



**CdTe/CdS GÜNEŞ HÜCRESİNİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hakkı KAPLAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Hakkı KAPLAN tarafından hazırlanan “CdTe/CdS GÜNEŞ HÜCRESİNİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Saime Şebnem AYDIN

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Nefise ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 15/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hakkı KAPLAN
15/01/2020

CdTe/CdS GÜNEŞ HÜCRESİNİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hakkı KAPLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında CdTe tabanlı ince film güneş hücre yapısı üretilerek, yapısal, optik ve elektriksel özellikleri incelendi. ITO/Cam alttaşı üzerine sırasıyla ZnO, CdS ve CdTe tabakaları Püskürtme Tekniği ile kaplandı. Yapı içerisinde soğurucu katman olarak yer alan CdTe için üç farklı kalınlık değerinde numune üretimi gerçekleştirildi. Bu yapılarda yüksek dirençli geçirgen (HRT) tabaka olarak ZnO tabakası kullanıldı. En yüksek dönüşüm verimliliği 1500 nm kalınlıklı CdTe güneş hücresi yapısında gözlemlendi. Aynı kaplama parametreleri kullanılarak ZnO tabakası olmadan bu yapı tekrarlandı ve etkisi incelendi. Ayrıca bu numunede CdS katmanının kalınlığının azaltılmasının cihaz parametrelerine olan etkisini belirlemek amacıyla 100 nm olan CdS kalınlığı yerine 75 nm yapılarak bir numune daha kaplandı. Elde edilen beş adet çok katmanlı ince filmler için öncelikle X-ışını kırınımı ile filmlerin kristal yapıları incelendi. Optik karakterizasyonlar için Fotoluminesans (FL), UV-Vis Spektrometresi kullanıldı. Filmlerin optik bant aralığı değerleri elde edildi ve gözlenen sonuçların uyumlu olduğu görüldü. Elektriksel karakterizasyondan önce tampon tabaka olarak MoO₃ ve arka kontak olarak Au, metali Isıl Buharlaştırma Tekniği ile yapılar üzerine biriktirildi ve $I - V$ ölçümleri gerçekleştirildi. En yüksek verimin elde edildiği yapı için kontak değişimine bağlı etkiler incelemek için Au metalinin yerine AuNiGe ve AuZn metalleri kullanılarak güneş hücresi parametreleri belirlendi. Au metali kullanılarak elde edilen 1500 nm CdTe kalınlıklı güneş hücresinin en yüksek dönüşüm verimliliğine sahip olduğu görüldü. Bu numuneye ait güneş hücresi parametreleri; açık devre gerilimi (V_{OC}) 0,801 V, dolum faktörü (FF) %71,8, kısa devre akımı (I_{SC}) 1,49 mA ve güç dönüşüm verimi $\eta(\%)$ 10,92 olarak belirlendi.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : Püskürtme Yöntemi, CdTe, CdS, İnce Film, Güneş Hücresi
Sayfa Adedi : 81
Danışman : Doç. Dr. Saime Şebnem AYDIN

INVESTIGATION OF STRUCTURAL OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF CdTe/CdS SOLAR CELL

(M. Sc. Thesis)

Hakkı KAPLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

In this thesis, CdTe based thin film solar cell structure is produced and its structural, optical and electrical properties are examined. ZnO, CdS and CdTe layers were coated on ITO / Glass substrates by Sputtering Technique, respectively. Three different thickness samples were produced for CdTe which is an absorber layer in the structure. In these structures, ZnO layer was used as a high resistivity transparent (HRT) layer. The highest conversion efficiency was observed in the 1500 nm thickness CdTe solar cell structure. Using the same coating parameters, this structure was repeated without the ZnO layer and its effect was examined. In addition, in order to determine the effect of reducing the thickness of CdS layer on the parameters of this sample, another sample was coated by making 75 nm instead of 100 nm CdS thickness. For the five multi layer thin films obtained, the resulting crystal structures of films were analyzed by X-ray diffraction. Photoluminescence (PL), UV-Vis Spectrometer systems were used for optical characterizations. Optical band gap of the films were obtained and found to be compatible with the observed results each others. Before electrical characterization, MoO₃ as buffer layer and Au as back contact were deposited on structures by Thermal Evaporation Technique and $I - V$ measurements were performed. Solar cell parameters were determined by using AuNiGe and AuZn metals instead of Au metal to investigate the effects of contact change for the structure with the highest yield. It was observed that the solar cell with the thickness of 1500 nm CdTe obtained using Au metal had the highest conversion efficiency. The solar cell parameters of this sample are; open circuit voltage (V_{OC}) was 0,801 V, filling factor (FF) was 71,8%, short circuit current (I_{SC}) was 1,49 mA and conversion efficiency η (%) was determined as 10,92.

Science Code : 20227

Key Words : Sputtering Technique, CdTe, CdS, Thin Film, Solar Cell

Page Number : 81

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Saime Şebnem AYDIN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansım boyunca yardımlarını esirgemeyen, kıymetli danışman hocam sayın Doç. Dr. Saime Şebnem AYDIN'a, engin bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen kıymetli hocam Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin müdürü, sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışmalarım boyunca desteğiyle her zaman yanımda olan, çok sevgili hocam Dr. Yunus ÖZEN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez çalışmalarım sırasında yardımlarıyla desteklerini esirgemeyen, Dr. Ü. Ceren BAŞKÖSE, Dr. Neslihan AKÇAY, H. İbrahim EFKERE, Gökhan GÖZLEKÇİ, Gürkan KURTULUŞ'a, sevgili çalışma arkadaşlarım Burak KORKMAZ, A. Emre GÜMRÜKÇÜ ve Ömer AKPINAR'a çok teşekkür ederim.

X-Işını ölçümlerimi gerçekleştirdiğim Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne ve sayın Prof. Dr. Hakan ATEŞ hocama teşekkür ederim.

Sevgili arkadaşlarım Umur T. YILMAZER, Mehmet ÖZTÜRK ve Nevin DİRİ'ye çok teşekkür ederim.

Her adımda yanımda olduğunu bildiğim, yol arkadaşım sevgili dostum H. Mustafa ÇEKEROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm adımlarımda tecrübesini eksik etmeyen, hayata karşı duruşuyla bambaşka bakış açısı edinmemi sağlayan maddi ve manevi destekçim babam Mithat KAPLAN'a, hayatıma kattıkları bütün güzellikleriyle sevgili yeğenlerime, ablam, ağabeyim ve enişteme, biricik annem Döndü KAPLAN'a sonsuz sevgi ve şükran dolusu teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez 20011K120290 no'lu "Fotonik Araştırma Merkezi" isimli ve 2016K121220 no'lu "Fotonik Uygulama ve Araştırma Altyapısının Geliştirilmesi" isimli T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı projeleri ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKENLER VE GÜNEŞ HÜCRELERİ	7
2.1. Yarıiletkenler	7
2.2. p-n Eklem Yarıiletken Tipleri	13
2.3. Fotovoltaik Etki.....	14
2.4. Güneş Hücresinin Elektriksel Karakterizasyonu	15
2.5. İnce Film Güneş Hücreleri	20
2.6. CdTe Tarihsel Gelişim Süreci	22
2.7. CdTe Tabanlı Güneş Hücresi Yapısı	26
2.7.1. Alttaş	26
2.7.2. Arka Kontak.....	26
2.7.3. Soğurucu Katman.....	27
2.7.4. Pencere Tabaka	29
2.7.5. Ön Kontak.....	31

Sayfa

3. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER	33
3.1. İnce Film Güneş Hücrelerinin Üretimi	33
3.1.1. Eş Püskürtme Sistemi.....	33
3.1.2. Isısal Buharlaştırma Sistemi	35
3.2. Karakterizasyon Yöntemleri.....	35
3.2.1. X-Işını Kırınımı	36
3.2.2. UV-Vis Spektrometresi	37
3.2.3. Fotoluminesans	39
3.2.4. Akım Gerilim Ölçüm Sistemi	41
4. NUMUNELERİN KAPLANMASI, KARAKTERİZASYONLARI VE FABRİKASYON İŞLEMLERİ: BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1. Yapıların Üretimi.....	43
4.1.1. Alttaş temizliği.....	44
4.1.2. ZnO katmanı	44
4.1.3. Pencere katmanı	45
4.1.4. CdTe kaplaması	46
4.2. CdTe/CdS Güneş Hücre Yapısının Analizleri.....	49
4.2.1. X-ışını kırınımı.....	49
4.2.2. Fotoluminesans ölçümleri	51
4.2.3. UV-Vis ölçümleri.....	54
4.3. Metalizasyon İşlemleri.....	57
4.3.1. Tampon tabaka.....	57
4.3.2. Metal arka kontak işlemleri	58
4.4. Akım Gerilim Ölçümleri	59
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	69

	Sayfa
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	81



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. FV teknolojisinin avantaj ve dezavantajları.....	3
Çizelge 2.1. Elementlerin kısaltılmış periyodik tablosu.....	8
Çizelge 2.2. CdTe ince filminin teorik hesaplanmış fotovoltak özellikleri.....	22
Çizelge 2.3. Superstrate ve alttaş konfigürasyonu için mevcut sorunlar	25
Çizelge 2.5. CdTe ve CdS bazı özellikleri	30
Çizelge 4.1. ZnO kaplama parametreleri.....	45
Çizelge 4.2. CdS kaplama parametreleri	46
Çizelge 4.3. CdTe kaplama parametreleri	47
Çizelge 4.4. Kaplamaları gerçekleştirilen kalınlıklarıyla beraber yapılar ve kodları	48
Çizelge 4.5. Optik ölçümler sonucunda elde edilen yapıların bant aralığı değerleri	57
Çizelge 4.6. MoO ₃ kaplama parametreleri	58
Çizelge 4.7. Au, AuNiGe ve AuZn için kaplama parametreleri.....	58
Çizelge 4.8. CTS1075 kodlu yapının elektriksel parametreleri.....	60
Çizelge 4.9. CTS1078 kodlu yapının elektriksel parametreleri.....	61
Çizelge 4.10. CTS1081 kodlu yapının elektriksel parametreleri.....	63
Çizelge 4.11. CTS1085 kodlu yapının elektriksel parametreleri.....	64
Çizelge 4.12. CTS1087 kodlu yapının elektriksel parametreleri.....	65
Çizelge 4.13. Yapılara ait güneş hücresi performans parametreleri	66
Çizelge 4.14. CTS1078 yapısı için farklı kontaklı performans parametreleri.....	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. 2005-2015 yılları arasında karşılaştırmalı olarak verilen birincil enerji tüketim verileri.....	1
Şekil 2.1. Bir yarıiletken için basitleştirilmiş enerji bant diyagramı	8
Şekil 2.2. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu	9
Şekil 2.3. Yarıiletkenlerde (a) Fermi enerji düzeyi, (b) Alıcı enerji düzeyi, (c) Verici enerji düzeyi	11
Şekil 2.4. Doğrudan ve dolaylı bant aralığı.....	12
Şekil 2.5. Bir p-n eklem oluşum diyagramı.....	14
Şekil 2.6. Karanlıkta ve ışınım altında bir güneş hücresine ait i-v eğrisi.....	16
Şekil 2.7. (a) ASTM G 173-03 Standardında alınan AM1.5 güneş spektrumu (b) Soğurucu tabakanın optik bant aralığının bir fonksiyonu olarak tek eklemli güneş pilinin maksimum verimi	18
Şekil 2.8. (a) İdeal bir fotovoltaiik aygıtta (b) Sonlu seri ve şönt dirençlerine sahip ideal olmayan bir cihaza ait eşdeğer devreler	20
Şekil 2.9. 1975-2019 yılları arası yapılan çalışmalarda elde edilen güneş hücresi verimlilik tablosu	21
Şekil 2.10. CdTe güneş pili için (a) Superstrate ve (b) Altaş konfigürasyonlarının şematik diyagramı.....	25
Şekil 2.11. CdTe kristal yapısı.....	28
Şekil 2.12. CdS kristal yapısı.....	29
Şekil 3.1. Eş püskürtme yöntemi	34
Şekil 3.2. Isısal buharlaştırma tekniği	35
Şekil 3.3. Kristal düzlemlerinde X-ışınlarının saçılması.....	37
Şekil 3.4. UV-Vis spektrometresine ait şematik gösterim	38

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. Bir yarıiletken içindeki uyarım sonucunda meydana gelen (a) Banttın banda ışımalı (b) Verici seviyeden değerlik bandına ışımalı (c) İletim bandından bir alıcı seviyeye ışımalı (d) Bir orta seviye ışımasız geçişler	40
Şekil 4.1. ZnO kaplamasının şematik gösterimi	44
Şekil 4.2. CdS kaplamalarının şematik gösterimi	46
Şekil 4.3. Farklı kalınlıklı CdTe kaplamalarının şematik gösterimi	47
Şekil 4.4. (a) CTS1085 ve (b) CTS1087 kodlu yapıların şematiği	48
Şekil 4.5. CdS ince filmine ait XRD deseni	50
Şekil 4.6. CdTe ince filmlerine ait XRD deseni	51
Şekil 4.7. CTS1075, CTS1078 ve CTS1081 kodlu numuneler için FL pikleri	52
Şekil 4.8. CTS1078-CTS1085 kodlu numuneler için FL pikleri	53
Şekil 4.9. CTS1078-CTS1087 kodlu numunler için FL pikleri	53
Şekil 4.10. ZnO için (a) soğurma ve (b) $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği	54
Şekil 4.11. CdS için (a) soğurma ve (b) $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği	55
Şekil 4.12. Farklı kalınlıktaki CdTe'ler için (a) soğurma ve (b) $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği ..	55
Şekil 4.13. ZnO, CdS ve CdTe için (a) soğurma ve (b) $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği	56
Şekil 4.14. CTS1075 kodlu güneş hücre yapı şeması	60
Şekil 4.15. CTS1075 numunesi için $I - V$ grafiği	60
Şekil 4.16. CTS1078 kodlu güneş hücre yapı şeması	61
Şekil 4.17. CTS1078 numunesi için $I - V$ grafiği	61
Şekil 4.18. CTS1081 kodlu güneş hücre yapı şeması	62
Şekil 4.19. CTS1081 numunesi için $I - V$ grafiği	62
Şekil 4.20. CTS1085 kodlu güneş hücre yapı şeması	63
Şekil 4.21. CTS1085 numunesi için $I - V$ grafiği	64
Şekil 4.22. CTS1087 kodlu güneş hücre yapı şeması	65

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23. CTS1087 numunesi için $I - V$ grafiği.....	65
Şekil 4.24. Farklı arka kontak malzemeli CTS1078 numunesi için I-V grafiği	67



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Ölçümler için kullanılan spektrometre	39
Resim 3.2. Ölçümlerde kullanılan fotoluminesans düzeneği	41
Resim 3.3. Ölçümlerde kullanılan düzenek ve AM1.5 standartlı solar simülatör	41
Resim 4.1. Püskürtme yöntemiyle elde edilen ZnO filmi	45
Resim 4.2. Püskürtme yöntemiyle elde edilen CdS filmi.....	46
Resim 4.3. Püskürtme yöntemiyle elde edilen CdTe filmi.....	48
Resim 4.4. Üretimi gerçekleştirilen çok katmanlı güneş hücre yapıları	49
Resim 4.5. Yapıların metal arka kontak işlem adımları	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
λ	Dalgaboyu
μm	Mikrometre
$\text{\AA}$	Angström
a	Örgü Parametresi
$a\text{-Si}$	Amorf Silisyum
Ar	Argon
As	Arsenik
Au	Altın
AuNiGe	Altın Nikel Germanyum
AuZn	Altın Çinko
Cd	Kadmiyum
CdCl_2	Kadmiyum Klorür
CdHgTe	Kadmiyum Civa Tellür
CdO	Kadmiyum Oksit
CdZnS	Kadmiyum Çinko Sülfür
cm	Santimetre
d	düzlemler arası mesafe
E_A	Akseptör Enerjisi
E_D	Donör Enerjisi
E_F	Fermi Enerji Seviyesi
eV	Elektronvolt
FF	Dolum Faktörü
GaAs	Galyum Arsenik
GaN	Galyum Nitrür
Ge	Germanyum
Hg	Civa

Simgeler**I****In****InP** **I_{SC}** **mA****MoO₃****mV****n****nm****P****p****pc-Si****Sb****sc-Si****Si****TeAu****Tellür****V** **V_{OC}** **ZnO****ZnS****ZnSe** **η** **θ** **χ** **Ω** **Açıklamalar**

Akım

İndiyum

İndiyum Fosfat

Kısa Devre Akımı

Miliamper

Molibden Trioksit

Milivolt

Kırınım Derecesi

Nanometre

Fosfor

Momentum

Çok kristalli Silisyum

Antimon

Tek Kristal Silisyum

Silisyum

Tellür Altın

Tellür

Gerilim

Açık Devre Gerilimi

Çinko Oksit

Çinko Sülfür

Çinko Selenit

Dönüşüm Verimliliği

Kırınım Açısı

Afinite

Ohm

Kısaltmalar**CIGS****CZTS****DSSC****RF****UV****Açıklamalar**

Bakır İndiyum Galyum Disülfid

Bakır Çinko Kalay Sülfür

Boya Duyarlı Güneş Hücresi

Radyo Frekansı

Morötesi

Kısaltmalar**Vis****XRD****FL*****I – V*****Açıklamalar**

Görünür

X-Işını Kırınımı

Fotoluminesans

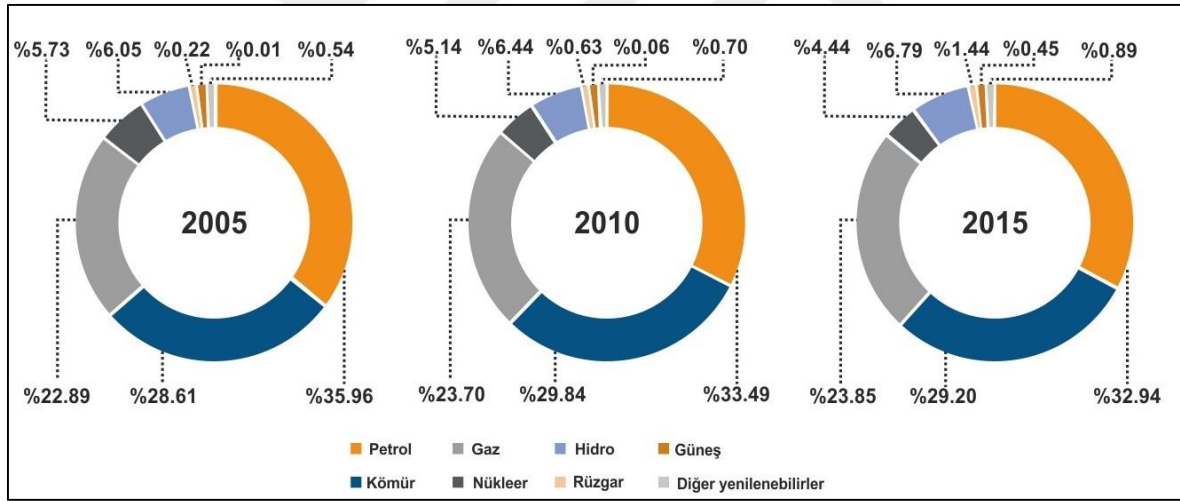
Akım-Gerilim



1. GİRİŞ

Doğadan elde edilen enerji biçimi olan yenilenebilir enerji, doğal kaynakların üretim potansiyelleri sebebiyle ilgi konusudur. Kaynaktan faydalanılan miktardaki enerjinin hızlı biçimde kendini yenileyebilecek yeteneğe sahip olması yenilenebilir enerji olarak tarif edilir [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga, biyokütle, hidroelektrik, hidrojen verilebilir [2].

Çeşitli iklim ve coğrafi konumlar için ihtiyaç duyulan elektriğin karşılanması, gelişen teknolojiyle beraber azalan üretim maliyetleri açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının ön planda olmasını sağlamaktadır. 2005, 2010 ve 2015 yılları için Dünya Enerji Konseyi tarafından yayınlanan enerji tüketim verileri Şekil 1.1’de verildi [3]. Bu şekil incelendiğinde yenilenebilir enerji kullanımının arttığı görülmektedir.



Şekil 1.1. Dünya Enerji Komisyonu tarafından yayınlanan 2005, 2010 ve 2015 yıllarına ait enerji tüketim verileri

Enerji üretiminde maliyeti düşük tutabilmek önemlidir. Geleneksel fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz) ile yenilenebilir enerji üretiminin maliyeti karşılaştırıldığında yenilenebilir enerji daha yüksek maliyete sahiptir [3,4]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek maliyeti bir dezavantaj oluştururken, uzun ömürlü olmaları ve karbon salınımını azaltmaları fosil yakıtlara göre avantajdır. Dünya nüfusundaki hızlı artış farklı kaynaklardan elde edilebilecek enerjiye olan ihtiyacı arttırmaktadır. Güneş, dünya yüzeyindeki en büyük enerji kaynağıdır. Güneş ışınımı, güneşin içerisinde meydana gelen sıralı füzyon reaksiyonları

sonucunda açığa çıkan elektromanyetik ışıındır. Güneş ışıınımdan elde edilen güneş enerjisi, sürdürülebilirlik yönünden, önümüzdeki yıllar içerisinde elektrik üretimi açısından önemli bir rol oynama potansiyeline sahiptir [5-6].

Fotovoltaik (FV) endüstrisinin hızla büyümesi, üretim seviyeleri ve verimliliğin artışıyla beraber maliyetlerin azalmasıyla devam eden bir süreçtir. Güneş ışığından faydalanmak üzere geliştirilmiş teknolojiler, soğurdukları ışıını enerjiyi dönüştürme biçimlerine göre aktif veya pasif olarak sınıflandırılabilir. Pasif güneş teknolojisi, ısıl anlamda iyi bir karakteristiğe sahip olan malzemelerden ve binaların güneş ışığıyla ısınacak şekilde konumlandırılmasından yararlanır; aktif güneş teknolojileri temel olarak güneş enerjili termal kolektörler, yoğunlaştırılmış güneş ışığından yararlanır [7, 8]. Pasif güneş teknolojilerini FV sistemler olarak adlandırmak mümkündür [9]. FV sistemler güneş ışığını genellikle yarıiletken malzemeler aracılığıyla elektriğe dönüştürür. FV sistemlerin geliştirilmesinde, düşük maliyet ve yüksek dönüşüm verimliliği önemlidir.

Güneş hücresi; elektromanyetik radyasyonu FV etki yardımıyla elektriğe dönüştüren ve FV enerji sistemlerinin temeli olan bir cihazdır. Bir güneş hücresi üzerinde ışıınım düştüğü sürece elektrik gücü üretir. Işıının sona ermesi elektrik üretimini sonlandırır. Güneş hücreleri kara ve uzay uygulamalarında kullanılabilir [10]. Çizelge 1.1’de FV teknolojinin sahip olduğu bazı avantaj ve dezavantajlar verilmiştir.

Günümüzde FV temelli alternatif enerji sistemlerinin çoğuna Silisyum (Si) tabanlı aygıtlar hâkimdir [11]. Birinci nesil güneş hücreleri olarak da isimlendirilen Si tabanlı güneş hücreleri, tek kristal Si (sc-Si) ve çok kristal Si (pc-Si) yapıya sahiptir. Elde edilen bu tip güneş hücrelerinde, soğurma katsayı oldukça düşüktür ve bu eksikliği gidermek için yeterince kalın tabakalı aygıtlar üretmek gerekir [12-17]. Hücre kalınlıklarının (yaklaşık 100-500 μm) yüksek olması ve yurtdışından temin edilmeleri maliyetleri oldukça arttırmaktadır [16, 17]. Si tabanlı aygıtlar için elde edilmiş en yüksek verim değerleri sc-Si ve ps-Si için sırasıyla %26,7 ve %22,3’dür [18].

İnce film teknolojisinin kullanılmasıyla birinci nesil güneş hücrelerinde var olan yüksek maliyetleri azaltmak amacıyla ikinci nesil güneş hücreleri geliştirilmiştir [19]. Burada temel olarak maliyeti düşürmek için foto aktif tabakaların kalınlığı (ince tabakaların soğuruculuğu

arttırılarak) azaltılmıştır[20]. İkinci nesil güneş hücrelerinin ortaya çıkış şekli birinci nesil güneş hücrelerinin geliştirilmesi sırasında tanımlanan FV malzemeler temel alınarak gerçekleşmiştir. Amorf Si (a-Si), Bakır İndiyum Galyum Diselenid (CIGS) ve Kadmiyum Tellür (CdTe) tabanlı yapılar ikinci nesil güneş hücresi grubu içerisinde yer almaktadır [21-23]. Doğrudan geçişli bant aralığına sahip malzemelerin kullanımına dayanan bu tip FV cihazlar, yüksek soğurma katsayıları nedeniyle birkaç mikron kalınlığa sahip filmlerden elde edilir [24].

Çizelge 1.1. FV teknolojisinin avantaj ve dezavantajları [4]

Avantajlar	Dezavantajlar
-Kaynağın yaygın ve sınırsız, erişilebilir olması	-Kaynağın sürekli aynı düzen rejiminin olmaması
-Karbon emisyonu olmaması	-İlk kurulum maliyetlerinin yüksekliği
-Düşük üretim ve işletme maliyetleri	-Üretim sonuçlarının tahmin edilememesi ve mevsimsel değişimi
-Modüler olması	-Geleneksel enerji kaynaklarına göre pahalılığı
-Sağlık ve toplumsal açıdan risk üretmemesi	
-Kolay kurulumu ve merkezi bir şebekeye ihtiyaç duymaması	

İkinci nesil güneş hücresi grubu içinde yer alan, CIGS ve a-Si yapıları için laboratuvar ölçeğinde verim değerleri sırasıyla % 22,9 ve % 14 elde edilmiştir [29, 30]. İkinci nesil güneş hücrelerinin veriminin düşük olmasının getirdiği dezavantajı ortadan kaldırmak amacıyla üçüncü nesil olarak adlandırılan güneş hücresi grubu geliştirilmeye başlanmıştır. Üçüncü nesil güneş hücre grubu diğer gruplara nazaran yarıiletken olmayan (polimer tabanlı hücreler gibi), kuantum nokta teknolojilerini ve tandem/çok eklemli III-V grubu güneş hücrelerini içermektedir. Örnek olarak Bakır Çinko Kalay Sülfür (CZTS), Perovskite güneş hücreleri, organik güneş hücreleri, kuantum nokta ve boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC) verilir [31, 32].

İkinci nesil güneş hücreleri arasında yer alan CdTe, güneş spektrumunun maksimum şiddetine karşılık gelen değerlerde (1,5 eV'luk bant aralığında) en iyi etkileşime sahip bileşik yarıiletken malzemelerden olması sebebiyle önem taşır [33]. Yüksek soğurma katsayısına sahiptir ve polikristal yapıda üretime elverişlidir [34, 35]. Üretim açısından çeşitli

tekniklerin uygulanabilir olmasıyla beraber; yansıma kayıpları, rekombinasyondan kaynaklanan kayıplar ve pencere tabakayla olan difüzyonu gibi dönüşüm verimliliğini sınırlayan etmenleri en aza indirmek yapılan araştırmaların temelini oluşturmaktadır [36]. Teorik olarak %30 verimlilik limitine yakın değerleri elde etmek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda hücre bazında en yüksek %22,1'lik (1 cm^2 alan için) verimlilik gözlenmiştir [28]. Dönüşüm verimliliği değerleri Si tabanlı aygıtlarla kıyaslandığında düşüktür. CdTe için elde edilen açık devre gerilimi bant aralığı tarafından tanımlanan maksimum değer altında kalmaktadır. Literatürde, yeterince yüksek p-tipi katkı oranlarının elde edilememesi ve polikristal yapıyla ilişkili rekombinasyonların mevcut olmasıyla bu durum açıklanmaya çalışılmıştır [37]. Açık devre geriliminin ve dolayısıyla verimin iyileştirilmesi, aktif katman kalınlığını azaltacağından üretim işlemlerinin maliyetini azaltacaktır. Kadmiyum (Cd) ve Tellür (Te) elementleri toksik etkileri iyi bilinen malzemeler olduğundan FV modüllerinde yer alan CdTe katmanından kaynaklı Cd emisyonu problem oluşturmaktadır. Cd ve Te elementlerinin giderek azalan rezervleri de göz önünde bulundurulduğunda mevcut miktarın en yüksek verimle değerlendirmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [25-27].

Soğurucu tabaka olarak kullanılan CdTe kalınlığındaki değişimin incelenmesi bu tez çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Ayrıca pencere tabakasındaki incelmeye bağlı olarak ortaya çıkacak problemleri ortadan kaldırmak için yüksek dirençli geçirgen (HRT) ince film tabakası olarak ZnO'nun kullanılması ve bununla beraber arka kontak malzemesi olarak farklı metal kullanımının etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının genel düzeni şu şekildedir: Birinci bölümde, yenilenebilir enerji tanımlanırken, yenilenebilir enerji çeşitleri ve güneş enerjisinin bunlar arasındaki yeri, yarıiletken teknolojilerinden faydalanılarak gelişimi devam eden güneş hücreleri ve tez çalışması içerisinde incelenen yapılar için kısa bilgiler sunuldu. İkinci bölümde, yarıiletkenler ve güneş hücreleri hakkında bilgi verildi. Tez çalışmasında kullanılan yarıiletken yapıları temel özellikleriyle birlikte tanıtıldı. Üçüncü bölümde, yapıların üretiminde kullanılan Eş-Püskürtme Sistemi ile yapısal, elektriksel ve optik özelliklerin karakterize edilmesinde kullanılan X-ışını kırınımı (XRD), Fotoluminesans (FL), UV-Vis ve Akım-Gerilim ($I - V$) Sistemleri hakkında bilgiler sunuldu. Dördüncü bölümde, güneş hücresi yapılarının Eş-Püskürtme tekniği ile büyütülmeleri, XRD, FL, UV-Vis ölçümleri ve değerlendirilmeleri sonucunda elde edilen yapısal, optik özellikler sunuldu. Yapılar için

solar simülatörle gerçekleştirilen elektriksel ölçüm sonuçları verildi. Beşinci bölümde, elde edilen yapısal, optik ve elektriksel analizlerinin sonuçları değerlendirildi.

Bu çalışmada kullanılan numuneler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (Gazi-Fotonik) Eş-Püskürtme Sistemi ile kaplandı. Numunelerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri, Gazi Üniversitesi Malzeme ve Metalürji Mühendisliğinde'de bulunan XRD ve Gazi-Fotonik'te bulunan FL, UV-Vis sistemleri kullanılarak incelendi.





2. YARIİLETKENLER VE GÜNEŞ HÜCRELERİ

Bu bölümde yarıiletkenler, p-n eklem, fotovoltaiik etki, güneş hücresinin elektriksel karakterizasyonu, ince film güneş hücreleri ve CdTe tabanlı güneş hücresi yapısı hakkında bilgiler sunuldu.

2.1. Yarıiletkenler

Katıların elektrik iletim kabiliyetlerine göre sınıflandırılması doğada var olan malzemelerin incelenmesi, tanımlanması ve uygulanabilirliği açısından rahat bir şekilde anlaşılması için gereklidir. Bu şekilde katılar; iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç malzeme grubunda incelenir. Atomlarının son yörüngelerinde dört elektron bulunduran, normal halde yalıtkan ve bir dizi dış etkenle enerjik olarak uyarıldığında iletkenlik özellikleri gösteren yarıiletken malzemeler, iletkenler ve yalıtkanlar arasında bir elektriksel özdirence (yaklaşık olarak $10^{-3} \Omega\text{cm}$ ve $10^{-9} \Omega\text{cm}$) sahiptir [38]. Malzemenin elektriksel direnci; voltaj, elektrik ve manyetik alan, ışık, sıcaklık gibi birçok dış kuvvetin etkisiyle değişebilir [39].

Yarıiletken malzemeler serbest elektronların bulunduğu iletim bandı ile bağlı elektronların bulunduğu değerlik bandı ve bunların arasında bir yasak enerji aralığına sahiptir [39]. Bu malzemelere uygun katkı yapılması durumunda, yapıların elektrik ve optik özelliklerindeki değişim gözlenir [40]. Yasak enerji bölgeleriyle ayrılan bir yarıiletkenin, iletkenlik ve değerlik bantlarının izin verilen enerji seviyeleri ve bu seviyelerin karakteristik elektron yoğunlukları; mutlak sıfır sıcaklıkta, bantlar tamamen boş ve tamamen dolu olacak şekilde modellenir.

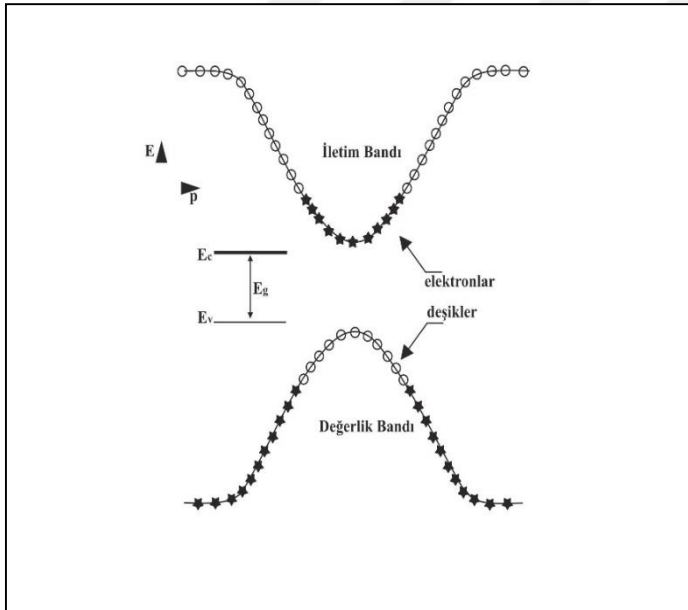
Yarıiletken malzemeler farklı kimyasal bileşimlere ve yapılara sahip olabilirler. En iyi bilinen yarıiletkenler periyodik cetvelin IV. grubunda bulunan Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge)'dur. Bu yarıiletkenler tek cins atomdan oluştuğu için elementel yarıiletkenler olarak adlandırılır.

Periyodik cetvelin üçüncü ve beşinci grup elementlerinden elde edilen GaAs, InP ve GaN gibi III-V malzemeler ile ikinci ve dördüncü grup elementlerinden elde edilen ZnO, ZnSe, ZnS, CdO ve CdSe gibi II-VI yarıiletkenleri bileşik yarıiletkenler olarak adlandırılır.

Bunlarla birlikte CdHgTe, CdZnS gibi üçlü ve InGaAlAs gibi dörtlü alaşımlar da üretilebilir ve alaşım yarıiletkenler olarak adlandırılır [41]. Elementlerin kısaltılmış periyodik tablosu Çizelge 2.1’de verildi.

Çizelge 2.1. Elementlerin kısaltılmış periyodik tablosu

I	II	III	IV	V	VI
-	-	B	C	N	O
-	-	Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te



Şekil 2.1. Bir yarıiletken için basitleştirilmiş enerji-bant diyagramı [40]

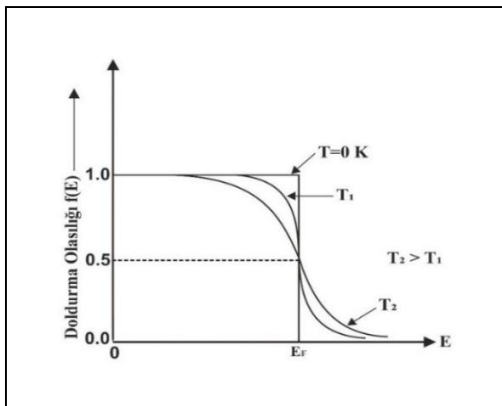
Yarıiletkenlerde, izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri mevcuttur. Yasak enerji bölgesi yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan bir parametredir. İzinli enerji seviyeleri bant oluşturur ve bu seviyeler yasak enerji bant aralığının (E_g) altında ve üstünde yerleşir. Yasak enerji bant aralığının altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji

seviyesi değerlik bandı, üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji seviyesi ise iletim bandı olarak adlandırılır. Değerlik bandının üst kısmı ve iletim bandının tabanı yaklaşık olarak paraboliktir. Şekil 2.1’de elektronların (*), bandı alttan üste doğru doldurduğu ve değerlik bandının üst kısmına yakın olan durumların iletim bandına uyarılan bazı elektronlar nedeniyle (o) boş olduğu basitleştirilmiş enerji-bant diyagramıyla gösterilmiştir.

0 K de, tüm elektronlar değerlik bandındadır. İletim bandında birçok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyel buradaki elektronları kolaylıkla hareket ettirecek düzeydedir. Fermi enerjisi (E_F), $T = 0 K$ de bir elektronun doldurabileceği en son seviyenin enerjisidir. Bir yarıiletken ışık, basınç veya elektrik alanı gibi dışarıdan bir uyarım altında olmadan sabit sıcaklıkta, E enerji durumunda bir elektron bulunma olasılığı $f(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile verilir. Bir seviyenin doldurulmasının enerjiye bağlı değişimi Şekil 2.2’de verildi. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu $f(E)$;

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve E_F Fermi enerjisi seviyesidir. E enerjisindeki bir seviyenin doldurulması olasılığı, enerji değerinin E_F olduğu değere kadar 1’dir. Bu değerin E_F ’den büyük olduğu durumda doldurulma olasılığı sıfır olur. Sıcaklık artışına bağlı olarak enerjisinde artış olan elektronların boş bir seviyeyi doldurması durumu Fermi seviyesi civarında simetri gösterir [42-44].



Şekil 2.2. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu [39]

Yarıiletken malzemeler, yapılarına ve saflıklarına göre sınıflandırılabilir. Kristal yapıları, atomlarının düzenli bir dizide hizalandığı, iyi yapılandırılmış periyodik atom yerleşimi ile karakterize edilir Atomik düzenlerine göre yarıiletkenler; amorf, polikristal ve tek kristal olarak üç çeşittir. Tüm kristali oluşturmak için tekrarlanabilecek en küçük atom topluluğu, örgü sabiti a olan bir ilkel hücredir [45]. Bu periyodiklik, bileşen elemanların atomik özellikleriyle birleştiğinde yarıiletkenlere kullanışlı elektronik özellikler kazandırır.

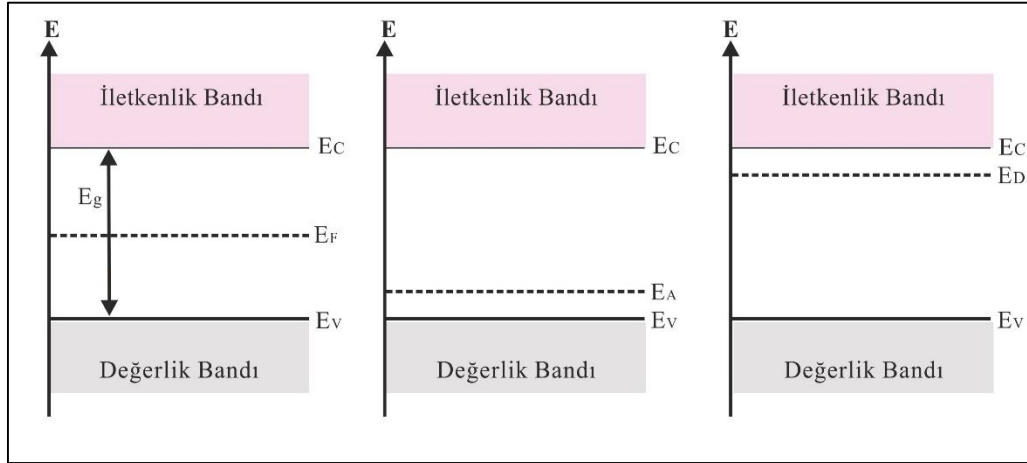
Yapılarına göre yarıiletkenler saf ve katkılı olarak tanımlanabilir. Yarıiletkenlerin katkılanması çeşitli kullanımlar için elektrik iletkenliklerinin modülasyonunu sağlayan önemli etmenlerden biridir. Safsızlık ya da örgü kusuru içermeyen bir yarıiletken malzeme katkısız yarıiletken olarak tanımlanır. Bu tip bir malzemenin mutlak sıfır sıcaklığında değerlik bandı tam olarak doludur ve iletim bandında ise serbest elektronlar bulunmaz.

Katkısız yarıiletkenlerde iletim bandı ve değerlik bandında yer alan elektronların yoğunlukları eşittir. Çünkü bir elektron termal uyarma sonucu geride bir boşluk bırakarak iletim bandına geçer. Bu malzemelerde elektrik alan ve sıcaklığın etkisiyle uyarılan elektronlar yasak enerji aralığını atlayarak iletkenlik bandına geçerler ve böylelikle iletimi sağlarlar. Katkısız yarıiletkenlerde elektron ve deşik sayısı eşittir. Fermi seviyesi iletkenlik ve değerlik bantlarının ortasında yer alır.

Bir yarıiletken kristalini oluşturan atomlardan bir kısmının yerine uygun katkı atomlarının yerleştirilmesi işlemi katkılama olarak adlandırılır. İstenilen özelliğe ve kullanılacak olan alana bağlı olarak katkılama oranı değişebilir. Bu işlemin amacı negatif ve pozitif yükler arasında çekim kuvveti ve elektrik alan oluşturmaktır. Bu sayede elektronun iletimi kolaylaşır ve hızlanır.

Yarıiletken kristale katkılanan elementler ya elektron verici ya da elektron alıcı olarak işlev görürler. Deşikler üreten katkı maddeleri alıcı olarak tanımlanırken bu tip katkılara sahip yarıiletkenlere pozitif yük taşıyıcıları ürettiği için p-tipi yarıiletken denir ve deşik yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır. p-tipi yarıiletkenlerde elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır. Alıcı enerji düzeyi (E_A), yasak enerji aralığında olup değerlik bandının üstünde yer alır. n-tipi yarıiletkende, Fermi seviyesi iletkenlik bandına yakınlaşırken p-tipi yarıiletkende ise değerlik bandının üst kenarına yakınlaşır. Kristale elektron veren katkılara verici ve katkılanan yarıiletkene n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunlukta

olduğu için elektronlara çoğunluk taşıyıcıları, deşiklere ise azınlık taşıyıcıları denilmektedir. Verici enerji düzeyi (E_D), yasak enerji aralığında ve iyonlaşma enerjisi kadar iletkenlik bandının altında yer alır [45, 46].

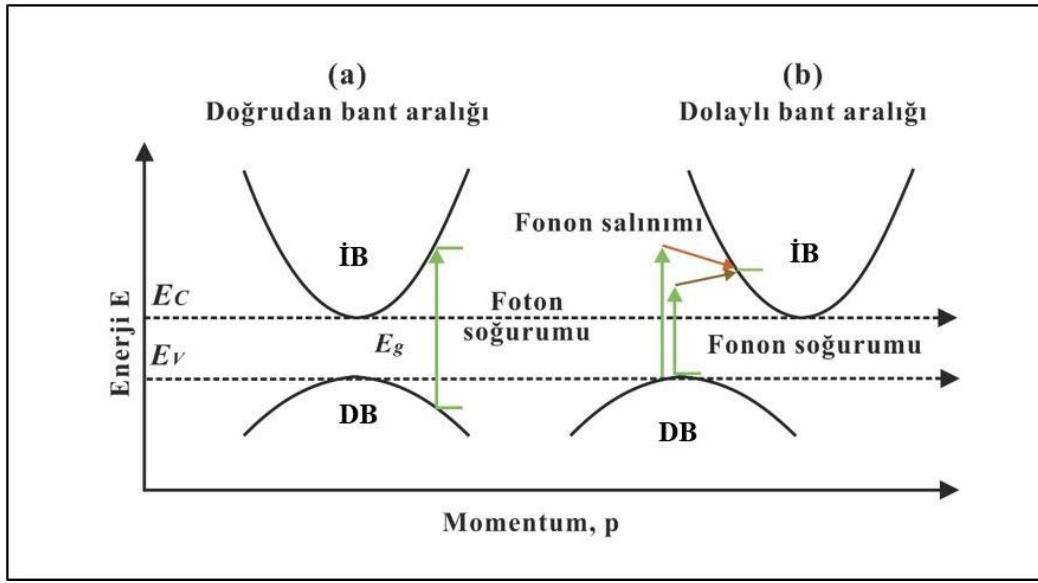


Şekil 2.3. Yarıiletkenlerde (a) Fermi enerji düzeyi, (b) alıcı enerji düzeyi, (c) verici enerji düzeyi

Yarıiletkenler düşük sıcaklıkta zayıf bir iletkenlik karakteristiğine sahiptir. k Boltzmann sabiti ve T ise sıcaklık olmak üzere oda sıcaklığında termal enerji kT , E_g 'nin bir kısmıdır. Değerlik bandında pozitif yüklü boşluklar veya deşikler bırakmak için E_g boyunca az sayıda elektron termal olarak uyarılır. Yarıiletken malzemelerin iletkenlik bandında birçok boş durum olduğundan uygulanan küçük bir potansiyel bu elektronları kolayca hareket ettirerek bir akıma neden olabilir [47-49].

Yarıiletkenler doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) bant aralıklı olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 2.4'de doğrudan ve dolaylı bant aralıklı yarıiletkenlerin temel foton soğurma sürecini göstermektedir. Buradaki enerji-momentum ilişkisi için, bir elektronun değerlik bandından iletim bandına mümkün olan en küçük enerjiyle ($E_g = E_C - E_V$) uyarılması kristal momentumunda herhangi bir değişiklik olmadan gerçekleşir. Bundan ötürü iletim bandının minimum enerjisi ve değerlik bandının maksimum enerjisi aynı k değerinde ($p = 0$) oluşur. Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerin (örneğin GaAs, InP, CIGS ve CdTe) enerji-bant diyagramı Şekil 2.4a'da gösterildi. Dolaylı bant aralıklı yarıiletken için (örneğin, Si ve Ge), değerlik bandının maksimum enerjisinden iletim bandının minimum enerjisine uyarılması, sadece kristal momentumunda gerçekleşecek bir değişiklik ile mümkündür. Bu nedenle iletim bandının minimum ve değerlik bandının maksimum enerjisi, elektronların kristal

momentumundaki farklı değerlerinde ortaya çıkar ($p \neq 0$). Momentumdaki değişme fonon etkileşmesiyle gerçekleşir. Şekil 2.4b’de bu durum gösterilmiştir. Dolaylı bant aralıklı yarıiletkenlerde, ışığın soğurumu fonon soğurumu veya fonon emisyonu tarafından sağlanır. Fononlar, yarıiletkendeki örgü titreşimlerinin parçacık şeklidir. Yarıiletkenler, göreceli olarak yüksek momentuma sahip düşük-enerjili parçacıkları nedeniyle bu işlem için uygundur (Şekil 2.4b) [50-52].



Şekil 2.4. (a) Doğrudan ve (b) Dolaylı bant aralığı, yarıiletken foton soğurumunu gösteren enerji-bant diyagramı

Yarıiletkenler; elektronik ve opto-elektronik cihazların üretiminde kullanılan temel elemanlardır. Si ve Ge dışında kalan yarıiletkenleri doğada saf halde bulmak mümkün değildir. Yapay olarak geçmişten günümüze kadar gelişmiş ve gelişim sürecini devam ettiren sistemlerle, ileri teknolojik yöntemler, aygıtlar kullanılarak bu malzemelerin elde edilmesi mümkündür. İyi elektro-optik özellikleri, küçük, hafif ve kullanım açısından rahatlık getirmeleri açısından yarıiletken malzemeler tercih edilmektedir [53-56].

2.2. p-n Eklem Yarıiletken Tipleri

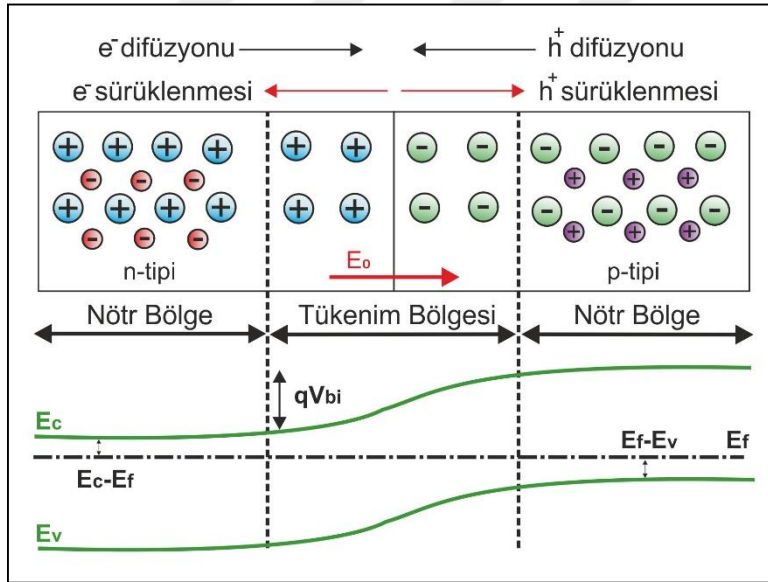
Güneş hücrelerindeki fotovoltaiik etkinin temelinde p-n eklem yatar. p-n eklem bir n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle oluşan yapıya denir. Yarıiletken aygıtların yapısı olan p-n eklem çoğunluk yük taşıyıcıları elektron olan n-tipi yarıiletkenler ile çoğunluk yük taşıyıcıları deşikler olan p-tipi yarıiletkenlerin arasındaki ara yüzeyde oluşturulur. p ve n-tipi yarıiletken katmanlar bir araya getirildiğinde, eklemde yer alan her iki bölgedeki yüksek taşıyıcı konsantrasyonu farklılığından dolayı, taşıyıcıların difüzyonu meydana gelir.

n-tipi yarıiletkende yer alan elektronlar pozitif iyonize olmuş verici atomlar (donör) bırakarak p tarafına, p tarafında yer alan deşikler de negatif iyonize olmuş alıcı atomları (akseptör) bırakarak n-tarafına nüfuz eder. p tarafına nüfuz eden elektronlar oradaki deşiklerle ve n tarafına nüfuz eden deşikler de oradaki elektronlarla yeniden birleşip rekombinasyon sağlarlar [57, 58].

Eklem ara yüzeyinde p-tarafı yakınında negatif ve n- tarafı yakınında pozitif uzay yük bölgesi meydana gelir. Tüketim bölgesi olarak adlandırılan hareketli taşıyıcı yoğunluğunun sıfır olduğu bu bölge, pozitif yükten negatife doğru bir elektrik alan oluşturur. Bu yüklü iyonların oluşturduğu potansiyel fark, her bir yük taşıyıcı tipi için difüzyon akımına zıt yönde bir sürüklenme akımını oluşturur. Bu iki farklı akım birbirine eşit olduğunda sistem dengeye ulaşır. Fermi seviyelerinin dengelenmesi ve eklem oluşumuyla ilişkili bant bükülmesi Şekil 2.5’de yer alan diyagramda gösterilmiştir. Denge potansiyel farkı, eklem yapısal ya da iç potansiyel gerilimi V_{bi} olarak ifade edilir. Bu değer p- ve n-tipi yarıiletkenlerin iş fonksiyonları arasındaki farktan belirlenir [60].

Bu şekilde homo-eklem Si güneş hücreleri elde edilir. Homo-eklemler, taşıyıcıların çoğunun yüzeye yakın üretildiği ve yüzey rekombinasyonuna açık, yüksek soğurma katsayılarına sahip olan malzemeler için bir tasarıma uygun değildir [61]. p-tipi ve n-tipi katkılara sahip farklı iki yarıiletken malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen eklem heteroeklem denir. Örnek n-tipi CdS ve p-tipi CdTe verilebilir. Doğrudan bant aralıklı malzemeler için, p-n bağlantısının serbest olarak bir yüzeye veya metal-yarıiletken ara yüzüne yakın

olmamasını sağlamak için hetero eklemler kullanılır. Bu yapılarda genellikle p-tipi katman, gelen ışığa göre tasarlanmış bir bant aralığına sahip soğurucu tabaka olarak, diğeri ise genellikle n-tipi tabaka, bir pencere tabakasıdır. Geniş bir bant aralığına sahip olan pencere tabaka gelen ışının soğurucu tabakaya girmesini sağlar. Potansiyel farkı, bir doğrultucu metal-yarıiletken bağlantısı olan bir Schottky eklemi kullanılarak da oluşturulabilir. Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan daha küçükse ($\Psi_S > \Psi_M$), bir p-tipi malzemeye bir Schottky eklemi oluşur. Homo ve hetero-eklemlerde olduğu gibi, iki malzeme birleştiğinde, taşıyıcılar yayılır. Schottky eklemlerindedeşikler metale dağılıp Fermi seviyesine kadar ara yüzeyin yanında sabit iyonları yani yarıiletkende kalan negatif iyonları bırakarak hizalanır ve dengeye ulaşılır. Deşik bariyerinin yüksekliği olan qV_{bi} veya Ψ_B değeri, yarıiletkenin yüzeyi ile metal arasında oluşturulan, metal ve yarıiletkeninin iş fonksiyonları farkına eşit olan $\Psi_B = \Psi_D - (E_F - E_V)$ değerine eşittir. Burada $\Psi_D = (E_{ea} + E_g) - \Psi_M$ değeri yapı içerisindeki yarıiletkenini Fermi seviyesi ve metalin iş fonksiyonu arasındadır. Bir n-tipi yarıiletkenle oluşturulan bir Schottky ekleminde ise metalin iş fonksiyonu yarıiletkeninkinden küçüktür ($\Psi_M > \Psi_S$).



Şekil 2.5. Bir p-n eklemin oluşum diyagramı [39]

2.3. Fotovoltaik Etki

Bir güneş hücresi ışınım altında olduğunda ışınım, n-tipi pencere tabakadan hücre içine girer. Işınım p-tipi katmanda soğurulur. Soğurucu tabakanın yasak enerji bant aralığı değerinden

daha büyük fotonlar soğurulduğunda değerlik bandında bulunan elektronlar iletim bandına çıkar. Elektronlar geride boşluklar bırakarak bu işlem gerçekleşir. Tüketim bölgesinde oluşan elektron ve deşik çiftleri yapısal elektrik alan tarafından etkilenir. Elektronlar n- tarafına, deşik p-tarafına doğru süpürülür. Nötr bölgelerde meydana gelen çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcılarından çoğunluk yük taşıyıcıları tüketim bölgesine ulaşabilir. Azınlık yük taşıyıcıları ise bunu gerçekleştirmez. Oluşan elektron-deşik çiftleri yüklerin rekombinasyonu ile birlikte yok olur. Elektron-deşik çiftleri tüketim bölgesine rekombinasyondan önce ulaşırlarsa mevcut elektrik alan tarafından ayrılır. İç potansiyel gerilim altında elektronlar n-tarafa, deşikler ise p-tarafa doğru çekilir. Bu şekilde rekombinasyon önlenmiş olur. İki tarafta da meydana gelen birikme bir potansiyel oluşturur. Bu olay fotovoltaiik etki olarak tanımlanır [62].

p-n eklemine gerilim uygulandığı zaman elektron ve deşiklerin sahip olduğu difüzyon ve sürüklenme akımları arasındaki denge bozulur. Tüketim bölgesi ve gerilim nedeniyle p-n eklemi sadece akımın bir yönde akmasına izin verir. İleri yönlü ön-gerilimde uygulanan voltaj, tükenme bölgesi boyunca elektrostatik potansiyeli azaltır ve ters yönde uygulanan gerilim, tüm bölge boyunca elektrostatik potansiyeli artırır [63, 64].

2.4. Güneş Hücresinin Elektriksel Karakterizasyonu

Bir güneş hücresinin çıktı parametrelerinin belirlenebilmesi için, akım- gerilim ($I - V$) karakteristiklerini incelemek gerekir. Şekil 2.6'da bir güneş hücresi için $I - V$ grafiği verilmiştir. Fotovoltaiik cihazın çalışma parametrelerini belirlemeye yarayan bu ölçümler hem aydınlık hem de karanlıkta yapılır. Güneş hücreleri $I - V$ karakteristiklerinde diyot benzeri, doğrultucu davranış sergilerler. Karanlıkta ideal bir güneş hücresi için Schokley denklemini kullanarak ölçümler yapılır [65]. Karanlıktaki ölçümlerde

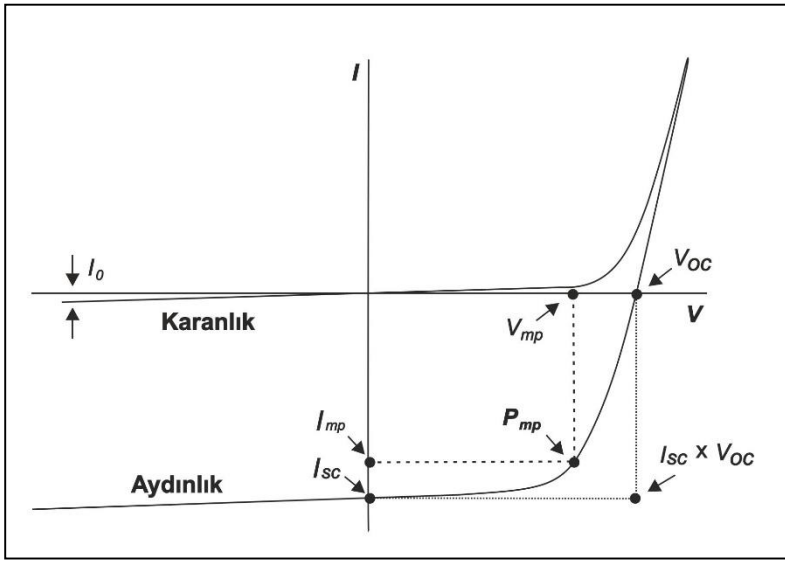
$$I = I_0(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) \quad (2.2)$$

eşitliği kullanılır. Burada sırasıyla I karanlık akımı, I_0 karanlıkta ters sızıntı akımı veya saturasyon akımı olarak adlandırılır. n idealite faktörü, q elektron yükü, k Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık ve V ise diyot üzerine uygulanan voltajdır. Aydınlatma altında ışığın

etkisinden dolayı eşitliğe I_L terimi eklenmelidir. Aydınlatma altında oluşturulan akım, karanlıkta elde edilen sonuçlarda I_L kadarlık bir kaymaya neden olur. Aydınlatma altında oluşan akım

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - I_L \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Burada I_L ışıık altında oluşan akımdır.



Şekil 2.6. Karanlıkta ve ışıınım altında bir güneş hücresine ait $I - V$ eğrisi

Kısa devre akımı olarak tanımlanan I_{sc} güneş hücresine uygulanan gerilim değeri sıfır olduğunda ($V = 0$) hücrenin üzerinden geçen akımdır. Aydınlatma altında elde edilen grafiğin y-eksenini kestiği nokta bu değeri verir. I_{sc} kısa devre akımı, güneş hücresinin ürettiği maksimum akım değeridir. Bu değer aynı zamanda aydınlatma altında oluşturulan akım olan I_L değerine eşittir. Eşitlik 2.3 kullanılarak

$$I_{sc} = -I_L \quad (2.4)$$

yazılabilir. Açık devre gerilimi V_{oc} ise, aydınlatma altında elde edilen grafiğin ($I = 0$ olacak şekilde) x -ekseni kestiği nokta olarak tarif edilir. Eşitlik 2.3 kullanılarak V_{oc} değeri

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2.5)$$

eşitliği ile verilir. Güneş hücresinden akım çekilmediği zaman hücre uçları arasındaki gerilim değeri olan açık devre gerilimi, güneş hücresinde var olan maksimum gerilimdir. Bu değer maksimum olduğu zaman hücreden herhangi bir güç çıkışı mevcut değildir. Gerilim maksimum iken akım olmadığı için hücrede güç çıkışı yoktur. V_{OC} ve I_{SC} çarpımına bölünen $I - V$ eğrisinin maksimum güç noktası P_{mp} değeri aşağıdaki gibi FF doldurma veya dolum faktörünü verir.

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{OC} I_{SC}} \times 100\% = \frac{P_{mp}}{V_{OC} I_{SC}} \times 100\% \quad (2.6)$$

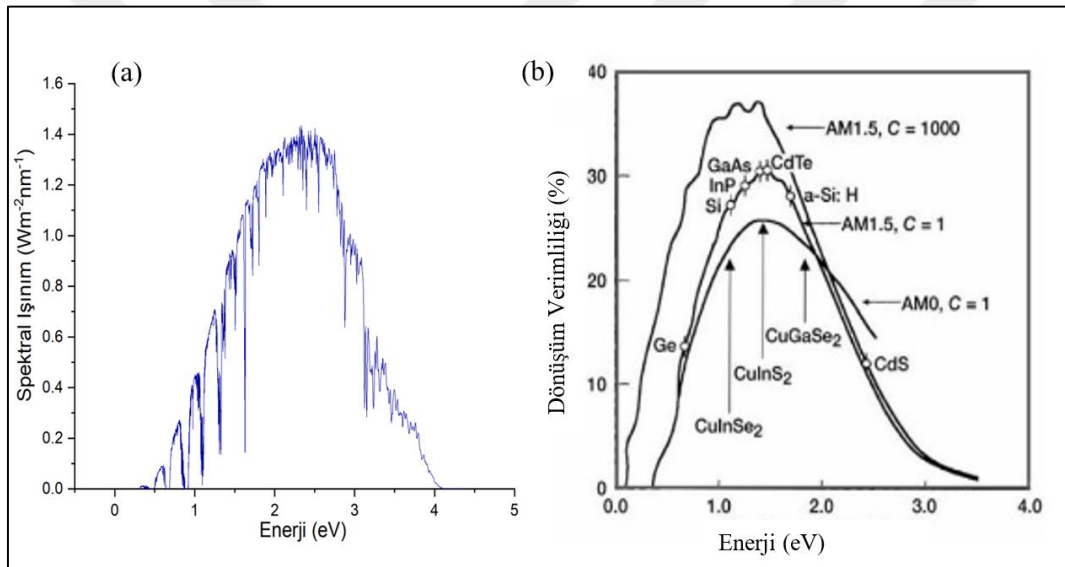
Bir güneş hücresinin ne ölçüde verimli olduğunu η güç dönüşüm verimi değerinden tanımlanır. Bunun için basitçe P_{mp}/P_I oranı biçiminde tanımlama yapılır. Burada P_I değeri girişteki güç değeridir. Eşitlik 2.6'da η için I_{SC} , V_{OC} ve FF açısından bir ifade verecek şekilde yeniden düzenlendiğinde:

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_I} \quad (2.7)$$

eşitliği ile elde edilir. Maksimum güneş hücre verimliliği için ideal olarak optimum bant aralığı, bant boşluğunun üzerinde fotonların tamamen soğurulması gerekir. Bu gereksinimler için uygun malzeme seçimi, geri yansımayı en düşük seviyeye indirmek, film kalınlığını arttırmak, difüzyon uzunluğunu arttırmak, tuzakların ve safsızlıkların mevcut yoğunluğunu azaltmak, yüzey kalitesini arttırmak, temas alanını arttırmak yoluyla verim artırılabilir. Ancak, gerçek malzemeler için farklı parametreler her zaman ayrı ayrı optimize etmek mümkün olmayabilir. Örneğin, güçlü bir optik soğurma büyük olasılıkla yüksek bir rekombinasyon kavşağı, yüksek dahili voltaj, kontaklara kayıpsız taşıma anlamına gelir [66].

Eşitlik 2.7'den incelendiğinde yüksek bir η değeri elde etmek için I_{SC} , V_{OC} ve FF değerlerini en üst seviyeye çıkarılması gerektiği görülebilir. Tek eklemlili güneş hücrelerinde güneş spektrumuna tam olarak uyan bir optik bant aralığına sahip bir yarıiletken seçimini

gerektirir. I_{SC} , değerini arttırmak için, dar bir yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletken malzeme seçilebilir. Örneğin 0,5 eV bant aralıklı bir malzeme için $\lambda < 2500$ nm olan tüm dalgaboyları soğurulabilir. Bu yasak enerji aralığına malzemelerden üretilen p-n bağlantıları düşük V_{bi} değerine ve dolayısıyla düşük V_{OC} değerine sahiptir. Öte yandan, geniş bir yasak enerji aralığına sahip malzeme seçiminde V_{bi} ve dolayısıyla V_{OC} daha yüksek olabilir, ancak güneş spektrumunun büyük bir kısmı emilmez ve I_{SC} daha düşük olur. Bununla birlikte maksimum güç dönüşüm verimi için çeşitli hesaplar yapılmıştır. Şekil 2.7’de AM1.5 spektrumunun E_g ’e göre değişimi verildi. Burada maksimum güç dönüşüm verimi olan η_{mak} değerine karşı gelen yasak enerji aralığı 1,1-1,5 eV değerleri arasında yer alır.



Şekil 2.7. (a) ASTM G173-03 standardında alınan AM1.5 güneş spektrumu. (b) Soğurucu tabakanın optik bant boşluğunun bir fonksiyonu olarak tek eklemli güneş hücresinin maksimum verimi

CdTe için yaklaşık olarak %30 verim gözlenmiştir. Bu grafikler ilk olarak 1961 yılında Shockley ve Quieser tarafından hesaplandı. Yaygın olarak kullanılan güneş hücresi materyallerinin, örneğin Si, InP, GaAs ve CdTe gibi, maksimum sınırlara yakın yasak enerji aralığı vardır. Ancak literatürde Shockley-Quieser limiti olarak bilinen değerler birden fazla p-n ekleminden faydalanılarak oluşturulan tasarımlar sayesinde aşılabilir [67]. Çok eklemli olarak adlandırılan bu tip güneş hücreleri cihazları, güneşten gelen spektrumun farklı bölgelerini hedef alan farklı yasak enerji aralığına sahip malzeme gruplarını içerir.

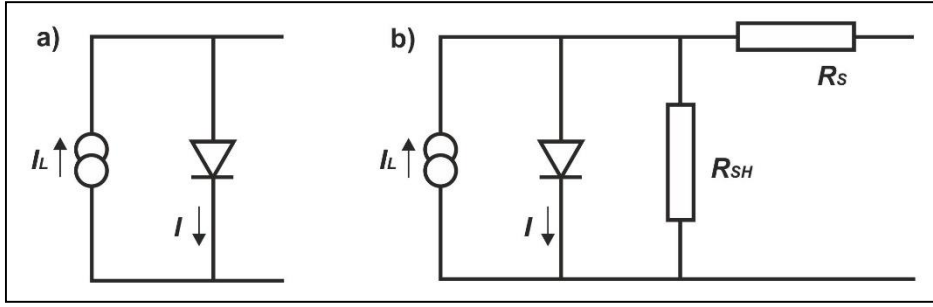
Bir güneş hücresinin aktif olmayan katmanlarında yansıma ve soğurmadan dolayı kaybedilen fotonlar, I_L değerine herhangi bir katkıda bulunmaz. Eğer donör yoğunluğu

akseptör yoğunluğuna göre çok daha büyükse n-tipi pencere katmanında üretilen taşıyıcılar herhangi bir katkıda bulunmayabilir. Bu gibi durumlarda, tüketim bölgesi tamamen p-tipi bölgede bulunmaktadır. Azınlık taşıyıcıların difüzyon uzunlukları, tükenme bölgesine deşikleri taşımak için yetersizdir.

Kayıplar ayrıca p tipi katmanda, taşıyıcılar derinlerde ve geçirgenlikten gelen kayıplarının olduğu ince soğurucular için üretildiğinde de oluşabilir. V_{OC} değeri donör ve akseptör yoğunluklarının etkisiyle optik bant aralığına bağılı olarak arttırılabilir. Eşitlik 2.3'e göre ideal bir güneş hücresi bir diyota paralel olarak bağılı olan kaynakla modellenenebilir. Gerçek bir güneş hücresi ise devreye seri ve paralel olarak bağılı dirençlere sahip olduğu için, R_S seri ve R_{SH} (şönt) paralel direnç terimlerini de hesaba katarak tanımlanır.

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(V-IR_S)}{kT}} - 1 \right] + \frac{V-IR_S}{R_{SH}} - I_L \quad (2.8)$$

R_S seri direnç hem yarıiletkenin direnci hem de devreyi tamamlamak için yarıiletken ile temas eden malzemelerin direncinden dolayı meydana gelir. Kullanılan malzemeyle metal kontaklar arasındaki dirençten, kontaklarda ve malzemedeki olan omik dirençten ve güneş hücresini oluşturan malzemenin katmanları arasında gelişen ara yüzeylerin direncinden kaynaklanır. Kısaca akım yolunda yer alan malzemelerin direnci olarak da tanımlanabilir. FF , I_{SC} ve V_{OC} değerleri parazit dirençlerden oldukça etkilenir; R_S değerindeki artış başlangıçta FF değerine, aşırı R_S artış durumlarında ise I_{SC} değerine zarar verir. Bir güneş hücresinin ideale en yakın tasarıma sahip olabilmesi için R_S değerinin olabildiğince düşük olması gerekir. İdeal bir güneş hücresinde seri direnç değeri sıfırdır. Şönt direnci R_{SH} ise güneş hücresinin yüzey ve hacimsel kusurlarından veya aydınlatmayla üretilen akım için kaçak akım yollarından meydana gelir. Şönt direncine kullanılan p-n eklemine sahip olduğu safsızlıklar ve diğer kristal kusurları neden olur. Düşük bir R_{SH} değeri başlangıçta FF doldurma faktörünü, yüksek R_{SH} durumlarında ise V_{OC} değerini azaltmaktadır. Şekil 2.8a'da ideal bir güneş hücresi için, Şekil 2.8b'de ise ideal olmayan R_{SH} ve R_S dirençlerine sahip eşdeğer devreler gösterilmiştir.



Şekil 2.8. (a) ideal bir fotovoltaiik aygıt ve (b) sonlu seri ve şönt dirençlerine sahip ideal olmayan bir cihaza ait eşdeğer devreler

İdeal koşullar altında belirli bir dalgaboyunda gelen bir foton, güneş hücresinin fotoakımı için elektron uyarılmasına neden olur. Ancak gerçek bir güneş hücresi durumunda optik kayıplar nedeniyle bu çok etkili değildir. Toplama ızgarasından kaynaklanan gölgeleme (alttaş konfigürasyonu, ışığın ilk girdiği katmandaki yansımalar ve pencere katmanında soğurmadan kaynaklanan kayıplar, farklı tabakalar arasındaki ara yüzeyler, yasak enerji bant aralığı yakınında bulunan soğurucu katmandan kaynaklanan eksik soğurma gibi çeşitli şekillerde optik kayıplardan bahsetmek mümkündür.

2.5. İnce Film Güneş Hücreleri

İnce filmler, çeşitli teknikler yardımıyla atomlarının bir alttaş biriktirilmesi şeklinde oluşturulan, genelde 1 μm değerinden küçük kalınlığa sahip yapılardır. Kullanılan yöntemle bağlı olarak optik ve elektriksel özellikleri, çeşitli etmenlere (kristal yönelimleri, morfolojisi gibi) bağlı olarak malzeme özellikleri değişebilir. İnce film sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi yapısal, optiksel ve elektriksel performans özelliklerine bağlı olarak şekillenir.

İnce Film güneş hücreleri, ikinci nesil güneş hücreleri olarak adlandırılır. Amorf Silisyum, CdTe ve CIGS tabanlı güneş hücresi yapıları ikinci nesil güneş hücreleri içerisinde yer alır. CdTe ve CIGS tabanlı ince film güneş hücreleri arttırılabilir verimlerinden dolayı yoğun araştırma konularından birini oluşturmaktadır. İnce film uygulama alanlarından biri olan fotovoltaik teknolojiler, güneş hücresi üretiminde kullanılan yarıiletken malzeme miktarını birkaç mikron kalınlığa düşürme avantajı ile geleneksel Silisyum tabanlı fotovoltaik teknolojiler bir alternatif olarak görülebilir. Şekil 2.9’da ince film (yeşil) güneş hücrelerinin hücre verimliliğinin yıllara bağlı olarak artışı gösterildi.

CdTe tabanlı ince film güneş hücreleri teorik olarak %30 verimliliğe sahiptir. Maliyetlerin ince film yöntemlerini kullanarak düşürülmesine imkânı sağlaması açısından mevcut fotovoltaik teknolojiler arasında ilgi çekmektedir [68]. CdTe, güneş spektrumunun maksimum miktarını minimum kayıplarla soğurmak için ideal bir malzeme olarak görülür. Doğrudan yasak enerji bant aralığı yaklaşık 1,5- 1,6 eV değerine ve görünür bölgede yüksek optik soğurma katsayısına ($6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$) sahip yarı iletken bir malzemedir [69-71]. Elde edilen maksimum dönüşüm verimliliği değeri % 22,1’in üzerindedir. Çizelge 2.2’de bir CdTe güneş hücresinin maksimum teorik çıkış parametreleri verildi.

Çizelge 2.2. CdTe İnce filminin teorik olarak hesaplanmış çıkış parametreleri

CdTe	
Bant aralığı (eV)	1,44
Maksimum J_{SC} (mA/cm ²)	30,5
Maksimum V_{OC} (V)	1
Maksimum CdS/CdTe Potansiyeli (V)	1,1
Maksimum Dönüşüm Verimliliği (%)	30

2.6. CdTe’ün Tarihsel Gelişim Süreci

CdTe ince film güneş hücreleri yarıiletken ve metal tabakalardan oluşan çok katmanlı cihazlardır. CdTe yarıiletkeni ilk olarak Fransız kimyager Margottet tarafından 1879 yılında sentezlenmiş fakat uygulanabilir bir elektronik malzeme olarak varlığı 1947 yılında Frerichs’ın Kadmiyum (Cd) ve Tellür (Te) buharlarını Hidrojen (H) atmosferinde

sentezlemesiyle oluşturduğu kristalin foto-iletkenliğini ölçmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. CdTe'nin elektronik özelliklerini anlamak gerçekleştirilen tek kristal çalışmalarıyla başlamıştır [72]. 1954 yılında Jenny ve Bube, ilk olarak farklı maddeler ile katkılayarak CdTe'de p-tipi ve n-tipi yarıiletken olarak elde edilebileceğini bildirdi. İndiyum (In) katısının n-tipi ve Altın (Au) katkısının da p-tipi özellik sağladığı gözlemlendi. Sonrasında yapılan çalışmalarda tek kristal n-tipi CdTe üzerine Cu₂Te gibi başka bir p-tipi malzeme kullanılarak çok eklemli yapı elde edilmiştir.

Krüger ve de Nobel, bileşik içerisinde yer alan Cd fazlalığının n-tipi ve Te fazlalığının p-tipi iletkenlik verdiğini Cd ve Te oranlarının değişimiyle iletkenlik tipinin kontrol edilebileceğini gösterdi. 1959 yılında Rappaport, İndiyum (In) katkısıyla elde ettiği p-tipi CdTe kristallerini kullanarak tek kristal homoeklemlili CdTe hücrelerinden yaklaşık olarak %2 verim elde etmiştir. Bu çalışmada açık devre gerilimi için (V_{OC}) 600 mV, kısa devre akımı için (I_{SC}) 4,5 mA/cm² (73 mW/cm² aydınlatma altında)ve dolum faktörü (FF) % 55 değerlerine ulaşmıştır [72-74].

1979'da Fransa'da Arsenik (As) katkılı p-tipi CdTe filmlerinin n-tipi yarıiletken malzemeler üzerine yakın alan buhar taşıma yöntemiyle (VTD) açık devre gerilimi için (V_{OC}) 723 mV, kısa devre akımı için (I_{SC}) 12 mA/cm² (AM1 aydınlatmasında), dolum faktörü %63 ve dönüşüm verimliliği %7 değeri elde edildi [75]. Daha sonra V_{OC} için 820 mV, I_{SC} için 21 mA/cm² ve FF değeri % 62 olan verimi % 10,5 olan hücreler bildirildi. 1960'ların başında, CdS/Cu₂S güneş hücresine benzer bir yapıya sahip olan n-tipi CdTe p-tipi Cu₂Te hücreler, n-tipi tek kristal veya çok kristallerin üzerine Cu tuzları içeren asidik sulu çözeltilerin yüzey reaksiyonu ile CdTe üzerinde p-tipi Cu₂Te yapısının senteziyle üretildi [76].

n-tipi CdS filmlerinin tek kristal p-tipi CdTe üzerine biriktirilmesiyle elde edilen hücreler ilk olarak Muller ve arkadaşları tarafından 1960'ların ortasında kullanıldığında, enerji dönüşüm verimleri% 5'ten azdı. Justi ve arkadaşları 1970'lerin başında, en iyi ince film CdTe/Cu₂Te hücreleri için %7 hücre dönüşüm verimliliği elde etti. Bu çalışmada Molibden (Mo) alttaş üzerine 5 µm kalınlığında CdS katmanı ve 20 µm kalınlığında CdTe katmanları kullanıldı. n-tipi CdTe ile yapılan diğer çalışmalarda, n-tipi tek kristal CdTe veya elektrokaplama yöntemiyle elde edilen CdTe ince filmlerine, Platin (Pt) veya Altın (Au)

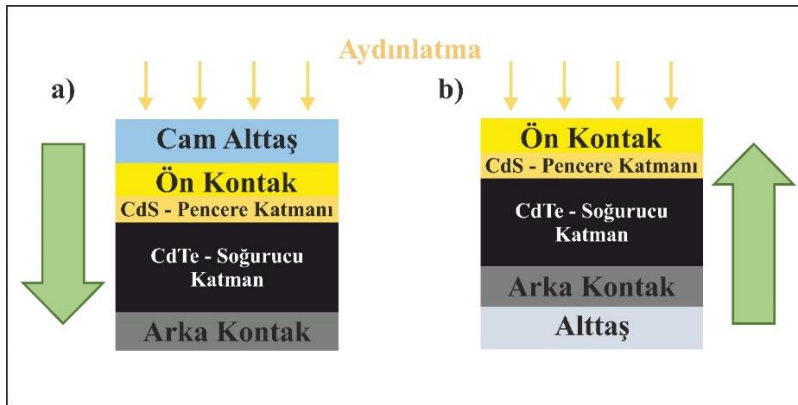
metalleriyle oluşturulan Schottky kontaklı cihazları kullanılarak yaklaşık olarak %9 verim bildirdi [77-78].

1977 yılında Mitchell ve arkadaşları 1 μm kalınlığında CdS ve İndiyum Kalay Oksit (ITO) katmanları kullanarak elde ettikleri hücre için V_{oc} değeri için 630 mV ile %7,9'luk bir dönüşüm verimliliği bildirdi. Tek kristal p-tipi CdTe için ince film CdS ile üretilen bir hücre için ilk kez en yüksek dönüşüm verim değeri Yamaguchi ve arkadaşları tarafından 1977'de bildirildi. Bu çalışmada, fosfor katkılı CdTe tekli kristallerinin (111) yönelimi üzerine kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle elde edilen 0,5 μm kalınlığına sahip CdS kullanımıyla 670 mV açık devre gerilimi ile %11,7 enerji dönüşüm verimi elde edildi [79, 80].

İnce film CdTe/CdS çok eklem güneş hücreleri, alttaş (substrate) ve superstrate (üst tabaka) olarak adlandırılan iki farklı konfigürasyonda üretilmiştir. Her iki konfigürasyonda, ışık hücreye şeffaf iletken oksit (TCO) ve CdS filmlerinden girer. Bununla birlikte, üst tabaka hücresinde, TCO, CdS ve CdTe tabakaları sırayla bir cam üst tabaka üzerine biriktirilir, ayrıca hücre için mekanik destek görevi görür. Işığın CdS/CdTe bağlantısına ulaşmadan önce destek camından geçmesi gerekir. Alttaş konfigürasyonunda, CdTe filmi ilk önce uygun bir alttaş üzerine, ardından CdS ve TCO'nun sırayla biriktirilmesi ile elde edilir.

Superstrate polikristal CdTe/CdS çok eklemli ince film güneş hücreleri ilk kez 1969'da yılında Adirovich ve arkadaşları tarafından Cam/SnO₂/CdS yapıları üzerine CdTe biriktirilmesiyle üretildi. Bu çalışmada yaklaşık %2 değerinden büyük bir dönüşüm verimi bildirildi. 1980'lerde ve 1990'larda, superstrate konfigürasyonda ince film CdTe/CdS güneş hücresi üretim işlemlerinin geliştirilmesi, cihaz tasarımında, biriktirme sonrası işlemlerde ve çeşitli tekniklerle yapılan işlemlerde oluşturulan yapılarda gerçekleştirilen iyileştirmelerden ziyade düşük dirençli temasların oluşmasında iyileştirmelerle geliştirilmiştir. 1980'lerde, CdTe biriktirme sıcaklığı, biriktirme sonrası ısıtma işlemi, biriktirme veya işlemin gerçekleştirildiği kimyasal ortamı ve CdTe kontak çalışmaları gibi işlem değişkenleri açısından kullanılan basamakların deneysel olarak optimizasyonu ile performansta önemli kazanımlar bildirildi. Örneğin, Matsushita Şirketi, serigrafi/sinterlenmiş CdTe hücreleri için, kullanılan mürekkeplerin ve sinterleme adımının sıcaklık-zaman dizilerini ayarlayarak yapıdaki CdCl₂, O ve Cu konsantrasyonlarını kontrol etmenin kritik önem taşıdığını bildirmiştir [81, 82].

CdTe hücre performansının artırılması için CdS/CdTe yapılarının CdCl₂ ile ısıtıl işlem uygulaması bildirildi [83]. CdCl₂ kullanımının düşük dirençli temas oluşumundaki ilerlemelerle birleştirilmesi, 1993'te Güney Florida Üniversitesi'ndeki bir araştırma grubunun yakın alan süblimasyonu (CSS) ile biriktirilen CdTe tabakası ile %15 verime sahip bir güneş hücresi rapor edildi. 2000 yılından bu yana, araştırmalar arttırılabilir verimleri nedeniyle çok kristal CdTe/CdS güneş hücrelerine doğru yönelmiştir. Dönüşüm verimliliği değerindeki en yüksek değer, First Solar şirketi tarafından %22,1 olarak bildirildi [83, 84].



Şekil 2.10. CdTe güneş hücresi için (a) Superstrate ve (b) alttaş konfigürasyonlarının şematik diyagramı

Bir güneş hücresi için mevcut konfigürasyonlar Şekil 2.10'da yer alan şematikte verildi. Çizelge 2.3'de superstrate ve alttaş konfigürasyonları için yer alan zorluklar belirtildi [84].

Çizelge 2.3. Superstrate ve alttaş konfigürasyonu için mevcut sorunlar

Superstrate Konfigürasyonu
-Genel olarak cam kullanımı ve camın yüksek ısıt işlemlere uygun olmaması -CdS üzerine CdTe biriktirilmesi etkisiyle yeniden kristalleşmenin iki katmanın karışımını ayrı ayrı kontrol etmenin zorluğu -Hava ile cam ara yüzeyindeki yansımanın azaltılması için yansıma önleyici kaplama ihtiyacı
Alttaş Konfigürasyonu
-Düşük açık devre gerilimi ve doldurma faktörü dolayısıyla düşük verim -CdTe ve CdS biriktirilmesi sırasında gerekli sıcaklıktan ötürü difüzyon olasılığı -Ön kontak olarak kullanılan metal ile CdTe ara yüzeyinde Schottky bariyer oluşumuna neden olan yüksek elektron afinitesi -CdS/CdTe heteroeklem bağlantı kalitesi (rekombinasyon kayıpları)

Belirtilen dezavantajlara rağmen alttaş konfigürasyonu, ön yüzeydeki optik kayıplarda muhtemel azalmanın etkisiyle daha yüksek akım üretimi şeklinde avantajlara sahiptir. Üst tabaka konfigürasyonu ise ikinci nesil güneş hücrelerinin üretimindeki temel amaç olan düşük maliyeti sağlama bakımından önemlidir. Soğurucu tabakanın inceltilmesi hem maliyetleri düşürmek açısından hem de elde edilecek parametrelerdeki değişimleri belirlemek açısından önem arz eder. Soğurucu katman kalınlığı için biriktirme veya kaplama sürelerinin değiştirilmesi, güneş hücresinin diğer katmanlarında herhangi bir değişikliğe gidilmeden gerçekleştirilebilir.

2.7. CdTe Tabanlı Güneş Hücresi Yapısı

CdTe tabanlı güneş hücresini oluşturan katmanların özellikleri ayrı ayrı aşağıda sunulmuştur.

2.7.1. Alttaş

Farklı alttaşlar, üretilen filmlerin mikro-yapısı, cihazı oluşturan katmanların biriktirilmesi ve cihaz karakteristikleri açısından önemli etkilere sahiptir. Güneş hücreleri tasarımlarında genellikle cam kullanılmakla birlikte çeşitli esnek yüzeyler de tercih edilir. Alttaş seçimi için önemli ayrım üretim adımları sırasında yüksek sıcaklıklara dayanabilir özelliklere sahip olacak şekilde yapılmalıdır. Yüksek sıcaklık gerektiren işlemler sırasında güneş hücresi yapısının katmanlarına alttaştan kaynaklı elementel safsızlıklar yayılmamalıdır.

Alttaş hücre içerisinde elektriksel olarak pasif bir bileşendir. Isıl genleşme katsayısını, hücre yapılarının üretimi sırasında biriktirilmiş katmanlarla eşleştirilmesi için mekanik olarak kararlı olması gerekir. Alttaş ve üst tabaka konfigürasyonlarında genellikle cam tercih edilir. Ucuz olmasının yanı sıra ihtiyaç duyulan sıcaklık değerlerine dayanıklılığı diğer bir tercih sebebidir [85, 86].

2.7.2. Arka Kontak

p-tipi CdTe üzerinde omik bir kontak oluşturmak için 5,7 eV ($\Psi_M > \Psi_p$) değerinden daha büyük bir iş fonksiyonuna sahip metal malzeme (Ψ_M) gereklidir. Yüksek elektron afinitesi

($\chi_P = 4,28 \text{ eV}$) ve nispeten büyük bir CdTe bant aralığı çoğu metal ile CdTe ara yüzeyinde keskin kenarlı bir Schottky bariyeri oluşumuna neden olur [85].

İlk kez Schottky bariyerli CdTe tabanlı güneş hücresi, Au/n-CdTe/ITO/Cam katmanlı yapı, 1980 yılında rapor edildi. Bu yapıya n-CdTe ve ITO arasına CdS katmanı eklenerek %6 civarında enerji dönüşüm verimi bildirildi. CdTe çoğu metalden yüksek bir iş fonksiyonu değerine sahip olması bir dezavantaj olarak yorumlanabilir. Arka kontak için 5,1-5,4 eV değer aralığına sahip Au kullanımının yaygınlığı mevcuttur. Kullanılan metallerin iş fonksiyonları 4,8-5,4 eV arasında olması cihaz parametrelerini belirlemek açısından yetersiz kalmaktadır [87, 88].

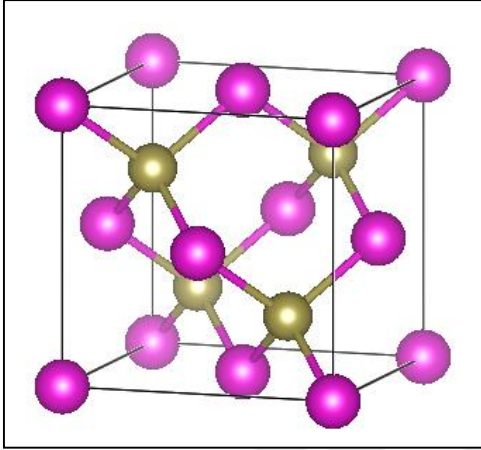
CdTe iş fonksiyonundan ötürü kullanılan metallerle olan ilişkisi, iki tüketim bölgesi üst üste binmemek koşuluyla geri yönde bant bükülmesine sebep olur. Bu durumun $I - V$ karakteristikleri üzerine olan etkisi, R_S 'yi arttırarak FF değerinde düşme şeklinde gerçekleşir. Soğurucu tabakayla metal kontak arasına yarıiletken bir katman kullanılması ile iki çeşit etki gözlemlenebilir. İlk olarak Schottky bariyer yüksekliği düşürülebilir. İkinci olarak da Tellür içeren bileşiklerle ara yüzeyde yüksek alıcı yoğunluğuna sahip katman oluşturulabilir.

İkinci etkiyi elde edebilmek amacıyla çeşitli kimyasallarla CdTe soğurucu katman yüzeyinde aşındırma işlemi ve bunun sonucundadeşiklerin bariyerden tünellemesine izin veren bir Tellürce zengin p-tipi katmanın dâhil edilmesiyle de tünelleyici (kuasi-omik) etki gözlemlenebilir. Superstrate konfigürasyonda genellikle TeAu, SbAu, AuPd, Ni gibi metaller kontak malzemesi olarak tercih edilmiştir. PbTe, SnTe, HgTe, ZnTe, Sb₂Te₃, As₂Te₃ gibi yarıiletkenler iş fonksiyonunu düşürmek açısından tercih edilir. Geri yansıtıcı tabaka olarak da etki gösteren bu yapıların dönüşüm verimliliği arttırıcı etkileri olduğu da bildirildi [89,90].

2.7.3. Soğurucu Katman

CdTe, bir II^B-VI^A bileşik yarıiletkenidir. II-VI grubu yarıiletken bileşikleri arasında, örneğin ZnS, CdSe ve HgTe gibi malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek ortalama atomik sayı, düşük erime sıcaklığı, büyük örgü parametresi ve yüksek iyoniklik özellikleri sergiler.

Elektronik olarak bileşği oluşturan elementlerin birleşim yüzdelerinin değişimiyle p ve n-tipi özellik gösteren CdTe, çinko sülfür (zincblende) yapısına sahiptir. Bununla birlikte Würtzit yapıya sahip olması da muhtemeldir. Çinko sülfür yapı için birim hücreinde dört atoma sahip bileşik yapısında iç içe yerleşmiş iki yüzey merkezli kübik yapı mevcuttur [91].



Şekil 2.11. CdTe'ün kristal yapısı

Cd veya Te atomlarınca zengin bir katmana sahip olmak, biriktirme şartlarında kullanılan sıcaklığa göre değişmekle beraber, Cd ortamında yapılan işlemlerde p-tipi iletkenliğe sebep olur. Çeşitli yöntemlerle biriktirme veya kaplama işlemleri gerçekleştirilebilen CdTe filmleri için, mevcut teknikler kullanılan alttaşın sıcaklığına göre iki ayrı grupta incelenebilir. Yüksek sıcaklık gerektiren işlemler için sırasıyla Yakın Boşluk Süblimleştirme (CSS), Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) veya Buhar Taşıma Biriktirme (VTD), Sprey Biriktirme teknikleri örnek verilebilirken, düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen yöntemler için Püskürtme Yöntemi, Elektro-kaplama, Yüzey Baskı Yöntemi ve Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma (MOCVD) teknikleri örnek verilebilir. Kullanılan yönteme bağlı olarak elde edilen film yapısı, sıcaklığın da etkisiyle değişkenlik gösterir. CdTe laboratuvar cihazlarında en yüksek verim CSS ve buhar taşıma yöntemleriyle elde edildi [71, 92, 87, 93, 94].

2.7.4. Pencere Tabaka

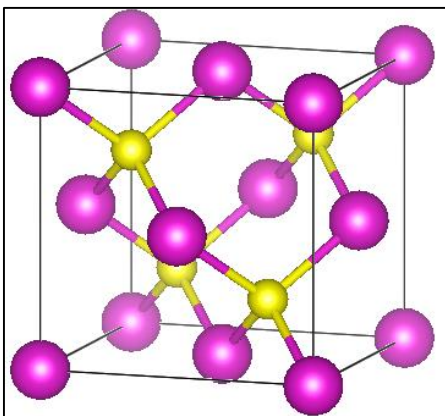
CdS periyodik tablonun II^B-VI^A grubuna dâhil olan, 300K de 2,4 eV yasak enerji bant aralığı değerine sahip yarıiletkenidir. Pencere tabakası uygulamasında, temelde iki gereksinim

vardır. Bunlar düşük elektriksel özdirenç ve yüksek optiksel geçirim gücüne sahip olmasıdır. Özdirenç ve optik geçirgenlik üretim yöntemlerine güçlü bir şekilde bağlı olmasına rağmen, katkısız CdS filmleri genellikle $10^8 \Omega cm$ gibi elektriksel özdirence sahiptir [95].

Sadece üretim yöntemlerinin kontrol edilmesiyle düşük özdirenç ve yüksek optik geçirgenliğe sahip katkısız CdS filmlerinin elde edilmesi zordur. Çeşitli ısı süreçleriyle Cd yoğunluğu artırılarak veya verici olarak hareket eden safsızlık atomları ile katkılayarak gerçekleştirilebilir.

Pencere tabakanın çok eklemli yapıdaki ana görevi soğurucu tabakaya maksimum miktarda ışık geçişine izin verirken bu tabakayla bir tüketim bölgesi meydana getirmektir. Yüksek optik kalite ve yüksek elektriksel iletkenlik değerlerini elde edebilmek için pencere tabakanın bant aralığı değerinin mümkün olduğu kadar yüksek ve bununla birlikte seri direnci korumak için oldukça ince olması gerekir [96, 97].

CdTe yarıiletkeni yüksek soğurma katsayısına sahip olması ve bir tek eklem meydana getirmek için uygun olmamasından dolayı kullanım açısından pencere tabakaya ihtiyaç duyar [34]. Cihaz mimarisine CdS eklenmesiyle oluşturulan yapılarda, genellikle yansıma kayıplarını indirmek için yardımcı olur.



Şekil 2.12. CdS'ün kristal yapısı

Optik iletim, kalınlık, film yapısının homojenliği ve direnci güneş hücre parametrelerini etkiler. CdTe'nin, CdS'den daha düşük bir taşıyıcı yoğunluğuna sahip olmasından dolayı tüketim bölgesi, taşıyıcı üretiminin ve toplanmasının çoğu CdTe içinde yer alır. CdTe, n-tipi

veya çoğunlukla p-tipi olmasına rağmen, CdCl_2 veya oksijen varlığında uygun bir ısıtım işlemi sayesinde p-tipi bir iletkenliğe sahip olabilir. İki yapının birbirine karışabilir yapıda olması, cihaz üretimi sırasında $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ ara yüzey katmanının oluşmasına neden olmakla beraber, ara yüzeyden kaynaklı sorunların en aza indirilmesi verimli bir CdS/CdTe çok eklemlili yapısına işaret eder [97].

CdTe ile oluşturulan çok eklemlili yapılarda, yüksek dönüşüm verimliliği için arayüzeyde oluşabilecek kusurlar ve örgü uyumsuzluklarına karşı CdS en çok kullanılan malzemedir. Optik kayıpların azaltılabilmesi için örneğin $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ veya $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ gibi alternatif tipte malzemeler araştırılmaktadır [98, 99].

CdS pencere tabakası kalınlığındaki değişim, soğurucu tabakanın çalışmasını etkileyeceği için önemlidir. Katman kalınlığına bağlı olarak V_{OC} ve FF değerlerinin azalmasının en aza indirildiği ve iletimin üst seviyeye çıkarıldığı bir CdS kalınlık değeri mevcuttur. Plotnikov ve arkadaşları film kalınlığının optimum değerinin 100 nm olduğunu ve 80 nm altına düşmesinin V_{OC} ve FF için kayıplara yol açacağı rapor ettiler [100]. CdS ve CdTe için bazı özellikler Çizelge 2.5’de verildi.

Çizelge 2.5. CdTe ve CdS ’ün bazı özellikleri

Özellik	CdS	CdTe
Kristal Yapısı	Hekzagonal & Kübik	Kübik
Görünüm	Sarı- Portakal Rengi	Gri-Siyah
Yoğunluk (gcm^{-3})	4,82	6,2
Erime Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	980	1092
Kaynama Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1474	1130
Örgü Sabiti ($\text{\AA}$)	4,295	6,481
Termal Genleşme Katsayısı (K^{-1})	$4,7 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-6}$
Termal İletkenlik ($\text{W}(\text{cmK})^{-1}$)	0,25	0,075
Molar Kütle	144,48	240,01
Bant Aralığı (eV)	2,42	1,5

CdS için en yaygın biriktirme tekniği, Kimyasal Banyo Biriktirme (CBD)’dir. Bununla birlikte: Isıl Buharlaştırma, Püskürtme, Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD), Yakın Boşluk Buharlaştırma (CSS), Sprey Biriktirme gibi biriktirme yöntemleri kullanılır. Düşük ısı değerlerinde biriktirme yapmak CdS için avantajlı görünmektedir. Tanecik büyüklüğünü arttırmak ve kristal kusurlarını en aza indirmek için biriktirme sonrasında ısıtım uygulanır. Bu işlem için biriktirme sonrasında 500 $^{\circ}\text{C}$ ’den yüksek

sıcaklıklar kullanıldığında CSS, Sprey biriktirme gibi yöntemlerle biriktirilen CdS yapısındaki tanecik büyüklüğünün daha az ve kristal kusurlarının daha fazla olduğu gözlenmiştir.

2.7.5. Ön Kontak

Ön kontak malzemesi seçilirken, omik teması sağlamak ve geçirgenliğin düşmemesi açısından geçirgen iletken oksitler tercih edilir. Mevcut çalışmalarda ön kontak için CdS'ün afinitesinden daha yüksek bir malzeme tercih edilmediği görülmektedir. Daha yüksek bir afiniteli malzeme tercih edildiği zaman engelleyici bir Schottky kontağı olduğu rapor edildi. Genel olarak Geçirgen İletken Oksitler (TCO) iyi elektriksel iletkenliğe ve görünür spektrumda yüksek şeffaflığa sahip n-tipi yarıiletkenlerdir. Filmi inceltmek hücre içine ışık geçişini arttırırken elektriksel iletkenliği düşürür. CdTe güneş hücreleri için kullanılan en yaygın TCO'lar: İndiyum Kalay Oksit ($\text{SnO}_2:\text{In}$ veya ITO) ve Flor Kalay Oksit ($\text{SnO}_2:\text{F}$ veya FTO)'tir. Yaygın olarak kullanılan diğer TCO'lar ise Alüminyum Çinko Oksit ($\text{Al}:\text{ZnO}$ veya AZO) ve Kadmiyum Stanat (Cd_2SnO_4 veya CTO)'tır [101, 102, 85, 70] .



3. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER

Bu bölümde ilk olarak yapıların üretimi için kullanılan sistemler ve daha sonra üretimi gerçekleştirilen çok katmanlı güneş hücresi yapılarının karakterizasyonları için kullanılan sistemler tanıtılmıştır.

3.1.İnce Film Güneş Hücrelerin Üretimi

3.1.1. Eş-Püskürtme Sistemi

Püskürtme yöntemi farklı alttaşlar üzerine çeşitli kalınlığa sahip katı bir hedef malzemenin kolayca biriktirilmesi için kullanılan bir vakum kaplama tekniğidir. Bu işlemde, hedef malzemenin yüzeyinde yer alan atomların iyonize bir gazla (plazma ile) bombardımanı ve kopan atomların bir alttaş üzerine aktarımı mevcuttur.

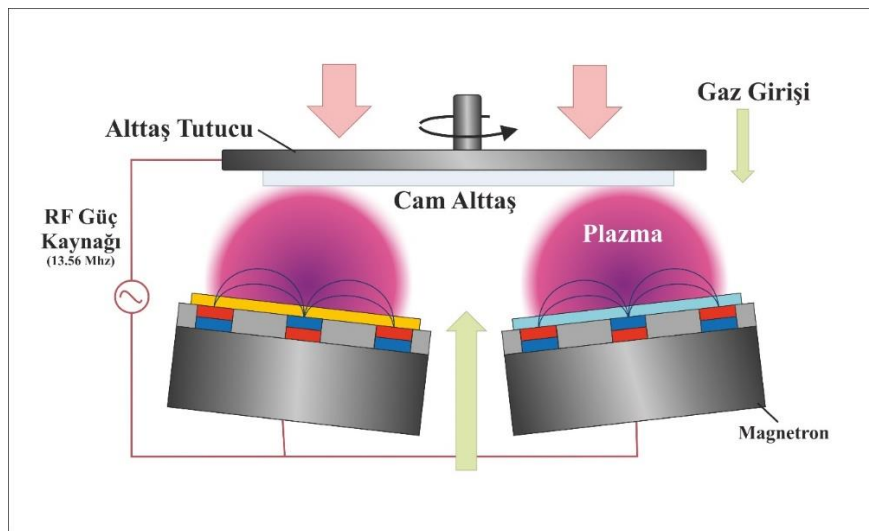
Sistem içerisinde biri anot diğeri katot olmak üzere iki elektrot bulunur. Kaplanması istenen malzeme katot kısmına, alttaş olarak kullanılacak malzeme ise anot kısmına yerleştirilir. Vakum ortamında gerçekleştirilen tüm süreç boyunca istenen vakum değeri sağlandıktan sonra ortamda katotta bulunan hedeften atomları koparacak olan plazmanın elde edilmesi işlemine geçilir. Püskürtme tekniği kullandığı güç kaynağına göre radyo frekansı (RF) ve doğru akım (DC) olarak iki çeşittir. Elektrotlar arasına uygulanan gerilimin elde edildiği güç kaynağı radyo frekans ise RF püskürtme, doğru akım ise DC püskürtme olarak isimlendirilir.

Anot ve katot arasına uygulanan uygun miktardaki güçle ortamda yer alan gazın plazma haline geçmesi sağlanır. Plazmayı elde etmek için asal gaz gibi reaktif olmayan bir gaz kullanılır. Yüksek saflıkta ortama gönderilen gaz, elektrotlara uygulanan gerilimden dolayı ortam içerisinde yer alan ve gerilim farkından dolayı hareket eden serbest elektronların etkisiyle iyonlaşarak gaz halden plazma haline geçer. Ortamda yer alan elektronlara iyonlaşmış halde bulunan Ar atomları da ikincil elektronlar olarak eklenir. Elektronların, yüksüz ve yüklü Ar atomların beraber yer aldığı bir plazma ortamı meydana gelir. Ar⁺ iyonları hedef üzerinde yer alan kesici açıldıktan sonra hedefe doğru yönlendirilerek malzeme

üzerinden atom kopartır. Koparılan atomlar anoda yerleştirilmiş olan alttaşın yüzeyinde birikerek film oluşumunu sağlarlar.

Plazmayı hedefin yüzeyinde sınırlamak için hedefin arka kısmında yer alan kalıcı mıknatıslar bulunur. Bu mıknatısların etkisi sistemde oluşan elektrik alana dik manyetik alanın varlığını sağlamaktır. Manyetik akı boyunca sarmal biçimde hareket eden manyetik alanlar katot yakınlarında hapsedilmiş olan elektronların alttaş yüzeyindeki bombardıman etkisini azaltır. Diğer bir etkisi de katot etrafındaki iyonizasyonu arttırmaktır. Yoğunluğu sabit olan plazmanın bir sonucu olarak hedeften fazla püskürtülen atomlar elde edilir. İletken malzemeler için DC püskürtme yöntemi kullanılırken dielektrik ve yarıiletken malzeme tipleri için de RF püskürtme yöntemi kullanılır. Hedef malzemeden herhangi termal bir etkiye ihtiyaç duymadan yapılan işlem düşük sıcaklık değerlerine izin verir. Şekil 3.1’de püskürtme sisteminin şematik gösterimi verildi.

Püskürtme sisteminde aynı anda aynı anda birden fazla hedefin kullanıldığı yapılandırma eş-püskürtme olarak adlandırılır. Bu tasarımda birden çok hedef ortak bir şekilde alttaş odaklayacak şekilde yer alır. Anotta yer alan alttaş malzeme z-ekseni etrafında döndürülerek biriktirme işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede alttaş yüzeyinin her noktasında homojen kalınlık değeri elde edilmeye çalışılır.

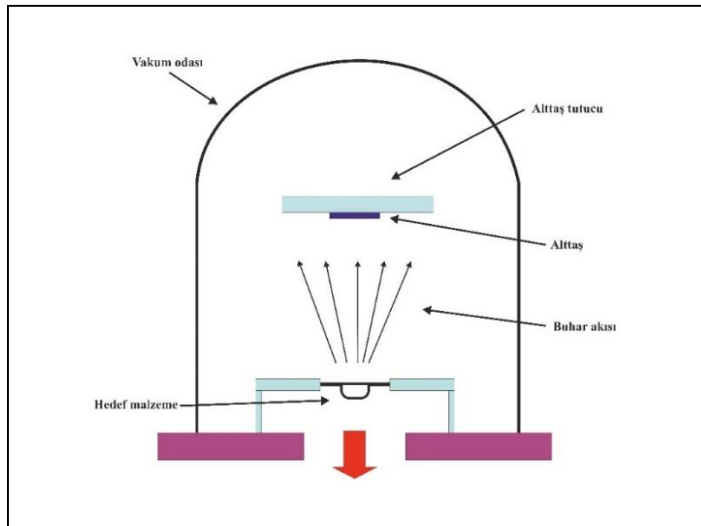


Şekil 3.1. Eş-Püskürtme Yöntemi'nin şematik gösterimi

3.1.2. Isıl Buharlaştırma Sistemi

Fiziksel Buhar Biriktirme tekniklerinden biri olan Isıl Buharlaştırma tekniği, çeşitli yapıların yüzeyine malzemelerin kaplama işlemlerini vakum altında gerçekleştiren bir ince film biriktirme yöntemidir. Kaynak malzemenin mikron veya angström kalınlığında kaplanabilmesine olanak verir. Bu teknikte uygulanacak olan malzemeler hem metaller hem de metalleri içermeyen oksitler veya nitritler gibi farklı malzemeler olabilir.

Isıl Buharlaştırma, buhar odası içinde katı bir kaynak malzemenin ısıtılmasını ve buhar basıncı üreten bir sıcaklığa getirilmesini içerir. Elde edilen buhar akısı alttaş yüzeyine birikerek film oluşturulur. Isıtma işlemi yüksek dirence sahip filament yardımıyla veya sac levha ile sağlanır. Isıtıcı üzerinde yer alan potaya kullanılmak istenen yüksek saflıktaki kaynak malzeme eklenir. Isıtıcı üzerinden akım geçirilerek ısıtma işlemi başlatılmış olur. Kaynak malzeme ve pota arasında reaksiyon gerçekleştirmesini önlemek için ısıtma hızlı bir biçimde yapılır. Isıl Buharlaştırma Yönteminin şematığı Şekil 3.2’de verildi. Bu tez çalışmasındaki metalizasyon işlemleri Gazi Fotonik’te bulunan Bestec Isıl Buharlaştırma Sistemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Isıl Buharlaştırma Yöntemi

3.2. Karakterizasyon Yöntemleri

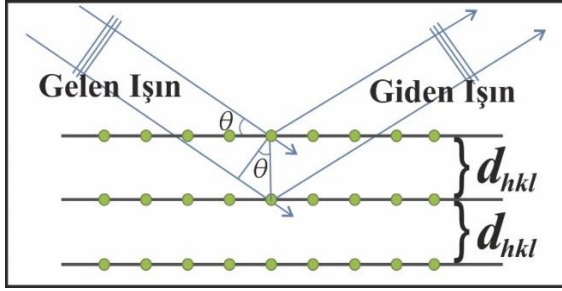
3.2.1. X-Işını Kırınımı

Kristal yapıya sahip malzemeler hakkında bilgi alabilmek için uygulanan kırınım yöntemleri, kristal parametrelerinin elde edilerek kristalin özelliklerinin elde edilmesini sağlar. X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kristalin sahip olduğu yapısal kusurlar, düzlemler arası mesafeler, örgü sabitleri, bağ uzunlukları ve açıları, bağlanmamış atom pozisyonları gibi çeşitli özellikler ile herhangi bir yapıyı oluşturan bileşenleri (parmak izi gibi) ve miktarlarını doğru biçimde belirlemede kullanılan yöntemlerden biridir.

Bir katot ışın tüpü olan X-ışını tüpü, X-ışınlarının elde edilmesini sağlar. Bir anot ve bir katottan meydana gelen tüpte iki elektrot arasına yüksek gerilim uygulandığında katottan elektron yayını gerçekleşir. Bu elektronlar gerilimden dolayı hızlanıp anota çarparak enerjilerini aktarmak biçimiyle X-ışınlarını oluşturur. Şekil 3.3 kristal düzlemlerinden X-ışınlarının saçılmasını şematik olarak göstermektedir ve bu şekilde faydalanılarak kırınım yöntemlerinin temelini oluşturan Bragg Kanunu

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir. Burada d kristalin mevcut özdeş düzlemleri arasında yer alan mesafe, θ kırınım açısı, n kırınım mertebesi ve λ kullanılan X-ışını dalgaboyudur. Gönderilen X-ışınlarını yapı içerisinde birbirini düzenli olarak tekrar eden kristal atomları anizotropik olarak saçarlar. Bunun sonucunda bazı ışınlar yıkıcı girişim yaparken bazıları eş faza sahiptir ve üst üste binerek yapıcı girişim gerçekleştirirler. Yapıcı girişim için iki örgü arası mesafe $2d \sin \theta$ değerindeki yol farkı, dalgaboyunun tam katlarında ($n=0,1,2,\dots$) bir değere sahiptir. Bragg kanunu dalgaboyu $2d$ değerine eşit veya küçük ($\lambda \leq 2d$) olduğu durumlarda geçerli hale gelir [101].



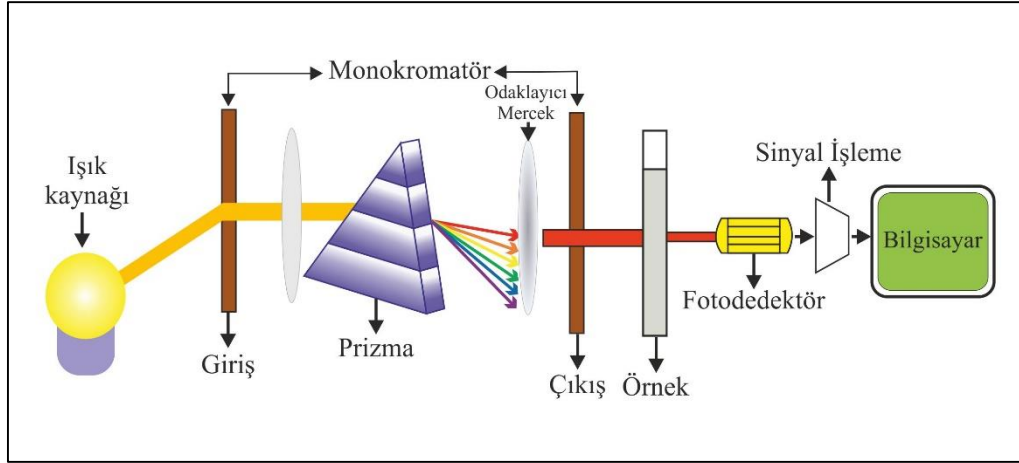
Şekil 3.3. Kristal düzelemlerinde X-ışınlarının saçılması

X-ışınlarının 0,01-100 Å arasında değişen dalgalıboylarının atomik mesafeler ölçüsünde olması ve incelenen malzeme veya yapı üzerinde herhangi bir tahribata yol açmamasından kaynaklanır. Kristali oluşturan atomlar arası mesafe 0,15-0,4 nm arasında değişmektedir. Kullanılan X-ışını dalgalıboyu ise 0,05-0,25 nm aralığındadır. Bu çalışmada elde edilen XRD ölçümleri Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yer alan $\lambda=1,5405\text{\AA}$ dalgalıboyuна sahip $\text{CuK}\alpha$ kaynaklı Bruker D8 XRD cihazı ile yapıldı. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gerçekleştirildi.

3.2.2. UV-Vis Spektrometresi

Yarıiletken malzemelerin bant aralığı ve geçirgenlik gibi diğer optik değerleri, optik soğurma özellikleri kullanılarak elde edilebilir. Bu teknikte temel olarak, UV-Vis spektrometresi olarak bilinen morötesi ve görünür bölge aralığında çalışan spektrometre kullanılır. UV-Vis spektrometresi, elektromanyetik spektrumun morötesi bölgeye yakın ve görünür bölgesinde soğurumunu, geçirgenliğini ve yansımalarını ölçer. Yakın morötesi ve görünür bölge için dalgalıboylarının aralığı sırasıyla yaklaşık olarak 200-400 nm ve 400-700 nm'dir. UV-Vis spektrometresinin şematik gösterimi Şekil 3.4'te gösterildi. Burada var olan temel bileşenler ışık kaynakları (morötesi ve görünür bölge), odaklayıcı mercek, prizma/ışığı kırıcı bir optik malzeme, foto detektör ve sinyal toplayıcıdan oluşmaktadır.

UV ışık kaynağı olarak döteryum ve 160-375 nm aralığında radyasyon yayan hidrojen lambaları gibi ışık kaynakları tercih edilir. Görünür ve yakın kızılötesi bölgede ölçümler için 350-2500 nm dalgalıboyu aralığında radyasyon yayabildiğinden tungsten filamentli veya halojen lambalar kullanılır. Birden fazla dalgalıboyuна sahip radyasyondan oluşan ışık, giriş yarığında monokromatöre geçer.



Şekil 3.4. UV-Vis spektrometresine ait şematik gösterimi

Spektrometrede, materyali aydınlatmak için bir monokromatik ışınım sağlanır. Gelen fotonların yoğunluğunun dışarıdakilere oranı ölçülür. Işık, bir paralel mercek vasıtasıyla toplanır ve daha sonra bir açıyla prizmaya (dağıtıcı ortam) çarparak farklı dalgalıboylarına ayrılır. Prizma döndürülerek, belirli bir dalga boyuna sahip olan çıkış radyasyonu yarıktan geçer ve numune üzerine düşer. Test edilen katı malzemelerin kalınlığına bağlı olarak, ışığın bir kısmı soğurulurken, diğerleri iletilir. İletilen ışığın (I) yoğunluğu gelen ışık yoğunluğuyla ilgilidir. Bunun için Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplama yapılır.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.4)$$

Burada x , yarıiletkenin kalınlığıdır ve ışığın yarıiletken malzemesinde kat ettiği mesafeyi temsil eder. α ise malzemenin soğurma katsayısı olarak adlandırılan bir sabittir. Malzemenin geçirgenliği (T), Eşitlik 3.5’de ifade edildiği gibi, iletilen ışık yoğunluğunun, olaydaki tek renkli ışığın yoğunluğuna oranıyla tanımlanır ve

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.5)$$

eşitliği ile verilir. Yarıiletken ince filmlerin yasak enerji bant aralığı geçirgenlik spektrumu kullanılarak Tauc teorisi ile hesaplanır. Tauc teorisi

$$ah\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (3.6)$$

eşitliği ile verilir [102, 103]. Burada α , “ $-\ln T$ ” ile doğru orantılı olan soğurma katsayısı, A foton yoğunluğundan bağımsız bir sabit, E_g yasak enerji bant aralığı $h\nu$ foton enerjisi ve n değeri “ $1/2, 2, 3/2$ ve 3 ” olan sabit bir sayıdır. Yarıiletken malzeme $n = 1/2$ olduğunda doğrudan, $n = 2$ olduğunda dolaylı, $n = 3/2$ olduğunda doğrudan ve $n = 3$ olduğunda dolaylı yasak bant aralığına sahiptir. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkenin $(\alpha h\nu)^2$ 'nin foton enerjisi $h\nu$ 'a göre olan grafiği çizildiğinde, eğriye alınan teğetin enerji eksenini kestiği nokta E_g yasak enerji aralığını verir.

Üretilen yapıların optik geçirgenlik ölçümleri Gazi- Fotonik bünyesinde bulunan Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi (Resim 3.1) ile 200-1100 nm dalgaboyu arasında gerçekleştirildi.



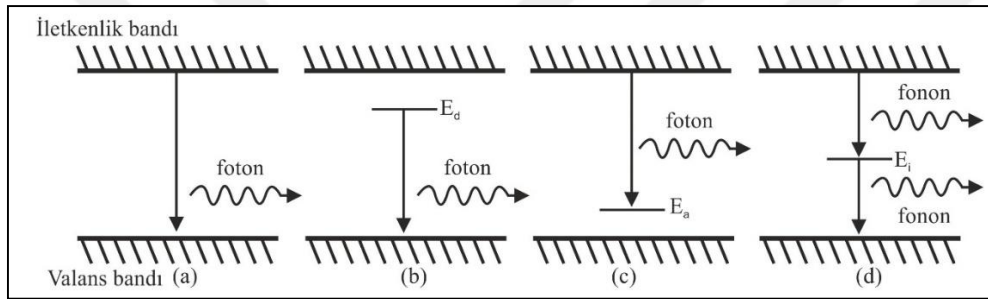
Resim 3.1. Ölçümler için kullanılan spektrometre

3.2.3. Fotolüminesans

Fotolüminesans (FL), yarıiletken malzemeler için kullanılan optik bir karakterizasyon tekniğidir. Ölçümü yapılan numuneye zarar vermeden gerçekleştirilen işlemde, elektronlar bir ışık kaynağıyla uyarılır. Ardından malzeme soğurulan enerjiyi kendiliğinden ışıma yaparak yayınlar. Malzemenin ışık kaynağıyla uyarılması foto-uyarım olarak isimlendirilirken, ortaya çıkan kendiliğinden ışıma ise fotolüminesans olarak adlandırılır. Ortaya çıkan bu kendiliğinden ışıma malzemenin karakteristik özelliği hakkında bilgi verir.

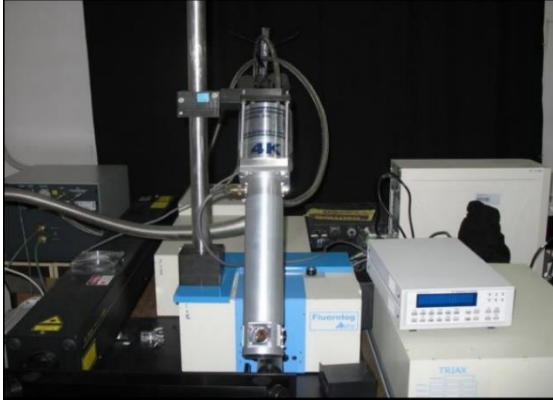
Bu ölçümlerde yasak enerji bant aralığı, safsızlıklar, malzemeye yapılan katkı miktarları gibi bilgiler elde edilir.

Değerlik bandında yer alan elektronlar, gelen $h\nu$ enerjili fotonlar etkisiyle uyarılarak iletim bandına çıkar. Işık kaynağından çıkan gelen fotonun enerjisi, malzemenin yasak enerji bant aralığından büyük olduğunda elektron-deşik çiftleri meydana gelir. Üretilen elektron-deşik çiftleri fonon ışıması yoluyla enerjilerini boşaltır. Elektronlar iletim bandına, deşikler ise değerlik bandına doğru hareket eder. Bant kenarlarında yer alan elektron-deşik çiftleri, rekombine olur. Son olarak elektron yeniden değerlik bandına döner.



Şekil 3.5. Bir yarıiletken içindeki uyarım sonucunda meydana gelen a) banttan banda ışımalı b) verici seviyeden değerlik bandına ışımalı c) iletim bandından bir alıcı seviyeye ışımalı ve d) bir orta seviyeye ışımasız geçişler [104]

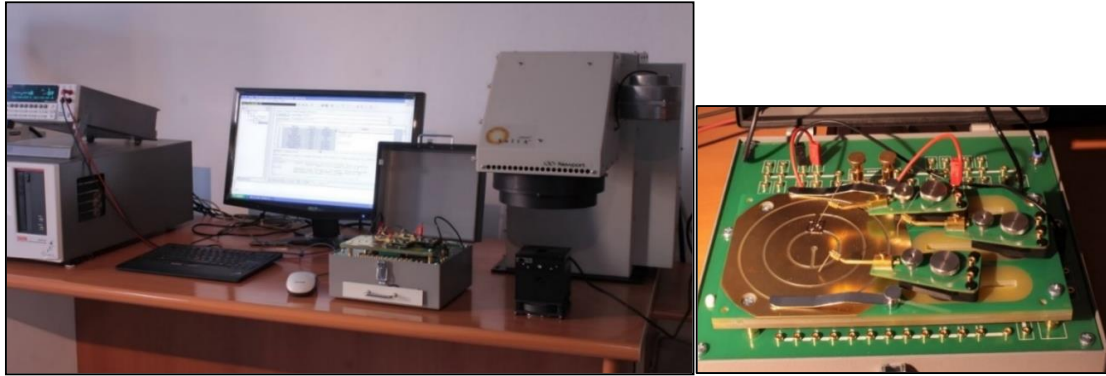
Değerlik bandında yer alan bir deşiğin iletim bandında bulunan bir elektronla birleşmesi sonucunda ortaya çıkacak fazla enerji, örgü içerisinde ısı olarak karşımıza çıkabilir. Bu şekilde oluşan geçişler ışımasız geçişler olarak tanımlanır. Uyarılmış bir elektronun yeniden değerlik bandına dönerken foton yayınlaması sonucunda ortaya çıkan geçişlere ışımalı geçişler denir. İletim bandında yer alan serbest elektronların, değerlik bandında yer alan serbest deşiklerle olan birleşmeleri sonucunda banttan banda olacak şekilde ışımalı geçiş gözlenebilir. Yarıiletkende mevcut olan katkıların veya katkısı bir yarıiletkende de bulunabilecek doğal safsızlık seviyeleri arasında da ışımalı geçiş gözlenebilir [45, 104]. Numunelerin FL ölçümleri, Gazi Fotonik bünyesinde bulunan 325 nm He-Cd lazer kullanılarak Jobin Yuvon Florog-550 sistemi ile gerçekleştirildi. Kullanılan düzenek Resim 4.2 de verildi.



Resim 3.2. Ölçümlerde kullanılan fotolüminesans düzeneği

3.2.4. Akım-Gerilim Ölçüm Sistemi

Üretimi gerçekleştirilen CdTe güneş hücrelerinin elektriksel çıktı parametreleri 1 güneş altında Keithley 4200 güç kaynağı ve AM1.5 standardında Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Newport Oriel Sol1A solar simülatör sistemi (Resim 3.3) kullanılarak elde edildi



Resim 3.3. Ölçümler için kullanılan düzenek ve AM1.5 standartlı solar simülatör



4. NUMUNELERİN KAPLANMASI, KARAKTERİZASYONLARI VE FABRİKASYON İŞLEMLERİ: BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ITO/Cam üzerine ZnO, CdS ve CdTe yapılarının Eş-püskürtme yöntemi ile kaplanması verilmiştir. Ayrı ayrı gerçekleştirilen kalınlık optimizasyonları sonucunda çok katmanlı ince film yapıları elde edilmiştir. X-ışını kırınımı, UV-Vis spektrometresi ve Fotoluminesans analizleri yapılmıştır. Elde edilen çok katmanlı ince film yapıları için metalizasyon işlemi gerçekleştirilerek güneş hücresi performans parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları ve yapılan işlemler bu bölümde sunulmuştur.

4.1. Yapıların Üretimi

Bu tez çalışmasında ITO kaplı cam üzerine sabit kalınlık değerlerinde 50 nm ZnO ve 100 nm CdS kaplamaları gerçekleştirildi. Soğurucu tabaka olarak seçilen CdTe için 1000 nm, 1500 nm ve 2000 nm tabaka kalınlık değerleriyle kaplama işlemi gerçekleştirildi. Yapılan analizler sonucunda 1500 nm kalınlık değerinin en yüksek dönüşüm verimliliğine sahip olduğu gözlemlendi. ZnO tabakasının güneş hücre parametreleri etkisinin incelenmesi amacıyla, 1500 nm CdTe tabaka kalınlığına sahip hücre yapısı ZnO katmanı olmadan üretildi. Ayrıca 1500 nm CdTe tabaka kalınlığına sahip hücre yapısında, pencere katman olarak tercih edilen 100 nm kalınlığa sahip CdS tabakasının kalınlığını 75 nm değerine sahip olacak şekilde değiştirilerek enerji dönüşüm verimliliğine etkisini görmek için hücre üretildi. Tüm işlemler püskürtme yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi.

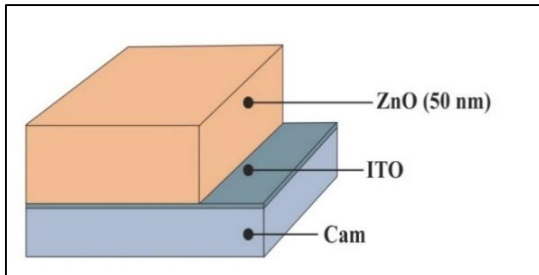
Güneş hücresi parametrelerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen metalizasyon işlemleri Isıl Buharlaştırma yöntemi kullanılarak tamamlandı. Metalizasyon sonrasında gümüş pasta yardımıyla tel bağlama işlemi yapılarak aygıt hazırlama işlemi tamamlandı. Üretilen hücrelerin çıktı parametreleri 1 Güneş ışması altında Keithley 4200 güç kaynağı ve AM 1.5 standardında Newport Oriel Sol1A solar simülatör sistemi kullanılarak elde edildi.

4.1.1. Alttaş Temizliği

Bu tez çalışması kapsamında alttaş olarak kullanılan İndiyum Kalay Oksit (ITO) kaplı cam malzemeleri hazır olarak temin edildi. Burada kullanılan Cam/ITO, $8 - 12 \Omega/sq$ yüzey direncine sahiptir. Kullanılan camlar Sigma Aldrich firmasından temin edildi. Alttaşlar üzerine kaplama yapılmadan önce organik ve inorganik kirliliklerden arındırmak için temizlik aşamasına tabi tutuldu. Öncelikli olarak alttaşlar deterjanlı ve deiyonize (DI-H₂O) suda ultrasonik banyo içerisinde 10 dakika bekletildi. Ardından deiyonize su ile durulandı. Alttaşlar, farklı beherlere konularak sırası ile aseton, izopropil alkol ve de iyonize su ile ultrasonik banyoda beşer dakikalık sürelerde oda sıcaklığında temizlendi. Temizleme işleminin son adımında, ITO kaplı camlar yüksek saflıktaki Azot (N₂) gazı ile kurutuldu. Böylece temizlik aşaması tamamlanmış oldu.

4.1.2. ZnO Kaplaması

Temizliği yapılan Cam/ITO malzemelerin üzerine eş-püskürtme yöntemi ile ZnO kaplanması için numuneler alttaş tutucuya yerleştirildi. Kaplama işlemi öncesinde kaplama odası 10^{-6} Torr vakum değerine getirildi. İlk olarak % 99,99 saflıkta ZnO hedef kullanılarak eş püskürtme yöntemiyle Cam/ITO üzerine ZnO filmlerinin üretimi, 150 W RF gücünde ve 20 mTorr Ar basıncında kaplama işlemi gerçekleştirildi. Bu şartlarda istenilen kalınlık değerini elde edebilmek için kalibrasyon yapıldı. 12 dakikalık kaplama sonrasında 30 nm kalınlık değeri gözlemlendi. Çizelge 4.1’de kaplama şartları verildi. 20 dakikalık kaplama süresiyle hedeflenen 50 nm kalınlık değeri elde edildi. Elde edilen verilere göre aygıtta kullanılacak numune sisteme yüklenmeden önce ön kontak alabilmek için Cam/ITO yüzeyinde bir bölge kapatılarak buranın kaplaması önleildi. 50 nm kalınlığında ZnO, Cam/ITO üzerine kaplandı. Kaplaması yapılan Cam/ITO/ZnO yapısı Şekil 4.1 ve fotoğrafı Resim 4.1’de verildi.



Şekil 4.1. ZnO kaplamasının şematik gösterimi

Çizelge 4.1. ZnO Kaplama Parametreleri

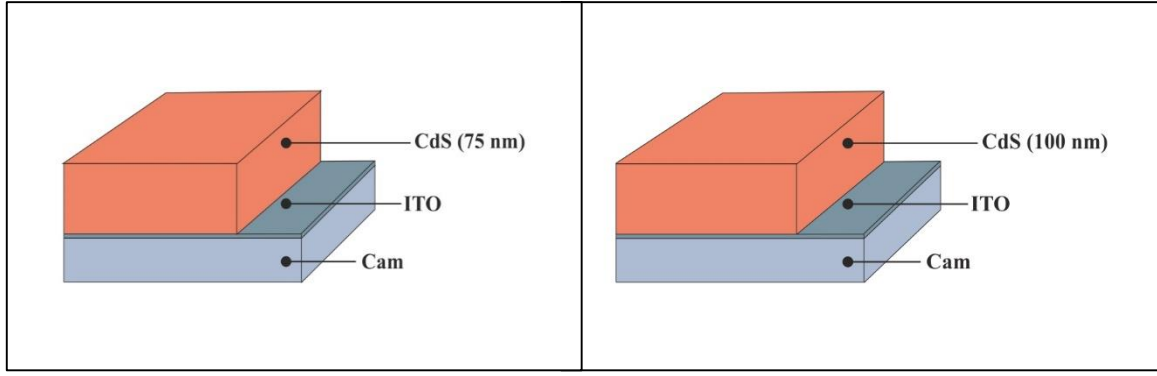
Alttaş	Temel Basınç (Torr)	RF Gücü (W)	Çalışma Basıncı (mTorr)	Alttaş Sıcaklığı	Süre (dakika)	Kalınlık (nm)	Hedef-Alttaş Mesafesi (cm)	Döndürme Hızı (rpm)
Cam/ITO	10^{-6}	150	20	Oda Sıcaklığı	12	30	10	5
Cam/ITO	10^{-6}	150	20	Oda Sıcaklığı	20	50	10	5



Resim 4.1. Püskürtme yöntemiyle elde edilen ZnO filmi

4.1.3. Pencere Katmanı

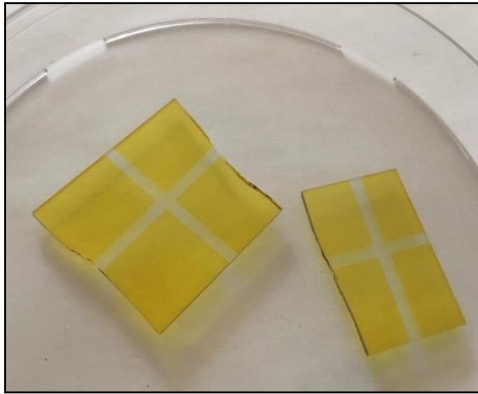
CdS tabakasının kalınlık optimizasyonunu sağlamak için numunelerin farklı sürelerde kaplaması gerçekleştirildi. % 99,99 saflığa sahip hedef kullanılarak ITO/Cam yapısı üzerine CdS ince filmi 100 W RF gücü altında ve 20 mTorr çalışma basıncında kaplama işlemi gerçekleştirildi. 10 dk, 15 dk ve 20 dk sürede sırasıyla 50 nm, 75 nm ve 100 nm kalınlığında CdS tabakası elde edildi. Burada kullanılan değerler Çizelge 4.2’de verildi. Bu kalınlık değerlerine bağlı olarak, Cam/ITO/ZnO yapısının üzerine 100 nm kalınlığında CdS tabakası kaplandı. Kaplaması yapılan Cam/ITO/ZnO/CdS yapısı Şekil 4.2’de ve fotoğrafı Resim 4.2’de verildi.



Şekil 4.2. CdS kaplamalarının şematik gösterimi

Çizelge 4.2. CdS kaplama parametreleri

Kaplama yapılan yapı	Temel Basınç (Torr)	RF Gücü (W)	Çalışma Basıncı (mTorr)	Alttaş Sıcaklığı	Süre (dakika)	Kalınlık (nm)	Hedef- Alttaş Mesafesi (cm)	Döndürme Hızı (rpm)
Cam/ITO/ZnO	10^{-6}	100	20	Oda Sıcaklığı	10	50	10	5
Cam/ITO/ZnO	10^{-6}	100	20	Oda Sıcaklığı	15	75	10	5
Cam/ITO/ZnO	10^{-6}	100	20	Oda Sıcaklığı	20	100	10	5

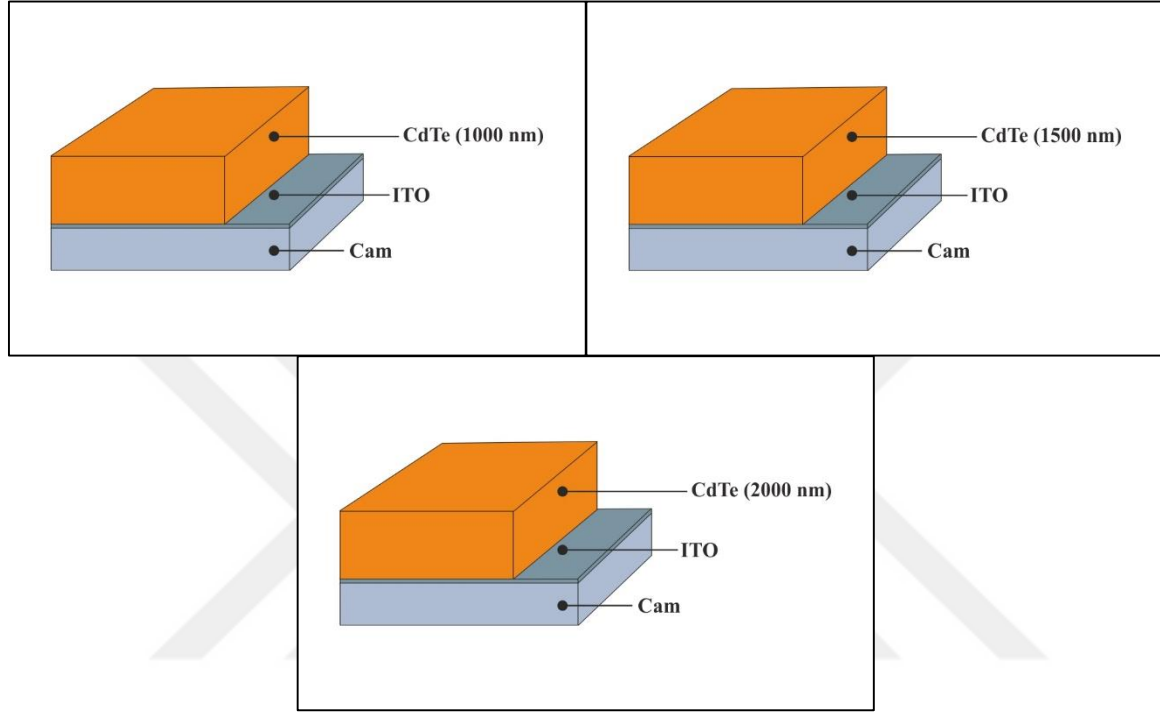


Resim 4.2. Püskürtme yöntemiyle elde edilen CdS filmi

4.1.4. CdTe Kaplaması

CdTe tabakasının kalınlık optimizasyonunu sağlamak için numunelerin farklı sürelerde kaplaması yapıldı. % 99,99 saflığa sahip hedef kullanılarak Cam/ITO yapısı üzerine p-tipi CdTe ince filmi 30 W RF gücü altında ve 20 mTorr çalışma basıncında kaplama işlemi gerçekleştirildi. Hedef malzemeye ısıdan kaynaklanacak hasar olmaması için uygulanan RF gücü düşük tutuldu. Kalibrasyon için yapılan Cam/ITO üzerine kaplaması gerçekleştirilen CdTe yapısına ait

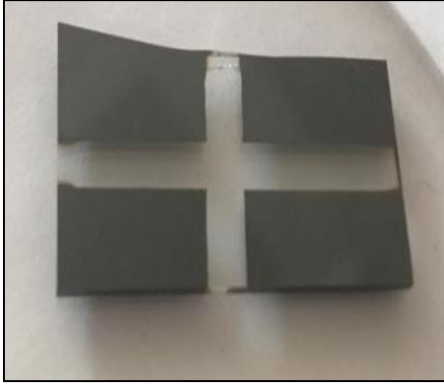
fotoğrafi Resim 4.3’de verildi. 110 dk, 135 dk ve 160 dk sürede sırasıyla Cam/ITO/ZnO/CdS yapısı üzerine 1000 nm, 1500 nm ve 2000 nm kalınlığında CdTe tabakası kaplanarak çok katlı ince film yapısı elde edildi. Burada kullanılan kaplama parametreleri Çizelge 4.3’de verildi. Elde edilen filmlerin bir şematik gösterimi Şekil 4.3’de sunuldu.



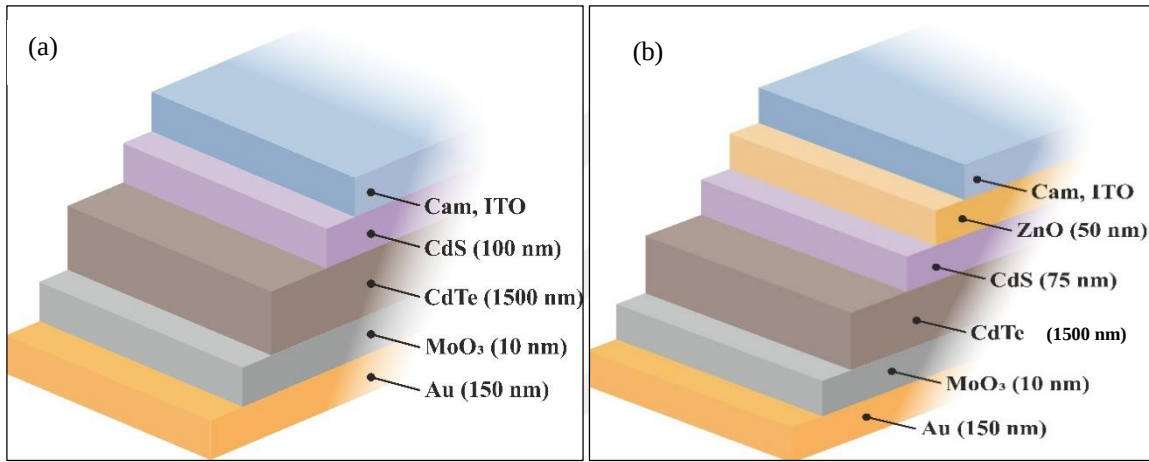
Şekil 4.3. Farklı kalınlıklı CdTe kaplamalarının şematik gösterimi

Çizelge 4.3. CdTe Kaplama Parametreleri

Kaplama yapısı	yapılan	Temel Basınç (Torr)	RF Gücü (W)	Çalışma Basıncı (mTorr)	Alttaş Sıcaklığı	Süre (dakika)	Kalınlık (nm)	Hedef-Alttaş Mesafesi (cm)	Döndürme Hızı (rpm)
Cam/ITO/ZnO/CdS		10^{-6}	30	20	Oda Sıcaklığı	110	1000	10	5
Cam/ITO/ZnO/CdS		10^{-6}	30	20	Oda Sıcaklığı	135	1500	10	5
Cam/ITO/ZnO/CdS		10^{-6}	30	20	Oda Sıcaklığı	160	2000	10	5



Resim 4.3. Püskürtme yöntemiyle elde edilen CdTe filmi



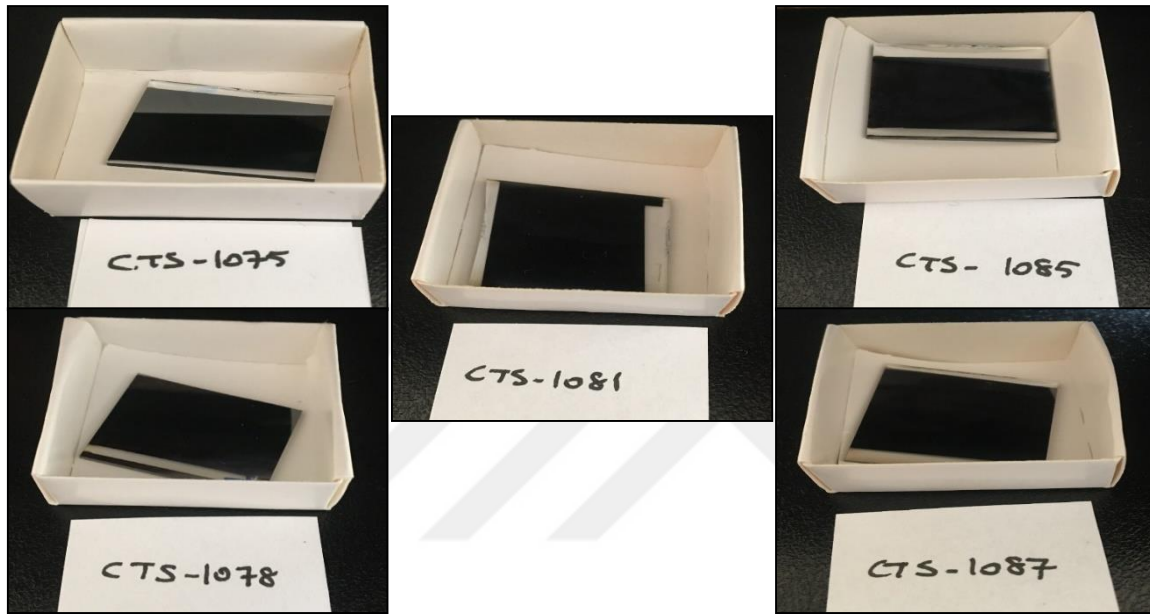
Şekil 4.4. (a) CTS1085 ve (b) CTS1087 kodlu yapıların şematifi

Üç farklı kalınlığa sahip yapının tüm karakterizasyonları gerçekleştirildikten sonra, en iyi enerji dönüşüm verimliliğine sahip 1500 nm CdTe tabaka kalınlıklı Cam/ITO/ZnO/CdS/CdTe (CTS1078) yapısının olduğu belirlendi. Bu yapıda ZnO ve CdS tabakasının kalınlığının etkisini incelemek için 2 adet yapı üretildi.

Çizelge 4.4. Kaplamaları gerçekleştirilen kalınlıklarıyla beraber yapılar ve kullanılan kodları

Numune Kodu	Yapı
CTS-1075	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (100 nm)/CdTe (1000 nm)
CTS-1078	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (100 nm)/CdTe (1500 nm)
CTS-1081	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (100 nm)/CdTe (2000 nm)
CTS-1085	Cam/ITO/CdS (100nm)/CdTe (1500 nm)
CTS-1087	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (75nm)/CdTe (1500 nm)

Öncelikli olarak yapı Şekil 4.4a'daki yapı şemasında verildiği gibi ZnO tabakası çıkarılarak Cam/ITO/CdS/CdTe (CTS1085) yapısı elde edildi. Sonra yapı içerisinde CdS yapısının kalınlık etkisini incelemek için CdS tabakası 100 nm'den 75 nm'ye düşürülerek kaplandı. Cam/ITO/ZnO/CdS(75 nm)/CdTe (CTS1087) yapısına ait yapı şeması Şekil 4.4b'de verildi. Elde edilen 5 farklı hücre yapısına ait kaplama parametreleri Çizelge 4.4'te verildi. Bu numunelere ait resimler de Resim 4.4'de sunuldu.



Resim 4.4. Üretimi gerçekleştirilen çok katmanlı güneş hücresi yapıları

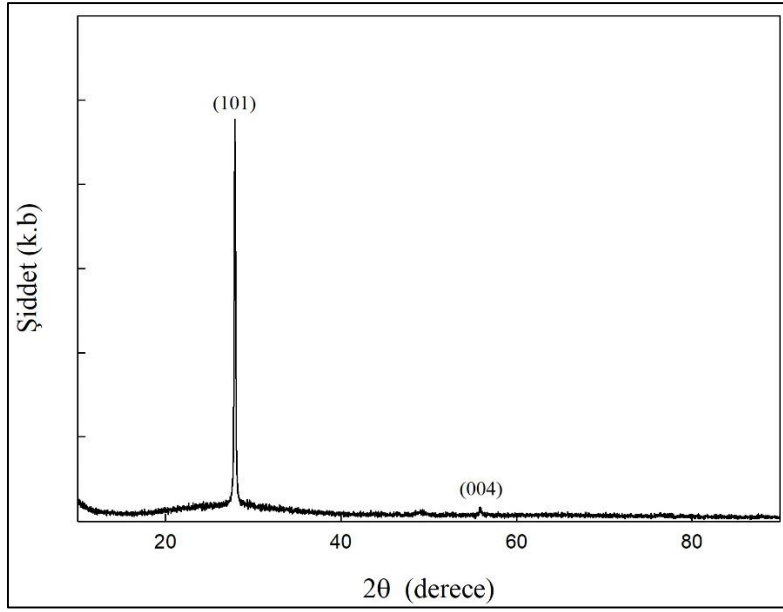
4.2. CdTe/CdS Güneş Hücre Yapısının Analizleri

Cam/ITO yapısı üzerine yapılan çok katmanlı ince film yapıları için yapısal analizler için X-ışını Kırınımı (XRD) ve optik karakterizasyonlar için Fotoluminesans (FL) ve UV-Vis Spektrometre cihazları kullanıldı.

4.2.1 X-ışını kırınımı (XRD)

Eş püskürtme yöntemi kullanılarak biriktirilen CdTe ve CdS filmlerine ait yapıların yapısal analizleri Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yer alan 1,5405 Å dalgaboyuna sahip CuK α kaynaklı XRD cihazı ile yapıldı. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında gerçekleştirildi. CdTe ve CdS yapısına ait pik

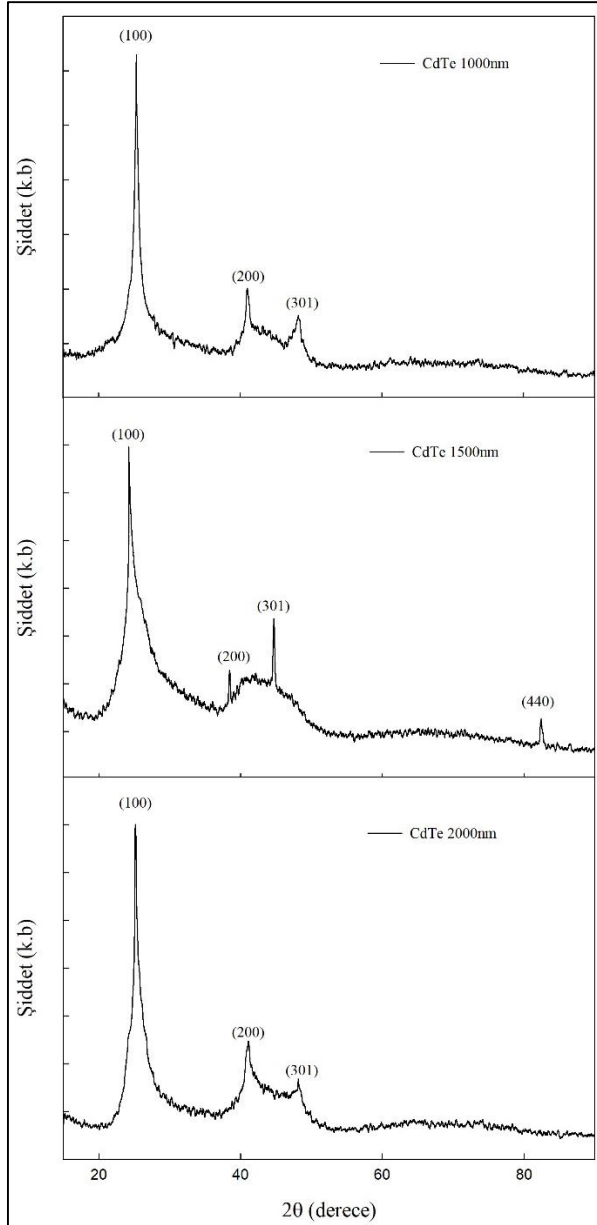
pozisyonları belirlendi. CdS için gerçekleştirilen yapısal analiz sonucunda (101) ve (004) düzlemlerinden elde edilen yansımalarından kaynaklanan pik pozisyonları gözlemlendi. Elde edilen verilere göre (101) düzlemi için $27,9^\circ$ ve (004) düzlemi için ise $55,8^\circ$ 'de görüldü. Hekzagonal yapıya sahip olan film için belirlenen pik pozisyonlarının literatürde verilen değerlerle uyumlu olduğu gözlemlendi [105, 106]. CdS filmi için gözlenen XRD kırınım deseni Şekil 4.5'de verildi.



Şekil 4.5. CdS ince filmine ait XRD deseni

CdTe film yapısının yapısal analizi sonucu, kübik yapıya sahip olduğu ve (111), (220), (331) düzlemlerinden yansıyan pikler gözlemlendi. (111), (220) ve (331) düzlemlerinden kaynaklanan yansımalarından elde edilen pik pozisyonları sırasıyla $23,7^\circ$, $39,3^\circ$ ve 46° olduğu belirlendi.

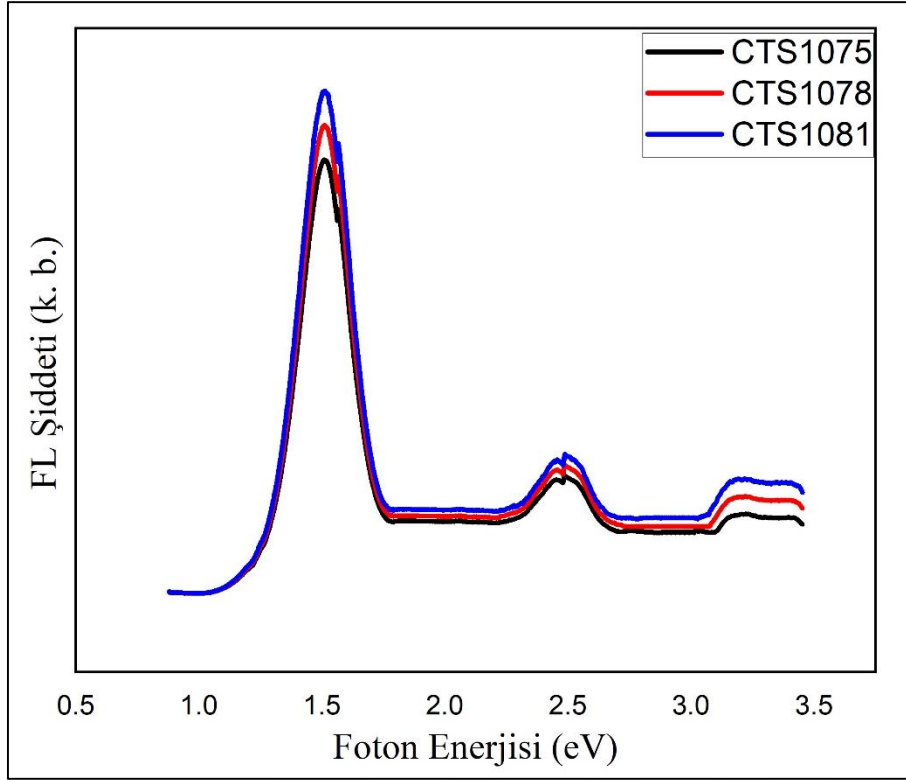
1500 nm kalınlık değerine sahip olan CdTe numunesi için diğer yapılardan farklı olarak (440) düzleminde kaynaklanan yansımadan elde edilen pik pozisyonu $82,24^\circ$ değerinde gözlemlendi. Belirlenen pik pozisyonlarından gözlenen değerlerin literatür verileriyle uyumlu olduğu görüldü [105, 106]. CdTe ince filmine ait XRD kırınım desenleri Şekil 4.6'da verildi.



Şekil 4.6. CdTe ince filmlerine ait XRD kırınım deseni

4.2.2. Fotolüminesans Ölçümleri

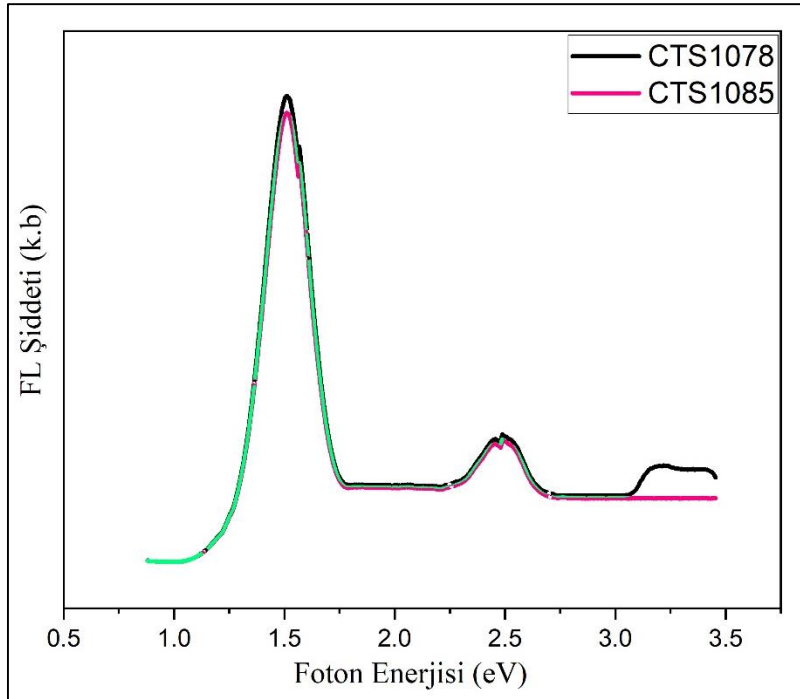
Numunelerin FL ölçümleri, Gazi Fotonik bünyesinde bulunan 50 mW güce sahip 325 nm He-Cd lazer kullanılarak Jobin Yvon Florog-550 sistemi ile oda sıcaklığında gerçekleştirildi. 400-1000 nm dalgaboyu aralığında alınan fotolüminesans spektrumlarında, elde edilen tüm FL ölçüm sonuçlarından CdTe için 1,5 eV, CdS için 2,48 eV ve ZnO için 3,2 eV yasak enerji bant aralığı değerleri belirlendi.



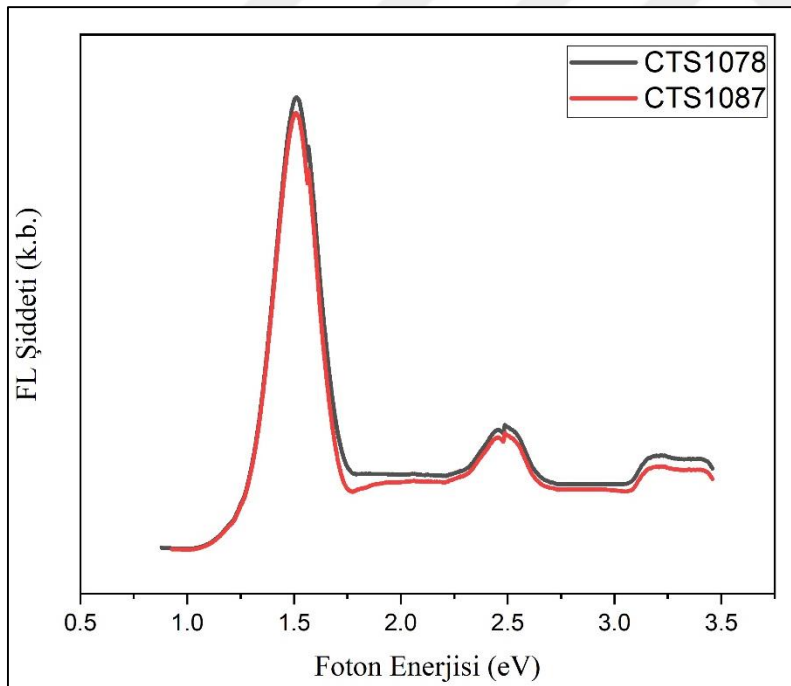
Şekil 4.7. CTS1075, CTS1078 ve CTS1081 kodlu numuneler için FL spektrumları

Üç farklı CdTe kalınlığına sahip olan CTS1075, CTS1078 ve CTS1081 kodlu numuneler için elde edilen FL spektrumları Şekil 4.7’de verildi. CdTe kalınlığının artışıyla ilgili olarak piklerin 1,5 eV değeri civarında gözlenen yasak enerji aralığında herhangi bir değişim gözlenmedi. Numunelerin kalınlığının artışıyla ilgili olarak şiddetlerinde farklılık meydana gelmiştir. 2000 nm kalınlığına sahip CdTe içeren CTS1081 kodlu yapı için elde edilen sonuçların, diğer yapılar için elde edilen sonuçlara göre daha yüksek olduğu söylenebilir. 1000 nm CdTe kalınlığına sahip CTS1075 kodlu yapı için sonuçlar, şiddetin diğer iki yapıya göre az olduğunu gösterir.

CTS1078 ve CTS1085 kodlu numuneler için elde edilen FL spektrumları Şekil 4.8’de verildi. 1500 nm CdTe kalınlığına sahip ZnO katmanı içeren CTS1078 kodlu numune ile ZnO içermeyen CTS1085 kodlu numuneler karşılaştırıldı. Her iki yapıda da 1500 nm kalınlıklı CdTe yer almaktadır. 1,5 eV değerine karşı gelen pik pozisyonlarında ve şiddetlerinde herhangi bir değişiklik görülmedi.



Şekil 4.8. CTS1078-CTS1085 kodlu numuneler için FL pikleri

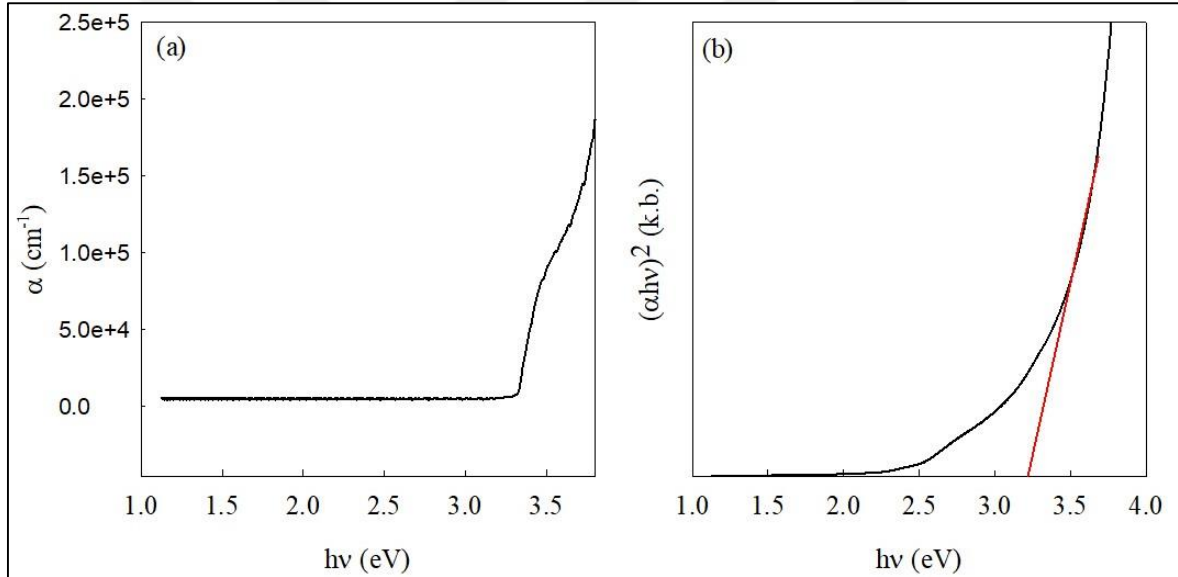


Şekil 4.9. CTS1078-CTS1087 kodlu numuneler için FL pikleri

CTS1078 ve CTS1087 kodlu numunelerden elde edilen FL spektrumları Şekil 4.9’da karşılaştırıldı. Burada CdS kalınlığının düşülmesine bağlı olarak enerji-bant değerlerinde bir değişim gözlenmez iken, 2,48 eV civarında CdS pikinin şiddetinde değişim olduğu gözlemlendi.

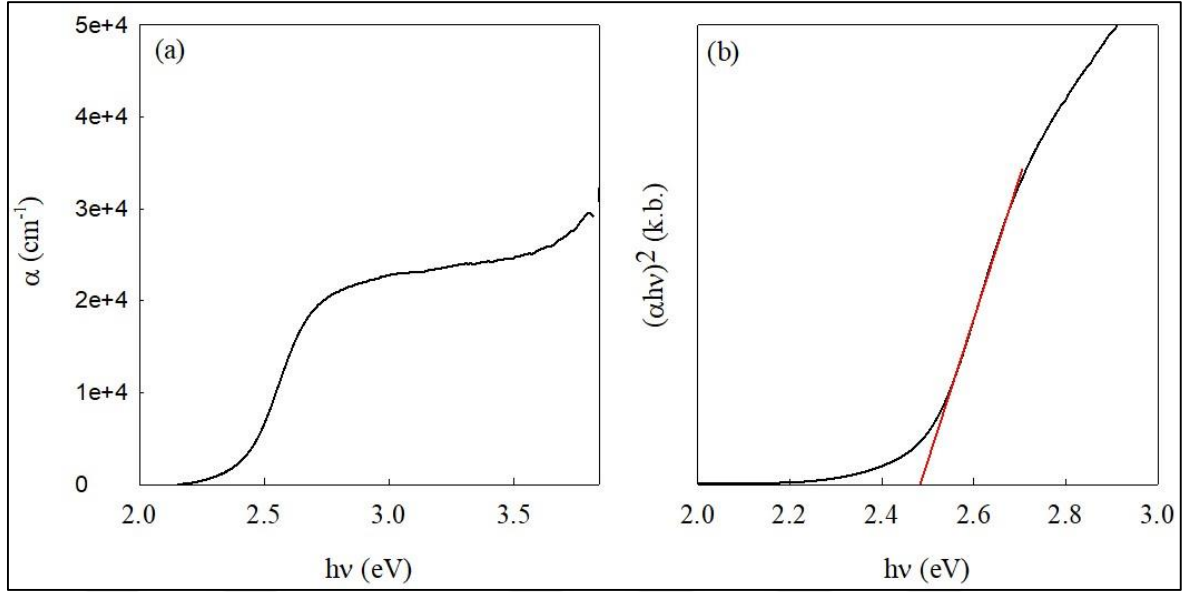
4.2.3. UV-Vis Ölçümleri

Yasak bant aralığını bulmak için malzemenin soğurma spektrumundan faydalanılabilir. Kaplaması gerçekleştirilen ZnO, CdS ve CdTe ince filmleri için soğurma katsayısı (α) Eşitlik 3.5 yardımı ile elde edildi ve Eşitlik 3.6 ile verilen Tauc ifadesi $n = 1/2$ alınarak hesaplamalar yapıldı. $\alpha - hv$ ve $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiklerinden yararlanılarak numunelerin yasak enerji aralıkları belirlendi. Cam/ITO/ZnO yapısına ait geçirgenlik spektrumundan elde edilen $\alpha - hv$ grafiği Şekil 4.10a'da ve $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği Şekil 4.10b'de verildi. ZnO için yasak enerji bant aralığı 3,21 eV olarak belirlendi. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görüldü [107].



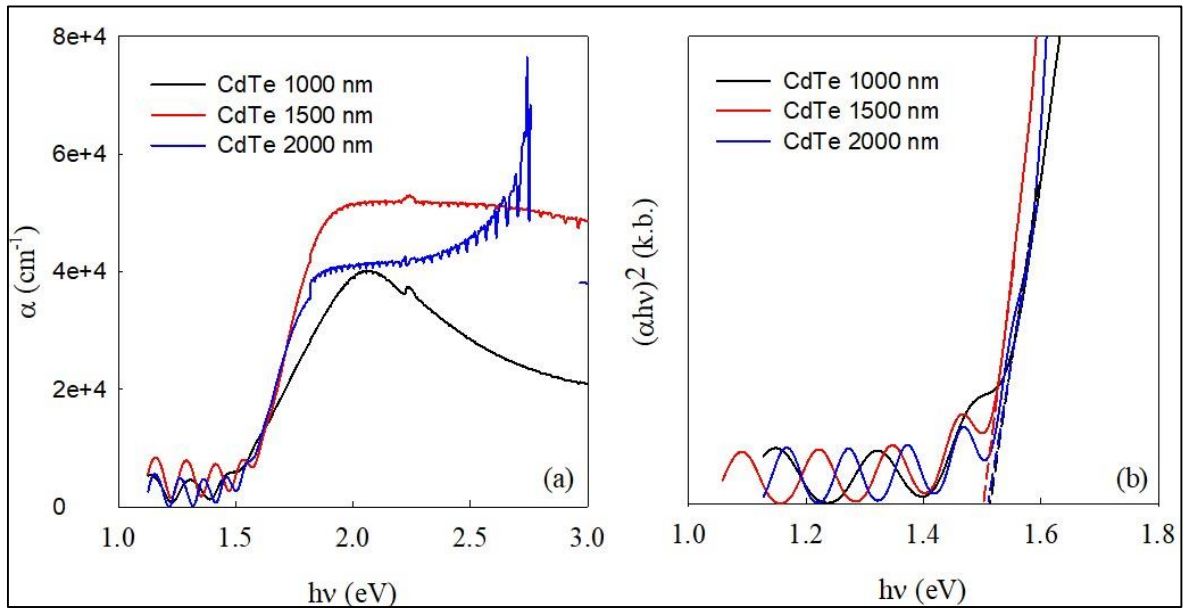
Şekil 4.10. ZnO için (a) soğurma ve (b) $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği

Cam/ITO/CdS yapısına ait $\alpha - hv$ grafiği Şekil 4.11a'da ve $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği Şekil 4.11b'de verildi. Şekil 4.11b'den görüldüğü gibi CdS yapısının band aralığı 2,48 eV olarak belirlendi ve sonucun literatürle uyumlu olduğu gözlendi [108].



Şekil 4.11. CdS için (a) soğurma ve (b) $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği

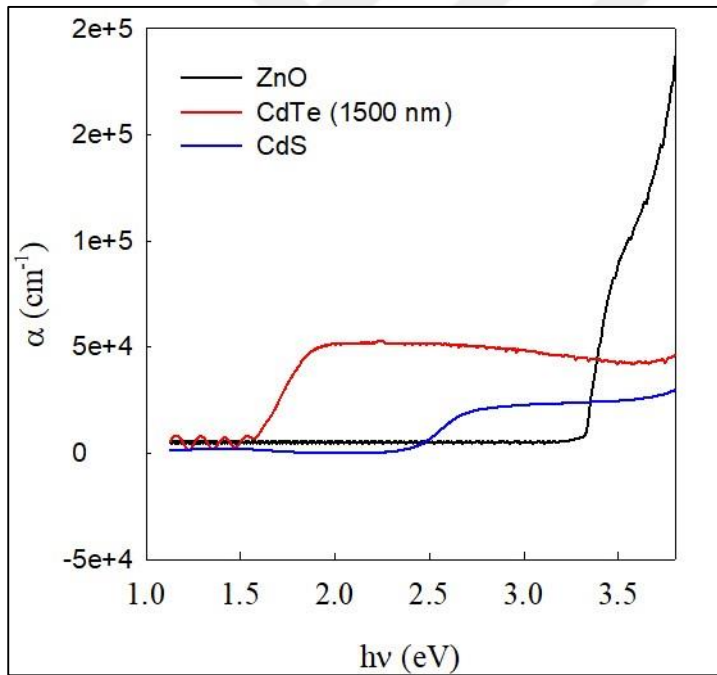
Cam/ITO/CdTe yapısına ait geçirgenlik ölçümleri gerçekleştirildi ve soğurucu katman olan CdTe için $\alpha - hv$ grafiği Şekil 4.12a'da ve $(\alpha hv)^2 - hv$ grafikleri Şekil 4.12b'de sunuldu. 1000 nm, 1500 nm ve 2000 nm kalınlık değerlerine sahip olan yapılar için yasak enerji bant aralığı sırasıyla 1,5 eV, 1,5 eV ve 1,51 eV elde edildi.



Şekil 4.12. Farklı kalınlıktaki CdTe'ler için (a) soğurma ve (b) $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği

UV-Vis spektrometre ölçüm sonuçlarına göre hücre yapısını oluşturan ZnO, CdS ve farklı kalınlıklardaki CdTe katmanlarının yasak bant aralıkları belirlendi. Elde edilen yasak bant aralıkları literatür ile uyumlu olduğu görüldü [109-111]. Ayrıca UV-Vis spektrometresi ile FL spektrometresinden elde edilen bant aralığı değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.5’de verildi ve birbiri ile uyumlu oldukları görüldü.

Şekil 4.12a’da verilen soğurma katsayısı- enerji grafiğinden de görüldüğü gibi en iyi soğurma katsayısına sahip CdTe kalınlığı 1500 nm’dir. Optimize edilen bu kalınlığın alt değerinde (1000 nm) ve üst değerinde (2000 nm) soğurma katsayısı değeri düşmektedir. Soğurma katsayısı yapıdaki elektron konstanrasyonuna bağlı olduğundan dolayı en yüksek soğurma katsayısına sahip 1500 nm kalınlıklı CdTe yapısı diğer yapılara göre en iyi performansa sahiptir [111].



Şekil 4.13. ZnO, CdS ve CdTe için $\alpha - hv$ grafiği

ZnO, CdS ve 1500 nm kalınlığa sahip CdTe yapılarına ait $\alpha - hv$ grafiği Şekil 4.13’de verildi. ZnO için yasak enerji bant aralığı olan 3,21 eV değerinden önce soğurma katsayısı (α) 1 eV değerinden itibaren azalma göstermiş, bant aralığı değerinden sonra hızlı bir şekilde artmıştır [112, 113]. Görünür bölgede sıfır soğurma katsayısının var olmasından dolayı kullanılan ZnO yapısının güneş hücreleri için uygun bir yapı olduğu görülmektedir.

CdS yapısı için soğurma katsayısı yasak enerji aralığı değerine kadar sıfıra yakın, yasak enerji aralığı olan 2.48 eV değerine yaklaştıkça artmaktadır. Bant aralığı değerinden itibaren gözlenen hızla artış soğurma kenarını oluşturmaktadır [114]. CdTe ise 1.5 eV'den büyük enerjili fotonları yüksek oranda soğurduğu görülmektedir. Bu üç filmin soğurma spetrumu üzerine yapılan bu değerlendirmeden, CdS/CdTe/ZnO dizilimine sahip hücre yapısının güneş spektrumunu sıralı olarak soğurdukları ve tasarlanan güneş hücresi için uygun yapılar oldukları görülmektedir.

Çizelge 4.5. Optik ölçümler sonucunda yapıların bant aralığı değerleri

Yapı	E_g (eV) (FL)	E_g (eV) (UV-Vis)
ZnO	3,20	3,21
CdS	2,40	2,48
CdTe	1,5	1,5-1,5-1,51

4.3. Metalizasyon İşlemleri

Üretilen yapıların elektriksel ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için malzeme yüzeyine metal kontak oluşturulması gereklidir. Kontak oluşturma işleminden önce Cam/ITO yüzeyinde ön kontak için belirli bir bölge boş bırakıldı. Arka kontak ise çapı 0,1 cm olacak şekilde tasarlandı ve maske oluşturuldu. Yapının yüzeyine maske yerleştirildi. Öncelikli olarak tampon tabaka, sonra metal kaplama işlemleri gerçekleştirildi.

4.3.1. Tampon tabaka

Metalizasyon işlemi öncesinde üretimi gerçekleştirilen güneş hücresi yapıları kullanılan metallere kaynaklanan difüzyonu engellemek için yüksek iş fonksiyonuna sahip (6,23 eV) MoO_3 tampon tabaka olarak kullanıldı. $2,04 \times 10^{-5}$ mbar taban basıncı altında oda sıcaklığında gerçekleştirilen işlemde, kaplama oranı 1 Å/s alındı. 10 nm tampon tabaka elde edilen işlemde kullanılan parametreler Çizelge 4.6'da verildi.

Çizelge 4.6. MoO₃ Kaplama Parametreleri

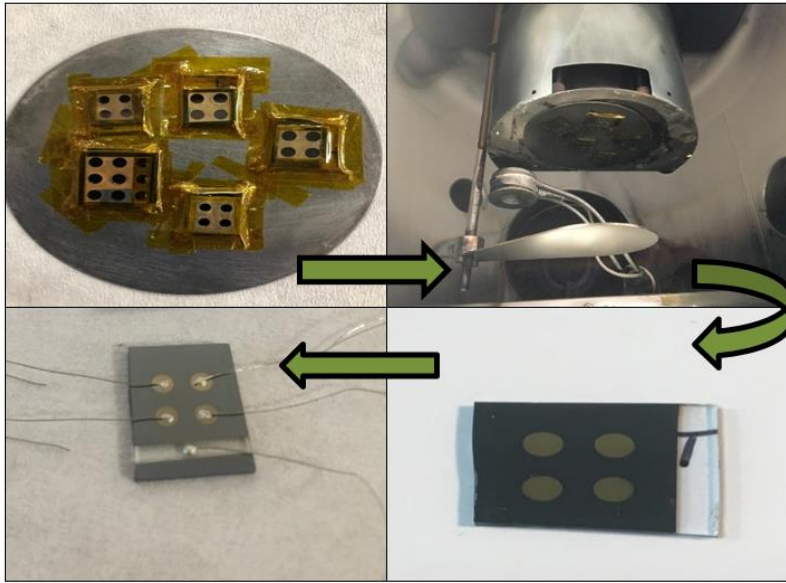
Kaplama Şartları	MoO ₃
Alttaş Sıcaklığı (°C)	Oda Sıcaklığı
Taban Basıncı (mbar)	10 ⁻⁵
Kaplama Basıncı (mbar)	10 ⁻⁵
Kaplama Oranı (Å/s)	1
Kaplama Kalınlığı(Å)	100

4.3.2. Metal arka kontak işlemleri

Kaplama işlemlerinin ardından elde edilen CdS/CdTe güneş hücresi yapıları için, farklı kontak malzemelerinin güneş hücresi parametrelerine olan etkisini incelemek amacıyla Altın (Au), Altın Nikel Germanyum (AuNiGe) alaşımı ve Altın Çinko (AuZn) alaşımları kullanıldı. Tampon tabaka biriktirmesiyle aynı atmosferde gerçekleştirilen işlemler için Gazi Fotonik'te bulunan Bestec marka Isıl Buharlaştırma sisteminde kullanıldı. İşlemler öncesinde uygun metal maskeler tercih edildi. Resim 4.5'de ızgaraların numuneler üzerine yerleştirildikten sonraki ve tel bağlama işleminin ardından elde edilen hücrenin görüntüsü verildi. Metal kontak işlemleri sırasında Isısal Buharlaştırıcıda kullanılan parametreler Çizelge 4.7'de verildi.

Çizelge 4.7. Au, AuNiGe ve AuZn metal kaplama parametreleri

Kaplama Şartları	Au	AuNiGe	AuZn
Alttaş Sıcaklığı (°C)	Oda Sıcaklığı	Oda Sıcaklığı	Oda Sıcaklığı
Taban Basıncı (mbar)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
Kaplama Basıncı (mbar)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
Kaplama Oranı (Å/s)	3,5	7,1	3,9
Kaplama Kalınlığı(Å)	1500	1500	1500



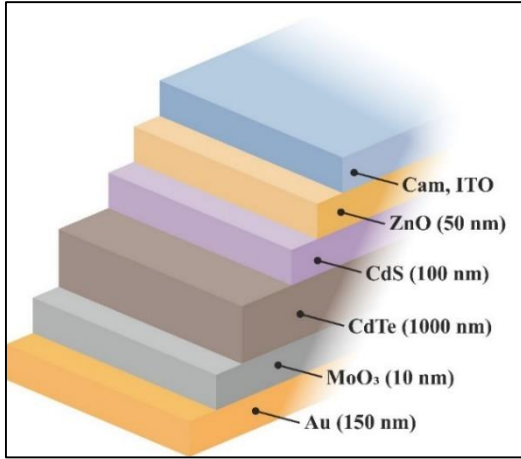
Resim 4.5. Yapıların metal arka kontak işlem adımları

4.4. Akım Gerilim Ölçümleri

Metalizasyon işlemleri tamamlanan numunelerin elektriksel ölçümleri Gazi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Solar simülatör yardımıyla AM1.5G (1 Güneş) standartları altında oda sıcaklığında yapıldı. Ölçümleri gerçekleştirilen numunelerin elektriksel ölçüm sonuçları aşağıda sunuldu.

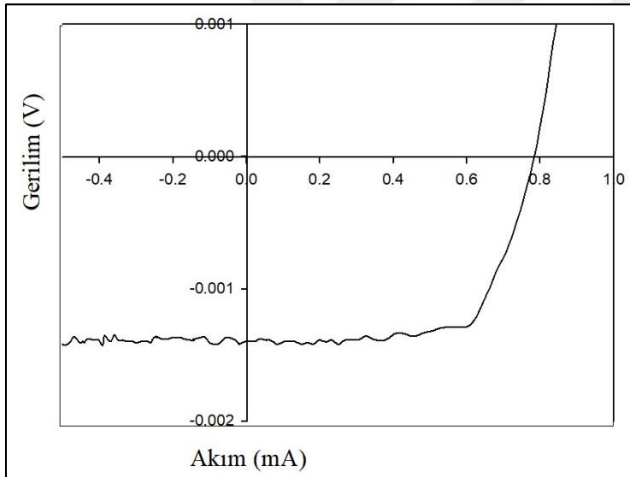
CTS1075 Kodlu Güneş Hücre Yapısının Elektriksel Analizi

Cam/ITO/ZnO(50 nm)/CdS(100 nm)/CdTe(1000 nm) yapısına sahip CTS1075 kodlu güneş hücresi oluşturuldu. Elde edilen yapı için öncelikle 10 nm kalınlığında MoO₃ tampon tabakası ve sonrasında üzerine 150 nm kalınlıklı Au metali kaplanılarak arka kontak oluşturuldu. CTS 1075 kodlu güneş hücresine ait yapı şeması Şekil 4.14’de verildi.



Şekil 4.14. CTS1075 kodlu güneş hücre yapı şeması

Şekil 4.15'deki eğri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 4.8'de sunuldu.



Şekil 4.15. CTS1075 numunesi için $I - V$ grafiği

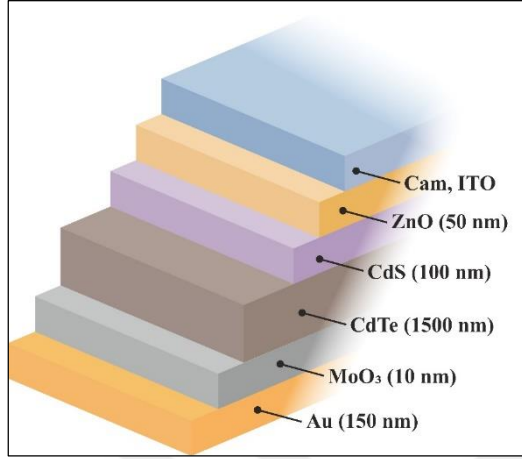
Çizelge 4.8. CTS1075 kodlu yapının elektriksel parametreleri

Güneş hücresi	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
CTS1075	0,789	1,4	70,3	9,89

CTS1078 Kodlu Güneş Hücre Yapısının Elektriksel Analizi

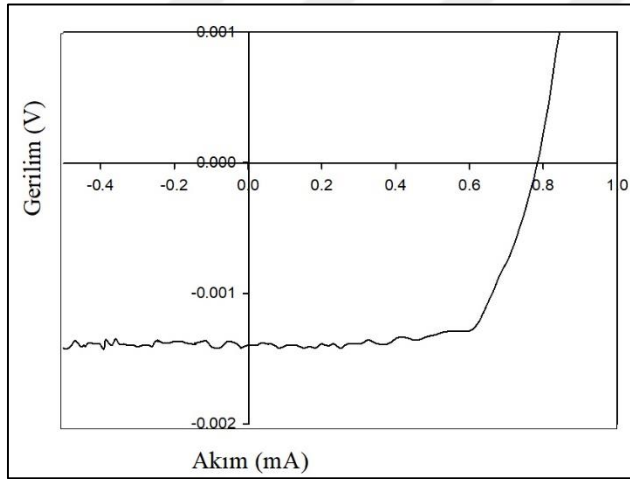
CdTe(1500 nm)/CdS(100 nm)/ZnO(50 nm)/ITO/Cam yapısına sahip CTS1078 kodlu güneş hücresi oluşturuldu. Elde edilen yapı için öncelikle 10 nm kalınlığında MoO_3 tampon

tabakası ve sonrasında üzerine 150 nm kalınlıklı Au metali kaplanılarak arka kontak oluşturuldu. CTS 1078 kodlu güneş hücresine ait yapı şeması Şekil 4.16’da verildi.



Şekil 4.16. CTS1078 kodlu güneş hücre yapı şeması

CTS1078 kodlu güneş hücre numunesinin $I - V$ grafiği Şekil 4.17’de verildi. Bu hücrenin elektriksel parametreleri Çizelge 4.9’da verildi.



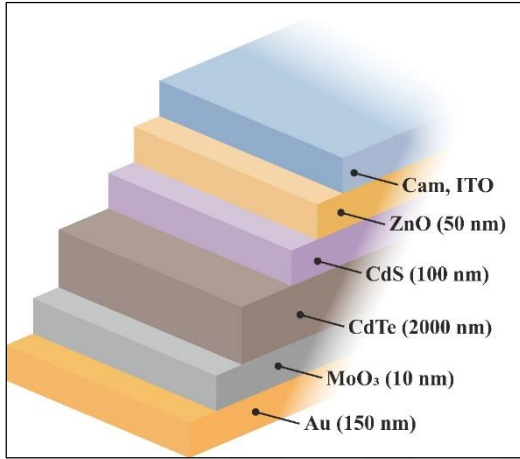
Şekil 4.17. CTS1078 numunesi için $I - V$ grafiği

Çizelge 4.9. CTS1078 kodlu yapının elektriksel parametreleri

Güneş hücresi	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
CTS1078	0,801	1,49	71,8	10,92

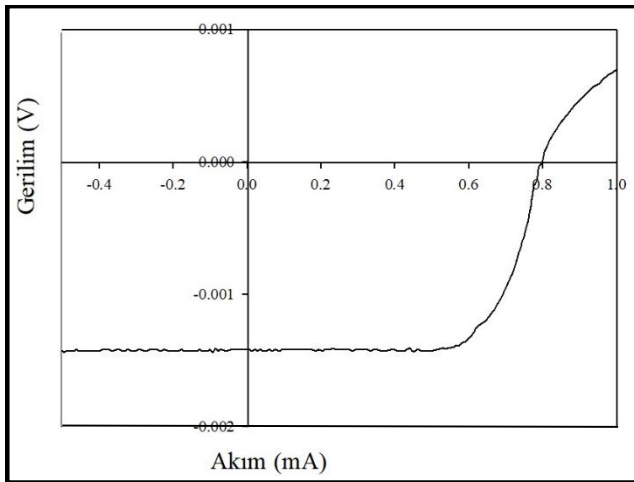
CTS1081 Kodlu Güneş Hücresi Yapısının Elektriksel Analizi

Cam/ITO/ZnO(50 nm)/CdS(100 nm)/CdTe(2000 nm) yapısına sahip CTS1081 kodlu güneş hücresi oluşturuldu. Elde edilen yapı için öncelikle 10 nm kalınlığında MoO₃ tampon tabakası ve sonrasında üzerine 150 nm kalınlıklı Au metali kaplanılarak arka kontak oluşturuldu. CTS 1081 kodlu güneş hücresine ait yapı şeması Şekil 4.18’de verildi.



Şekil 4.18. CTS1081 kodlu güneş hücre yapı şeması

CTS1081 kodlu güneş hücre numunesinin $I - V$ grafiği Şekil 4.19’den elde edildi. Elektriksel parametreleri Çizelge 4.10’da verildi.



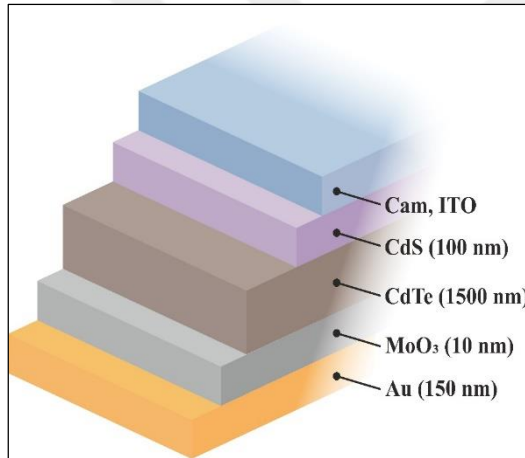
Şekil 4.19. CTS1081 numunesi için $I - V$ grafiği

Çizelge 4.10. CTS1081 kodlu yapının elektriksel parametreleri

Güneş hücresi	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	FF (%)	η (%)
CTS1081	0,798	1,42	70,0	10,10

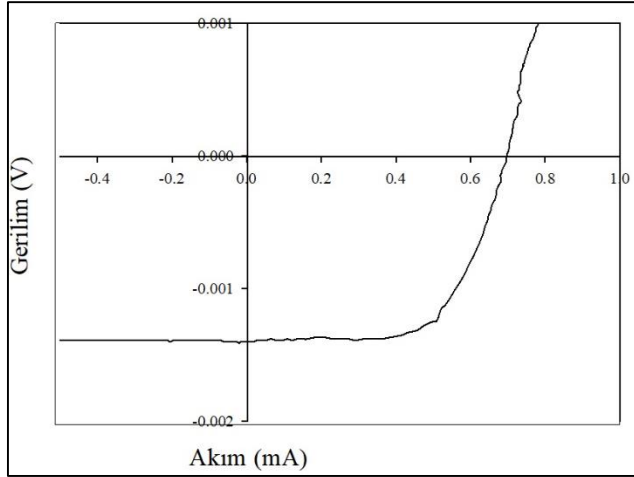
CTS1085 Kodlu Güneş Hücresi Yapısının Elektriksel Analizi

CdTe(1500 nm)/CdS(100 nm)/ITO/Cam yapısına sahip CTS1085 kodlu güneş hücresi oluşturuldu. Elde edilen yapı için öncelikle 10 nm kalınlığında MoO_3 tampon tabakası ve sonrasında üzerine 150 nm kalınlıklı Au metali kaplanılarak arka kontak oluşturuldu. CTS 1085 kodlu güneş hücresine ait yapı şeması Şekil 4.20’de verildi.



Şekil 4.20. CTS1085 kodlu güneş hücre yapı şeması

CTS1085 kodlu güneş hücre numunesinin $I - V$ grafiği Şekil 4.21’de verildi. Elektriksel parametreleri Çizelge 4.11’de verildi.



Şekil 4.21. CTS1085 numunesi için $I - V$ grafiği

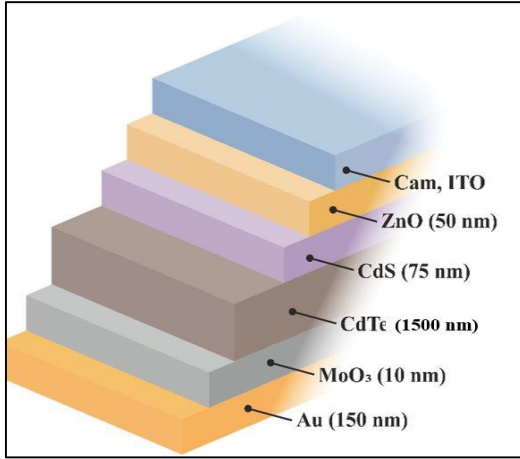
Şekil 4.21’de verilen grafikten elde edilen elektriksel parametreleri Çizelge 4.10’da verilmiştir. Burada ZnO katmanı olmamasına bağlı olarak V_{OC} değerinde düşüş gözlemlendi. Buna bağlı olarak η (%) dönüşüm verimliliği azalmıştır.

Çizelge 4.11. CTS1085 kodlu yapının elektriksel parametreleri

Güneş hücresi	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
CTS1085	0,696	1,40	64,86	8,05

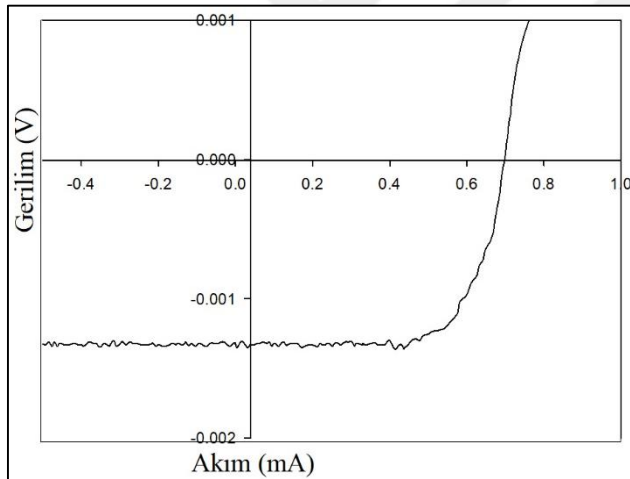
CTS1087 Kodlu Güneş Hücre Yapısının Elektriksel Analizi

CdTe(1500 nm)/CdS(75 nm)/ZnO(50 nm)/ITO/Cam yapısına sahip CTS1087 kodlu güneş hücresi oluşturuldu. Elde edilen yapı için öncelikle 10 nm kalınlığında MoO_3 tampon tabakası ve sonrasında üzerine 150 nm kalınlıklı Au metali kaplanılarak arka kontak oluşturuldu. CTS 1087 kodlu güneş hücresine ait yapı şeması Şekil 4.22’de verildi.



Şekil 4.22. CTS1087 kodlu güneş hücre yapı şeması

CTS1087 kodlu güneş hücre numunesinin $I - V$ eğrisi Şekil 4.23’de elektriksel parametreleri Çizelge 4.12’de verildi.



Şekil 4.23. CTS1087 numunesi için $I - V$ grafiği

Çizelge 4.12. CTS1087 kodlu yapının elektriksel parametreleri

Güneş hücresi	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
CTS1087	0,710	1,35	68,49	8,36

Şekil 4.23’den hesaplanan dönüşüm verimliliği değeri CTS1085 kodlu yapıdan elde edilen değerden daha büyüktür. Yapı içerisinde yer alan ZnO katmanının verimliliği arttırdığı gözlemlendi. Bu yapıda CdS kalınlığının azaltılarak hücre içerisine daha fazla ışınım girmesi, böylece verimliliğin artması beklendi. Ancak elde edilen sonuçlarda CdS kalınlığının

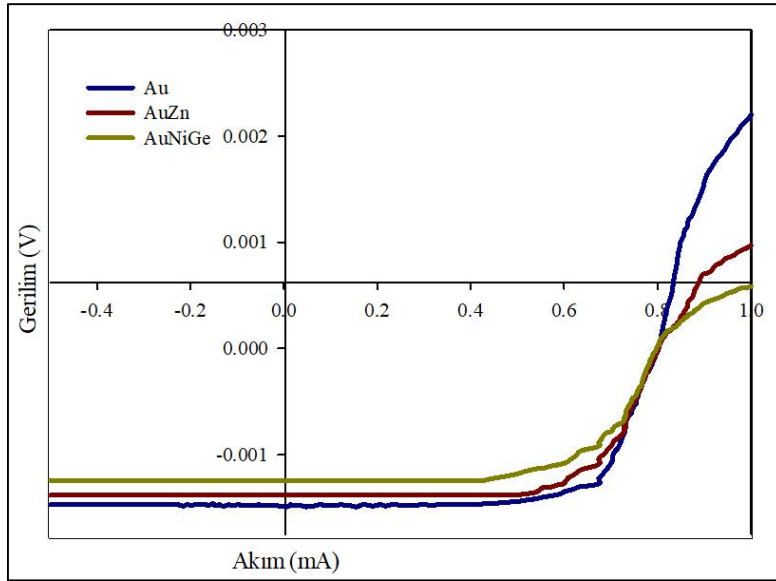
azaltılması sonucunda elde edilen değer, 100 nm kalınlıklı yapılara göre daha düşük verime sahiptir. Elde edilen ölçüm sonuçlarında açık devre gerilimi CTS1078 kodlu yapıya kıyasla 19 mV azaldığı görüldü. Açık devre gerilimindeki düşüşten dolayı dolum faktörü ve dönüşüm verimliliğinde azalma belirlendi. Elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu görüldü [100].

Çizelge 4.13. Yapılara ait güneş hücresi performans parametreleri

Güneş hücresi	Hücre Yapısı	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	FF (%)	η (%)
CTS1075	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (100 nm)/CdTe (1000 nm)	0,789	1,40	70,3	9,89
CTS1078	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (100 nm)/CdTe (1500 nm)	0,801	1,49	71,8	10,92
CTS1081	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (100 nm)/CdTe (2000 nm)	0,7982	1,42	70,0	10,10
CTS1085	Cam/ITO/CdS (100nm)/CdTe (1500 nm)	0,696	1,40	64,8	8,05
CTS1087	Cam/ITO/ZnO (50 nm)/CdS (75nm)/CdTe (1500 nm)	0,71	1,35	68,4	8,36

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen performans parametreleri Çizelge 4.5’de verildi. Elde edilen sonuçlardan HRT tabakası olarak yapılar içerisinde yer alan ZnO katmanının açık devre gerilimini ve FF dolum faktörünü arttırdığı gözlemlendi. CTS1085 numunesi ile kıyaslandığında HRT tabakası içeren diğer numunelerin dönüşüm verimliliği değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum görünür bölgenin büyük bölümünde soğurmanın arttığını göstermektedir.

Çizelge 4.13’de görüldüğü gibi en iyi verimliliğe sahip olan CTS1078 kodlu numune için kontak etkisini incelemek amacıyla üç farklı metal arka Au, AuZn ve AuNiGe olarak belirlendi. Numunelerin $I - V$ grafikleri Şekil 4.24’den elde edildi ve elektriksel parametreler Çizelge 4.14’de verildi. Sonuçlara göre Au kontaklı numunenin en yüksek dönüşüm verimliliğine sahip olduğu görüldü.



Şekil 4.24. Farklı arka kontak malzemeleri için CTS1078 numunesi için $I - V$ grafikleri

Kontak malzemelerindeki Au miktarı azaldıkça dolun faktörü ve dönüşüm verimliliğinin azaldığı gözlemlendi. Ayrıca bu azalmanın seri dirençteki artmaktan olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.14. CTS1078 numunesi için farklı kontaklı performans parametreleri

Kontak tipi	V_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	$FF(\%)$	η (%)
Au	0,8014	1,49	0,7184	10,92
AuZn	0,7974	1,38	0,6822	9,56
AuNiGe	0,7914	1,25	0,6484	8,17



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması içerisinde kullanılacak olan yapıları elde etmek amacıyla ilk olarak ZnO, CdS ve CdTe bileşiklerinin optimizasyonları yapıldı. Cam/ITO üzerine ZnO, CdS ve CdTe ince filmleri Eş-Püskürtme Yöntemiyle kaplandı. ZnO için 50 nm, CdS için 75 nm ve 100 nm kalınlık değerleri süreye bağlı olarak elde edildi. Son olarak CdTe için 1000 nm, 1500 nm ve 2000 nm kalınlık değerleriyle tüm ince film yapıları için optimizasyonlar gerçekleştirildi.

Elde edilen ince film yapıların yapısal karakterizasyonu X-ışını kırınımı, optik karakterizasyonu ise FL ve UV-Vis spektrometreleri yardımıyla gerçekleştirildi. CdS için elde edilen XRD deseninde (101) ve (004) düzlemlerinden elde edilen yansılardan $27,9^\circ$ ile $55,8^\circ$ 'lerde pik pozisyonları gözlemlendi. CdS filminin hekzagonal yapıda olduğu belirlendi. CdTe için ise (111), (220), (331) düzlemlerinden elde edilen yansımaların pik pozisyonları $23,7^\circ$, $39,3^\circ$ ve $46,0^\circ$ 'lerde gözlemlendi. 1500 nm kalınlıklı CdTe yapısında $82,2^\circ$ 'de (440) düzleminden kaynaklanan pik gözlemlendi ve bu yapının kübik yapıda olduğu belirlendi. Optik karakterizasyon sonrasında geçirgenlik değerlerinden ince film yapılarına ait $\alpha - hv$ grafikleri yardımıyla soğurma katsayıları elde edildi. Buradan yasak enerji bant aralığı değerleri $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiklerinden elde edilerek belirlendi. Bulunan yasak enerji bant aralığı değerleri ZnO için 3,21 eV, CdS için 2,48 eV olarak elde edildi. Üç ayrı kalınlık değerine sahip CdTe ince filmleri için bu değer sırasıyla 1,50 eV, 1,50 eV ve 1,51 eV olarak elde edildi.

X- ışını kırınımı ve UV-Vis yardımıyla gerçekleştirilen ölçümlerden sonra üç farklı çok katmanlı ince film güneş hücresi yapıları oluşturuldu. Bu yapılarda CdTe kalınlık değerleri değiştirilerek, diğer katmanların kalınlıkları sabit tutuldu. 1000 nm, 1500 nm ve 2000 nm CdTe kalınlığına sahip hücrelerde, CdS kalınlığı 100 nm ve ZnO kalınlığı 50 nm olarak gerçekleştirildi. Yapılan FL ölçümleri sonrasında kalınlık artışına bağlı olarak şiddette bir artış olduğu, bant aralığı değerinde değişimin olmadığı görüldü. Elde edilen bant aralığı değerlerinin UV-Vis ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu görüldü.

Yapısal ve optiksel analizlerinin tamamlanmasından sonra elektriksel analizleri için hücre fabrikasyonu aşamasına geçildi. Tampon tabaka (MoO_3) ve Au metal arka kontak

işlemlerinden sonra yapılara Ag pasta yardımıyla tel bağlanarak CdTe yapı kalınlığının farklılaştığı üç adet CTS1075 (1000 nm), CTS1078 (1500 nm) ve CTS1081 (2000 nm) kodlu güneş hücreleri elde edildi. Bu yapıların elektriksel analizleri AM1.5 G (1 Güneş) spektruma sahip Solar Simülatör ile gerçekleştirildi. Akım-gerilim ($I - V$) ölçümleri sonucunda güneş hücresi performans parametreleri belirlendi. CTS1075, CTS1078 ve CTS1081 kodlu güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimlilikleri sırasıyla %9,89, %10,92 ve %10,1 olarak elde edildi. Üretilen güneş hücre yapılarından, enerji dönüşüm verimliliği göre en yüksek olanın CTS1078 kodlu 1500 nm CdTe kaplı numune olduğu görüldü.

Bu yapıda HRT tabaka olarak yer alan ZnO katmanının etkisini gözlemlemek amacıyla CTS 1078 kodlu güneş hücre yapısı ZnO tabakası olmadan kaplandı ve CTS1085 kodlu olarak adlandırıldı. Tampon tabaka ve Au metal arka kontak işleminden sonra akım-gerilim ölçümü gerçekleştirilen yapı için performans parametreleri elde edildi. Bu sonuçlar kullanılarak enerji dönüşüm verimliliği %8,05 olarak belirlendi. Bu durumun CTS1078 kodlu yapı ile kıyaslandığında ZnO katmanının verimi arttırdığı, hücre içinde oluşan yansıma kayıplarını azalttığı, seri direnci düşürdüğü, yapıdan gelecek difüzyonları önleyerek omik olmasını azalttığı düşünülmektedir.

En yüksek performans parametrelerine sahip olan CTS1078 kodlu yapıdan elde edilen sonuçlarda bu sefer CdS kalınlığının etkisini incelemek amacıyla 100 nm olarak kullanılan değer, 75 nm'ye düşürüldü. CTS1078 yapısıyla karşılaştırıldığında CdS için 100 nm değerinin ideal kalınlık değeri olduğu belirlendi. Bu yapı CTS1087 olarak kodlandı ve enerji dönüşüm verimi %8,36 olarak elde edildi.

Farklı metal kontak malzemelerinin yapılar üzerindeki etkisinin incelenmesi için CTS1078 kodlu 1500 nm CdTe kalınlığına sahip yapı AuNiGe ve AuZn metal alaşımları kullanılarak arka kontak çalışması gerçekleştirildi. Au, AuZn ve AuNiGe kontaklarına ait CTS1078 kodlu güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimliliği sırasıyla %10,92, %9,05 ve %8,17 olarak gözlemlendi. Elde edilen sonuçlara göre Au metalinin en iyi arka kontak metali olduğu ve değişimlerin iş fonksiyonuna bağlı olduğu belirlendi.

Bu tez çalışmasında eş-püskürtme yöntemiyle CdTe güneş hücre yapıları elde edildi. HRT katman olarak kullanılan ZnO tabakasının katkısı, CdS tabakasının inceltilmesinin etkisi ve ideal CdTe kalınlığı belirlendi. En yüksek dönüşüm verimliliğine sahip yapı farklı arka

kontaklar kullanılarak, kontak metalinin yapıya etkisi gözlemlendi. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda üretilen numuneler arasında en iyi CdTe kalınlığının 1500 nm, en iyi kontak metalinin ise Au olduğu belirlendi.





KAYNAKLAR

1. Ellabban, O., Abu-Rub, H., and Blaabjerg, F. (2014). Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and Their Enabling Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764.
2. Jager-Waldau, A. (2018). Snapshot of photovoltaics. *EPJ Photovoltaics*, 9, 6.
3. İnternet: Renewables 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>, Son Erişim Tarihi: 27.01.2019.
4. Luque, A., and Hegedus, S. (Editörler). (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (Second Edition). New York: John Wiley and Sons. 12-187.
5. Demirbaş, A. (2006). Global Energy Resources. *Energy Sources*, 28(8), 779-792.
6. Zweibel, K., Mason, J., and Fthenakis, V. (2008). A Solar Grand Plan. *Scientific American*, 298, 64-73.
7. Gottschalg, R., Betts, T.R., Infield, D.G., and Kearney, M.J. (2004). On the Importance Of Considering the Incident Spectrum When Measuring the Outdoor Performance of Amorphous Silicon Photovoltaic Devices. *Measurement Science and Technology*, 15(2), 460-466.
8. Boerema, N., Morrison, G., Taylor, R., and Rosengarten, G. (2013). High Temperature Solar Thermal Central-Receiver Billboard Design. *Solar Energy*, 97, 356-368.
9. Das, S.K. (1993). Characterisation Of CdCl₂ Treated Electrodeposited CdS/CdTe Thin Film Solar Cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29, 277-287.
10. Thirsk, R., Kuipers, A., Mukai, C., and Williams, D. (2009). The space-flight environment: the International space station and beyond. *Canadian Medical Association Journal*, 180, 1216-1220.
11. Weber, L. (1997). Some reflections on barriers to the efficient use of energy. *Energy Policy*, 25, 833-835.
12. Corsin, B., Andres, C., and Wolf, S. D. (2016). High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells: Status and Perspectives, *Energy and Environmental Science*, 9, 1552-1576.
13. Zhao, J., Wang, A., and Green, M. A. (1999). 24.5% Efficiency Silicon PERT Cells on MCZ Substrates and 24.7% Efficiency PERL Cells on FZ Substrates. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 7, 471.
14. Sopori, B., Madjdpour, J., Zhang, Y., and Chen, W. (1999). *PV Optics: An Optical Modeling Tool for Solar Cell and Module Design*. Paper presented at Electrochemical Society International Symposium Seattle, USA.

15. Bhattacharya, S., and John, S. (2019). Beyond 30% Conversion Efficiency in Silicon Solar Cells: A Numerical Demonstration. *Scientific Reports*, 9, 12482.
16. Woditscha, P., and Koch, W. (2002). Solar Grade Silicon Feedstock Supply for PV Industry. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72(1-4), 11-26.
17. Rasukkannu, M., Velauthapillai, D., and Vajeeston, P. (2017). Computational Modeling of Novel Bulk Materials for the Intermediate-Band Solar Cells. *American Chemical Society Omega*, 2, 1454-1462.
18. Rasukkannu, M., Velauthapillai, D., and Vajeeston, P. (2018). A First-Principle Study of the Electronic, Mechanical And Optical Properties of Inorganic Perovskite Cs_2SnI_6 for Intermediate-Band Solar Cells. *Material Letters*, 218, 233-236.
19. Yamaguchi, M., Takamoto, T., and Arakia, K. (2006). Super High-Efficiency Multi-Junction and Concentrator Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18-19), 3068-3077.
20. Fthenakis, V. (2009). Sustainability of Photovoltaics: The Case for Thin-Film Solar Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2746-2750.
21. Hillhouse, H. W., and Beard, M.C. (2009). Solar Cells From Colloidal Nanocrystals: Fundamentals, Materials, Devices, and Economics. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 14(4), 245-259.
22. Cousins, P.J. (2010). *Generation 3: Improved performance at lower cost*. Paper presented at 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, USA.
23. Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., and Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic Materials: Present Efficiencies and Future Challenges. *Science*, 352(6283), 307.
24. Chopra, K.L., Paulson, P.D., and Dutta, V. (2004). Thin-Film Solar Cells: An Overview. *Progress in Thin-film Solar Cells*, 12 (2-3), 69-92.
25. Nordic Council of Ministers. (2003). Cadmium Review; 1. COWI, 3-22.
26. Rombach, E., and Friedrich, B. (2014). Recycling of Rare Metals, *Handbook of Recycling*, 125-150.
27. Bleiwas, D.I. (2010). Byproduct Mineral Commodities Used For The Production of Photovoltaic Cells. *U.S. Geological Survey Circular*, 1365, 10.
28. Salavei, A., Menossi, D., Piccinelli, F., Kumar, A., Mariotto, G., Barbato, M., and Romeo, A., (2016). Comparison of high efficiency flexible CdTe solar cells on different substrates at low temperature deposition. *Solar energy*, 139,13-18.
29. Powalla, M., Paetel, S., Ahlswede, E., Wuerz, R., Wessendorf, C.D., and Friedlmeier, T.M. (2018). Thin-Film Solar Cells Exceeding 22% Solar Cell Efficiency: An Overview on CdTe, $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, and Perovskite-Based Materials, *Applied Physics Review*, 5 (041602), 1-29.

30. Green, M.A., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J., and Yoshita, M. (2019). Solar Cell Efficiency Tables (Version 54). *Progress in Photovoltaics*, 27(7), 565-575.
31. Grätzel, M. (2003). Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4(2), 145-15.
32. Pandey, A.K., Muhammad Shakeel, M., and Ahmad Nasrudin, A. (2018). Natural Sensitizers and Their Applications in Dye-Sensitized Solar Cell. *Environmental Biotechnology: For Sustainable Future*, 375-401.
33. Acevedo, A.M. (2006). Thin film CdS/CdTe Solar Cells: Research Perspectives. *Solar Energy*, 80(6), 675-681.
34. Mitchell, K., Fahrenbruch, A.L., and Bube, R.H. (1977). Photovoltaic Determination of Optical-Absorption Coefficient in Cdte. *Journal of Applied Physics*, 48, 829.
35. İnternet:We, X., Dhere, R.G., Albin, T.A., Yan, Y., and Sheldon, P. (2001). *High Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTE Polycrystalline thin film solar cell*. Paper presented at NCPV Program Review Meeting, USA.
36. Yang, R., Bai, Z., Wang, D., and Wang, D. (2013). High Efficient Thin Film Cdte Solar Cells. *2013 Spanish Conference on Electron Devices*, 1-6.
37. Birkmire, R.W., McCandless, B.E., and Phillips, J.E. (1989). *Post Processing Treatments and Contacts for Thin Film CdS/CdTe Devices*. Paper presented at Proceedings of the Polycrystalline Thin Film Program Meeting, USA.
38. Caferov, T. (1998). *Yariletken Fiziği-1*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, 200.
39. Kittel C. (1996). *Katıhal Fiziğine Giriş*. İstanbul: Bilgi Tek Yayıncılık, 22, 434.
40. Sze, S.M. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (Third Edition). New Jersey: John Wiley&Sons, 8-10.
41. Seeger, K. (2004). *Semiconductor Physics: An Introduction*.(Nineth Edition). Heidelberg: Springer-Verlag, 110-150.
42. Grundmann, M. (2016). *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications*.(Third Edition). New York: Springer, 20-50.
43. Neamen, D. (2011). *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles*.(4th edition). New York: McGraw-Hill, 250-375.
44. Ole, Keller (2014). *Light:The Physics of the Photon*.(First Edition). Boca Raton: CRC Press,75.

45. Çetin, S. Ş. (2010). *GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklemlı Yapıların Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-30.
46. Orhan, N. (2012). *CdS, CdO ve ZnO Yarıiletken Nano Yapılarının Boyut Kontrollü Üretimi Ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1-8.
47. Özen, Y. (2015). *III-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi ve Prototip Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Modül Üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-20.
48. Rao, C.N.R., and Raveau, B. (1998). *Transition Metal Oxides* (Second Edition). Berlin: Wiley-VCH, 32-77.
49. Ashrit, P. (2017). *Transition Metal Oxide Thin Film-Based Chromogenics and Devices*. Oxford: Elsevier, 1.
50. Eranna, G. (2012). *Metal Oxide Nanostructures as Gas Sensing Devices*, Boca Raton: CRC Press, 72-85.
51. Hannah J. Joyce, H.J., Wong-Leung, J., Gao, Q., Tan, H.H., and Jagadish, C. (2010). Phase Perfection in Zinc Blende and Wurtzite III–V Nanowires Using Basic Growth Parameters. *Nano Letters*, 10 (3), 908–915.
52. Singh, A. K. (2016). *Engineered Nanoparticles: Structure, Properties and Mechanisms of Toxicity*. (First Edition), London: Elsevier Academic Press, 19-76.
53. Steranka, F. M., and Bhat, J. (2002). High Power LEDs – Technology Status and Market Applications. *Physica Status Solid(a)*, 194 (2), 380-388.
54. Pahuja, O.P. (2005). *Solid State Physics*. (First Edition). New Delhi: Laximi Press, 26-63.
55. Matsui, Y. ,Murai, H. ,Arahira, S. ,Kutsuzawa, S., and Ogawa, Y. (1997) 30-GHz Bandwidth 1.55-Mm Strain-Compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW Laser, *IEEE Photonic Technology Letters*, 9(1), 25-27.
56. Phillips, J.C. (1973). *Bonds and Bands in Semiconductors*. London: Academic Press, 3-5.
57. Green, M. A. (1982). *Solar Cells*. (First Edition). New York: Prentice-Hall Series in Solid State Physical Electronics, 3-175.
58. Erol, A., ve Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamalar*. (İkinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayınları, 153-202.
59. Colinge, J.P., Colinge, C. A. (2011). *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği*. (Çev. S. Tüzemen ve S. Tekmen). Ankara: Nobel Yayınları. (Eserin orijinali 2002’de yayımlandı), 15-116.

60. Rasmussen, L. C. (2013). *Evaluation of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Absorber Films Sputtered from a Single, Quaternary Target*, PhD Thesis, Uppsala University, Sweden, 6-7.
61. Nelson, J. (2003). *The Physics of Solar Cells*. London: Imperial College Press, 27-105.
62. Altamura, G. (2014). *Development of CZTSSe Thin Films Based Solar Cells*, PhD Thesis, Université de Grenoble, France, 11-18.
63. Abusnina, M. M. A. (2016). *Synthesis and Characterization of Kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) Thin Films for Solar Cell Application*, PhD Thesis, University of Denver, USA, 12-14.
64. Rajeshmon, G.V. (2013). *Prospects of sprayed CZTS thin film solar cells from the perspective of material characterization and device performance*, PhD Thesis, Cochin University of Science and Technology, India, 59-66.
65. Shockley W. (1950). *Electrons and Holes in Semiconductors*. Van Nostrand: Princeton, 2-15
66. Scheer, R., and Schock, H.W. (2011) *Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices*. New York: Wiley-VCH, 120-150.
67. Shockley, W., Queisser, H.J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3),510-519.
68. Loferski, J. (1956). Theoretical Considerations Governing the Choice of the Optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy Conversion. *Journal of Applied Physics*, 27(7), 777-784.
69. McCandless, B. E., and Sites, J. R. (2003). Cadmium Telluride Solar Cells. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. New York: John Wiley Sons, 617-662.
70. Wu, X. (2004). High-Efficiency Polycrystalline Cdte Thin-Film Solar Cells. *Solar Energy*, 77 (6), 803-814.
71. Hodges, D.R. (2009). *Development of CdTe thin film solar cells on flexible foil substrates*, PhD Thesis, University of South Florida, USA, 20-28.
72. Jenny, D., and Bube, R. (1954). Semiconducting Cadmium Tellurid. *Physical Review*, 96, 1190-1191.
73. Olusola, I. (2016). *Optoelectronic devices based on graded bandgap structures utilising electroplated semiconductors*, PhD Thesis, Sheffield Hallam University, UK, 52-61.
74. Mimilya-Arroyo, J., Marfaing, Y., Cohen-Solal, G., and Triboulet, R. (1979). Electric and Photovoltaic Properties of CdTe pn Junctions. *Solar Energy Materials*, 1, 171.
75. Ras Fahrenbruch, A., and Bube R. (1983). *Fundamentals of Solar Cells*, New York: Academic Press, 418-460.

76. Rothwarf, A., and Böer, K. (1975). Direct Conversion of Solar Energy Through Photovoltaic Cells. *Progress in Solid State Chemistry*, 2(10), 71-102.
77. Muller, R., and Zuleeg, R. (1964). Vapor Deposited Thin Film Heterojunction Diodes. *Journal of Applied Physics*, 35, 1550-1556.
78. Mitchell, K., Fahrenbruch, A., and Bube, R. (1977). Evaluation of the CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell. *Journal of Applied Physics*, 48, 4365-4371.
79. Yamaguchi, K., Matsumoto, H., Nakayama, N., and Ikegami, S. (1977). CdS-CdTe Solar Cell Prepared by Vapor Phase Epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 16, 1203-1211.
80. Amirkhalili, A. (2017). *Influence of Mo, Na, Cl and Mg Treatments to Promote Recrystallization in the Absorber Layer*, PhD Thesis, Northumbria University, UK, 65.
81. Suyama, N., Arita, T., Nishiyama, Y., Ueno, N., Kitamura, S., and Murozono, M. (1990). *CdS/CdTe Solar Cells by the Screen Printing Sintering Technique*. Paper presented at 21st IEEE Photovoltaic Specialist Conference, USA.
82. Britt, J., and Ferekides, C. (1993). Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8 % efficiency. *Applied Physics Letters*, 62(22), 2851-2852.
83. Gretener, C., Perrenoud, J., Kranz, L., Kneer, L., Schmitt, R., Buecheler, S., and Tiwari, A.N. (2013). CdTe/CdS thin film solar cells grown in substrate configuration. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(8), 1580-1586.
84. Fardi, H., and Buny, F. (2013). Characterization and Modeling of CdS/CdTe Heterojunction Thin-Film Solar Cell for High Efficiency Performance. *International Journal of Photoenergy*, 576952, 1-6.
85. Patterson, M., and Williams, R. (1981). Schottky Barriers at Metal-CdTe Interfaces. *Vacuum*, 31(10-12), 639-643.
86. Basol, B.M. (1988). Electrodeposited CdTe and HgCdTe Solar Cells. *Solar Cells*, 23(1), 69-88.
87. Basol, B.M. (1984). High Efficiency Electroplated Heterojunction Solar Cell. *Journal of Applied Physics*, 55 (2), 601-603.
88. Jones, E.W., Barrioz, V., Irvine, S.J.C., and Lamb, D. (2009). Towards Ultra-Thin CdTe Solar Cells Using MOCVD. *Thin Solid Films*, 517(7), 2226-2230.
89. Barrioz, V., Irvine S. J. C., Jones, E. W., Rowlands, R. L., and Lamb, D. A. (2007). In Situ Deposition of Cadmium Chloride Films Using MOCVD for CdTe Solar Cells. *Thin Solid Films*, 515(15), 5808-5813.
90. Weinstein, M., Wolff, G.A., and Das, B. N. (1965). The Growth of Wurtzite CdTe and Sphalerite Type CdS Single Crystal Films. *Applied Physics Letters*, 6, 73-75.

91. McCandless, B.E., Birkmire, R.W., Buchanan, W.A., Fields, S., and Hanket, G.M. (2002). *Vapor transport deposition of cadmium telluride films*. Paper presented at 29th IEEE Photovoltaics Specialists Conference Specialists Conference, USA.
92. Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V., and Podestà, A. (2004). Recent Progress on CdTe/CdS Thin Film Solar Cells. *Solar Energy*, 77(6), 795-801.
93. Wu, X., Keane, J. C., Dhere, R.G., Dehart, C., Albin, D.S., Duda, A., Gessert, T. A., Asher, S., Levi, D. H., and Sheldon, P. (2001). 16.5 % Efficient CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. *NCPV Program*, 995-1000.
94. Rmili, A., Ouachtari, F., Bouaoud, A., Louardi, A., Chtouki, T., Elidrissi, B., and Erguig, H. (2013). Structural, Optical and Electrical Properties of Ni-Doped CdS Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 53-59.
95. Al Kuhaimi, S.A., Shaalan, N.M., and Bahammam, S. (1998). The Electron Affinity Difference in CdS/CdTe Solar Cells. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Chemical Sciences*, 110, 199-206.
96. Yan Y.F., and Al-Jassim, M.M. (2012). Transmission Electron Microscopy of Chalcogenide Thin Film Photovoltaic Materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 16, 39-44.
97. Kartopu, G., Clayton, A.J., Brooks, W.S.M., Hodgson, S.D., Barrioz, V., Maertens, A., Lamb, D.A., and Irvine, S.J.C. (2014). Effect of Window Layer Composition in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}/\text{CdTe}$ Solar Cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(1), 18-23.
98. Perrenoud, J., Buecheler, S., Kranz, L., Fella, C., Skarp, J., and Tiwari, A.N. (2010). *Application Of $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ as Window Layer in Cadmium Telluride Solar Cells*. Paper presented at 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, USA.
99. Plotnikov, V.V., Davies, A.R., Sites, J.R., and Compaa, A.D. (2008). *Dependence CdS/CdTe solar cells efficiency and nonuniformity on CdS layer thickness*. Paper presented at 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, USA.
100. Liu, T., Zhang, X., Zhang, J., Wang, W., Feng, L., Wu, L., Li, W., Zeng, G., and Li, B. (2013). Interface study of ITO/ZnO and ITO/SnO₂ complex transparent conductive layers and their effect on CdTe solar cells. *International Journal of Photoenergy*, 765938.
101. Perrenoud, J., Kranz, L., Buecheler, S., Pianezzi, F., and Tiwari, A.N. (2011). The use of aluminium doped ZnO as transparent conductive oxide for CdS/CdTe solar cells. *Thin Solid Films*, 519(21), 7444-7448.
102. Cömert, B. (2015). *TiO₂ İnce Film Gaz Sensörlerinin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

103. Munirah, M., Khan, S., Aziz, A., Rahman, S.A., and Khan, Z.R. (2013) Spectroscopic studies of sol-gel grown CdS nanocrystalline thin films for optoelectronic devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*, (16), 1894-1898.
104. Gfroerer, T.H., (2000). Photoluminescence in Analysis of Surfaces and Interfaces,. R.A. Meyers (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester: John Wiley and Sons, pp. 9209-9231.
105. Akpınar, Ö. (2019). MOCVD Yöntemiyle Safır Alttaş Üzerine Büyütülen Al_xGa_{1-x}/GaN HEMT Yapısının Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32-35.
106. NatRazik, N.A. (1987). Use of standart reference material for precise lattice parameter determination of materials of hexagonal crystal structure. *Journal of Materials Science Letters*, 6(12), 1443-1444.
107. Ahmad, M., Ahmed, E., Zhang, Y., Khalid, N.R., Xu, J., Ullah, M., and Hong, Z. (2013). Preparation of Highly Efficent Al-Doped ZnO Photocatalyst by Combustion Synthesis. *Current Applied Physics*, 13, 697-704.
108. Ortuno-Loper, M.B., Sotelo-Lerma, M., Mendoza-Galvan, A., and Ramirez-Bon, R. (2004). Optical Band Gap Tuning Study of Strain in CdS Thin Films. *Vacuum*, 76(2-3), 181-184.
109. Chandramohan, S., Sathyamoorthy, R., Sudgahar, P., and Asokan, K. (2008). Optical Properties of Swift Ion Beam Irradiated CdTe Thin Films. *Thin Solid Films*, 516, 5508-5512.
110. Shaaban, E.R., Afify, N., and El-Taher, A. (2009). Effect of Film Thickness on Microstructure Parameters and Optical Constants of CdTe Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, 482, 400-404.
111. Choi, Y., Kim, N.H., Park, J.S., and Lee, W.S. (2010). Influences of Thickness Uniformity and Surface Morphology on the Electrical and Optical Properties of Sputtered CdTe Thin Films for Large Area II-VI Semiconductor Heterostructured Solar Cells. *Materials Science and Engineering B*, 171, 73-78.
112. Nunes, P., Costa, D., Fortunato, E., and Martins, R. (2002). Performances presented by zinc oxide thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Vacuum*, 64, 293-297.
113. Shan, F. K., Kim, B. I., Liu, G. X., Liu, Z. F., Sohn, J. Y., Lee, W. Y., Shin, B. C., and Yu, Y. S. (2004). Blueshift of near band edge emission in Mg doped ZnO thin films and aging. *Journal Applied Physics*, 95(9), 4772-4776.
114. Toma, O., Ion, L., Iftimie, S., Radu, A., and Antohe, S. (2016). Structural, morphological nad optical properties of rf-sputtered CdS thin films. *Materials and Design*, 100, 198-203.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAPLAN, Hakkı
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 30.12.1993, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (543) 578 14 33
 e-mail : hakkı.kaplan@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam Ediyor
Lisans	Ankara Üniversitesi / Fizik	2015
Lise	Antalya Konyaaltı Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gazi Üni. Fotonik Uyg. Ve Araş. Merkezi	Bursiyer

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kaplan, H., Efker, H.İ., Özen, Y., Çetin, S.Ş., Özçelik, S. (2019, 6 Eylül). *Soğurucu Katman Kalınlığının CdTe/CdS Güneş Hücresinin Dönüşüm Verimliliği Üzerine Etkisi*. Fotonik 2019 - 21. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayında sunuldu, İstanbul

Hobiler

Sinema, Yüzme



GAZİ GELECEKTİR..