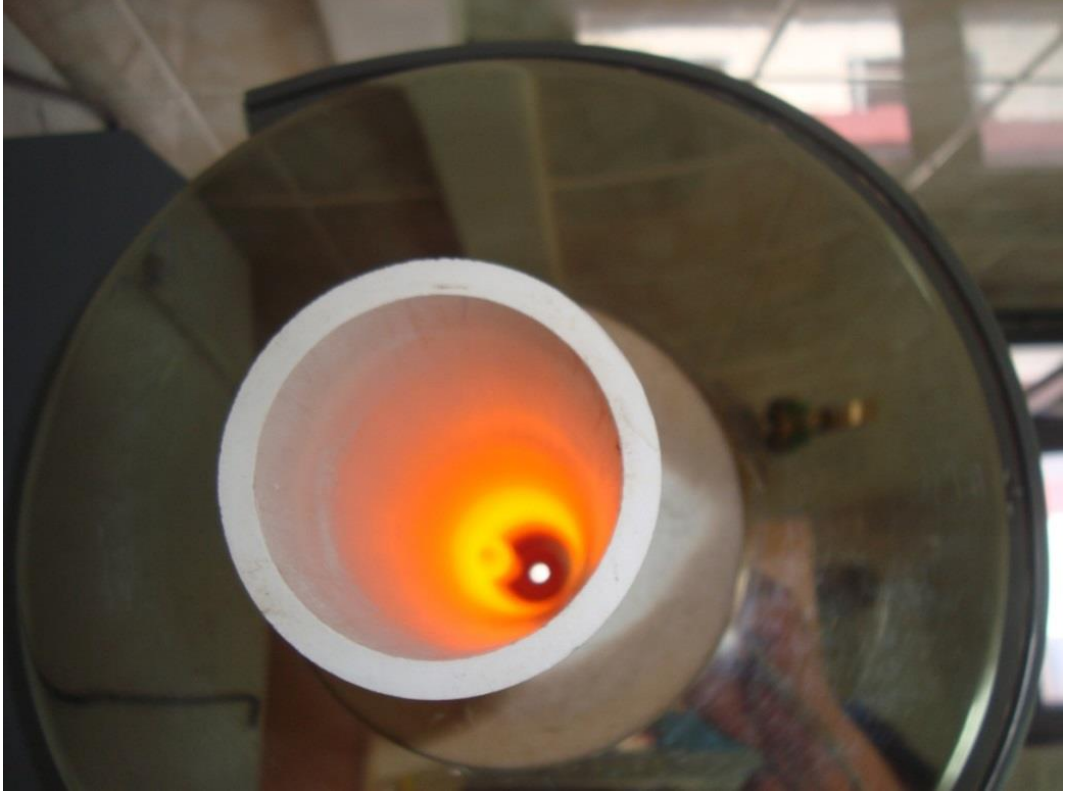
Şekil 3.3: Protherm marka yatay tüp fırın



Şekil 3.4: Protherm marka yatay tüp fırın kontrol nitesi



Şekil 3.5: Protherm marka yatay tüp fırında sinterleme işlemi



Şekil 3.6: Protherm marka yatay tüp fırında kuartz tüpün çalkalanması



Şekil 3.7: Külçe halindeki bileşiğin agat havanda toz haline getirilmesi

3.3 Alttaşların Temizlenmesi

18x18 mm ebatlarında İndiyum Kalay Oksit (ITO) kaplı alttaşlar (Şekil 3.8) öncelikle metanol ile temizlenerek üzerindeki kir, yağ ve parmak izi gibi kalıntılardan arındırıldı. 60 °C saf su içinde 10 dk çalkalanan alttaşlar daha sonra 60 °C deiyonize su bulunan bir beher içinde ultrasonik temizleme cihazına yerleştirildi

(Şekil 3.9). Ultrasonik temizleme cihazında 30 dk bekletilen alttaşlar daha sonra kurutma makinesi yardımıyla kurutulularak büyütme işlemine hazır hale getirildi.



Şekil 3.8: İndiyum kalay oksit (ITO) kaplı alttaş



Şekil 3.9: ITO kaplı alttaşların saf su ve ultrasonik temizleme cihazında temizlenmesi

3.4 Güneş Pili Üretimi

Sinterleme işlemi ve alttaşların temizlenmesi yapıldıktan sonra ince film depolama işlemine geçildi. CdIn_2Te_4 ve %1 In katkılı CdTe'nin film depolama işlemleri Vaksis Pvd-Handy serisi Isısal Buharlaştırma ve Vaksis MIDAS serisi Elektron Demeti (e-beam) sistemleri kullanılarak gerçekleştirildi.

3.4.1 CdIn₂Te₄/CdS güneş pili üretimi

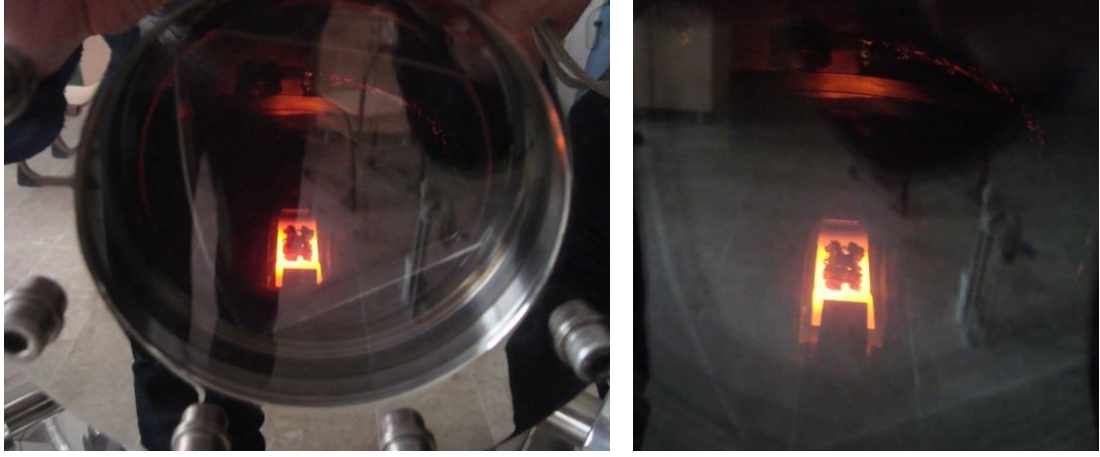
3.4.1.1 Isısal buharlaştırma yöntemi ile CdIn₂Te₄/CdS güneş pili üretimi

CdIn₂Te₄ depolanması

Sinterlendikten sonra Agat havan yardımı ile dövülerek toz haline getirilen katkılı ve katkısız polikristaller tungsten potalar içine yerleştirilerek tutucuya bağlandı. 18x18mm ebatlarında kesilip temizliği yapılan ITO kaplı alttaşların çember içine yerleştirilmesiyle sistem kapatılıp vakuma alınmaya başlandı. Bu esnada alttaş ısıtıcı kapalı, kesici (shutter) kapalı ve akım 0A değerindedir. Vakum çemberinin iç basıncı 5×10^{-5} Torr basınca ulaşıncaya pota üzerinden yavaş yavaş akım geçirilmeye başlandı. Depolamanın daha kaliteli ve homojen yapıda oluşmasına yardımcı olmak için alttaş tutucu sabit hızda döndürüldü. Kalınlık monitöründen buharlaşma hızı sürekli olarak takip edildi. Pota üzerinden geçen akım 37 Amper değerine ulaştığı zaman malzeme kızarmaya başladı ve akım 41 Amper değerinde kesici açılarak depolama işlemi başlatıldı. Malzemenin buharlaşma hızı yaklaşık olarak 15-25 Å/s değerinde tutuldu. Yaklaşık 9 dakika sonunda 1 µm (10kÅ) kalınlığa ulaşıldığında kesici kapatılarak depolama işlemi sonlandırıldı.

CdS depolanması

Cam/ITO/CdIn₂Te₄ yapısı oluştuktan sonra tavlanmış ve tavlanmamış numuneler, üzerine pencere tabakası olan CdS polikristalini depolamak üzere ısısal buharlaştırma sisteminin tutucusuna yerleştirildi. Tungsten pota içine toz haldeki % 99,999 saflıkta CdS konularak sistem kapatıldı. Alttaş tutucunun döndürülmesi ve sistemi vakuma alma işlemi başlatıldı. Vakum çemberi iç basıncı 5×10^{-5} Torr basınca gelinceye kadar vakum işlemi devam etti. Daha sonra pota üzerinde 30 Amper akım geçirilmeye başlandı. Yavaş yavaş akım değeri artırılırken pota üzerinden geçen amper değeri 54 A'e ulaştığında potanın kızardığı gözlemlendi. Akım değeri 82 A değerine ulaştığında kesici açılarak depolama işlemine başlandı. İşlemler sırasında alttaş sıcaklığı 0 °C ve malzemenin buharlaşma hızı yaklaşık olarak 10-15 Å/s değerinde tutuldu. Kalınlık monitöründen kaplama kalınlığı 1 µm (10kÅ) değeri okunduğunda kesici kapatılarak depolama işlemine son verildi. Pencere tabakası olan CdS polikristalinin depolanması yaklaşık 20 dakika sürdü.



Şekil 3.10: Isısal buharlaştırma yöntemi ile CdS pencere tabakasının depolanması

3.4.1.2 Elektron demeti (E-beam) yöntemi ile $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ güneş pili üretimi

CdIn_2Te_4 depolanması

Sinterlenerek toz haline getirdiğimiz polikristaller kuartz potalar içinde E-beam sisteminin su soğutmalı pota kabine yerleştirildi. Daha sonra temizliği yapılmış olan ITO kaplı alttaşlar tutucuya yerleştirildi. Sistem kapatılarak önce mekanik pompa daha sonrada turbo moleküler pompa çalıştırılarak sistem vakuma alınmaya başlandı. 2×10^{-5} Torr vakum değerine ulaşıncaya depolama işlemine geçildi. Depolama işlemi başlangıcında alttaş ısıtıcı kapalı, kesici kapalı ve sisteme herhangi bir akım uygulanmadı. Sistem kumandası ile gerekli ayarlamalar yapıldıktan (elektron akışının pota içerisine düşürülmesi gibi) sonra ilk olarak alttaş döndürücü devreye alındı. Tutucunun alttaşı sürekli olarak döndürmesi, yüzey üzerinde düzenli bir film oluşumu sağlamaktadır. Akım 2 mA'den başlayarak verilmeye başlandı. Buharlaşma hızı ilk anda 75-80 Å/s ile başladı ve bu esnada kesici açılarak alttaş üzerine depolama işlemi başlatıldı. Depolama sırasında buharlaşma hızı 25-35 Å/s değerlerinde tutuldu. Buharlaşma hızının düştüğü anlarda akım değeri maksimum 4 mA'e kadar çıkartıldı. Depolama kalınlığı 1 µm (10kÅ) olduğunda sistem otomatik olarak kesiciyi kapatılarak depolama işlemini sonlandırdı.

CdS depolanması

Tavlanmış ve tavlanmamış Cam/ITO/CdIn₂Te₄ numuneleri E-beam sistemine yerleştirildikten sonra karbon pota içine %99,999 saflıkta CdS polikristali konularak sistem kapatıldı. Vakum değeri 2×10^{-5} Torr olduğunda kesici açılarak depolama işlemine geçildi. Bu esnada alttaş tutucu döndürülerek film yüzeye daha düzgün kaplanması sağlandı. Akım 2 mA'den başlayarak verilmeye başlandı. Buharlaşma hızı ilk anda 120 Å/s ile başladı ve bu esnada kesici açılarak alttaş üzerine depolama işlemi başlatıldı. Depolama sırasında buharlaşma hızı 10-30 Å/s değerlerinde tutuldu. Buharlaşma hızının düştüğü anlarda akım değeri maksimum 6 mA'e kadar çıkartıldı. Depolama kalınlığı 1 µm (10kÅ) olduğunda sistem otomatik olarak kesiciyi kapatarak depolama işlemini sonlandırdı. İşlem süreci yaklaşık 8 dakika sürdü.



Şekil 3.11: Elektron demeti yöntemiyle CdS pencere tabakasının depolanması

3.4.2 %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pili üretimi

3.4.2.1 Isısal buharlaştırma yöntemi ile %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pili üretimi

%1 In katkılı CdTe depolanması

Sinterlendikten sonra Agat havan yardımı ile dövülerek toz haline getirilen katkılı ve katkısız polikristaller tungsten potalar içine yerleştirilerek ısısal buharlaştırma sisteminin tutucusuna bağlandı. ITO kaplı alttaşların çember içine yerleştirilmesiyle sistem kapatılıp vakuma alınmaya başlandı. Bu esnada alttaş ısıtıcı kapalı, kesici (shutter) kapalı ve akım 0A değerindedir. Vakum çemberinin iç basıncı 5×10^{-5} Torr basınca ulaşıncaya pota üzerinden yavaş yavaş akım geçirilmeye başlandı. Pota üzerinden geçen akım 50 Amper değerine ulaştığı zaman malzeme kızarmaya başladı ve akım 71 Amper değerinde kesici açılarak depolama işlemi başlatılmış oldu. Malzemenin buharlaşma hızı yaklaşık olarak 9-13 Å/s değerinde tutuldu. Yaklaşık 10 dakika sonunda 0,7 µm (7kÅ) kalınlığa ulaşıldığında kesici kapatılarak depolama işlemi sonlandırıldı.

CdS depolanması

Cam/ITO/%1 In katkılı CdTe yapısı oluştuktan sonra tavlanmış ve tavlanmamış numuneler, üzerine pencere tabakası olan CdS polikristalini depolamak üzere ısısal buharlaştırma sisteminin tutucusuna yerleştirildi. Tungsten pota içine toz haldeki % 99,999 saflıkta CdS konularak sistem kapatıldı. Alttaş tutucunun döndürülmesi ve sistemi vakuma alma işlemi başlatıldı. Vakum çemberi iç basıncı 5×10^{-5} Torr basınca gelinceye kadar vakum işlemi devam etti. Daha sonra pota üzerinde 30 Amper akım geçirilmeye başlandı. Yavaş yavaş akım değeri artırılırken pota üzerinden geçen amper değeri 70 A'ye ulaştığında potanın kızardığı gözlemlendi. Akım değeri 100 A değerine ulaştığında kesici açılarak depolama işlemine başlandı. İşlemler sırasında alttaş sıcaklığı 0 °C ve malzemenin buharlaşma hızı yaklaşık olarak 10-11 Å/s değerinde tutuldu. Kalınlık monitöründen kaplama kalınlığı 0,7 µm (7kÅ) değeri okunduğunda kesici kapatılarak depolama işlemine son verildi. Pencere tabakası olan CdS polikristalinin depolanması yaklaşık 20 dakika sürdü.

3.4.2.2 Elektron demeti (E-beam) yöntemi ile %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pili üretimi

%1 In katkılı CdTe depolanması

Sinterlenerek toz haline getirdiğimiz polikristaller kuartz potalar içinde E-beam sisteminin su soğutmalı pota kabine yerleştirildi. Daha sonra temizliği yapılmış olan ITO kaplı altaşlar tutucuya yerleştirildi. Sistem kapatılarak önce mekanik pompa daha sonrada turbo moleküler pompa çalıştırılarak sistem vakuma alınmaya başlandı. 2×10^{-5} Torr vakum değerine ulaşıncaya depolama işlemine geçildi. Depolama işlemi başlangıcında altaş ısıtıcı kapalı, kesici kapalı ve sisteme herhangi bir akım uygulanmamaktadır. Daha sonra ilk olarak altaş döndürücü devreye alındı. Akım 2 mA'den başlayarak vermeye başlandı. Depolama sırasında buharlaşma hızı 10-12 Å/s değerlerinde tutuldu. Depolama kalınlığı 0,7 µm (7kÅ) olduğunda sistem otomatik olarak kesiciyi kapatılarak depolama işlemini sonlandırdı.

CdS depolanması

Cam/ITO/CdTe yapısı oluştuktan sonra tavllanmış ve tavlınmamış numuneler, üzerine pencere tabakası olan CdS polikristalini depolamak üzere ısısal buharlaştırma sisteminin tutucusuna yerleştirildi. Tungsten pota içine toz haldeki % 99,999 saflıkta CdS konularak sistem kapatıldı. Altaş tutucunun döndürülmesi ve sistemi vakuma alma işlemi başlatıldı. Vakum çemberi iç basıncı 5×10^{-5} Torr basınca gelinceye kadar vakum işlemi devam etti. Daha sonra pota üzerinde 30 Amper akım geçirilmeye başlandı. Yavaş yavaş akım değeri artırılırken pota üzerinden geçen amper değeri 70 A'e ulaştığında potanın kızardığı gözlemlendi. Akım değeri 100 A değerine ulaştığında kesici açılarak depolama işlemine başlandı. İşlemler sırasında altaş sıcaklığı 0 °C ve malzemenin buharlaşma hızı yaklaşık olarak 10-11 Å/s değerinde tutuldu. Kalınlık monitöründen kaplama kalınlığı 0,7 µm (7kÅ) değeri okunduğunda kesici kapatılarak depolama işlemine son verildi. Pencere tabakası olan CdS polikristalinin depolanması yaklaşık 20 dakika sürdü.

3.5 Tavlama İşlemi

Hem ısısal buharlaştırma hem de elektron demeti buharlaştırma yöntemiyle üretilmiş CdIn_2Te_4 ve %1 In katkılı CdTe depolanmış alttaşlar tavlama işlemine tabi tutulmak üzere $400\text{ }^\circ\text{C}$ ye kadar ısıtılmış (Rajendra ve Kekuda 2012) protherm marka yatay fırın içine yerleştirildi (Şekil 3.12). Tavlama esnasında film üzerinde oksitlenme olmaması için fırın içinden sürekli olarak azot gazı geçirildi. Fırın sıcaklığı $400\text{ }^\circ\text{C}$ tutularak 1 saat tavlama işlemi yapıldı. Daha sonra fırın kapatıldı. Fırın doğal olarak oda sıcaklığına kadar azot gazı ortamında soğutulduktan sonra numuneler çıkartıldı.



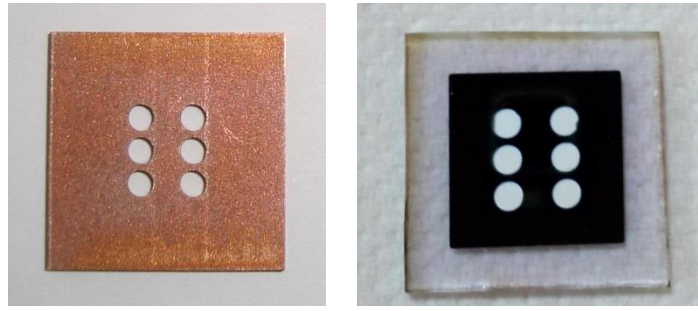
Şekil 3.12: Tavlama işlemi

3.6 Kontak Alma İşlemi

Hem ısısal buharlaştırma yöntemi hem de E-beam yöntemi ile üretilen numunelerin kontak alma işlemi için ısısal buharlaştırma yöntemi kullanılmıştır.

Güneş pili yapısı oluştuktan sonra tavllanmış ve tavlansamış numuneler, üzerine kontak almak için ısısal buharlaştırma sisteminin tutucusuna yerleştirildi.

Tungsten pota içine katı haldeki In konularak sistem kapatıldı. Alttaş tutucunun döndürülmesi ve sistemi vakuma alma işlemi başlatıldı. Vakum çemberi iç basıncı 5×10^{-5} Torr basınca gelinceye kadar vakum işlemi devam etti. Daha sonra pota üzerinde 37 Amper akım geçirilmeye başlandı. Yavaş yavaş akım değeri artırılırken pota üzerinden geçen amper değeri 67 A'ye ulaştığında potanın kızardığı gözlemlendi. Akım değeri 87 A değerine ulaştığında kesici açılarak depolama işlemine başlandı. İşlemler sırasında alttaş sıcaklığı 0 °C ve malzemenin buharlaşma hızı yaklaşık olarak 10-15 Å/s değerinde tutuldu. Kalınlık monitöründen kaplama kalınlığı 0,5 µm (5 kÅ) değeri okunduğunda kesici kapatılarak depolama işlemine son verildi. Kontak alma işleminde In depolanması yaklaşık 20 dakika sürdü.



Şekil 3.13: (a) kontak almak için kullanılan bakır maske (b) kontak alma işlemi tamamlanmış numune

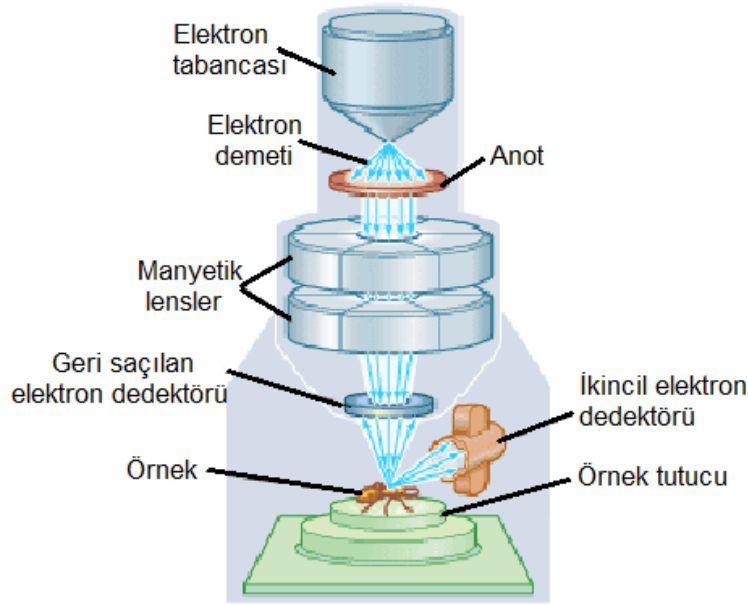
3.7 Yüzey Yapısı ve Element Analizi

Elde edilen ince filmlerin yüzey yapısı ve element analizi için X-ışını spektrometresi (XRD), enerji dağılım spektrometresi (EDS) üniteli taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır

3.7.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

SEM'de görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması ile oluşturulur. Odaklanan elektron demeti numune üzerinde taratılır ve meydana gelen etkileşimler sonucu oluşan yansımalar uygun algılayıcılarla toplanır. Toplanan ışınlar sinyal güçlendiriciden geçtikten sonra katot ışınları tüpünün ekranına aktarılır ve böylece görüntü oluşur (Ceylan 2013).

SEM, optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşur (Şekil 3.14). Optik kolon kısmında; elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası ve ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler bulunur.

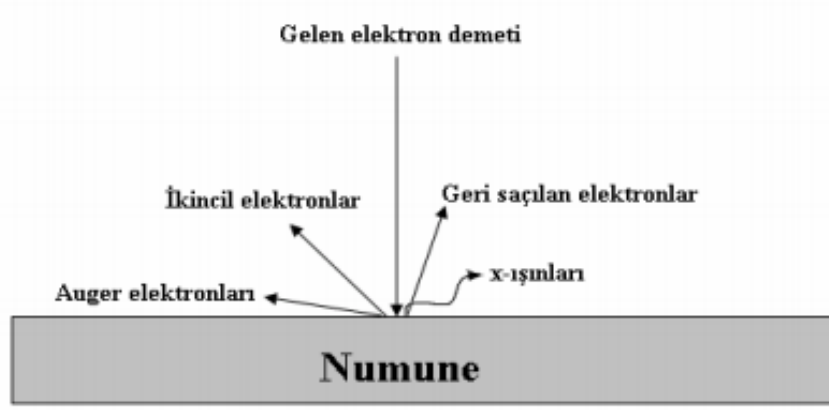


Şekil 3.14: SEM cihazının şematik görüntüsü (Tatar, 2015)

Mercekler elektron demetini numune üzerine odaklamaktadır. Sistem 10^{-4} Pa değerinde vakum altında tutulmaktadır. Elektron demetinin numune ile etkileşimi sonucunda oluşan ışınları ve elektron saçılmalarını toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcı ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır (Ceylan, 2013).

3.7.2 Enerji dağılımlı X-ışınları analizi (EDS)

Bu sistem ile nicel ve nitel gözlem yapılabilmektedir. Bu teknik SEM ile birleştirilmiş haldedir. SEM'de numune üzerine gönderilen elektronlar numune ile olan etkileşimi sonucu bir takım saçılmalar yapar (Şekil 3.15). EDS, elektron bombardımanına uğramış numune üzerinden saçılan X-ışınlarının emisyonu ölçer. X-ışını emisyonunun enerjisi ya da dalga boyu farklılık gösterir. Bu farklılık her bir elemente has değerdedir (Özkan, 2010).



Şekil 3.15: SEM'de gelen elektronların numune ile etkileşimi sonucu oluşan saçılmalar

3.7.3 X-ışını kırınımı (XRD) analizi

X-ışınları kristale zarar vermeksizin kristalin yapısı hakkında bilgi veren bir yöntemdir. X-ışınları dalga boyu yaklaşık 1\AA civarındadır ve bu atomlar arası uzaklık mertebesinde bir değer olduğundan kullanımı çok yaygındır. X-ışınları sayesinde bir kristaldeki düzlemler arası mesafe, tanecik ve kristal yönelimi, tanecik boyutu ve tanecik şekli ile ilgili bilgi sahibi olabiliyoruz.

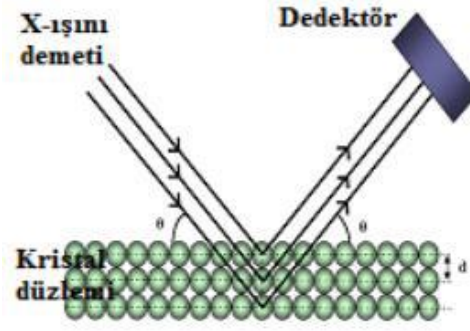
X-ışını kırınımı, kristal düzlemine gönderilen X-ışınlarının kristalin atom düzlemine çarparak yansması olayıdır (Şekil 3.16). Ancak bu yansıma olayı aynalardaki gibi yüzeysel değildir. Atom düzlemlerine ulaşırken aldıkları yollar ve kristal yüzeyine gelme açısı önemlidir. X-ışınları her durumda kırınıma uğramazlar. Kırınım deseni oluşturabilmeleri için Bragg koşulunu sağlamaları gerekir. XRD profili yardımı ile düzlemler arası uzaklık (d) ve kafes sabiti (a) Bragg yasası olarak bilinen aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilir.

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (3.1)$$

Burada; λ , kullanılan X-ışını dalga boyu; d , kafes aralığı; θ , Bragg's açısıdır. Kübik kristal için düzlem-aralık eşitliği aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2+k^2+l^2)}{a^2} \quad (3.2)$$

Burada; $(h\ k\ l)$ düzlemlerin Miller indisleridir.



Şekil 3.16: Kristal düzleminde X-ışını kırınımının meydana gelmesi

XRD verileri ile ince filmlerin tanecik büyüklükleri aşağıda verilen Scherrer formülü kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.3)$$

Burada; D , kristal büyüklüğü; λ , kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu; β , radyan cinsinden kırınım pikinin yarı maksimum genişliği, θ , XRD pikinin Bragg kırınım açısı ve k , tanecik büyüklüğü hesaplanan film ile ilgili bir sabittir (El-nahass ve diğ. 2014)

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Filmlerin yüzey morfolojisi ve kompozisyonları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri QUANTA (FEG-250) modeli ile alındı. X-ışını kırınım ölçümleri BRUKER (D8 ADVANCE) XRD sistemi kullanarak alındı. Güneş pillerine ait akım-voltaj karakteristikleri Solar Light XPS300 solar simülatör, Solar Light Radiometre PMA2100 ve Keithley 2400 Sourcemeter cihazları yarımıyla 4 sun (4000 W/m^2) altında AM0 koşullarında oda sıcaklığında incelendi.

Tablo 4.1: Hazırlanmış numunelerin isimlendirilmesi

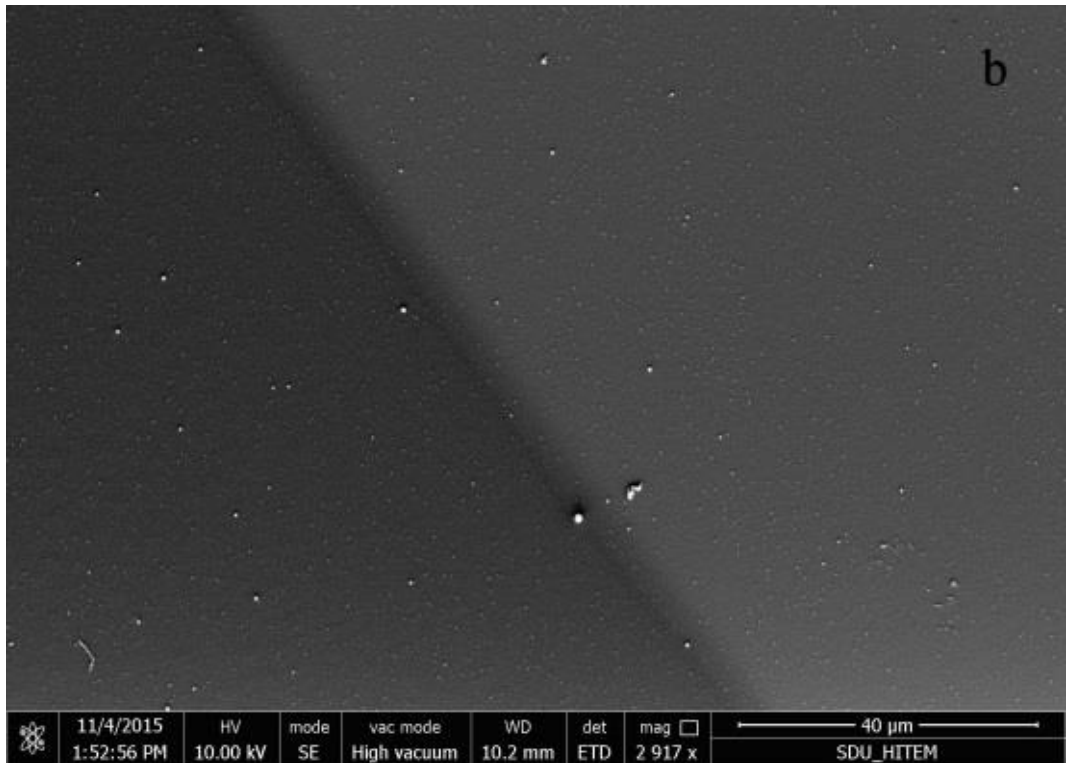
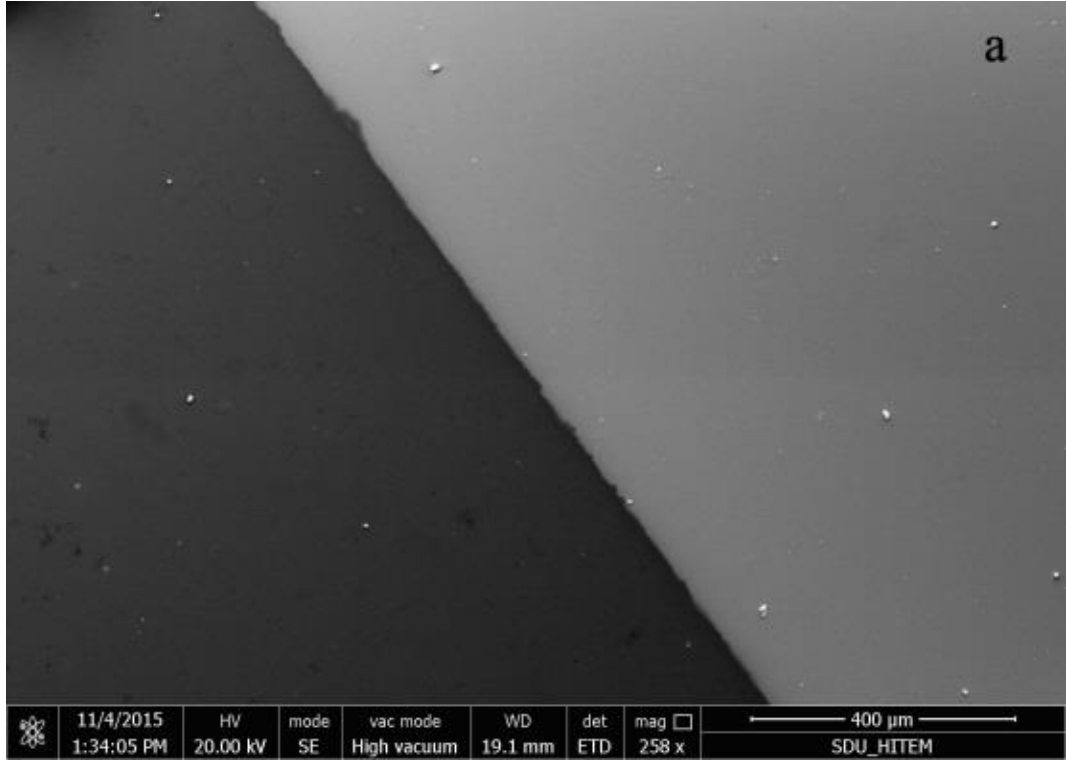
IB0	Tavlanmamış CdIn_2Te_4	ED0	Tavlanmamış CdIn_2Te_4
IB0_400	400 °C sıcaklığında tavlanmış CdIn_2Te_4	ED0_400	400 °C sıcaklığında tavlanmış CdIn_2Te_4
IB1	Tavlanmamış %1 In katkılı CdTe	ED1	Tavlanmamış %1 In katkılı CdTe
IB1_400	400 °C sıcaklığında tavlanmış %1 In katkılı CdTe	ED1_400	400 °C sıcaklığında tavlanmış %1 In katkılı CdTe
IB: Isısal Buharlaştırma Yöntemi			
ED: Elektron Demeti (E-Beam) Buharlaştırma Yöntemi			

4.1 Isısal Buharlaştırma ile Üretilen $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ Güneş Pillerinin Analizi

4.1.1 $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi

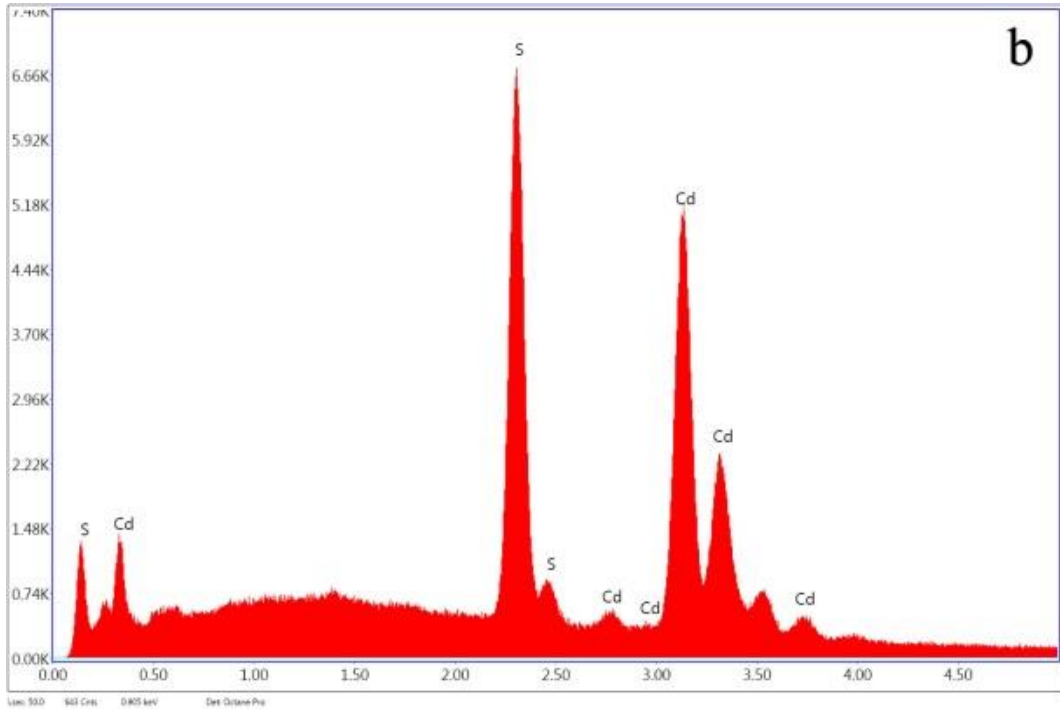
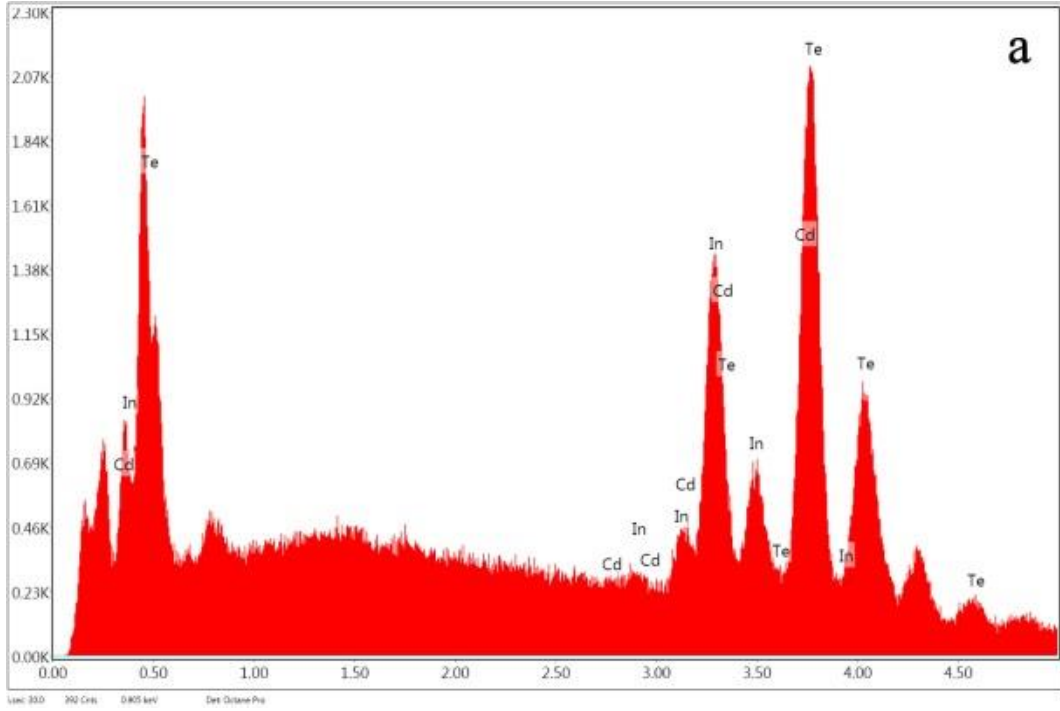
4.1.1.1 SEM ve EDS analizi

Malzemelerin yüzey morfolojisini belirlemek amacı ile elde edilen SEM görüntüleri tavlanmış ve tavlanmamış güneş pilleri için Şekil 4.1'de verildi. Görüntüler incelendiğinde tavlanmış film yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Benzer bir davranış Pandey ve diğ. (2005) tarafından rapor edilmiştir.

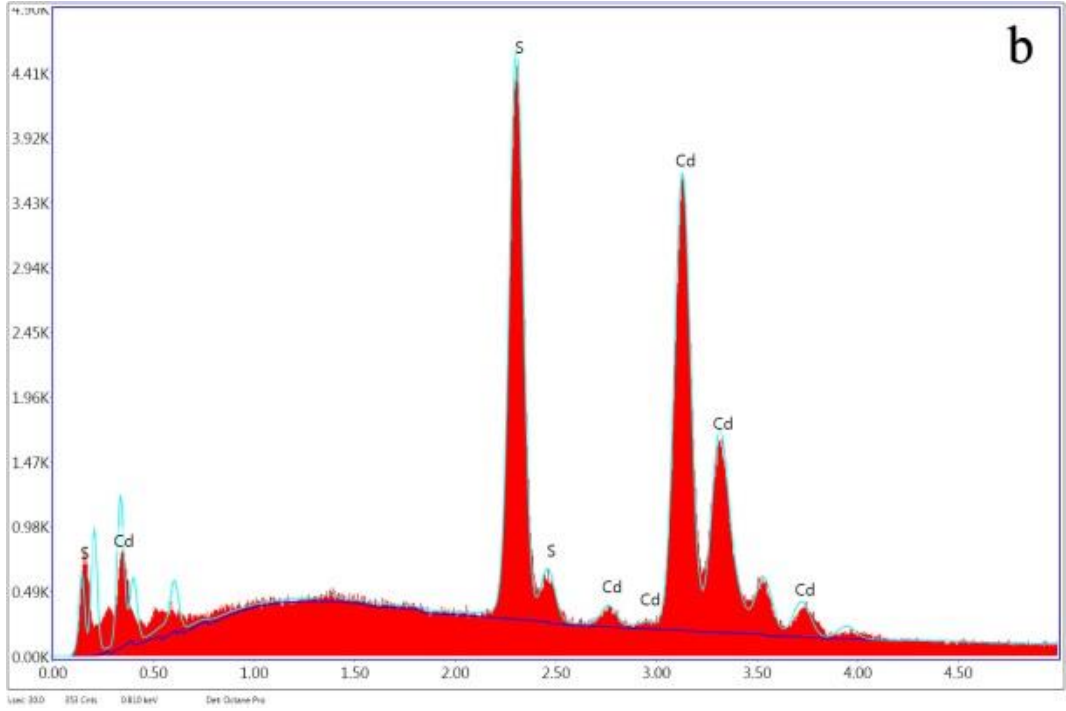
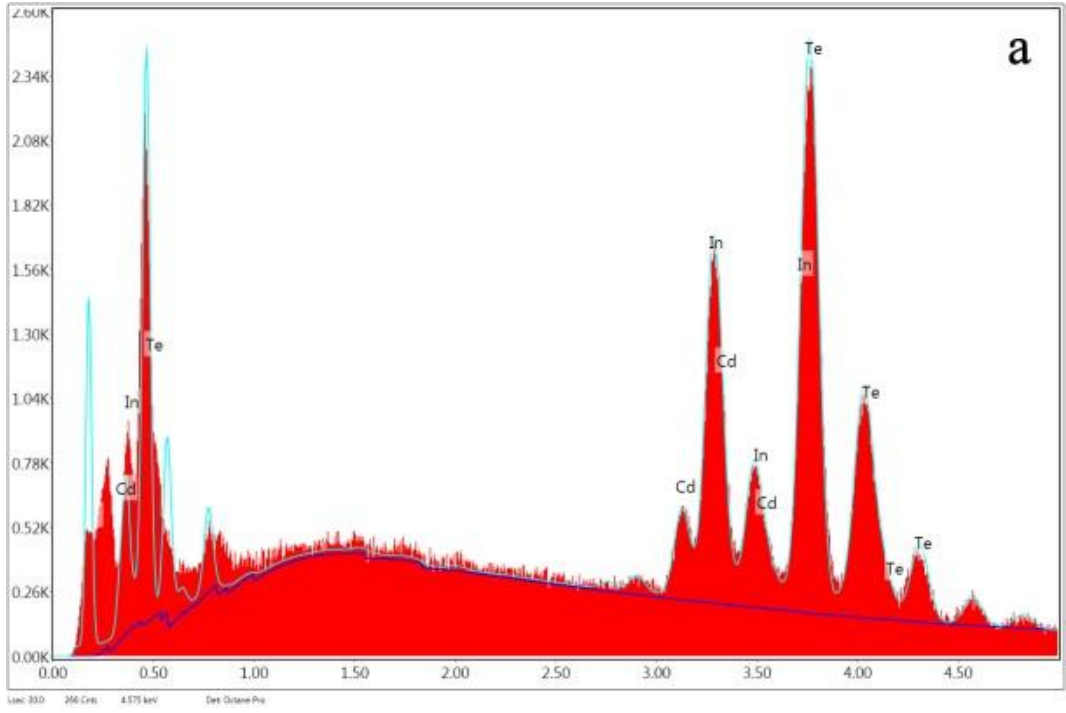


Şekil 4.1: (a) IB0 ait SEM görüntüsü (b) IB0_400 ait SEM görüntüsü

Tavlanmış ve tavlanmamış güneş pillerine ait enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verildi.



Şekil 4.2: (a) IB0 alt filme (CdIn₂Te₄) ait EDS spektrumu
(b) IB0 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu



Şekil 4.3: (a) IB0_400 alt filme (CdIn₂Te₄) ait EDS spektrumu
 (b) IB0_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu

1150 °C’de sinterleyerek oluşturduğumuz bileşiğin oluşma biçimi, Cd:In:Te oranı ve kirlilik atomlarının yapıda olup olmadığını belirlemek için EDS ölçümleri yapıldı. Tablo 4.2’de verilen CdIn₂Te₄ bileşiğinin EDS analizi sonuçlarından görüldüğü gibi numune içerisinde Cd, In ve Te atomları dışında başka kirlilik atomlarına rastlanmadı. Yine elementel analiz sonucunda, cihazın %5’lik hata payı içerisinde yaklaşık 1:2:4 oranında stokiyometriye uygun CdIn₂Te₄ üçlü bileşiğinin oluştuğu gözlemlendi.

Tablo 4.2: CdIn₂Te₄ bileşiğinin EDS sonucu

Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
Cd	11,55	12,51
In	29,13	30,38
Te	59,33	56,61

Tablo 4.2’de EDS analizi verilmiş olan CdIn₂Te₄ alt film olarak, CdS (toz formda) ise üst film malzemesi olarak kullanıldı. Malzemeler ITO kaplı cam alttaş üzerine ısısal buharlaştırma yöntemi ile biriktirildi. Biriktirilen ince film güneş pillerinin EDS analiz sonuçları sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’te verildi. Isısal buharlaştırma yöntemiyle biriktirilen alt filmler de tavlama sonucu Cd oranında bir artış gözlenirken, In ve Te oranında azalma tespit edildi.

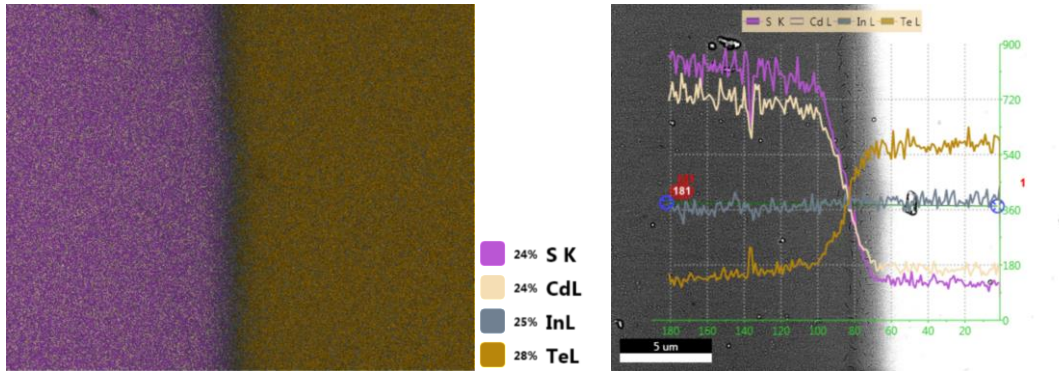
Tablo 4.3: Alt filmlere (CdIn₂Te₄) ait EDS sonucu

	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
IB0	Cd	3,93	4,33
	In	23,52	25,34
	Te	72,55	70,34
IB0_400	Cd	5,40	5,93
	In	23,31	25,07
	Te	71,28	69,00

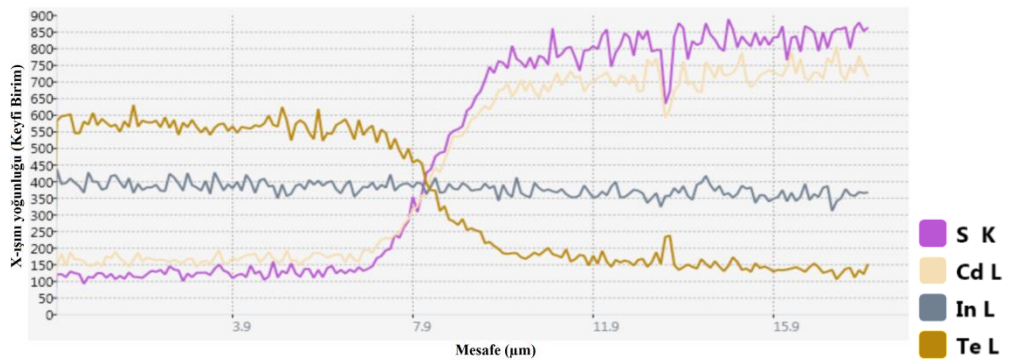
Tablo 4.4: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu

	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
IB0	Cd	74,36	54,73
	S	25,64	45,27
IB0_400	Cd	75,40	53,35
	S	24,60	46,65

Alan taraması element yerleşimi Şekil 4.4 ve çizgi tarama analiz grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde geçiş bölgesine kadar yapıdaki Cd, In ve Te element oranı yüksek, geçiş bölgesi geçildikten sonra bu oran azalmaktadır. Geçiş bölgesinden sonra ise Cd ve S elementlerinin oranı artmaktadır. Şekil 4.5 incelendiğinde elementlerin homojen dağılım şeklinde numunede olduğu ve yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı tespit edildi. Alt film Cd, In ve Te atomlarından oluştuğu ve üst film de Cd ve S atomlarından oluştuğu görülmektedir. Elementleri temsil eden renk kodları grafiklerin yanında verilmiştir.



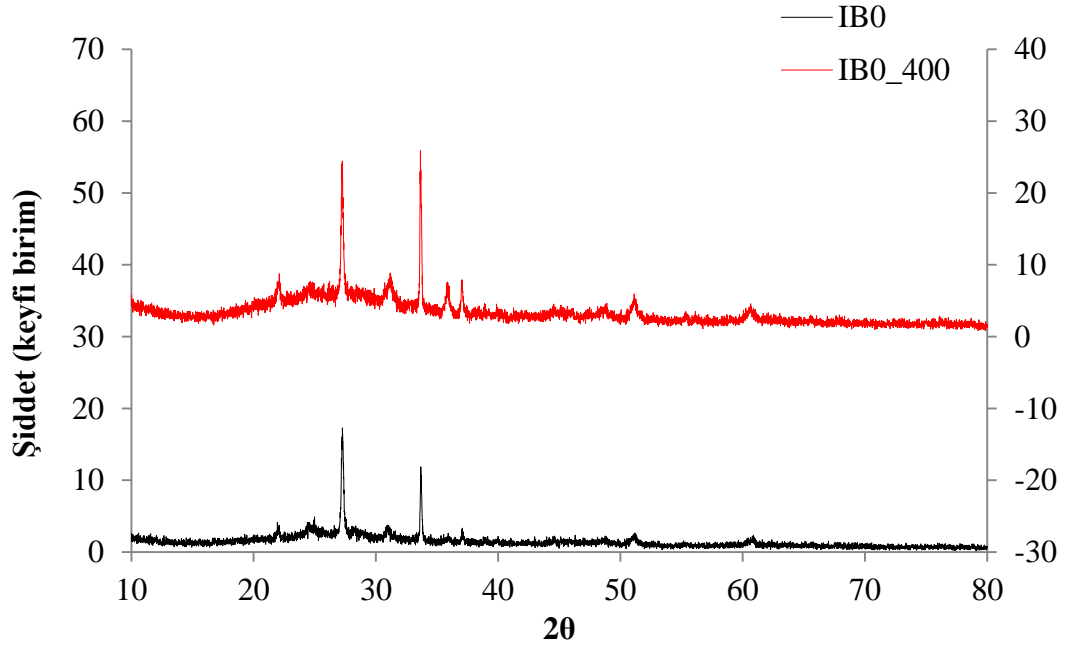
Şekil 4.4: CdIn₂Te₄/CdS güneş pilinin alan taraması element yerleşimi



Şekil 4.5: CdIn₂Te₄/CdS güneş pilinin çizgi tarama analizi grafiği

4.1.1.2 XRD analizi

Isısal buharlaştırma yöntemi ile ITO kaplı cam alttaş üzerine biriktirilen, yaklaşık 2,0 μm kalınlığındaki $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ (IB0) ve 400 $^\circ\text{C}$ 'de 1 saat tavllanmış $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ (IB0_400) ince film güneş pillerinin XRD saçılma sonuçları Şekil 4.6'de verildi. IB0 ve IB0_400 numunelerinde yaklaşık olarak $2\theta=27,2^\circ$ pozisyonunda gözlemlendi. Yine aynı örneklerde $2\theta=33,6^\circ$ pozisyonunda keskin bir pik daha ortaya çıktı. Gözlenen piklerin pozisyonları aynı olup, tavlamaya bağlı olarak şiddetinin arttığı görüldü. Tavlamaya bağlı olarak pik pozisyonlarının değişmeyip şiddetlerinin artması, yapısal bozuklukların azalması ve ince filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçmesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. $2\theta=27,2^\circ$ ve $2\theta=33,6^\circ$ pikleri tarafından üretilen kırılma hatları sırasıyla (200) ve (202) yapısına karşılık gelmektedir (Singsa-ngah ve diğ. 2015).



Şekil 4.6: IB0 ve IB0_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği

XRD verileri yardımıyla İnce film güneş pillerindeki tanecik büyüklüğü denklem (3.3) kullanılarak hesaplandı. Düzlemler arası uzaklık (d) ve kafes sabiti (a) Bragg's yasası kullanılarak hesaplandı. IB0 ve IB0_400 ince film güneş pilleri için hesaplanan bu değerler Tablo 4.5'te verildi. Tavlamanın etkisi ile tanecik büyüklüğünün arttığı yani filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçtiği belirlendi. Tanecik büyüklüğü literatürde yapılan çalışmalar ile uyumluluk

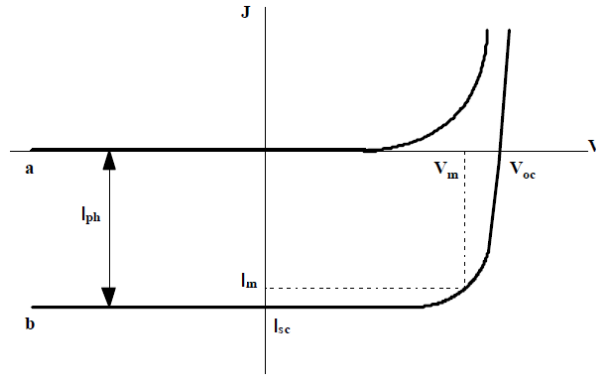
göstermektedir (Yılmaz ve Gölcür 2012; Kumar ve diğ. 2005). Düzlemler arası uzaklık (d) hesaplamaları (Jain ve diğ. 2003), kafes sabiti (a) hesaplamaları ise (Dongol ve diğ. 2015) yapmış oldukları çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 4.5: IB0 ve IB0_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları

hkl	IB0				IB0_400			
	$2\theta^\circ$	d (Å)	a (Å)	D (nm)	$2\theta^\circ$	d (Å)	a (Å)	D (nm)
(200)	27,23	3,271	6,542	25,87	27,26	3,267	6,535	27,54
(202)	33,69	2,657	7,515	18,06	33,62	2,662	7,530	28,46

4.1.2 CdIn₂Te₄/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi

Bir güneş pilinin verimi onun kalitesini belirtmesi açısından önem taşımakta olup veriminin bulunmasında karakteristik Akım-Gerilim (I-V) eğrisinden yararlanır. İdeal güneş pili akım gerilim eğrisi Şekil 4.7de verilmiştir.



Şekil 4.7: İdeal güneş pili akım gerilim eğrisi a) karanlık ve b) ışık (Yılmaz 2004)

Bu eğri yardımıyla pilin açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} gibi çıkış parametreleri belirlenmektedir. Güneş pilinin açık devre gerilimi, pilden geçen akımın sıfır olması durumunda pil uçlarından ölçülen gerilimdir. Pilin kısa devre akımı ise sıfır gerilimde ve aydınlatma altında pilden geçen akımdır. Bu akım gelen ışığın şiddetine bağlıdır. I-V eğrisi üzerinde değişik noktalarda I-V çarpımlarının hesaplanması ve bu çarpımın maksimum olduğu noktanın belirlenmesi ile maksimum güç noktası P_m bulunur. Bu noktanın tespit edilmesinden sonra akım-gerilim

eksenleri üzerindeki izdüşüm değerleri pilin maksimum gücüne karşılık gelen akım I_m ve gerilim V_m değerlerini gösterir. Bu durum pilden elde edilebilecek maksimum güç bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılır

$$P_m = I_m \times V_m \quad (4.1)$$

Açık devre gerilimi ve pilin maksimum gücüne bağlı olarak,

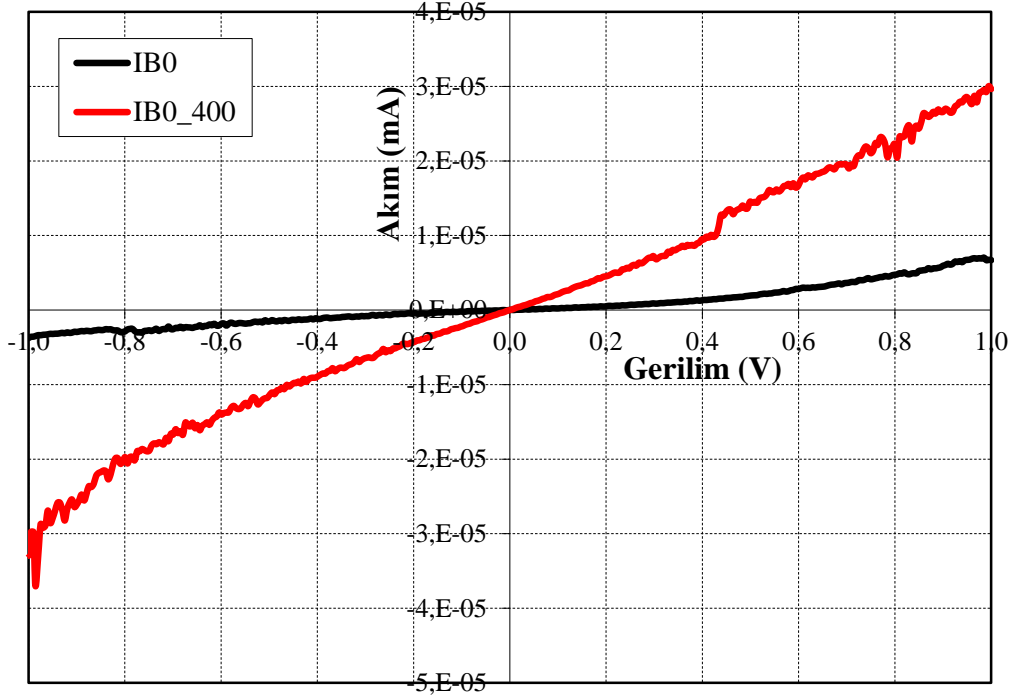
$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (4.2)$$

eşitliği ile verilen dolun çarpanı (Fill-factor) tanımlanır. Dolun çarpanı güneş pilinin iç seri direncinden kaynaklanır. Seri direncin büyüklüğü dolun çarpanını küçültür. İdeal bir güneş pili için dolun çarpanı 1'e eşittir. Dolun çarpanının büyük olması güneş pilinin veriminin yüksek olduğunu belirtir. Açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve pil üzerine gelen ışınım enerjisinin (P_{in}) bilinmesi durumunda pilin ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmedeki verimi aşağıdaki şekilde bulunabilir (Şahin ve Okumuş 2013).

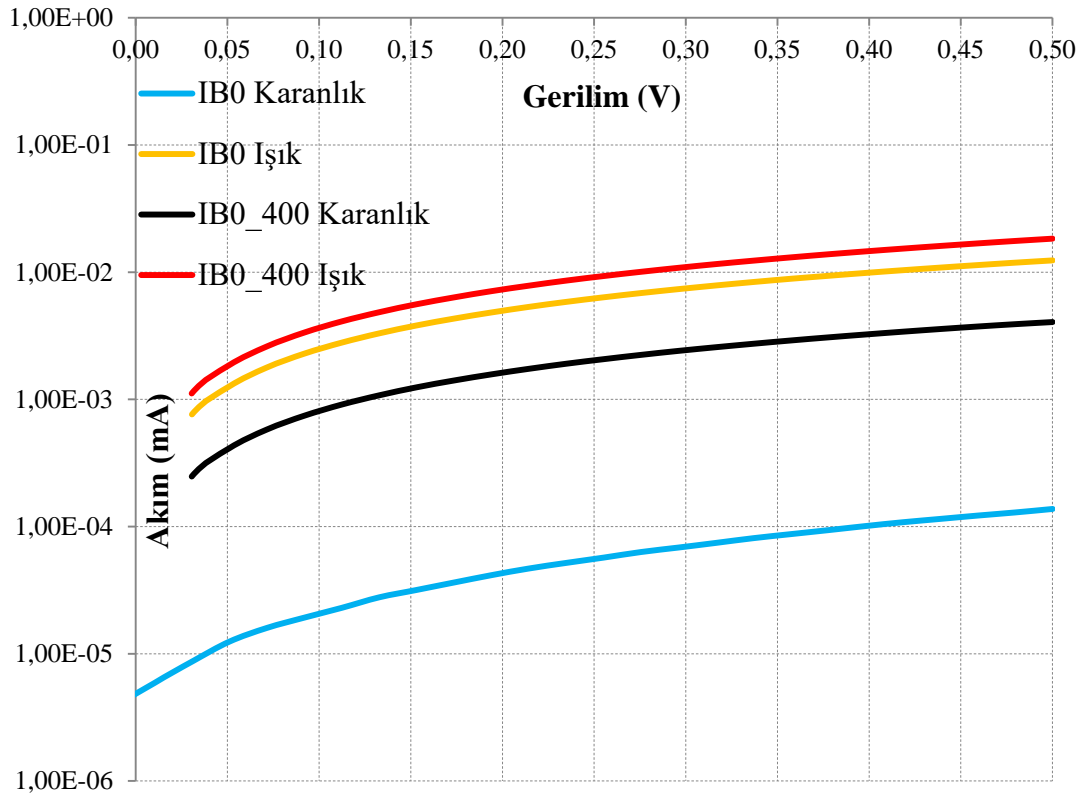
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} \quad (4.3)$$

Tavlanmış ve tavlansmamış $CdIn_2Te_4/CdS$ ince film güneş pillerinin I-V karakteristiği Şekil 4.8'de verildi. Şekil 4.8'den de açıkça görüldüğü gibi akım ve voltaj eğrileri dalgalı bir yapı göstermeyip sürekli dir. Tavlanmış güneş pilinde ise akım değerinin arttığı görülmektedir. Singh ve diğ. (2010) farklı alttaş sıcaklıklarında üretmiş oldukları ince filmlerde akım-voltaj eğrilerinin süreklilik gösterdiğini ve alttaş sıcaklık değeri arttıkça akım değerinin de arttığını belirlemişlerdir.

Tavlanmış ve tavlansmamış $CdIn_2Te_4/CdS$ ince film güneş pillerinin solar simülatör ölçümleri Şekil 4.9'de verildi. $IB0$ ve $IB0_{400}$ güneş pillerine ait karanlık ve ışık altındaki ölçümlerin sonucunda elde edilen karşılaştırmalı grafik incelendiğinde, güneş pillerinin ışık altındaki tepkimesi açıkça görülmektedir. Fakat verimlilik bakımından düşük değerlere karşılık gelmektedir. Fotovoltaik güneş pillerinin güneş enerjisini elektrik enerjisine çevrim verimi, diğer enerji sistemlerine göre daha düşüktür. Verimin düşük olması doğal ve teknolojik sınırlamalardan kaynaklanmaktadır (Korur 1990)



Şekil 4.8: IB0 ve IB0_400 numunelerinin dark I-V karakteristiği



Şekil 4.9: IB0 ve IB0_400 numunelerinin I-V karakteristiği

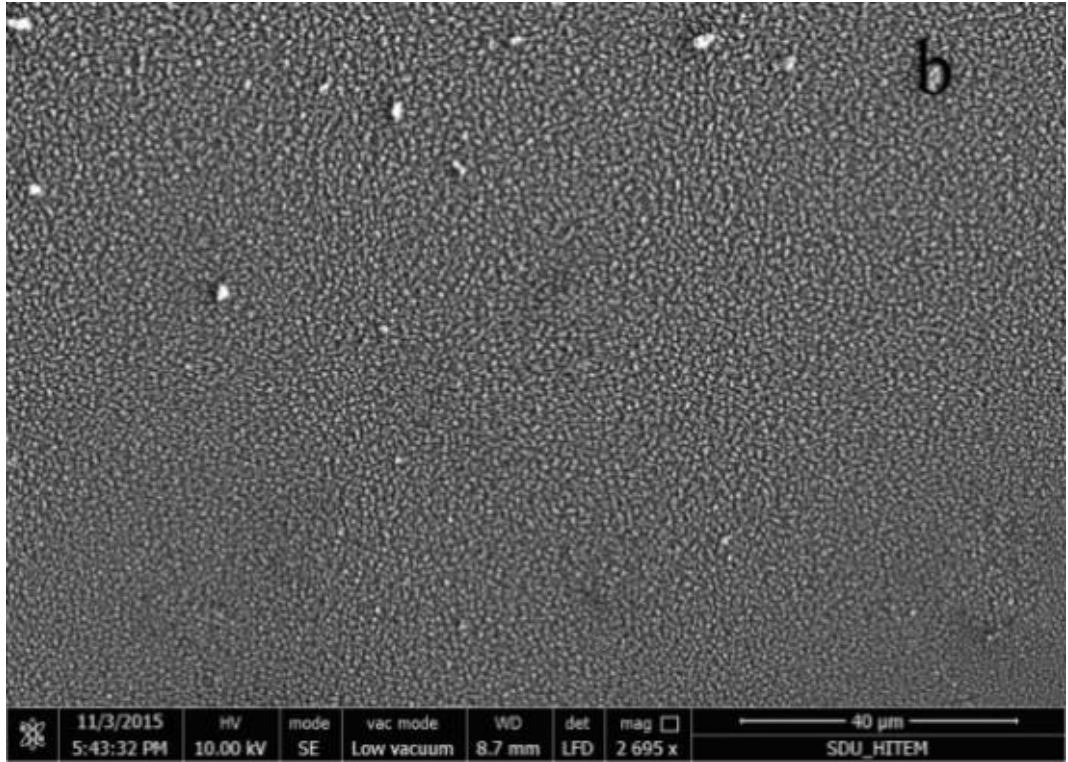
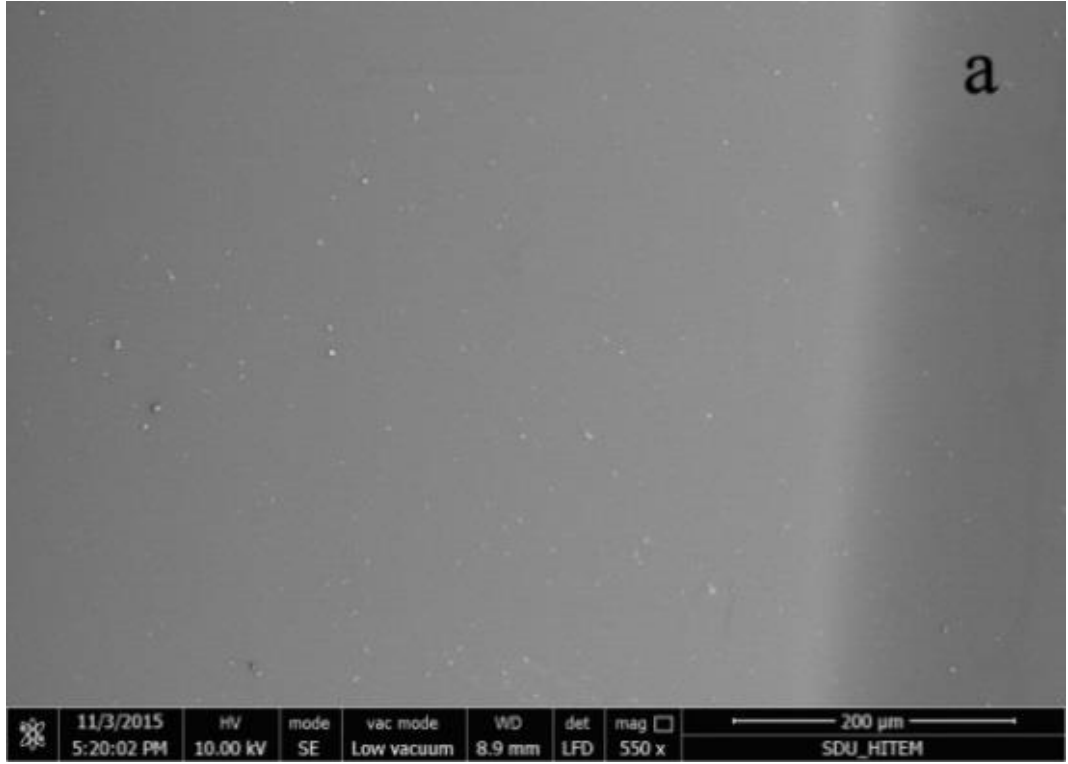
4.2 Elektron Demeti ile Üretilen CdIn₂Te₄/CdS Güneş Pillerinin Analizi

4.2.1 CdIn₂Te₄/CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi

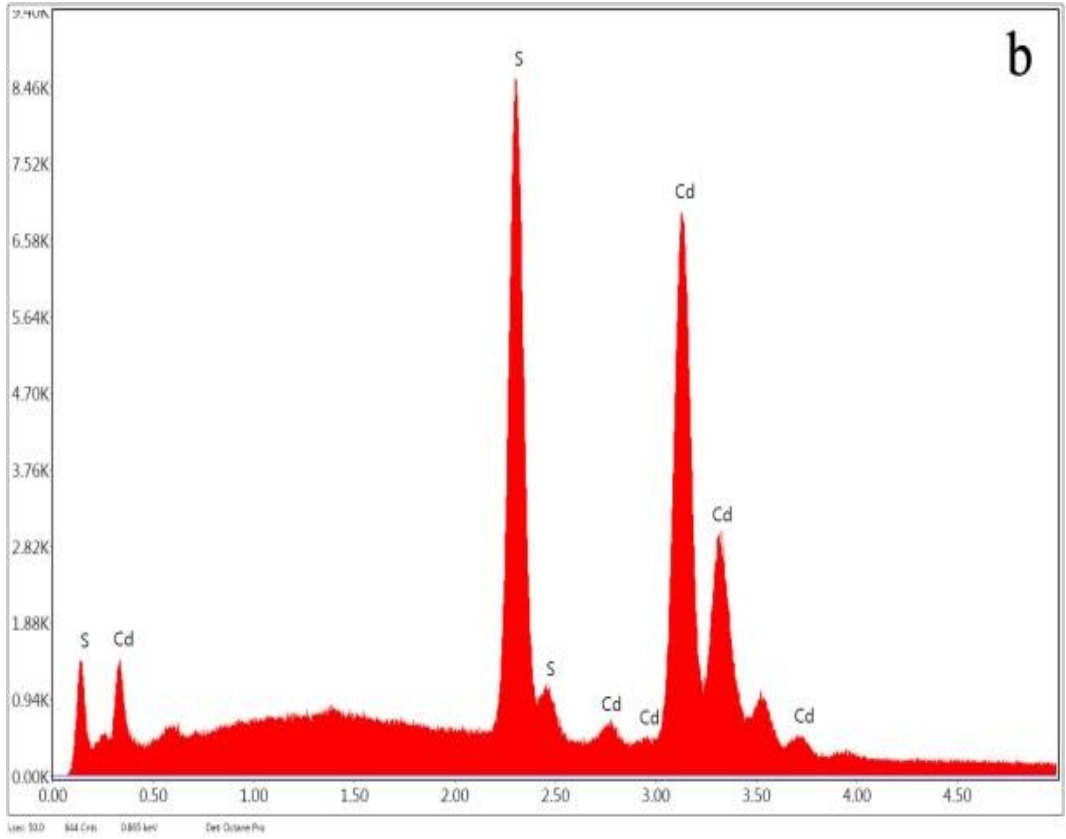
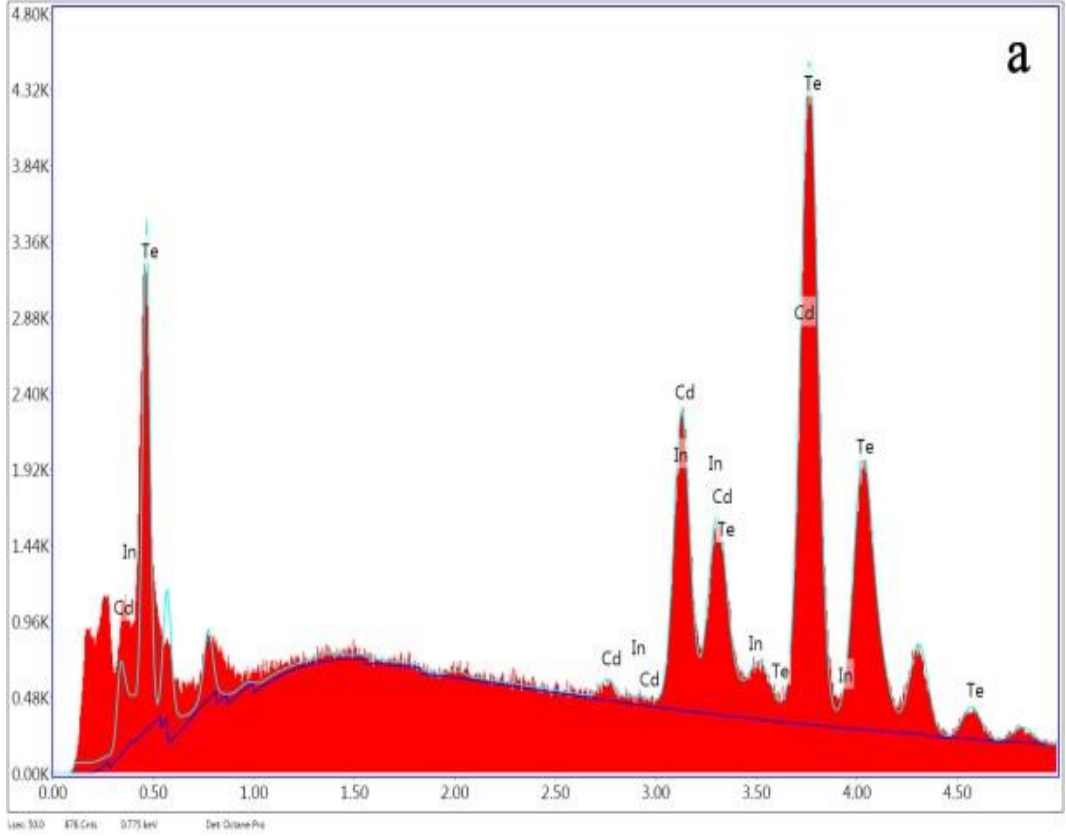
4.2.1.1 SEM ve EDS analizi

CdIn₂Te₄ alt film olarak, %99,999 saflıkta CdS (toz formda) ise üst film malzemesi olarak kullanıldı. Malzemeler ITO kaplı cam alttaş üzerine elektron demeti buharlaştırma tekniği ile biriktirildi. Malzemelerin yüzey morfolojisini belirlemek amacı ile tavllanmış ve tavlannmamış güneş pilleri için SEM görüntüleri Şekil 4.10'da, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) grafikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verildi. İnce film güneş pillerine ait EDS analiz sonuçları ise sırasıyla Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de verildi.

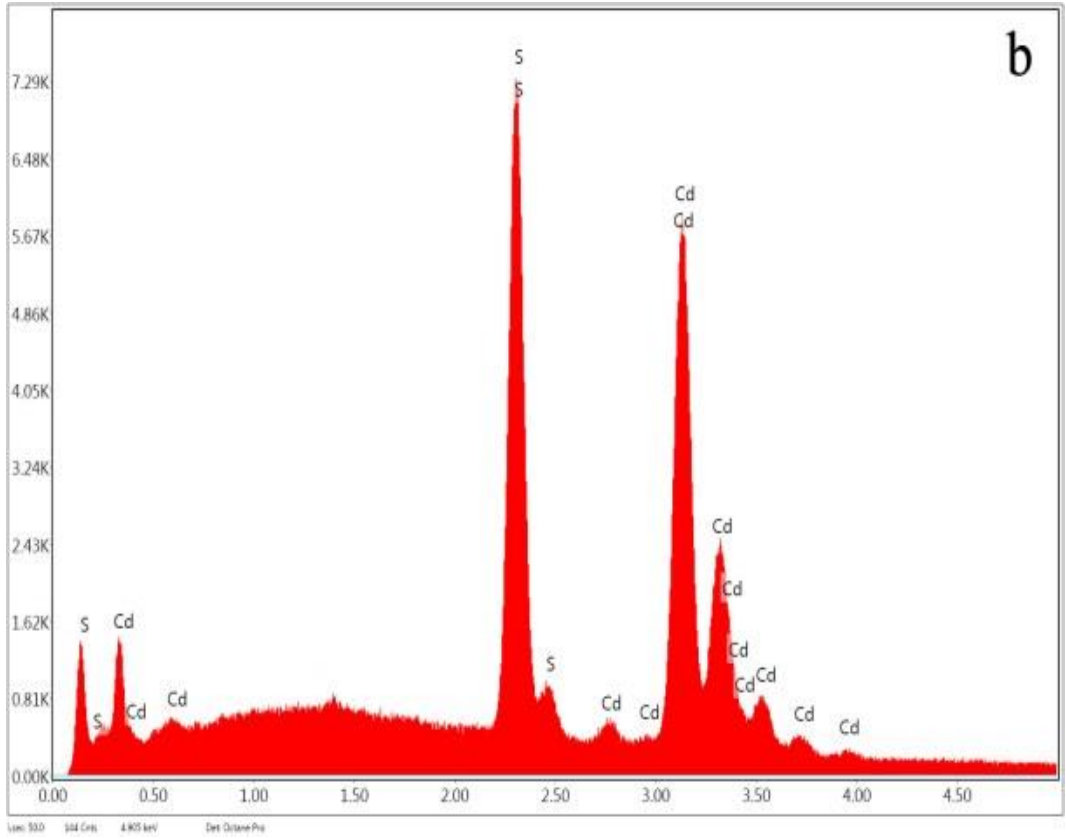
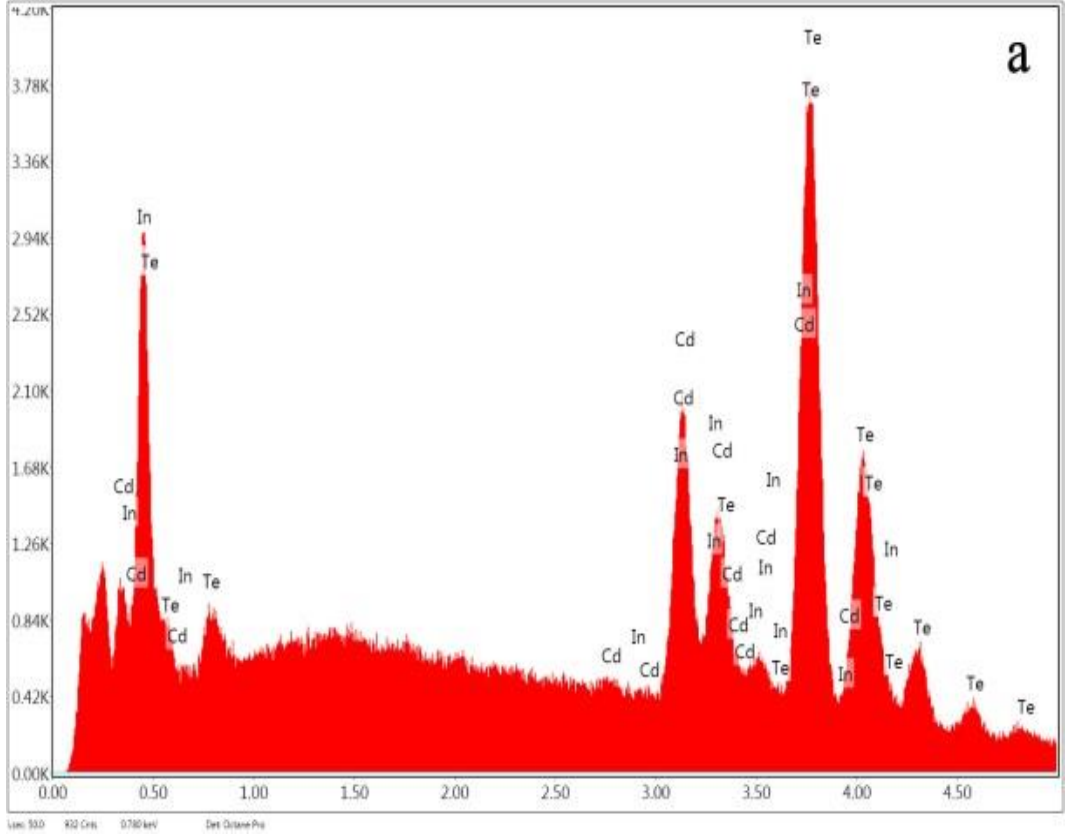
Şekil 4.10'daki görüntüler incelendiğinde tavllanmış film yüzey pürüzlülüğünün arttığı görüldü. Pandey ve diğ. (2005) yapmış oldukları çalışmada benzer bulgular elde etmişlerdir.



Şekil 4.10: (a) ED0 ait SEM görüntüsü (b) ED0_400 ait SEM görüntüsü



Şekil 4.11: (a) ED0 alt filme (CdIn_2Te_4) ait EDS spektrumu
(b) ED0 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu



Şekil 4.12: (a) EDO_400 alt filme (CdIn_2Te_4) ait EDS spektrumu
 (b) EDO_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu

Elektron demeti buharlaştırma tekniği ile biriktirilen alt filmler de tavlama sonucu Cd ve In oranında bir artış gözlenirken, Te oranında azalma tespit edildi. Üst filmler için ise elde edilen Cd ve S değerlerinin Rmili ve diğ. (2013) yapmış oldukları çalışma ile uyumluluk içinde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.6: Alt filmlere (CdIn_2Te_4) ait EDS sonucu

	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
ED0	Cd	17,17	18,94
	In	5,10	5,50
	Te	77,74	75,55
ED0_400	Cd	17,74	19,55
	In	5,25	5,66
	Te	77,02	74,79

Tablo 4.7: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu

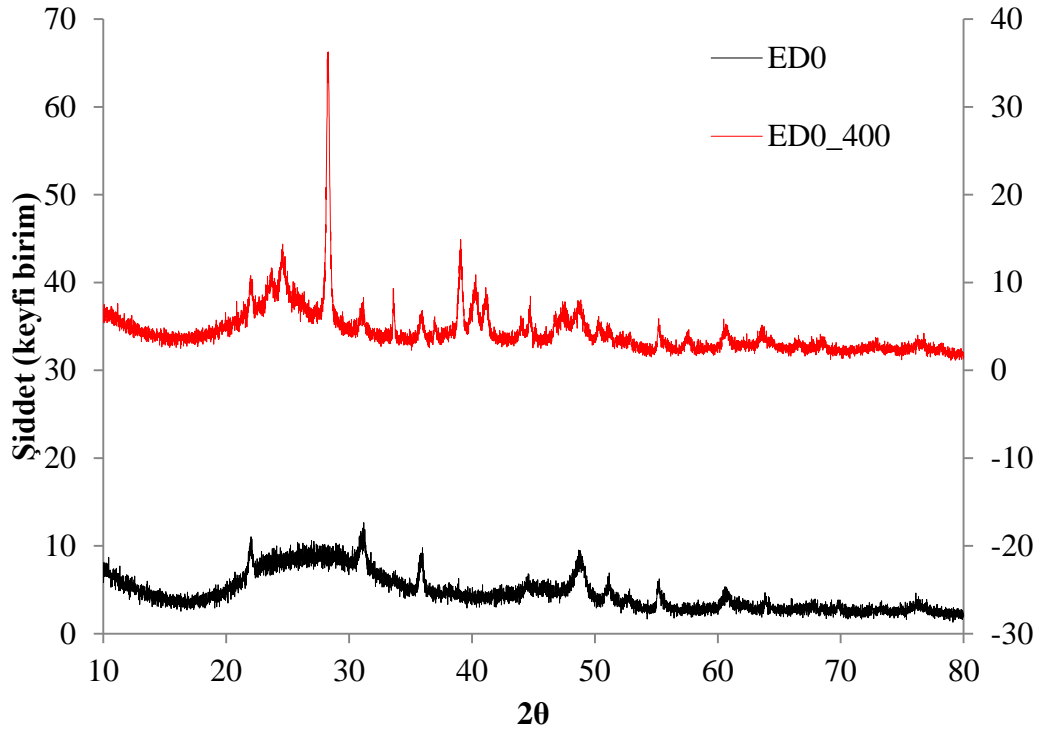
	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
ED0	Cd	76,48	55,20
	S	23,52	44,80
ED0_400	Cd	83,68	53,63
	S	16,32	46,37

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'deki EDS spektrumları incelendiğinde yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı belirlendi. Alt filmin Cd, In ve Te atomlarından oluştuğu ve üst filmin de Cd ve S atomlarından oluştuğu gözlemlendi. Bu sonuç yukarıdaki EDS analiz sonuçlarında da açıkça görülmektedir.

4.2.1.2 XRD analizi

Elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile ITO kaplı cam alttaş üzerine biriktirilen, yaklaşık 2,0 μm kalınlığındaki saf $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ (ED0) ve 400 °C'de 1 saat tavllanmış $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ (ED0_400) ince film güneş pillerinin XRD kırınım sonuçları Şekil 4.13'de verildi. ED0 numunesinde $2\theta=31,1^\circ$ ve $48,7^\circ$ pozisyonlarında iki adet pik gözlenmiştir. Bu pikler tarafından üretilen kırılma hatları sırasıyla (202)

ve (311) yapısına karşılık gelmektedir. ED0_400 numunesinde $2\theta=24,5^\circ$, $28,2^\circ$ ve $39,1^\circ$ pozisyonunda üç adet pik gözlemlendi. Bu pikler tarafından üretilen kırılma hatları sırasıyla (111), (200) ve (220) yapısına karşılık gelmektedir. Gözlenen piklerin incelendiğinde, tavlamaya bağlı olarak şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Tavlamaya bağlı olarak pik şiddetlerinin artması, yapısal bozuklukların azalması ve ince filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçmesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir (Singsa-ngah ve diğ. 2015).



Şekil 4.13: ED0 ve ED0_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği

Kafes sabiti (a), düzlemler arası uzaklık (d), tanecik büyüklüğü (D), hesaplamaları denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) ile hesaplandı. ED0 ve ED0_400 ince film güneş pilleri için hesaplanan bu değerler Tablo 4.8’de verildi. Tavlamanın etkisi ile tanecik büyüklüğünün arttığı yani filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçtiği belirlendi. Tanecik büyüklüğü literatürde yapılan çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir (Yılmaz ve Gölcür 2012; El-nashass ve diğ. 2014). Düzlemler arası uzaklık (d) hesaplamaları (Jain ve diğ. 2003), kafes sabiti (a) hesaplamaları ise (Mishra ve Ganguli 2016) yapmış oldukları çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 4.8: ED0 ve ED0_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları

ED0					ED0_400				
$2\theta^\circ$	hkl	d (Å)	a (Å)	D (nm)	$2\theta^\circ$	hkl	d (Å)	a (Å)	D (nm)
31,1°	(202) ^a	2,870	8,117	21,0	24,5°	(111) ^c	3,626	6,280	12,67
48,7°	(311) ^b	1,866	6,188	8,43	28,2°	(200) ^a	3,154	6,308	22,51
					39,1°	(220) ^d	2,300	6,506	22,01

^a (Singsa-ngah ve diğ. 2015)

^b (Shenouda ve diğ. 2013)

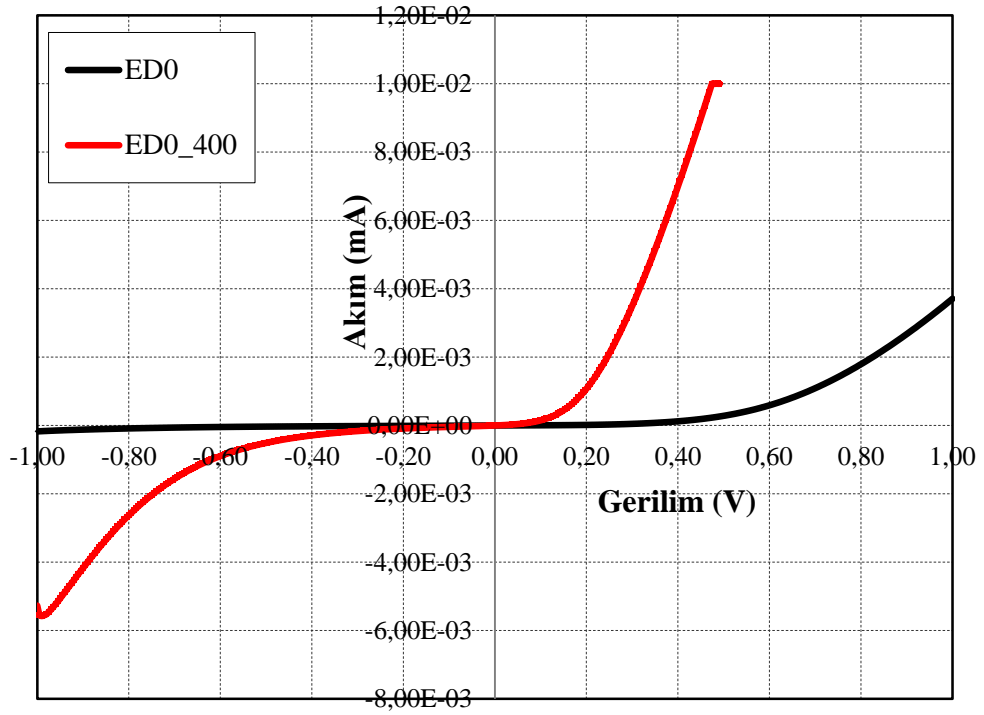
^c (Shenouda ve diğ. 2013; Jain ve diğ. 2003; Zapata-tores ve diğ. 2000; Ramirez-bon ve diğ. 1997)

^d (Shenouda ve diğ. 2013; Jain ve diğ. 2003; Ramirez-bon ve diğ. 1997)

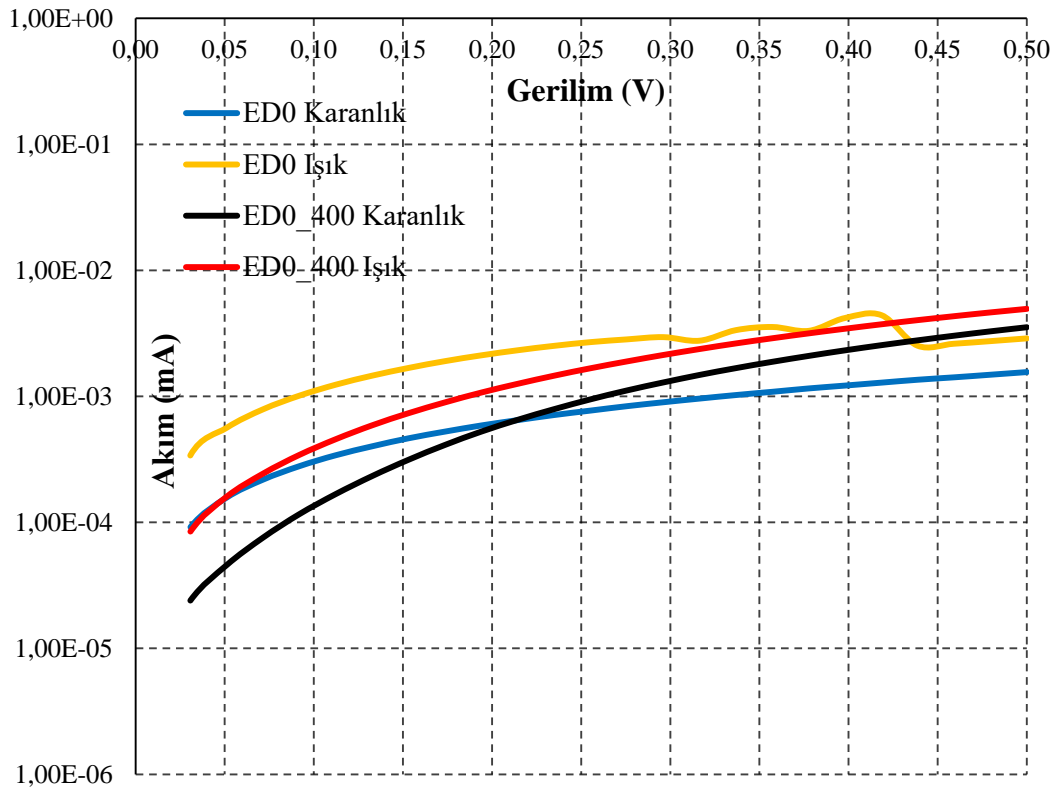
4.2.2 CdIn₂Te₄/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi

Tavlanmış ve tavlanmamış CdIn₂Te₄/CdS ince film güneş pillerinin I-V karakteristiği Şekil 4.14’de verildi. Şekil 4.14’den de açıkça görüldüğü gibi akım ve voltaj eğrileri tavlanmış güneş pilinde ideal diyot karakteristiği göstermektedir. Bilindiği üzere ideal diyot; diyoda ileri yönde polarlama uygulandığında hemen iletme geçmez. Bunun nedeni gerilim seddinin ancak belli bir gerilim değerinde aşılabilmesidir. Ters yönde polarlama uygulandığında ise diyot tam manasıyla yalıtkan değildir, çok küçük de olsa bir sızıntı akımı geçer.

Şekil 4.15’de tavlanmış ve tavlanmamış CdIn₂Te₄/CdS ince film güneş pillerinin solar simülatör ölçümleri görülmektedir. Güneş pillerinin ışığa karşı duyarlılığı saptandı.



Şekil 4.14: ED0 ve ED0_400 numunelerinin dark I-V karakteristiği



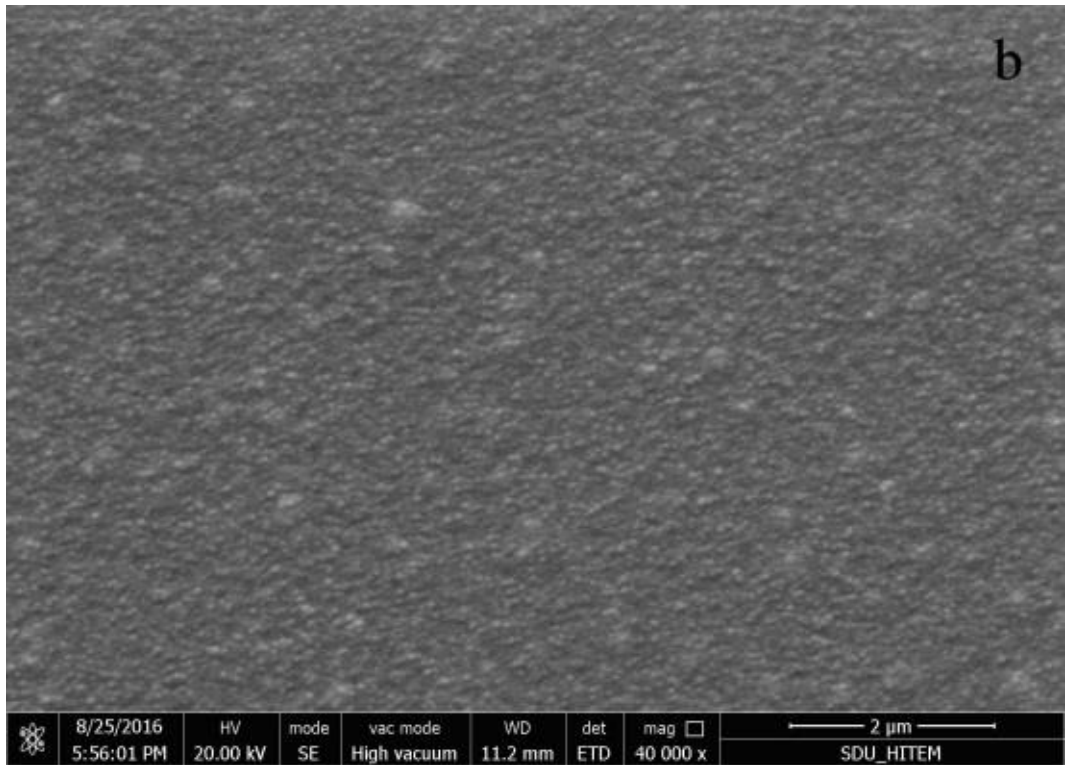
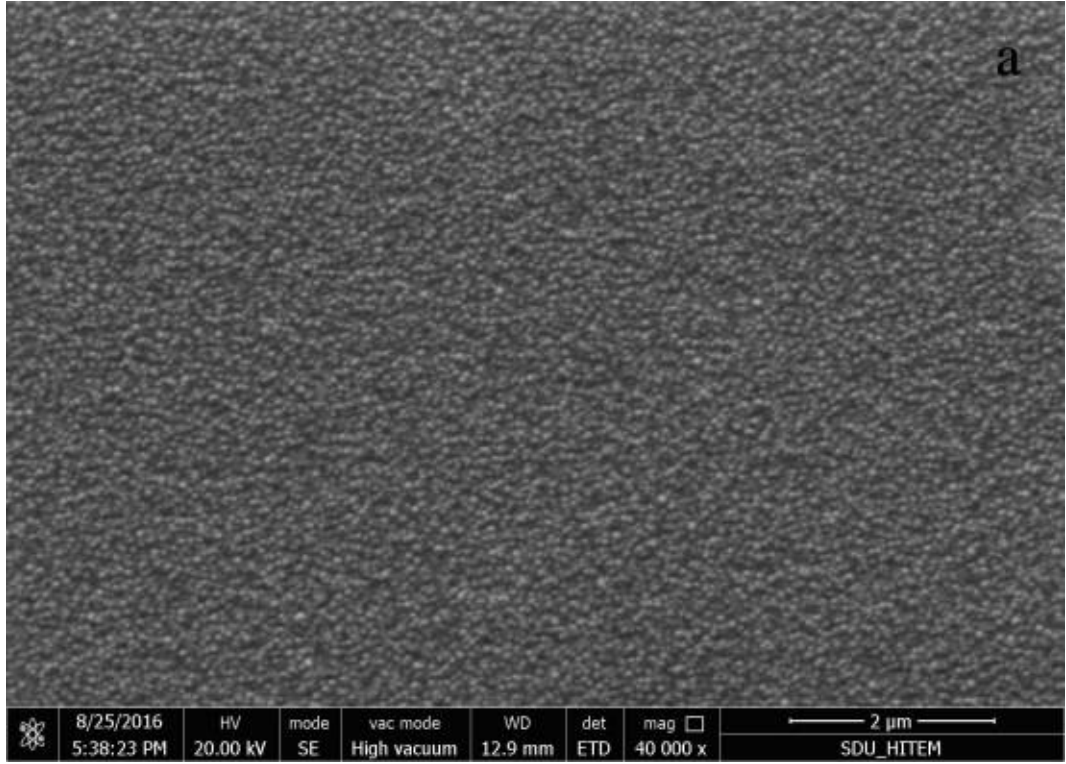
Şekil 4.15: ED0 ve ED0_400 numunelerinin I-V karakteristiği

4.3 Isısal Buharlaştırma ile Üretilen %1 In katkılı CdTe/CdS Güneş Pillerinin Analizi

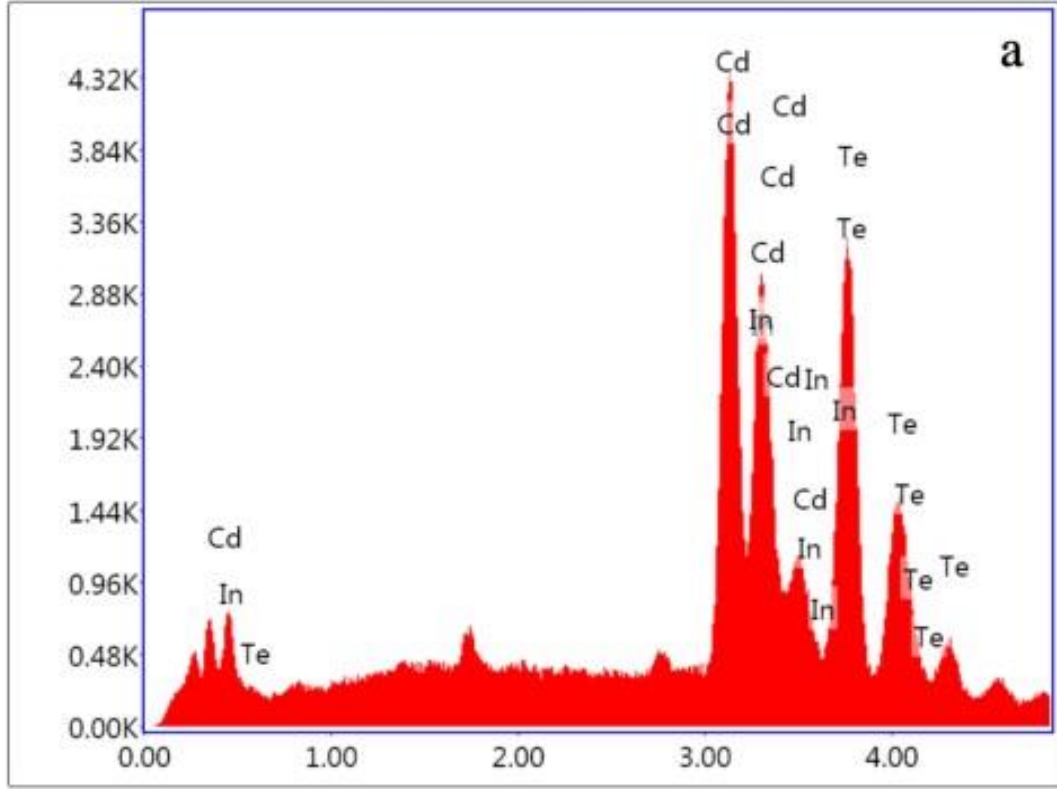
4.3.1 %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi

4.3.1.1 SEM ve EDS analizi

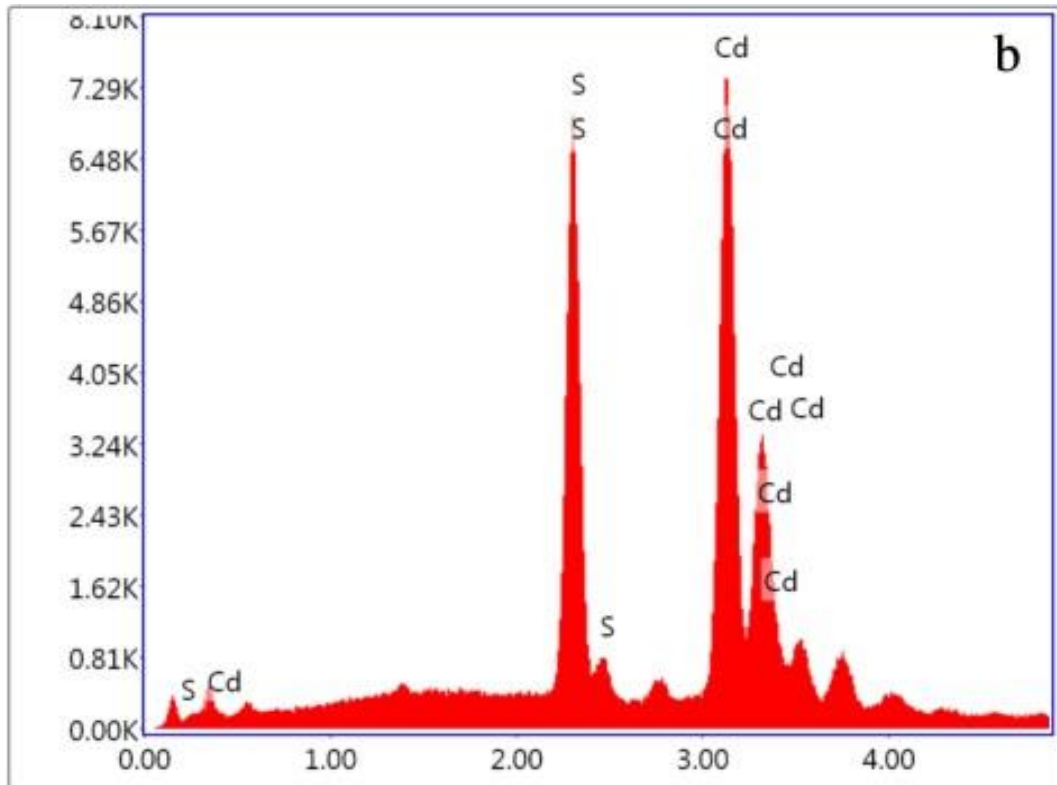
%1 In katkılı CdTe alt film olarak, CdS (toz formda) ise üst film malzemesi olarak kullanıldı. Malzemeler ITO kaplı cam alttaş üzerine ısısal buharlaştırma yöntemi ile biriktirildi. Malzemelerin yüzey morfolojisini belirlemek amacı ile SEM görüntüleri tavllanmış ve tavlansız güneş pilleri için Şekil 4.16'de, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) grafikleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'da verildi. Biriktirilen ince film güneş pillerinin EDS analiz sonuçları ise sırasıyla Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da verildi. Görüntüler incelendiğinde tavlansız film yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve topaklanmaların oluştuğu görülmektedir. Genellikle filmlerin tanecik boyutu film kalınlığı, yüzey sıcaklığı ve tavlama sıcaklığına bağlı olduğu bilinmektedir. Ortaya çıkan tanecik boyutu mikron altı boyuttadır. Chander ve Dhaka (2016) yapmış oldukları çalışmalarında benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 4.16: (a) IB1 ait SEM görüntüsü (b) IB1_400 ait SEM görüntüsü

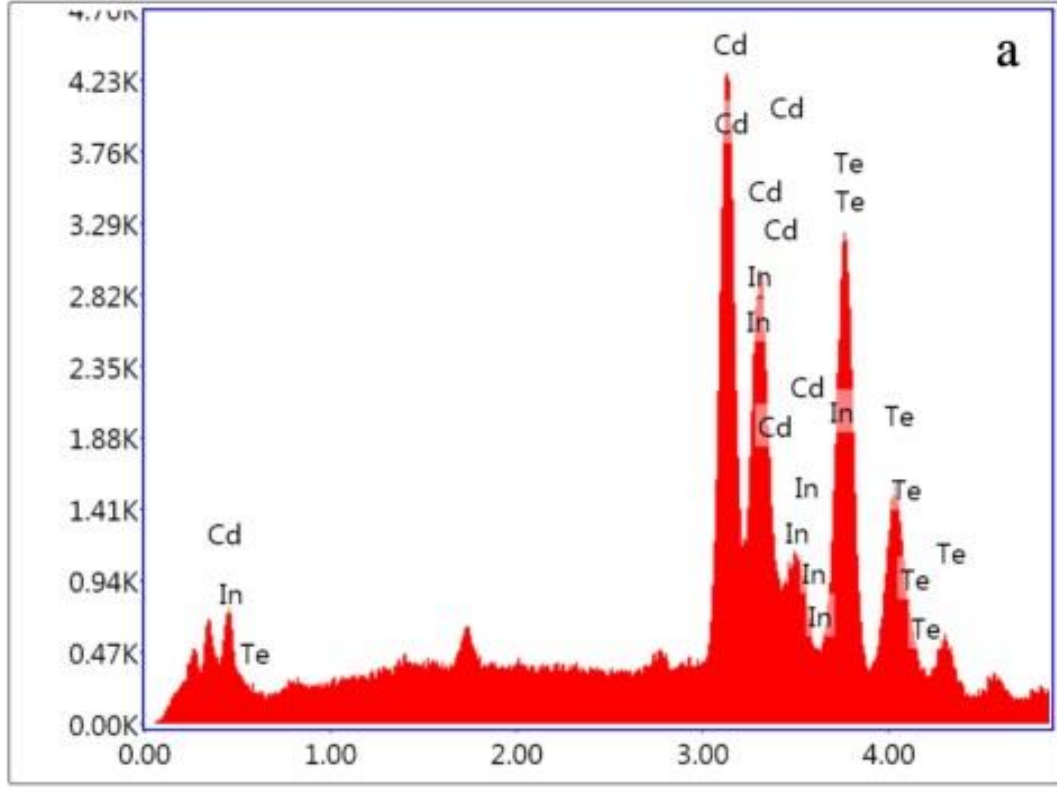


Lsec: 44.6 670 Cnts 1.750 keV Det: Octane Pro Det

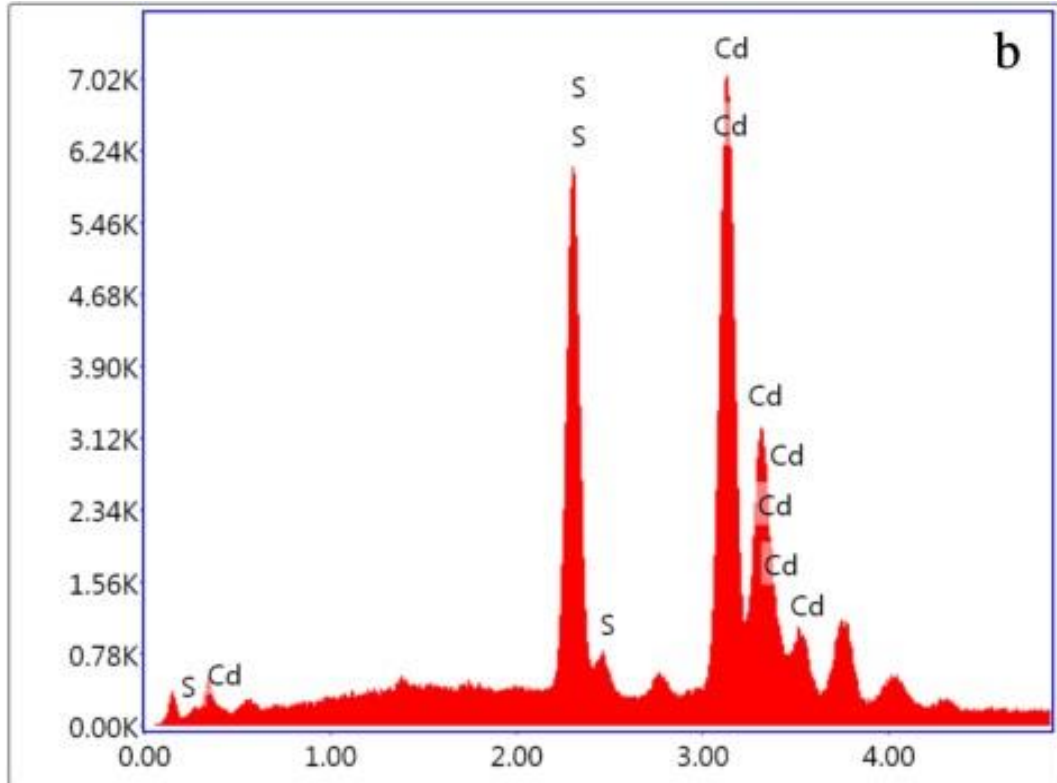


Lsec: 43.8 516 Cnts 1.390 keV Det: Octane Pro Det

Şekil 4.17: (a) IB1 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu
(b) IB1 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu



Lsec: 44.5 638 Cnts 1.750 keV Det: Octane Pro Det



Lsec: 43.8 260 Cnts 0.900 keV Det: Octane Pro Det

Şekil 4.18: (a) IB1_400 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu
(b) IB1_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu

Isısal buharlaştırma yöntemiyle biriktirilen alt filmler de tavlama sonucu Cd oranında bir artış gözlenirken, In ve Te oranında azalma tespit edildi.

Tablo 4.9: Alt filmlere (%1 In katkılı CdTe) ait EDS sonucu

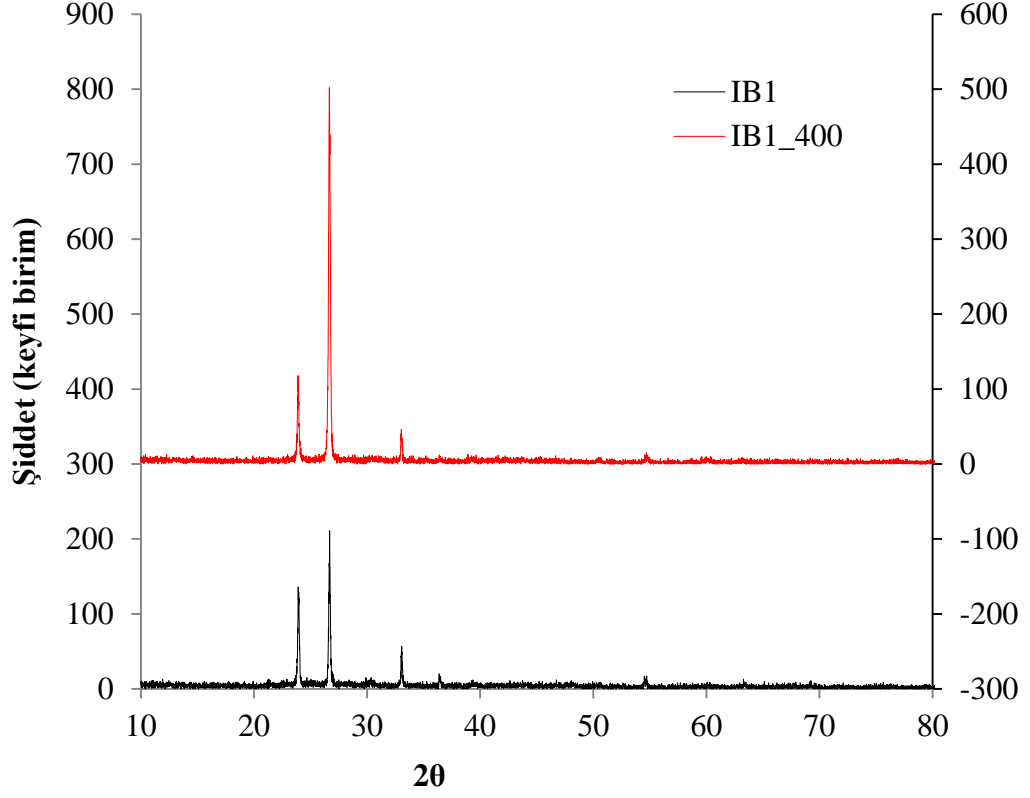
	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
IB1	Cd	35,92	38,36
	In	12,99	13,58
	Te	51,09	48,06
IB1_400	Cd	36,29	38,74
	In	12,93	13,51
	Te	50,78	47,45

Tablo 4.10: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu

	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
IB1	Cd	77,68	49,82
	S	22,32	50,18
IB1_400	Cd	79,23	52,12
	S	20,77	47,88

4.3.1.2 XRD analizi

Isısal buharlaştırma yöntemi ile ITO kaplı cam alttaş üzerine biriktirilen, yaklaşık 1,4 μm kalınlığındaki saf %1 In katkılı CdTe/CdS (IB1) ve 400 °C’de 1 saat tavllanmış %1 In katkılı CdTe/CdS (IB1_400) ince film güneş pillerinin XRD saçılma sonuçları Şekil 4.19’de verildi. IB1 ve IB1_400 numunelerinde yaklaşık olarak $2\theta=23,9^\circ$, $26,6^\circ$ ve $33,0^\circ$ pozisyonlarında pikler gözlemlendi. Belirlenen piklerin pozisyonları aynı olup, tavlamaya bağlı olarak şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Tavlamaya bağlı olarak pik pozisyonlarının değişmeyip şiddetlerinin artması, yapısal bozuklukların azalması ve ince filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçmesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. $2\theta=23,9^\circ$, $2\theta=26,6^\circ$ ve $2\theta=33,0^\circ$ pikleri tarafından üretilen kırılma hatları sırasıyla (111), (200) ve (211) yapısına karşılık gelmektedir (Tariq 2015; Chander ve Dhaka 2015^b).

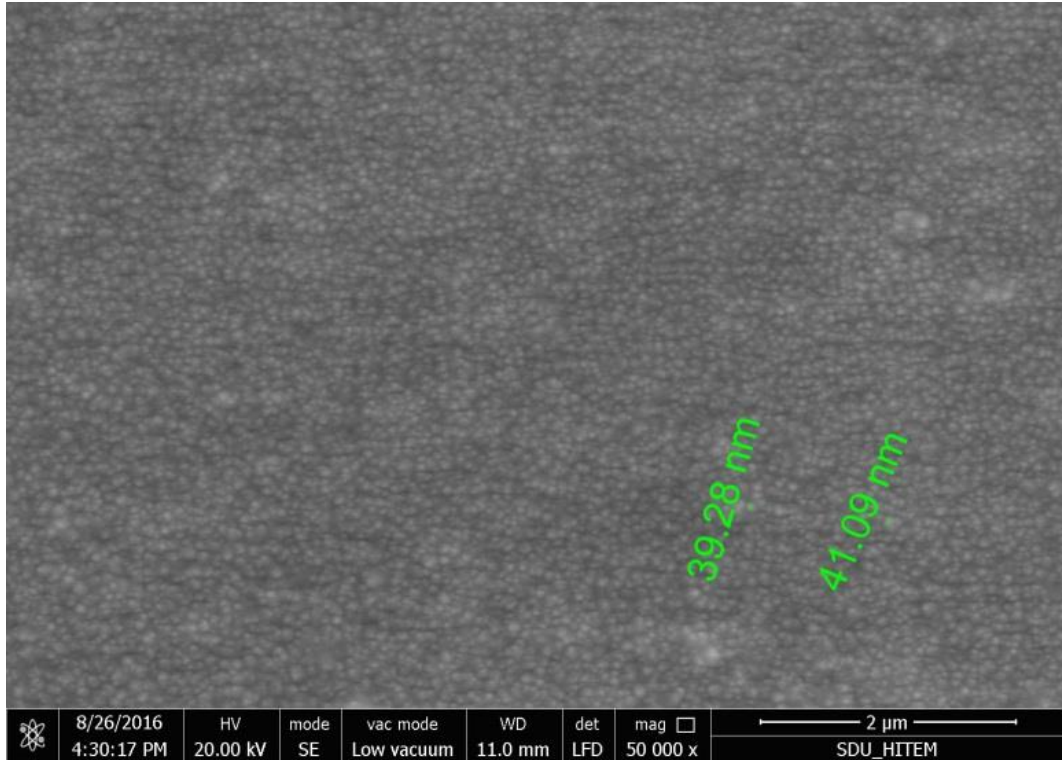


Şekil 4.19: IB1 ve IB1_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği

XRD verileri yardımıyla İnce film güneş pillerindeki tanecik büyüklüğü denklem (3.3) kullanılarak hesaplandı. Düzlemler arası uzaklık (d) ve kafes sabiti (a) denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak hesaplandı. IB1 ve IB1_400 ince film güneş pilleri için hesaplanan bu değerler Tablo 4.11’de verildi. Tavlamanın etkisi ile tanecik büyüklüğünün arttığı yani filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçtiği belirlendi. Tablo 4.11’de verilen ve XRD saçılması sonucu yapılan tanecik büyüklüğü hesaplamaları ile Şekil 4.20’deki SEM görüntülerinden elde edilen tanecik büyüklüğü uyumluluk göstermektedir. Düzlemler arası uzaklık (d) hesaplamaları, kafes sabiti (a) hesaplamaları (Freik ve diğ. 2014), yapmış oldukları çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 4.11: IB1 ve IB1_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları

hkl	IB1				IB1_400			
	$2\theta^\circ$	d (Å)	a (Å)	D (nm)	$2\theta^\circ$	d (Å)	a (Å)	D (nm)
(111)	23,95	3,711	6,427	31,41	23,93	3,715	6,435	49,89
(200)	26,68	3,337	6,674	34,11	26,65	3,340	6,681	42,63
(211)	33,05	2,707	6,631	29,84	33,09	2,703	6,623	36,06



Şekil 4.20: SEM görüntülerinde elde edilen tanecik büyüklüğü

4.3.2 %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi

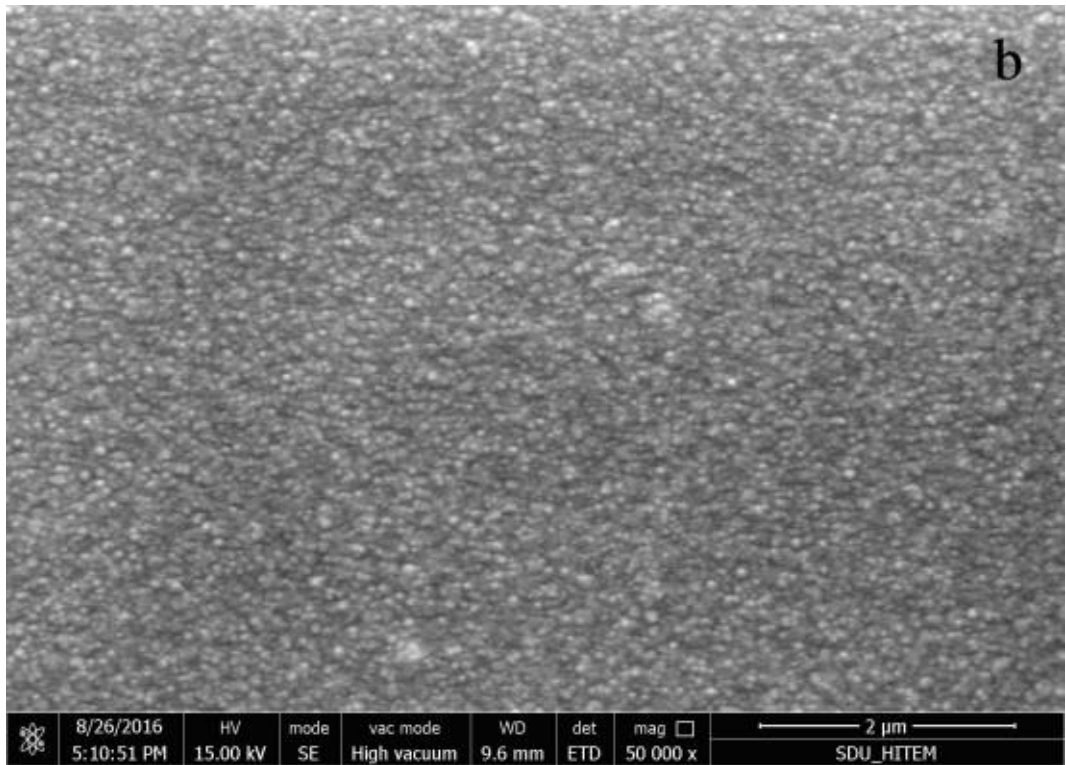
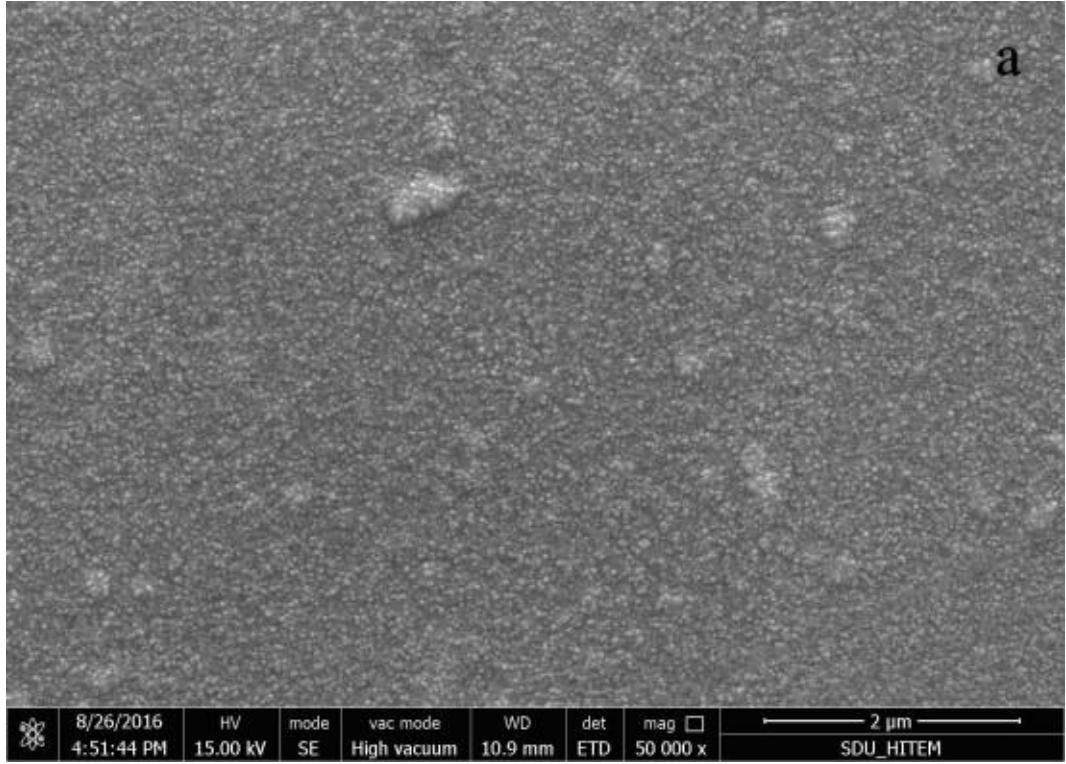
Tavllanmış ve tavlınmamış In katkılı CdTe/CdS ince film güneş pillerinin elektriksel özellikleri incelendiğinde güneş pili yapısının oluşmadığı tespit edilmiştir.

4.4 Elektron Demeti ile Üretilen %1 In katkılı CdTe/CdS Güneş Pillerinin Analizi

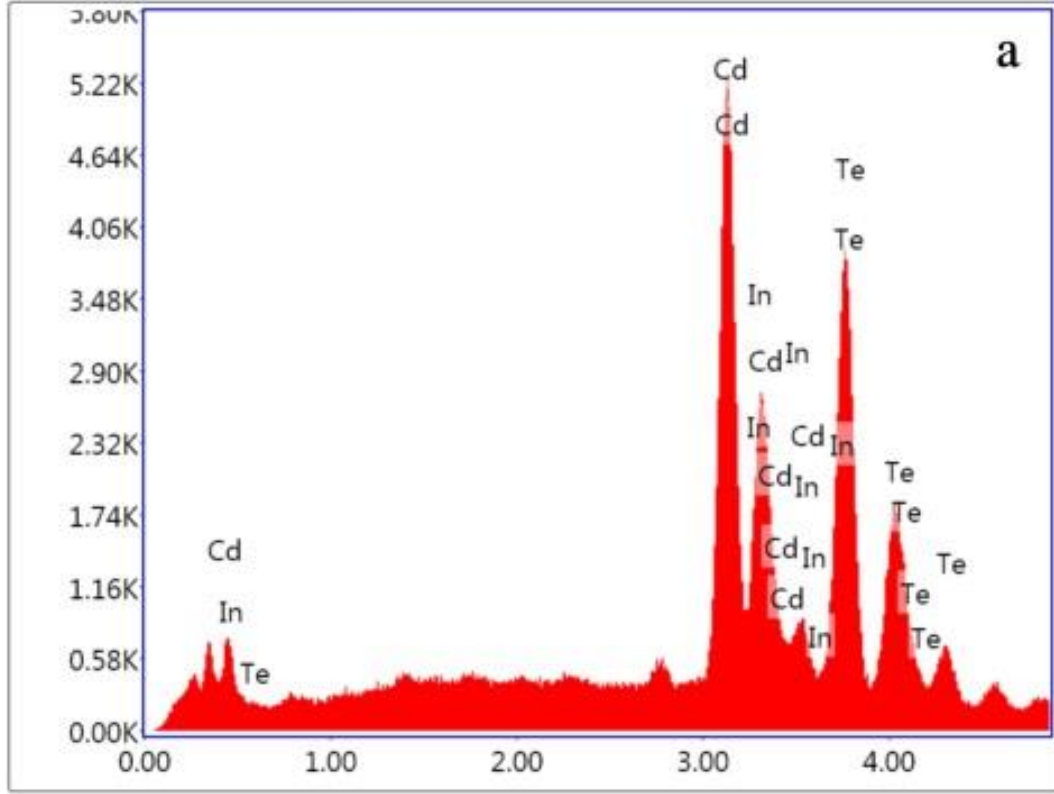
4.4.1 %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi

4.4.1.1 SEM ve EDS analizi

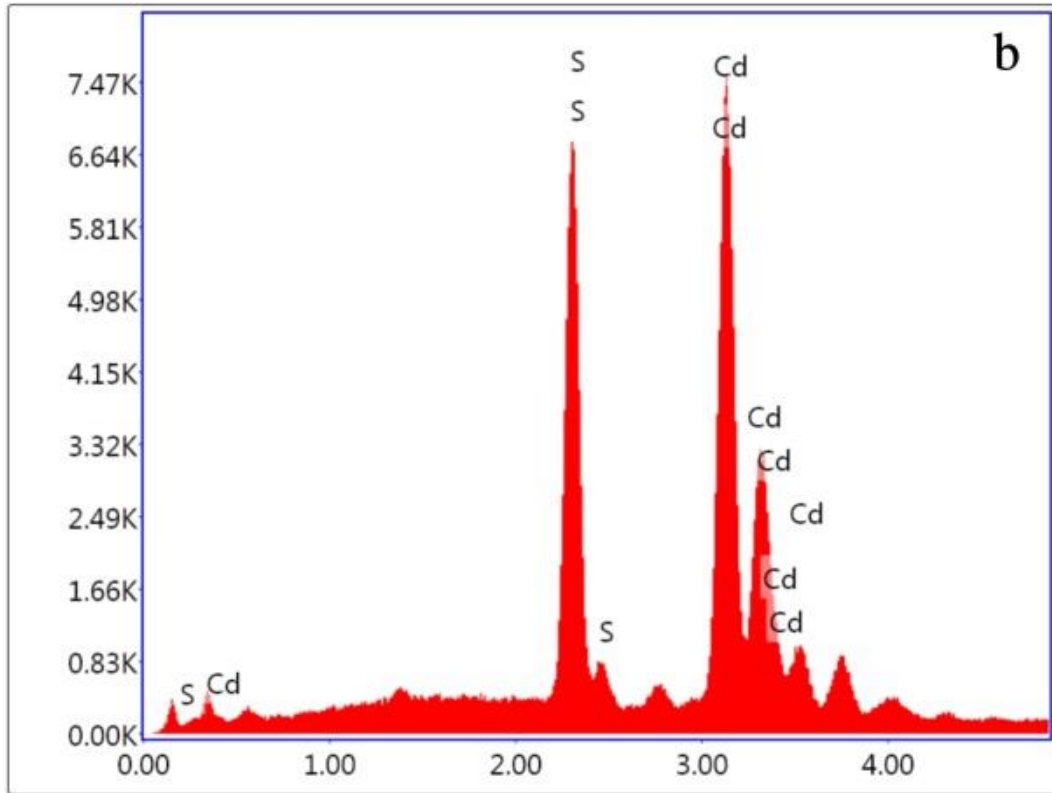
Malzemelerin yüzey morfolojisini belirlemek amacı ile tavllanmış ve tavlansız güneş pilleri için SEM görüntüleri Şekil 4.21’de, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) grafikleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de verildi. Biriktirilen ince film güneş pillerinin EDS analiz sonuçları ise sırasıyla Tablo 4.12 ve Tablo 4.13’te verildi. Şekil 4.21’deki görüntüler incelendiğinde tavlansız film yüzeyinde pürüzlülüğünün arttığı topaklanmanın azaldığı görülmektedir. Bu davranış tavlamanın olumlu bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.21: (a) ED1 ait SEM görüntüsü (b) ED1_400 ait SEM görüntüsü

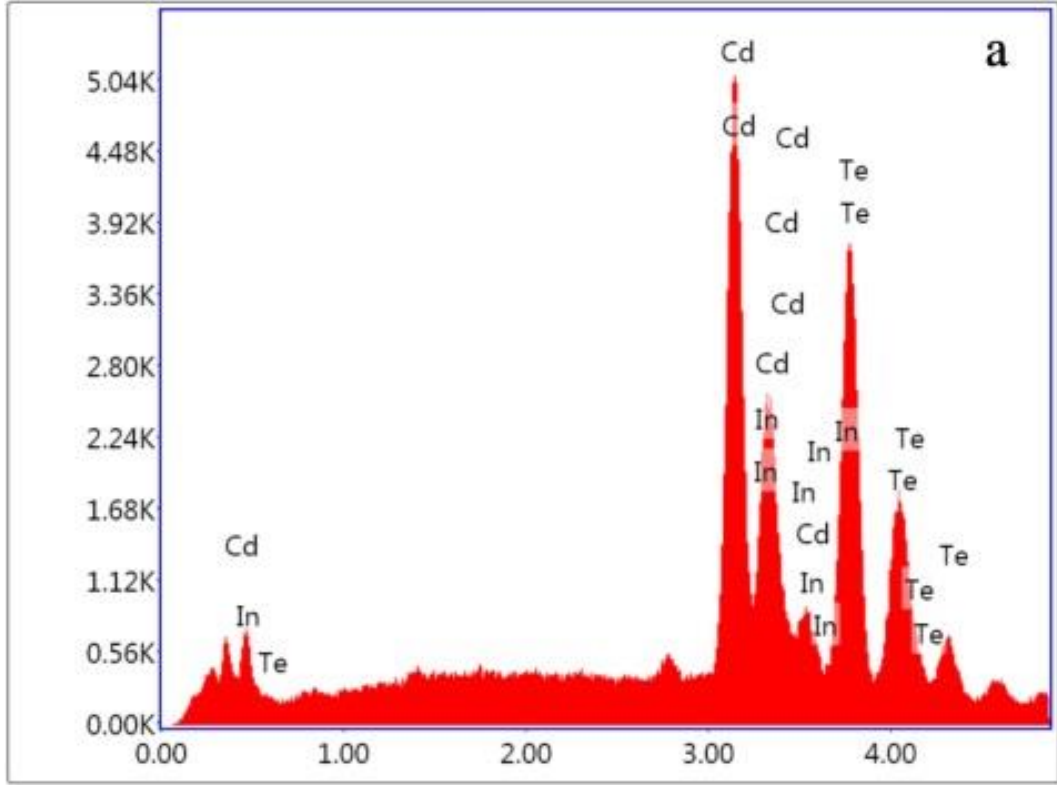


Lsec: 44.3 264 Cnts 0.900 keV Det: Octane Pro Det

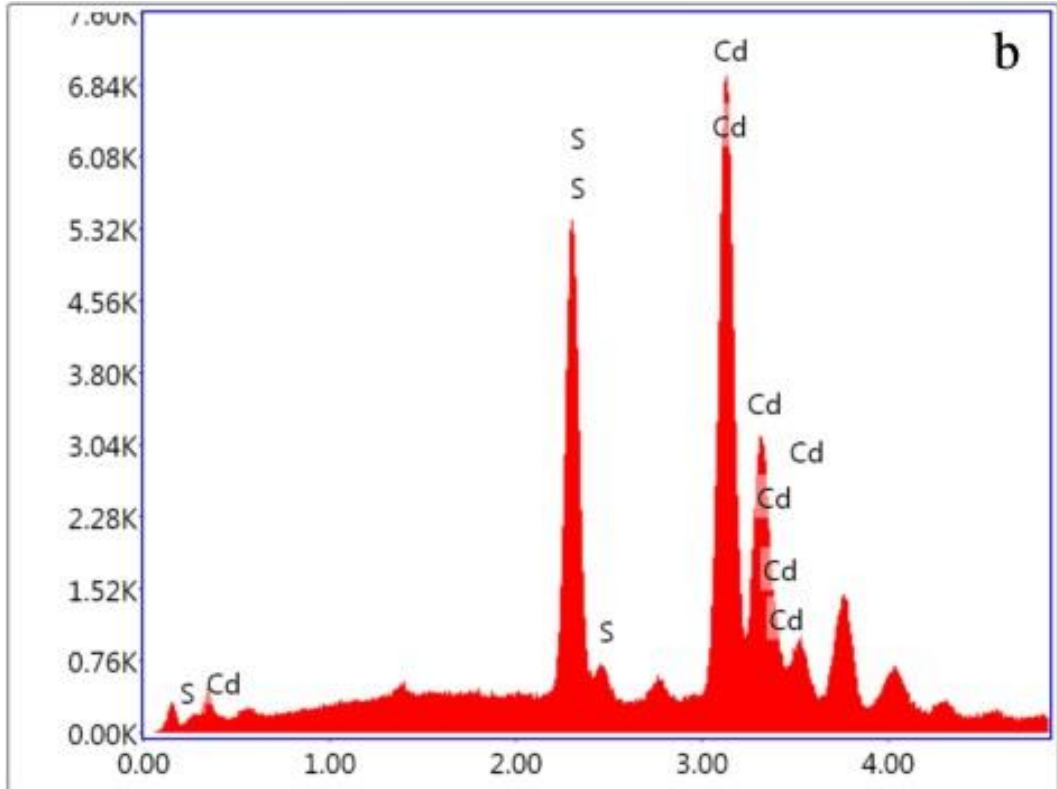


Lsec: 43.9 275 Cnts 0.900 keV Det: Octane Pro Det

Şekil 4.22: (a) ED1 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu
(b) ED1 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu



Lsec: 44.3 238 Cnts 0.900 keV Det: Octane Pro Det



Lsec: 43.9 258 Cnts 0.900 keV Det: Octane Pro Det

Şekil 4.23: (a) ED1_400 alt filme (%1 In katkılı CdTe) ait EDS spektrumu
(b) ED1_400 üst filme (CdS) ait EDS spektrumu

Tablo 4.12: Alt filmlere (%1 In katkılı CdTe) ait EDS sonucu

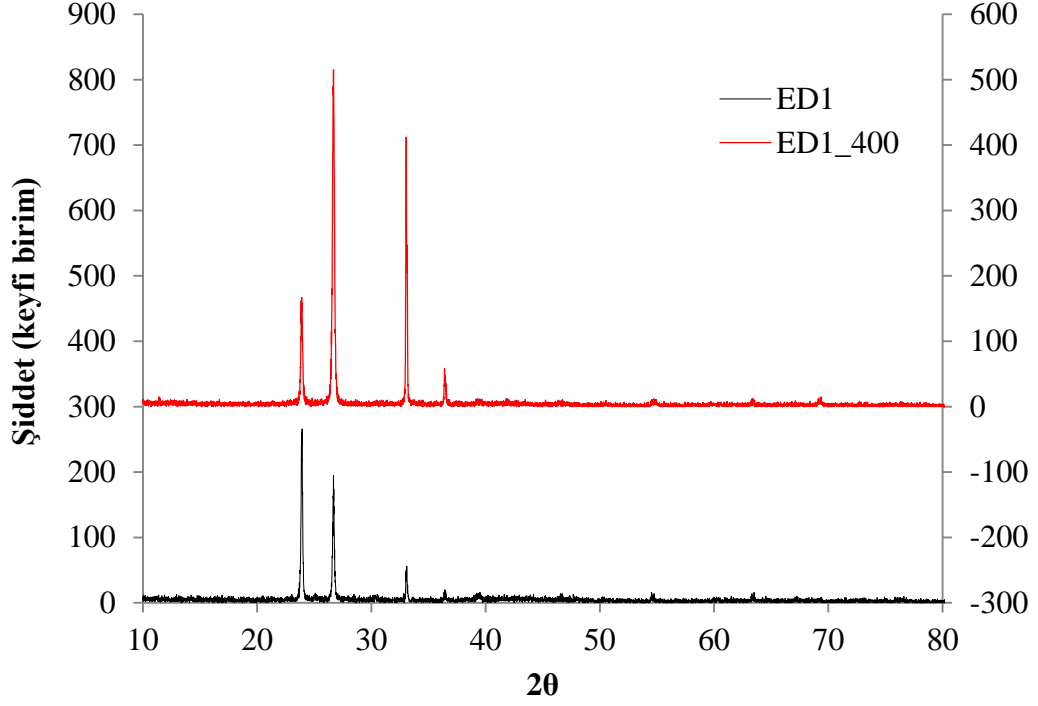
	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
ED1	Cd	41,00	43,93
	In	3,70	3,88
	Te	55,30	52,19
ED1_400	Cd	40,49	43,39
	In	4,10	4,30
	Te	55,41	52,31

Tablo 4.13: Üst filmlere (CdS) ait EDS sonucu

	Element	Yüzde ağırlık %	Atomik ağırlık %
ED1	Cd	77,83	50,03
	S	22,18	49,97
ED1_400	Cd	80,67	54,34
	S	19,33	45,66

4.4.1.2 XRD analizi

Elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile ITO kaplı cam alttaş üzerine biriktirilen, yaklaşık 1,4 μm kalınlığındaki saf %1 In katkılı CdTe/CdS (ED1) ve 400 $^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat tavllanmış %1 In katkılı CdTe/CdS (ED1_400) ince film güneş pillerinin XRD kırınım sonuçları Şekil 4.24'de verildi. ED1 ve ED1_400 numunelerinde yaklaşık olarak $2\theta=23,9^{\circ}$, $26,6^{\circ}$ ve $33,0^{\circ}$ pozisyonlarında gözlemlendi. Gözlenen piklerin pozisyonları aynı olup, tavlamaya bağlı olarak şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Tavlamaya bağlı olarak pik pozisyonlarının değişmeyip şiddetlerinin artması, yapısal bozuklukların azalması ve ince filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçmesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir. $2\theta=23,9^{\circ}$, $2\theta=26,6^{\circ}$ ve $2\theta=33,0^{\circ}$ pikleri tarafından üretilen kırılma hatları sırasıyla (111), (200) ve (211) yapısına karşılık gelmektedir (Becerril ve diğ. 1999).

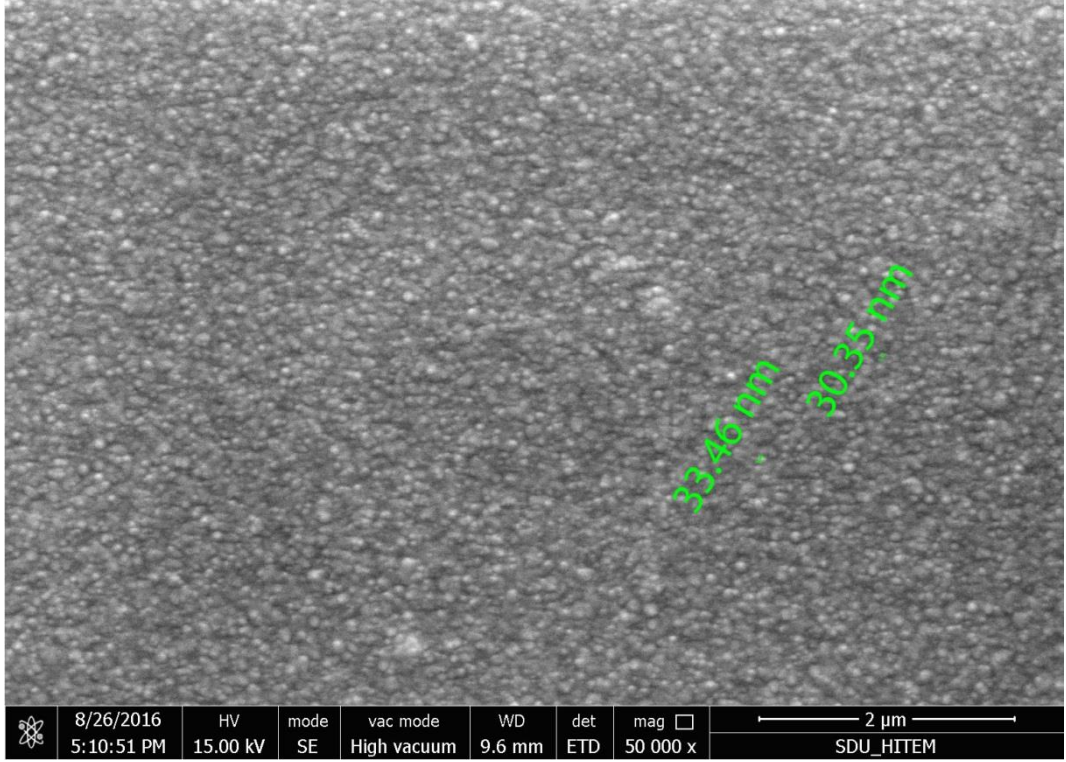


Şekil 4.24: ED1 ve ED1_400 ait X-ışını kırınımı karşılaştırmalı grafiği

Düzlemler arası uzaklık (d), kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D), hesaplamaları denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) ile hesaplandı. ED1 ve ED1_400 ince film güneş pilleri için hesaplanan bu değerler Tablo 4.14'te verildi. Tavlamanın etkisi ile tanecik büyüklüğünün arttığı yani filmlerin amorf yapıdan polikristal yapıya geçtiği belirlendi. Tablo 4.14'te verilen ve XRD saçılması sonucu yapılan tanecik büyüklüğü hesaplamaları ile Şekil 4.25'deki SEM görüntülerinden elde edilen tanecik büyüklüğü uyumluluk göstermektedir.

Tablo 4.14: ED1 ve ED1_400 örnekleri için düzlemler arası uzaklık (d) kafes sabiti (a) ve tanecik büyüklüğü (D) hesaplamaları

hkl	ED1				ED1_400			
	$2\theta^\circ$	d (Å)	a (Å)	D (nm)	$2\theta^\circ$	d (Å)	a (Å)	D (nm)
(111)	23,91	3,717	6,438	30,30	23,89	3,720	6,443	38,56
(200)	26,68	3,337	6,674	24,36	26,69	3,336	6,672	32,83
(211)	33,04	2,707	6,631	24,05	33,04	2,707	6,633	29,86

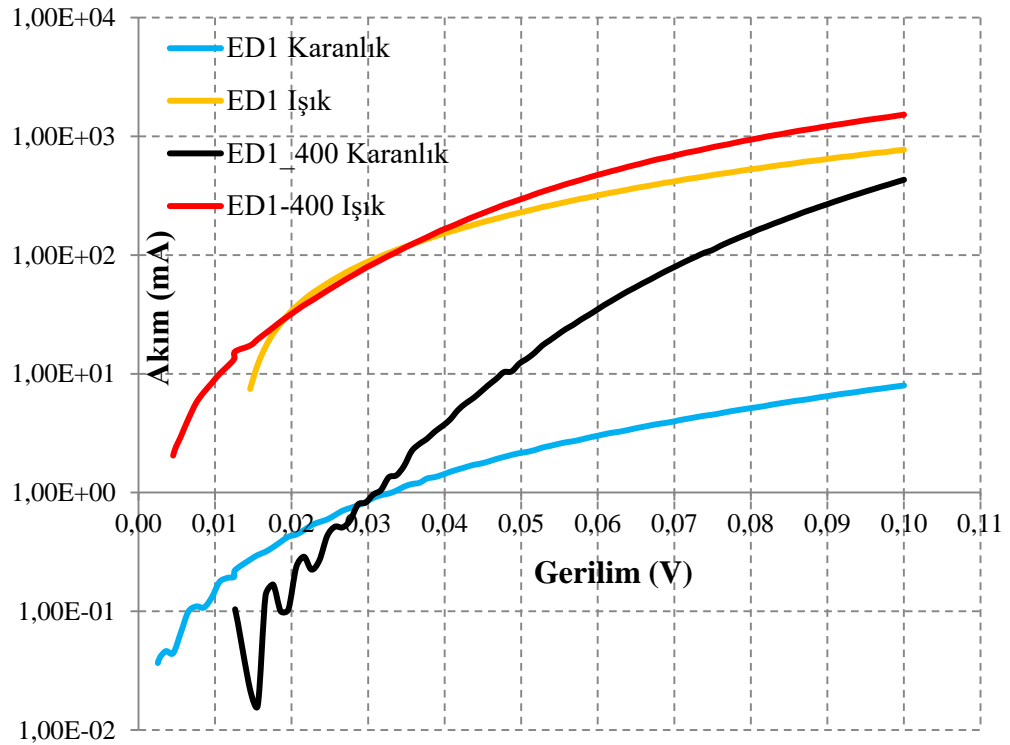
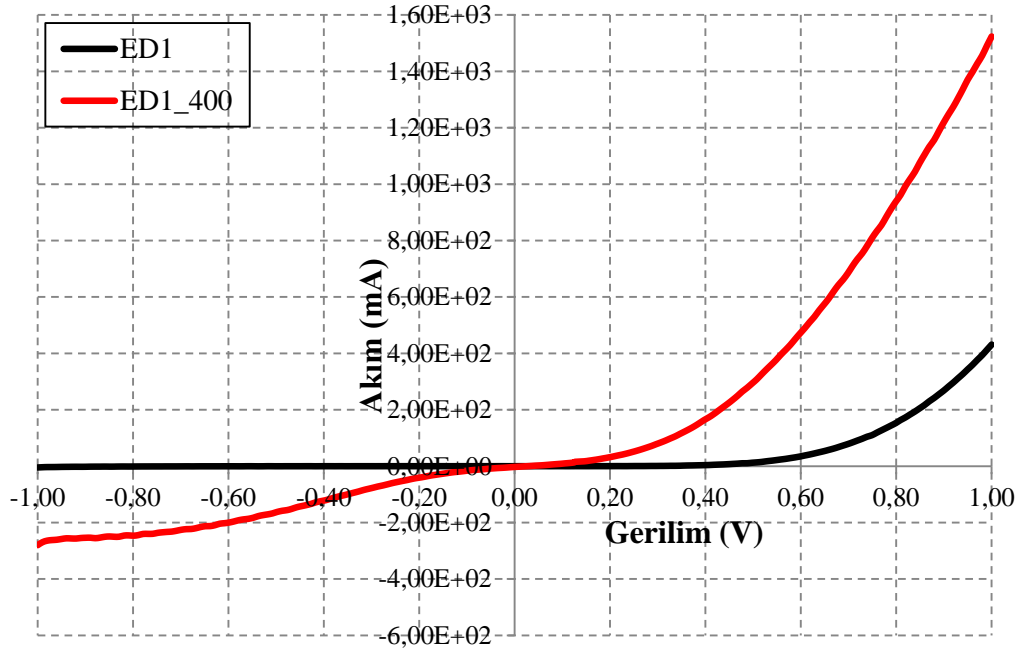


Şekil 4.25: SEM görüntülerinde elde edilen tanecik büyüklüğü

4.4.2 %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel özelliklerinin incelenmesi

Tavlanmış ve tavlanmamış In katkılı CdTe/CdS ince film güneş pillerinin I-V karakteristiği Şekil 4.26'da verildi. Şekil 4.26'dan da açıkça görüldüğü gibi akım ve voltaj eğrileri tavlanmış güneş pilinde ideal diyot karakteristiği göstermektedir.

Şekil 4.27'de tavlanmış ve tavlanmamış In katkılı CdTe/CdS ince film güneş pillerinin solar simülatör ölçümleri görülmektedir. Güneş pillerinin ışığa karşı duyarlılığı saptandı. Verimlilik bakımından %1'den daha düşük bir değer tespit edildi.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada II-III-VI ve II-VI yarıiletken grubuna ait $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ ve %1 In katkılı CdTe/CdS güneş pilleri hem ısısal buharlaştırma yöntemi hem de elektron demeti yöntemi ile üretildi. Ayrıca üretilen bu güneş pillerinin tavlama işlemine bağlı olarak yapılarındaki değişimi incelemek üzere azot gazı ortamında 400°C sıcaklıkta 1 saat süre ile tavlandı. Güneş pillerinin yüzey morfolojisi ve kompozisyonlarının belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri alındı. Yapı analizleri için X-ışını kırınım (XRD) ölçümleri alındı. Son olarak ta akım-voltaj karakteristikleri incelendi.

Isısal buharlaştırma yöntemi ile üretilen tavllanmış ve tavlansız $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ ince film güneş pillerinin SEM görüntüleri incelendiğinde tavlansız film yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. EDS analizleri sonucunda ise tavlama işlemi sonrasında Cd oranında bir artış gözlenirken, In ve Te oranında azalma tespit edildi. Element yerleşimi ve çizgi tarama analizine ait EDS haritaları incelendiğinde yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı tespit edildi. Alt film Cd, In ve Te atomlarından oluştuğu ve üst film de Cd ve S atomlarından oluştuğu görülmektedir. Tavlansız ve tavlansız numunelerin yapı analizleri XRD ölçümleri ile yapıldı, ortaya çıkan piklerin şekil ve pozisyonlarından (200) filmlerin polikristal olduğu yapıda olduğu tespit edildi. Tavlama işlemine bağlı olarak ise filmlerin daha düzenli bir yapıya geçiş yaptığı gözlemlendi. Elektriksel özellikleri incelendiğinde güneş pili yapısının oluştuğu görüldü fakat verim bakımından kayda değer bir verim elde edilemedi.

Elektron demeti yöntemi ile üretilen tavlansız ve tavlansız $\text{CdIn}_2\text{Te}_4/\text{CdS}$ ince film güneş pillerinin SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey pürüzlülüğünün tavlama sonucunda arttığı görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde ise tavlama sonucu Cd ve In oranında bir artış gözlenirken, Te oranında azalma tespit edildi. EDS spektrumlarından yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı tespit edildi. Alt film Cd, In ve Te atomlarından oluştuğu ve üst film de Cd ve S atomlarından oluştuğu görülmektedir. Tavlansız ve tavlansız numunelerin yapı analizleri XRD

ölçümleri ile yapıldı, ortaya çıkan piklerin pozisyonlarından filmlerin polikristal olduğu tespit edildi. Tavlamaya bağlı olarak ise tanecik büyüklüğünün arttığı tespit edildi. Bu durum ile filmlerin daha düzenli bir polikristal yapıya geçiş yaptığı gözlemlendi. Elektriksel özellikleri incelendiğinde güneş pili yapısının oluştuğu ve tavllanmış güneş pilinin ideal diyot karakteristiği gösterdiği belirlendi.

Isısal buharlaştırma yöntemi ile üretilen tavllanmış ve tavlansmamış %1 In katkıli CdTe/CdS ince film güneş pillerinin SEM görüntüleri incelendiğinde tavlansmış film yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve topaklanmaların oluştuğu görülmektedir. Genellikle filmlerin tanecik boyutu film kalınlığı, yüzey sıcaklığı ve tavlama sıcaklığına bağlı olduğu bilinmektedir. Ortaya çıkan tanecik boyutu mikron altı boyuttadır. EDS analizleri sonucunda ise tavlama işlemi sonrasında Cd oranında bir artış gözlenirken, In ve Te oranında azalma tespit edildi. EDS spektrumları incelendiğinde yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı tespit edildi. Tavlansmış ve tavlansmamış numunelerin yapı analizleri XRD ölçümleri ile yapıldı, ortaya çıkan en kuvvetli pikin (111) pozisyonunda olduğu tespit edildi. Tavlamaya bağlı olarak pik pozisyonlarının değişmeyip şiddetlerinin arttığı gözlemlendi.

Elektron demeti yöntemi ile üretilen tavlansmış ve tavlansmamış %1 In katkıli CdTe/CdS ince film güneş pillerinin SEM görüntüleri incelendiğinde tavlama sonucunda film yüzey pürüzlülüğünün arttığı topaklanmanın azaldığı görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde ise tavlama sonucu Cd oranında bir azalma gözlenirken, In ve Te oranında artış tespit edildi. Yapı içinde kirlilik atomlarının olmadığı tespit edildi. Tavlansmış ve tavlansmamış numunelerin yapı analizleri XRD ölçümleri ile yapıldı, gözlenen piklerin pozisyonları aynı olup, tavlamaya bağlı olarak pik şiddetinin önemli oranda arttığı tespit edildi. Aynı zamanda tavlamaya bağlı olarak tanecik büyüklüğünün arttığı tespit edildi. Elektriksel özellikleri incelendiğinde tavlansmış güneş pilinin ise ideal diyot karakteristiği gösterdiği görülmektedir.

Isısal buharlaşma yöntemi ve elektron demeti yöntemi ile üretilen güneş pilleri genel olarak incelendiğinde, tavlansmış güneş pillerinin yapısal özellikleri ve elektriksel özelliklerinin tavlansmamış güneş pillerine nazaran yukarıda belirtilen hususlar çerçevesinde daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

Altindemir, G., “Güneş pili yapımında kullanılan SnS₂ ince filmlerin hazırlanması ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2001).

Aydoğan, Ö., “Elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile üretilmiş NiTi ince-şekilli filmlerin faz yapılarının ve optik özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2009).

Becerril, M., Picos-Vega, A., Zelaya-Angel, O., Ramirez-Bon, R., Espinoza-Beltrán, F.J., Gonzales-Hernández, J., Chao, B., “Studies on In doped CdTe co-sputtered films”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 60, 257–265, (1999).

Bhattacharyya, D. and Carter, M.J., “Effect of substrate on the structural and optical properties of chemical-bath deposited CdS films”, *Thin Solid Films*, 288, 176-181, (1996).

Ceylan H.M., “CuGaSe₂ ince filmlerinin yapısal elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Denizli, (2013).

Chander, S. and Dhaka, M.S., “Physical properties of vacuum evaporated CdTe thin films with post-deposition thermal annealing”, *Physica E*, 73, 35-39, (2015^a).

Chander, S. and Dhaka, M.S., “Optimization of physical properties of vacuum evaporated CdTe thin films with the application of thermal treatment for solar cells”, *Materials Science in Semiconductor Processing* 40, 708-712, (2015^b).

Chander, S. and Dhaka, M.S., “Impact of thermal annealing on physical properties of vacuum evaporated polycrystalline CdTe thin films for solar cell applications”, *Physica E*, 80, 62-68, (2016).

Chavez, H., Jordan, M., McClure, J.C, Cush, G. and Singh, V.P., “Physical and electrical characterization of CdS films deposited by vacuum evaporation, solution growth and spray pyrolysis”, *Journal of Materials Science: Materials Electronics*, 8, 151-154, (1997).

Çalışkan, M., “Au/CdTe ve Ag/CdTe eklemlerin yapısal ve opto-elektronik özellikleri”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, İstanbul, (2006).

Deligöz, E., “Bazı ikili (CdS, CdSe, CdTe, CdF₂, AlBi, BBi) bileşiklerin yapısal, elektronik, elastik, termodinamik ve titreşimsel özelliklerinin ab initio yöntemle incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Ankara, (2007).

Dongol, M., El-Denglawey, A., Abd El Sadek, M.S. and Yahia, I.S., “Thermal annealing effect on the structural and the optical properties of nano CdTe films”, *Optik*, 126, 1352-1357, (2015).

Duan Y. and Jungen M., “Electronic structural and magnetic properties of cadmium chalcogenide beryllsilicate sodalites”, *Eur. Phys. J. B*, 2, 183-190, (1998).

Ebenezer, E., Muralı, K.R., Chockalingam, M.J. and Venkateson, V.K., “Electrical properties of vacuum annealed CdS films”, *J. Mater. Sci.*, 23, 3861-3863, (1988).

El-Nahass, M.M., Youssef, G.M. and Noby, S.Z., “Structural and optical characterization of CdTe quantum dots thin films”, *Journal of Alloys and Compounds*, 604, 253-259, (2014).

Freik, D., Parashchuk, T., Volochanska, B., “Thermodynamic parameters of CdTe crystals in the cubic phase”, *Journal of Crystal Growth*, 402, 90-93, (2014).

Fritsche, J., Kraft, D., Thißen, A., Mayer, T., Klein, A. and Jaegermann, W., “Band energy diagram of CdTe thin film solar cells”, *Thin Solid Films*, 403–404, 252-257, (2002).

Galloway, S.A., Edwards, P.R. and Durose, K., “Characterization of thin film CdS/CdTe solar cells using electron and optical beam induced current”, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 57, 61-74, (1999).

Gölcür, D., “CdInTe ince filmlerinin elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Denizli, (2012).

Gürlük, G., “NiTi hafızalı alaşım şekilli film kaplamaların üretilmesi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Anabilim Dalı, İstanbul, (2009).

Ikhmayies, S. J., and Ahmad-Bitar, R. N., “Characterization of vacuum evaporated CdTe thin films prepared at ambient temperature”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 16, 118-125, (2013).

Jain, K., Sharma, R.K., Kohli, S., Sood, K.N. and Rastogi, A.C., “Electrochemical deposition and characterization of cadmium indium telluride thin films for photovoltaic application”, *Current Applied Physics*, 3, 251-256, (2003).

Kara, K., “atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi ile p-tipi ZnO (Çinko Oksit) üretimi ve yapısal özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Adana, (2008).

Kelek, N.Ü., “Hava ısıtıcılı optimum güneş kollektörü dizaynı”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (1996).

Kittel, C., “Introduction to solid state physics”, John Wiley and Sons, New York, 1-19 (1996).

Korur, E., “Güneş enerjisi”, *Bilim ve Teknik Dergisi*, Tübitak, Cilt 23, Sayı 268, (1990).

Krishnakumar, V., Barati, A., Schimper, H.-J., Klein, A., and Jaegermann, W., “A possible way to reduce absorber layer thickness in thin film CdTe solar cells”, *Thin Solid Films*, Vol. 535, 233-236, (2013).

Kumar, S., Khan, Z.H., Majeed Khan, M.A. and Husain, M., “Studies on thin films of lead chalcogenides”, *Current Applied Physics*, 5, 561-566, (2005).

Lalitha, S., Karazhanov, S.Zh., Ravindran, P., Senthilarasu, S., Sathyamoorthy, R. and Janabergenov, J., “Electronic structure, structural and optical properties of thermally evaporated CdTe thin films”, *Physica B: Condensed Matter*, 387(1–2), 227-238, (2007).

Madelung O., Schulz M., Weiss H., “Numerical data and functional relationships in science and technology”, Landolt-Borstein (Eds.), 17, Springer, Berlin, (1982).

Martinez, J.L., Martinez, G., Torres-Delgado, G., Guzman, O., Del Angel, P., Zebya Angel, O. and Cozada-Morales, R., “Cubic CdS thin films studied by spectroscopic ellipsometry”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 8, 399-403, (1997).

Mishra, S. and Ganguli, B., “Electronic and optical properties of defect CdIn₂Te₄ chalcopyrite semiconductor: A first principle approach”, *Materials Chemistry and Physics*, 173, 429-437, (2016).

Ördek, C., “CdTe kristalinde taşıyıcı yoğunluğunun etkin iki seviye modeli ile sıcaklığa bağlı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Muğla, (2007).

Özkan, M., “Termoionik vakum ark (TVA) tekniği ile II-VI grubu bazı yarıiletken bileşiklerin ince filmlerinin üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2010).

Pandey, S.K., Tiwari, U., Raman, R., Prakash, C., Krishna, V., Dutta, V. and Zimik, K., “Growth of cubic and hexagonal CdTe thin films by pulsed laser deposition”, *Thin Solid Films*, 473, 54-57, (2005).

Rajendra, B.V. and Kekuda, D., “Flexible cadmium telluride/cadmium sulphide thin film solar cells on mica substrate”, *J Mater Sci: Mater Electron* 23, 1805–1808, (2012).

Ramírez-Bon, R., Nunez-Lopez, R., Espinoza-Beltran, F.J., Zelaya-Angel, O. and Gonzalez-Hernandez, J., “Characterization of CdTe-In Co-sputtered films”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 58, 807-811, (1997).

Rmili, A., Ouachtari, F., Bouaoud, A., Louardi, A., Chtouki, T., Elidrissi, B. and Erguig, H., “Structural, optical and electrical properties of Ni-doped CdS thin films prepared by spray pyrolysis”, *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 53-59, (2013).

Sahu, S.N., “Chemical deposition of CdS Films, structure, RBS, PIXE, optical and photoelectrochemical solar cell studies”, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 6, 43-51, (1995).

Salavei, A., Rimmaudo, I., Piccinelli, F., and Romeo, A., “Influence of CdTe thickness on structural and electrical properties of CdTe/CdS solar cells”, *Thin Solid Films*, Vol. 535, 257-260, (2013).

Sarı, H., “Yarıiletkenler ve optik özellikler”, Yüksek Lisans Ders Notları, *Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü*, Ankara, (2008).

Shenouda, A.Y., Rashad, M.M. and Chow, L., “Synthesis, characterization and performance of Cd_{1-x}In_xTe compound for solar cell applications”, *Journal of Alloys and Compounds*, 563, 39-43, (2013).

Siddiquee, K.A.M.H., Pathan, M.A.K., Alam, S., Islam, and Qadir, M.R., “Investigation of CdS and CdTe thin films and influence of CdCl₂ on CdTe/CdS structure”, *Optics*, Vol. 124, 4383-4388, (2013).

Singh, S., Kumar, R. and Sood, K.N., “ Structural and electrical studies of thermally evaporated nanostructured CdTe thin films”, *Thin Solid Films*, 519, 1078-1081, (2010).

Singsa-ngah, M., Hongsith, K., Choopun, S. and Tubtimtae, A., “Undoped and Manganese²⁺-doped polycrystalline Cd_{1-x}In_xTe sensitizer for liquid-junction solar cell devices”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 451, 189-197, (2015).

Sönmezoğlu, S., “Nano tanecikli TiO₂ ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optiksel özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Tokat, (2010).

Süvüt, H.H., “Değişik yöntemlerle elde edilen CdS’ün optik ve elektriksel özelliklerinin karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir, (2005).

Şahin M. E., Okumuş H. İ., “Güneş pili modülünün Matlab/Simulink ile modellenmesi ve simülasyonu”, *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 3, Sayı 5, 17-25, (2013).

Şişman, İ., “CdS, CdSe ve CdTe bileşik yarıiletken ince filmlerinin aynı çözeltilerden elektrokimyasal olarak Au(111) elektrodu üzerinde büyütülmesi ve AFM, STM, XRD ve UV-VIS spektroskopisi ile karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Anabilim Dalı, Erzurum, (2006).

Takanoğlu, D., “Katkısız ve katkılı CdSe ince filmlerinin optik ve elektrik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Denizli, (2011).

Tariq, G.H., Anis-ur-Rehman, M., “Annealing effects on physical properties of doped CdTe thin films for photovoltaic applications”, *Materials Science in Semiconductor Processing* 30, 665–671, (2015).

Tatar, D., “Spray pyrolysis yöntemi ile farklı altlık sıcaklığında elde edilen SnO₂ ve SnO₂:F ince filmlerin bazı özelliklerine, altlık sıcaklığının etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Erzurum, (2015).

Valyomano, A.G., Vijayakumar, K.P. and Purushothaman, C., “Effect on annealing temperatures on the electrical transport properties of spray-pyrolysed CdS Films”, *Journal of Materials Science Letters*, 9, 1025-1027, (1990).

Vazquezluna, J.G., Zehe, A. and Zelaya-Angel, O., “Chemical CdS thin film deposition influenced by external electric and magnetic fields, *Cryst. Res. Technol.*, 34, 949-958, (1999).

Vigil, O., Zelaya-Angel, O., Rodriguez, U. and Morales-Aceuedo, A., “Electrical characterization of chemically deposited CdS thin films under magnetic field application”, *Phys. Stat. Sol.(A)*, 167, 143-150, (1998).

Web_1,

https://www.webelements.com/compounds/cadmium/cadmium_sulphide.html
(23.09.2016)

Yılmaz, K. and Gölcür, D., “Investigations on structural, electrical and optical Properties of polycrystalline CdInTe thin films grown by thermal evaporation”, *SDU Journal of Science (E-Journal)*, 9, 150-162, (2014).

Yılmaz, K., “Investigation of InSe thin film based devices”, Doktora Tezi, Orta doğu Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, 46-47, (2004).

Zakharov O., Rubio A., Blase X., Cohen M. L, Loui S. G., “Quasiparticle band structures of six II-VI compounds: ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, and CdTe” *Phys. Rev. B*, 50, 10780-10787, (1994).

Zapata-Torres, M., Castro-Rodriguez, R., Melendez-Lira, M., Jimenez-Sandoval, S., Zapata-Navarro, A. and Pena, J.L., “Structural transition from CdTe to CdIn₂Te₄ in films grown by close paced vapor transport combined with free evaporation”, *Thin Solid Films*, 358, 12-15, (2000).

Zencir, B., “Çok kristalli CdTe ince filmlerinin optiksel özellikleri: optiksel sabitlerin “Zarf Yöntemiyle” saptanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Anabilim Dalı, Muğla, (2007).

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: İbrahim KIRBAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi	: KONYA 22.01.1981
Lisans Üniversite	: Gazi Üniversitesi
Y. Lisans Üniversite	: Gazi Üniversitesi
Elektronik posta	: ibrahimkirbas@msn.com
İletişim Adresi	: Armağan İlci Mah. Serdaroğlu Cad. no:45/10 Merkez / BURDUR
Yayın Listesi	:

SCI, SSCI, AHCI indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

- Kırbaş İ., Karabacak R., “Effect of annealing on the structural properties of thermal evaporated CdIn₂Te₄/CdS thin film solar cells”, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 127 (19): 7986–7992, (2016)

Diğer dergilerde yayınlanan makaleler

- İşyarlar B, Kırbaş İ., “Doğal Gaz Yakıtlı Bir Yanma Odasında Hava ve Yakıt Hızlarının Sıcaklık, Entalpi ve Entropi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi”, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5 (2): 60-66 (2015).
- İşyarlar B, Kırbaş İ., “Doğal Gaz Yakıtlı Bir Yanma Odasında Hava ve Yakıt Sıcaklıklarının Sıcaklık, Entalpi ve Entropi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4 (2): 24-31 (2014)

- Çifci A., Kırbaş İ., İşyarlar B., “Güneş Pili Kullanılarak Burdur’da Bir Evin Ortalama Elektrik İhtiyacının Karşılanması”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 5 (1): 14-17 (2014)
- Kırbaş İ., Çifci A., İşyarlar B., “Burdur İli Güneşlenme Oranı ve Güneş Enerjisi Potansiyeli”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 4 (2): 20-23 (2013)
- Kırbaş İ., Aydoğan B., Uyumaz A., “Hava Isıtmalı Güneş Kollektörlerin'de Güneş Takip Mekanizması Kullanımı”, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2 (2): 74-84 (2011).
- Özkaya M, G., Kırbaş İ., İncili V., “Havalı Güneş Kollektörünün Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Politeknik Dergisi, Cilt: 10, Sayı:3, Sayfa:253-256, (2007).

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

- Kırbaş İ., Çifci A., Karabacak R., (2013). CdTe İnce Film Güneş Pilinin En Elverişli Yapısının Belirlenmesi. 2. GÜNEŞ SEMPOZYUMU