



**CdTe/CdS VE Sb₂Se₃/CdS İNCE FİLM GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
KARAKTERİZASYONU**

Kerim Kubilay DÖNMEZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

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.

Kerim Kubilay DÖNMEZ

31/01/2022

CdTe/CdS VE Sb₂Se₃/CdS İNCE FİLM GÜNEŞ HÜCRELERİNİN

KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Kerim Kubilay DÖNMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Bir hücreyi karakterize etmek, bir hücreyi tanımak yani onun davranışını, etkinlik durumunu ve verimini etkileyen kusurların veya parazitik unsurların varlığını tanımlayabilen tüm bilgileri toplamak anlamına gelir. İnce film güneş pilleri minimum malzeme kullanımının verdiği avantaj ile daha düşük üretim maliyetine sahip olması ve günümüzde ulaşılmış oldukları yüksek verimlilikleri sayesinde bu fotovoltaik cihazlara olan ilgi artmaktadır. Son yıllarda kadmiyum tellür (CdTe) ince film yarı iletkeni üzerine yapılan yoğun çalışmalar ile bu güneş pillerinin verimliliği ve kararlılığı geliştirilmiştir. Ancak kadmiyum toksik bir materyal olarak kabul edilmektedir ve Avrupa’da bu materyalin kullanımı kısıtlanmaktadır. Bundan dolayı CdTe tabanlı ince film güneş pillerine olan talep azalmaktadır. Diğer yandan antimon selenit (Sb₂Se₃) yarı iletkenin çevreye zararının olmaması ve uygun opto-elektronik özelliklere sahip olmasının avantajı ile bu malzeme ince film güneş pilleri arasında yeni bir alternatif emici tabaka olarak önem kazanmıştır. Fakat bu ince film pilin verimliliği ve kararlılığı düşük olduğu için üzerinde daha fazla geliştirme çalışmaları yapılmalıdır. Bu çalışmada CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film güneş hücrelerini karakterize edebilmek için deneysel testler uygulanmıştır. Üzerinde çalışılan test hücreleri ilk analizlerin yapıldığı Verona Üniversitesindeki fotovoltaik ve katı hal fiziği laboratuvarında üretilmiştir. Daha sonra, bu piller gerekli karakterizasyon testleri için Padova Üniversitesindeki fotovoltaik laboratuvarına getirilmiştir. Burada dış quantum verimliliği (EQE), karanlıkta ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği ve foto-voltaj düşüşü (PVD) ölçümü yapılmıştır. Bu çalışmada; CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film test hücreleri farklı sıcaklık ve ışık şiddeti altında karakterize edilmiştir ve deneysel olarak yapılan karakterizasyon sonucunda bu hücreler hakkında literatür bilgisi oluşturulmuştur.

Bilim Kodu : 92802
Anahtar : CdTe, Sb₂Se₃, CdS, İnce Film Güneş Pili, Karakterizasyon
Sayfa Adedi : 85
Danışman : Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

CHARACTERIZATION OF CdTe/CdS AND Sb₂Se₃/CdS THIN FILM SOLAR CELLS

(M. Sc. Thesis)

Kerim Kubilay DÖNMEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

Characterizing a cell means recognizing a cell, which is collecting all the information that can identify the presence of defects or parasitic elements that affect its behavior, activity status and efficiency. The interest in thin film solar photovoltaic devices has increased due to the advantage of minimum material usage, lower production costs and high efficiency they have reached today. In recent years, the efficiency and stability of CdTe based thin-film solar cells have been improved with intensive studies on cadmium telluride (CdTe) thin film semiconductor. However, cadmium is considered a toxic material and its use is restricted in Europe. Therefore, the demand for CdTe-based thin-film solar cells has decreased. On the other hand, antimony selenide (Sb₂Se₃) semiconductor has gained importance as a new alternative absorber layer among thin-film solar cells, with the advantage of not being harmful to the environment and having suitable opto-electronic properties. However, since the efficiency and stability of this thin-film solar cell is low, further development work should be done on it. In this study, experimental tests were applied to characterize CdTe/CdS and Sb₂Se₃/CdS thin film solar cells. These test cells were produced in the photovoltaic and solid-state physics laboratory at the University of Verona, where the first analysis was carried out. Subsequently, these cells were brought to the photovoltaic laboratory at the University of Padova for the necessary characterization tests. Here, external quantum efficiency (EQE), current-voltage characteristic in the dark and light and photo-voltage decay (PVD) measurement were performed. In this study, CdTe/CdS and Sb₂Se₃/CdS thin film test cells were characterized under different temperatures and light intensity, and literature review about these cells was established as a result of experimental characterization.

Science Code : 92802
Key : CdTe, Sb₂Se₃, CdS, Thin Film Solar Cell, Characterization
Page Number : 85
Supervisor : Assoc. Prof. Halil İbrahim VARIYENLİ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca rehberlik ve desteklerinden dolayı danışman hocam Doç Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki kıymetli tüm hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım sırasında Padova Üniversitesi Fotovoltaik Laboratuvarında harika bir araştırma ortamı sağlayan ve bunun yanında tavsiye ve yardımları için Assoc. Prof. Matteo MENEGHINI'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, fotovoltaik laboratuvarındaki cihazların kullanılması ile ilgili desteğini esirgemeyen Res. Asst. Matteo BERTONCELLO'ya tavsiye ve yardımı için teşekkürlerimi sunarım. Her zaman yardım etmeye istekli olan Fabio CASULLI'ye teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın dayandığı CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film test hücrelerini sağladığı için Verona Üniversitesi'nden Assoc. Prof. Alessandro ROMEO'ya teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, destekleri ve yardımları için aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER ve KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	7
3. GÜNEŞ PİLİ PARAMETRELERİ	15
3.1 Güneş Pili Çift Diyot Devre Modeli	15
3.2. Güneş Pili I-V (Akım-Gerilim) Karakteristiği	17
3.3. Doldurma Faktörü	20
3.4. Verimlilik	21
3.5. Güneş Pillerinde Parazitik Dirençler.....	21
3.5.1. Seri direnç	22
3.5.2. Paralel direnç.....	23
3.6. Sıcaklığın Etkisi	24
3.7 Işık Şiddetinin Etkisi	26
3.8 Kuantum Verimliliği	26
3.9. Spektral Yanıt (SR)	27
3.10. Açık Devre Gerilimi Düşüşü (OCVD).....	29

	Sayfa
3.11. Rekombinasyon.....	30
4. YÖNTEM ve METODLAR	33
4.1. CdTe/CdS ve Sb ₂ Se ₃ /CdS İnce Film Güneş Pili	33
4.1.1. CdTe/CdS ince film güneş pili.....	33
4.1.2. CdTe/CdS ince film pili üretim süreci	34
4.1.3. Sb ₂ Se ₃ /CdS ince film güneş pili.....	35
4.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	37
4.2.1. CdTe soğurucu katmanı	37
4.2.2. Sb ₂ Se ₃ soğurucu katmanı	38
4.2.3. CdS pencere katmanı.....	38
4.2.4. Ön kontaklar.....	38
4.2.5. Arka kontaklar.....	39
4.2.6. Substrat.....	39
4.3. Deneysel Kurulum	40
4.4. Karakterizasyon.....	41
4.5. Termal Karakterizasyon	42
4.6. Işık Şiddetinin Etkisi	43
4.7. Kullanılan Cihazlar	43
4.7.1. Keithley 2651A	43
4.7.2. Labview arayüzü ve ölçümler	45
4.7.3. Güneş simülatörü	47
4.7.4. Loana ve EQE ölçümü	49
4.7.5 Tektronix dijital fosfor osiloskop DPO 7354.....	53
4.7.6. Agilent E3649A güç kaynağı ünitesi	53

	Sayfa
4.7.7. Rigol DG 5071	54
4.7.8. Havalandırma fırını	55
4.7.9. Piranometre	56
5. BULGULAR VE İRDELEME	57
5.1. CdTe/CdS İnce Film Güneş Pili Karakterizasyonu	57
5.2. Sb ₂ Se ₃ /CdS İnce Film Güneş Pili Karakterizasyonu	60
5.3. CdTe/CdS ve Sb ₂ Se ₃ /CdS Termal Karakterizasyon	64
5.4. Işık Şiddetinin Etkisi	74
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kullanılan ince film güneş pili malzemeleri ve kalınlığı.....	40
Çizelge 4.2. Pillerin fırında tutulduğu sıcaklık ve zaman	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Fotoelektrik etki.....	2
Şekil 1.2. Güneş pilinin şematik gösterimi	3
Şekil 1.3. PN bağlantısının bant ve genel diyagramı	4
Şekil 3.1. Çift diyot modelinin devre şeması.....	16
Şekil 3.2. Bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği	17
Şekil 3.3. Karanlık I-V ve aydınlık I-V karakteristiği	18
Şekil 3.4. Kısa devre akımı, güneş pili I-V karakteristiği.....	19
Şekil 3.5. Açık devre gerilimi, güneş pili I-V karakteristiği.....	20
Şekil 3.6. Akım-gerilim fonksiyonu olarak doldurma faktörleri	20
Şekil 3.7. Bir güneş pili devresi seri direnç (R_s) ve şönt drenci (R_{SH})	22
Şekil 3.8. Bir güneş pilinde şönt direncinin dolum faktörüne etkisi, hücre alanı 1cm, $T=300K$, $R_{SH}=30 \text{ ohm.cm}^2$	23
Şekil 3.9. Sıcaklığın bir güneş pilinin I-V karakteristiği üzerine etkisi.....	25
Şekil 3.10. Kuantum verimliliği örnek grafik.....	27
Şekil 3.11. Bir silikon güneş pilinin spektral yanıtı.....	28
Şekil 3.12. Teorik olarak açık devre gerilimi azalma eğrisi	29
Şekil 4.1. CdTe ince film pilinin superstrate yapısı.....	33
Şekil 4.2. CdTe/CdS ince film pilin şematik gösterimi	35
Şekil 4.3. Sb_2Se_3 /CdS ince film pil superstrate yapısı.....	36
Şekil 4.4. Sb_2Se_3 /CdS ince film pilin şematik gösterimi	36
Şekil 4.5. CdTe/CdS ince film güneş pili hücreleri	40
Şekil 4.6. Sb_2Se_3 /CdS ince film güneş pili hücreleri	40
Şekil 4.7. Keithley 2651A'yı yönetmemizi sağlayan Labview program arayüzü.....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. I-V Light kontrol arayüzü	46
Şekil 4.9. I-V Dark kontrol arayüzü.....	46
Şekil 5.1. CdTe/CdS ince film pilin EQE grafiği	57
Şekil 5.2. CdTe/CdS ince film pilin karanlıkta akım-gerilim karakteristiği.....	58
Şekil 5.3. CdTe/CdS ince film pilin aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği.....	59
Şekil 5.4. CdTe/CdS ince film pilin PVD grafiği	59
Şekil 5.5. Sb ₂ Se ₃ /CdS ince film pilin EQE grafiği	60
Şekil 5.6. Sb ₂ Se ₃ /CdS ince film pilin karanlıkta akım-gerilim karakteristiği.....	61
Şekil 5.7. Sb ₂ Se ₃ /CdS ince film pilin aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği.....	62
Şekil 5.8. Sb ₂ Se ₃ /CdS ince film pilin PVD grafiği	63
Şekil 5.9. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda aydınlıkta akım-gerilim grafiği	64
Şekil 5.10. Sb ₂ Se ₃ /CdS pilinin farklı sıcaklıklarda aydınlıkta akım-gerilim grafiği	64
Şekil 5.11. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda karanlıkta akım-gerilim grafiği	65
Şekil 5.12. Sb ₂ Se ₃ /CdS pilinin farklı sıcaklıklarda karanlıkta akım-gerilim grafiği	65
Şekil 5.13. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda PVD grafiği	66
Şekil 5.14. Sb ₂ Se ₃ /CdS pilinin farklı sıcaklıklarda PVD grafiği	66
Şekil 5.15. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıkta V _{OC} değeri	67
Şekil 5.16. Sb ₂ Se ₃ /CdS pilinin farklı sıcaklıkta V _{OC} değeri	67
Şekil 5.17. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıkta I _{SC} değeri	68
Şekil 5.18. Sb ₂ Se ₃ /CdS pilinin farklı sıcaklıkta I _{SC} değeri	68
Şekil 5.19. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıkta doldurma faktörü	69
Şekil 5.20. Sb ₂ Se ₃ /CdS pilinin farklı sıcaklıkta doldurma faktörü	69
Şekil 5.21. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta verimi.....	70
Şekil 5.22. Sb ₂ Se ₃ /CdS pili farklı sıcaklıkta verimi.....	70

Şekil	Sayfa
Şekil 5.23. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta maksimum çıkış gücü	71
Şekil 5.24. Sb ₂ Se ₃ /CdS pili farklı sıcaklıkta maksimum çıkış gücü	71
Şekil 5.25. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta seri direnç değeri	72
Şekil 5.26. Sb ₂ Se ₃ /CdS pili farklı sıcaklıkta seri direnç değeri	72
Şekil 5.27. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta paralel direnç değeri	73
Şekil 5.28. Sb ₂ Se ₃ /CdS pili farklı sıcaklıkta paralel direnç değeri	73
Şekil 5.29. CdTe/CdS pili farklı ışık şiddeti altında akım-gerilim karakteristiği	74
Şekil 5.30. Sb ₂ Se ₃ /CdS pili farklı ışık şiddeti altında akım-gerilim karakteristiği	74
Şekil 5.31. CdTe/CdS farklı ışık şiddeti altında verimi	75
Şekil 5.32. Sb ₂ Se ₃ /CdS farklı ışık şiddeti altında verimi	75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. CdTe/CdS ince film güneş pili test numunesi	35
Resim 4.2. Sb ₂ Se ₃ /CdS ince film güneş pili test numunesi	37
Resim 4.3. Hücre tutucu.....	41
Resim 4.4. Keithley 2651A.....	44
Resim 4.5. Güneş Simülatörü	47
Resim 4.6. Led matrisi	48
Resim 4.7. Güç kaynağı	48
Resim 4.8. PV-Tools tarafından loana sistemi.....	49
Resim 4.9. Loana güç kaynağı ünitesi ve monokromatik ışık kaynağı	50
Resim 4.10. Loana sistemi numunenin yerleştiği orta kısım	50
Resim 4.11. Tektronix dijital osiloskop DPO 7354.....	53
Resim 4.12. Agilent E3649A	54
Resim 4.13. Rigol DG5071.....	55
Resim 4.14. M400-VF Tipi Havalandırma Fırını	55
Resim 4.15. LP PYRA 08	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
Au	Altın
Cd	Kadmiyum
CdS	Kadmiyum sülfür
CdTe	Kadmiyum tellür
Cu	Bakır
°C	Derece
eV	Elektro volt
I	Diyot üzerinden akan akım
I₀	Koyu doygunluk akımı
I_{mpp}	Maksimum güç noktasındaki akım
k	Boltzman sabiti
μm	Mikrometre
n	İdealite faktörü
n_i	Öz taşıyıcı konsantrasyonu
nm	Nanometre
P	Güç
R_s	Seri direnç
R_{SH}	Paralel direnç
Sb₂Se₃	Antimon Selenit
T	Sıcaklık
V	Volt
V_{mpp}	Maksimum güçteki gerilim
W	Watt
ZnO	Çinko oksit
η	Güç dönüşüm verimi
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar**Açıklamalar****EQE**

Dış kuantum verimi

FF

Doldurma faktörü

ITO

İndiyum kalay oksit

I-V

Akım-Gerilim

I_{sc}

Kısa devre akımı

OCVD

Açık devre voltaj düşüşü

PV

Fotovoltaik

PVD

Fotovoltaik düşüşü

QE

Kuantum verimi

SR

Spektral yanıt

TCO

Şeffaf iletken oksit

V_{oc}

Açık devre gerilimi

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel gelişme ve büyüme nedeniyle enerjiye olan talep artarak devam etmektedir. Fosil yakıtlar gibi sınırlı kaynakların kullanımının artması ise karbon salınımı nedeniyle çevreyi kirletmektedir. Fosil yakıtların uzun süreli kullanımı iklim değişikliklerine ve ekosistemin bozulmasının nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir. Enerjiye olan talebin artmasıyla birlikte sınırlı miktarda olan fosil yakıtların sonunda tükeneceği ve bu ihtiyacımızı karşılayamayacağı öngörülmektedir [1]. Daha güvenilir, çevreye zararın en az olduğu ve uygun enerji maliyeti için rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, biokütle enerjisi, hidroelektrik ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar gün geçtikçe artarak devam etmektedir.

Ev, iş, okul, hastane vb. yerlerde ısıtma, soğutma, aydınlatma ve çeşitli elektronik cihazların kullanımı gibi farklı türde çok çeşitli uygulamalar için elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktayız. Bu da elektriğin üretim ve tüketiminin doğrudan yaşam kalitesi üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Biz insanlar, yaşam kalitemizi olabildiğince iyileştirmeye çalışmaktayız, bu da enerji tüketiminin artmasına yol açmaktadır. Çevreyi kirletmeyen ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi ile bu ihtiyacımıza cevap aramaktayız.

Güneşin kütlesinin yaklaşık dörtte üçü hidrojenden oluşur ve geri kalanı çoğunlukla oksijen, karbon, neon ve demir dahil olmak üzere çok daha küçük miktarlarda daha ağır elementler içeren helyumdur [2]. Güneş içinde her saniye 6.10^{11} kg hidrojen helyuma dönüşmektedir ve saniyede yaklaşık $3,86 \times 10^{26}$ Joule enerji açığa çıkmaktadır [3,4]. Güneşten dünyaya ulaşan güneş ışıınımı 1366 W/m^2 'dir [5]. Bu veriler bize güneşten ulaşan enerjinin insanlık için güvenilir bir enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. Son yıllarda güneş ışığından (fotovoltaik etki ile) elektrik üretimi dünya çapında katlanarak artmaktadır [6].

Güneş pili (hücre) ışık enerjisini (foton) fotovoltaik etki ile elektriğe dönüştüren cihazdır [7]. Bu etki ile ışık emilir ve bir elektronun veya başka bir yük taşıyıcının daha yüksek duruma uyarılmasına neden olur. Güneş hücresi üzerinde ışıınım olduğu sürece elektrik enerji üretilir. Işık olmadığında ise elektrik üretimi durur. Güneş pilleri, şarj edilmeleri gerekmediği için bataryalardan farklıdır.

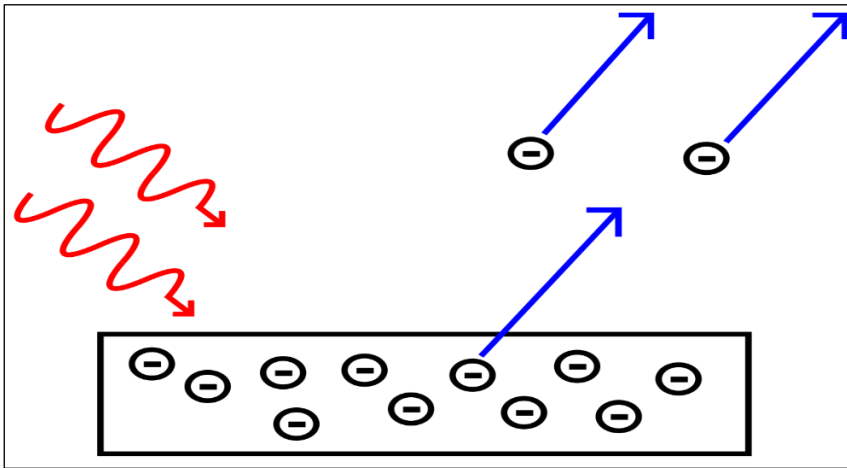
Güneş pili avantajları;

- Düşük işletme maliyeti,
- Çalışma sırasında emisyon, yanma veya radyoaktif yakıt gerekmez. (Fakat güneş hücresi üretimi çevreyi kirletebilir.)
- Hareketli parçası yoktur, (aşınma ve ses kirliliği oluşturmaz.)
- Ortam sıcaklığında çalışır (korozyon ve güvenlik sorunu yoktur.)
- Bina ve benzeri birçok yapıya entegre edilebilir.

Dezavantajları;

- Kaynaktan gelen ışık olmadığında kullanılamaz.
- Kurulum için yüksek başlangıç maliyeti vardır.
- Ortam şartlarına göre değişiklik gösterir (bulutlu hava şartlarında daha az güç üretilir.)

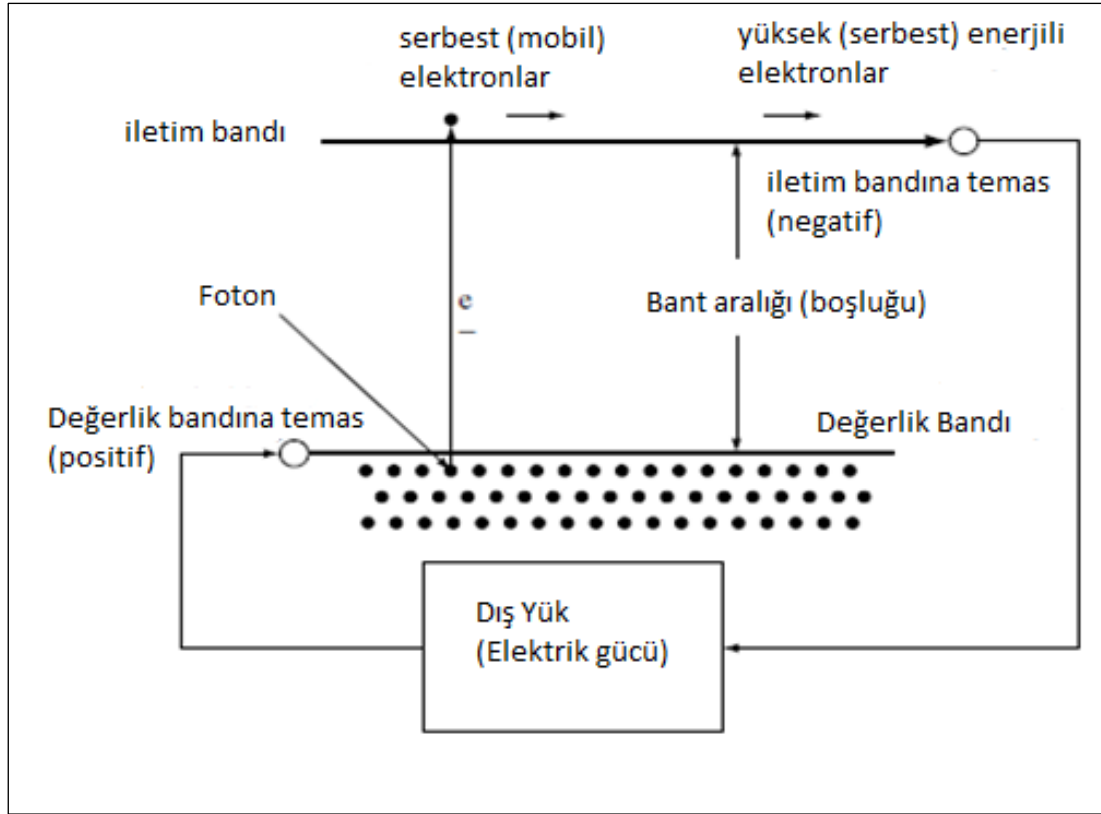
Güneş pillerinin bu dezavantajları genel olarak teknik olmaktan ziyade ekonomik perspektifle ilgilidir. Ayrıca bu güneş pillerinin üretim yöntemleri ve kullanılan bazı malzemeler doğaya zararlı olabilmektedir. Bu sorunlar nedeniyle araştırmacılar, çevre dostu ve düşük maliyetli malzemeleri keşfetmeye çalışmaktadırlar, bununla beraber yüksek verimli ve çevreye daha az zararlı üretim yöntemleri üzerine de çalışılmaktadır.



Şekil 1.1. Fotoelektrik etki

Güneş pilleri yarı iletken malzemeden yapılmaktadır. Bunlar atomik yapıya zayıf olarak bağlanmış elektronlara sahiptirler ve valans bandı adı verilen enerji bandını temsil ederler.

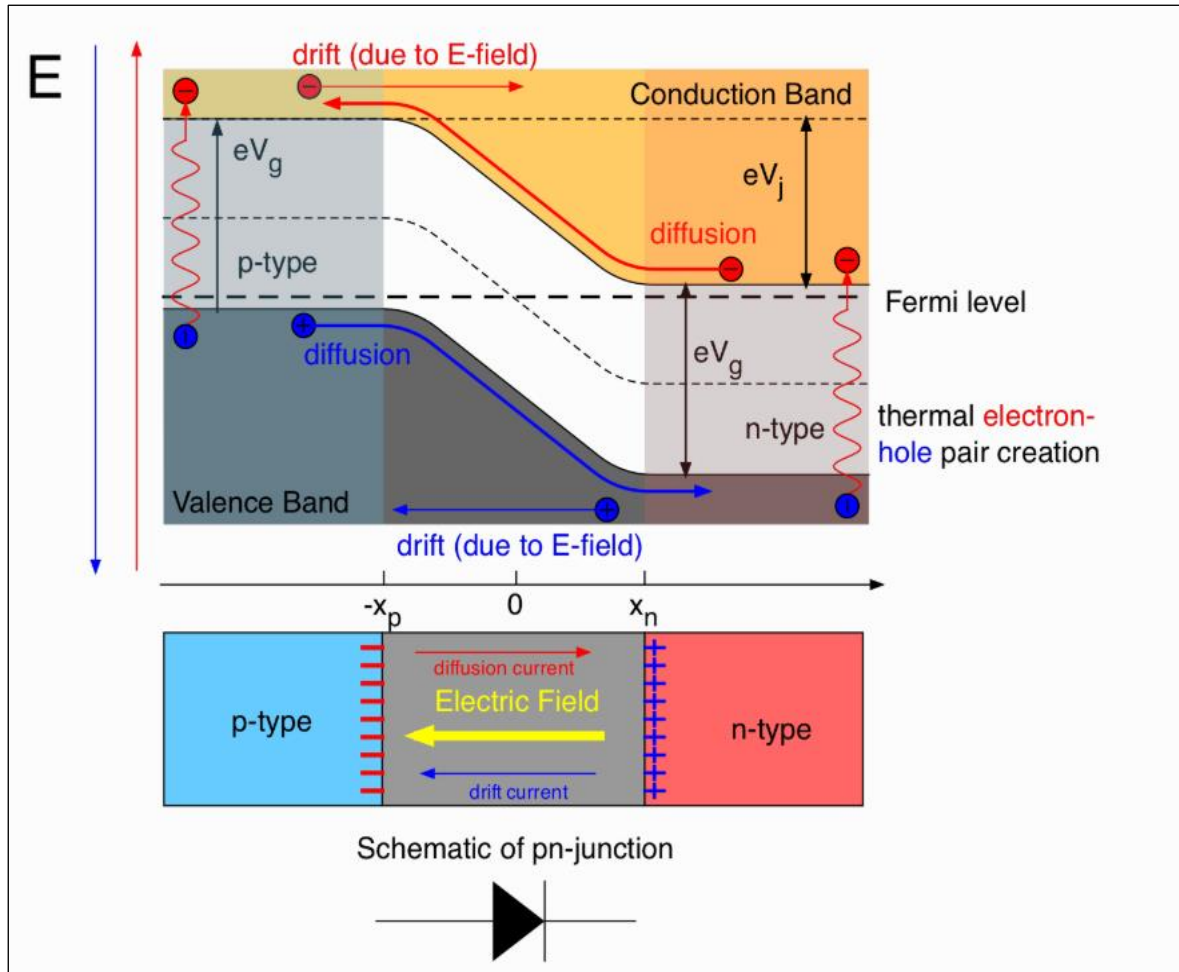
Valans elektronu atomdan ayırabilmek için bir enerji verilmesi gerekmektedir. Bu bant aralığı enerjisi, foton enerjisi sayesinde, değerlik bandında bir elektronu yukarı duruma getirmek için minimum enerji olan belirli bir eşiği aştığı zamandır. Bu şekilde, iletim bandındaki serbest elektronlar, elektron volt (eV) birimlerinde ölçülen bant aralığı ile değerlik bandından ayrılır. Böylelikle güneş ışığı, güneş piline ulaştığında, fotonlar valans elektronlarına çarpar. Bu olay ile, elektronların bağlarının kopmasına ve iletim bandına atlamasına neden olur. Daha sonra seçici kontak ile iletim bandı elektronları dış devreye iletilir. Elektronlar dış devrede hareket ederek enerjilerini kaybeder ve ikinci kontak yoluyla hücrenin valans bandına geri dönerler [7].



Şekil 1.2. Güneş pilinin şematik gösterimi [7]

Güneş pilleri, bir p-tipi ve bir n-tipi yarı iletken arasında homojonksiyon olan pn-eklemini oluşturur. P ve n tipi yarı iletkenlere katkılama işlemi yapılarak malzeme içindeki elektron ve boşlukların sayısı artırılır. Bu işlem ile mobil yük taşıyıcıların konsantrasyonu değişmektedir. P-n ekleminde, p-tipi tarafta daha fazla boşluk ve daha az elektron bulunur, n-tipi tarafta ise daha fazla hareketli elektron ve daha az boşluk bulunur. Bu iki parça birbirine temas ettirildiğinde, elektronlar ve boşluklar (pozitif yük) yüksek konsantrasyon

bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine doğru dağılırlar. Bu süreç sonsuza kadar devam etmez. Sonuç olarak, bağlantının her iki tarafındaki belli bir bölgede, mobil yük taşıyıcıları tükenmiş hale gelir. Tükenme tabakasının kalınlığı, bölgedeki katkılama işlemi gören maddelerin konsantrasyonu ile ters orantılıdır [7]. Bölgedeki sabit yükler, tükenme tabakasında, bağlantının n tarafından p tarafına işaret eden bir elektrik alan oluşturur. Sonuç olarak tükenme katmanının içinde bir foton soğurulduğunda, elektron boşluk çifti, sabit yük tarafından oluşturulan elektrik alanı sebebiyle doğal olarak ayrılır. Daha sonra elektron boşluk çifti tükenme tabakasının dışına taşınır. n-bölgesindeki serbest elektronlar gerilim kaynağının eksi kutbu tarafından itilerek p-bölgesindeki boşluk ile birleşir. Kaynağın negatif kutbundan n-bölgesinde sürekli olarak elektron gelir. Boşluk bir terminal tarafından yeniden dolar ve elektron diğer terminal tarafından çıkar. Bu süreç kaynak gerilimi kesilene kadar devam eder [7]. Bu elektrik alan sayesinde elektron-boşluk çifti birbirinden ayrılarak güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluşturmaktadır.



Şekil 1.3. PN bağlantısının bant ve genel diyagramı

Güneş hücresi üretiminde malzeme seçimi önemli bir kavramdır. Son zamanlarda, birçok araştırmacı güneş pillerinin verimliliğini ve kararlılığını artırmak için yeni malzemeler üzerinde çalışmaktadırlar. İnce film güneş pilleri minimum malzeme kullanımının verdiği avantaj ile daha düşük üretim maliyetine sahip olması ve günümüzde artan verimlilikleri sayesinde bu fotovoltaik cihazlara olan ilgi artmaktadır. Yenilenebilir enerji alanında fotovoltaik teknolojilerin geliştirilmesi, enerji maliyetlerinin düşürülmesine, santrallerin enerji geri ödeme sürelerinin azaltılmasına ve yüksek güç dönüşüm verimliliği elde edilmesine odaklanmaktadır. Ancak, elde etmemiz gereken diğer önemli husus, bu cihazların uzun vadeli kararlılığıdır. Bu çalışmada fotovoltaik ve katı hal fiziği laboratuvarında üretilen CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film test hücrelerinin farklı sıcaklık ve ışık yoğunluğu altında karakterizasyonu yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bilimsel makalelerde ve literatürde güneş pili malzemeleri üç nesil olarak sınıflandırılmaktadır [8]. Birinci nesil güneş pili esas olarak tek kristalli silikondan yapılmıştır ve maliyeti fazladır. Maliyeti düşürme üzerine çalışmalar ile yeni malzemelerin araştırılması, ikinci nesil olarak adlandırılan ince film güneş pillerinin gelişmesini sağlamıştır. İnce film güneş pilleri, daha az malzeme kullanımı ve son zamanlarda artan verimlilikleri nedeniyle avantajlıdır [9]. Ayrıca, ince film hücrelerinin üretimi kolaydır ve daha fazla sayıda tabakanın varlığından dolayı düşük akım kayıpları vardır [7]. Üçüncü nesil olarak adlandırılan güneş pilleri organik malzemeden yapılmaktadır [8]. Tüm güneş pili çalışmaları kendi içinde anlamlı ve gelişmeye açıktır.

İnce film güneş pili aşırı ince yarı iletken katmanlardan oluşur. Bu piller cam, metal, plastik gibi bir veya daha fazla ince fotovoltaiik malzeme katmanının üst üste yerleştirilmesinden meydana gelir [10].

Amorf silikon (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum galyum selenid (CIGS) yarı iletkenleri ince film güneş pilleri teknolojisinde ticari olarak yaygın olarak kullanılan malzemelerdir [10]. Son yıllarda üzerine yapılan çalışmalar ile CdTe pilinin verimi %22'lere kadar çıkmıştır [11]. Fakat kadmiyum malzemesinin toksik olmasından dolayı CdTe pillerinin kullanımı sınırlandırılmaktadır [12]. Ek olarak, antimon selenid (Sb_2Se_3) son zamanlarda ümit vadeden bir fotovoltaiik malzeme olarak düşünülmektedir çünkü uygun bant aralığı ve yüksek kimyasal kararlılığı ile doğada bol bulunan bileşenleri ile toksik olmayan fotovoltaiik malzeme olarak görülmektedir [13].

Lee ve arkadaşları (2018), verimli ince film güneş pilleri elde etmek için ön tavlama süresinin etkisini ve optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Hızlı termal tavlamadan önce $100^\circ C$ 'de ön tavlama süresinin Sb_2Se_3 'in nihai morfolojisini ve kristalleşmesini etkilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıntılı taramalı elektron mikroskobu, X-ışınımı kırınımı ve Raman spektroskopik analizleri ile 40 dakikalık ön tavlamanın Sb_2Se_3 fazının kristalleşmesini desteklediğini gözlemlemişlerdir. Optimize edilmiş 40 dakikalık önceden tavllanmış Sb_2Se_3 soğurucu için en yüksek %1,47'lik verim elde etmişlerdir ve düzgün bir akım akışı sağladığını gözlemlemişlerdir [14].

Guo ve arkadaşları (2019), yaygın olarak kullanılan CdS pencere katmanı yerine CdSe'nin güneş pillerinde pencere katmanı olarak kullanılabileceği üzerine çalışma yapmışlardır. CdS pencere katmanı ile karşılaştırıldığında, CdSe pencere katmanı Sb_2Se_3 filmi arasındaki arayüzey difüzyonu baskılayabildiğini böylece arayüzey rekombinasyon bölgelerinin azaltılabileceğini söylemektedir. CdSe/ Sb_2Se_3 güneş pillerindeki gelişmiş fotoakım ve azaltılmış seri direnç, cam/FTO/CdSe/ Sb_2Se_3 /grafit hücre mimarisi ile %4,5'lik geliştirilmiş güç dönüştürme verimliliği elde etmişlerdir [15].

Ju ve arkadaşları (2020), hidrozin çözeltisi işlemi kullanılarak Sb_2Se_3 ince film güneş pili üretmişlerdir. Fotoaktif tabakanın kalınlığının kontrol edilmesi ve bir poli (3-heksiltiyofen) delik taşıma tabakasının yerleştirilmesiyle, %2,45'lik güç dönüşüm verimliliğine sahip bir Sb_2Se_3 tabanlı güneş pili elde ettiklerini belirtmektedirler [16].

Li ve arkadaşları (2018), kaynak ve alt tabaka sıcaklıklarının ayrı ayrı kontrolüne izin veren, kapalı alan sübliminyasyon sürecini kullanan kararlı ve verimli CdS/ Sb_2Se_3 ince film güneş pili üretimini rapor etmişlerdir. Bu yöntem ile, Sb_2Se_3 film birikiminin daha iyi kontrol edilmesini ve arayüzey difüzyonunun azaltılmasını sağlayarak daha yüksek kaliteli emici filmlere ve gelişmiş heteroeklemlerin oluşmasını sağlamıştır. Ek olarak, yeni bir düşük maliyetli olan 4,4',4'',4'''-(9-octylzarbazole-1,3,6,8-tetrayl) tetrakis (N,N-bis(4-methoxyphenyl)aniline) (CZ-TA) delik taşıma katmanı olarak tanıtmışlardır. Bu CZ-TA delik taşıma katmanı, arka temas direncini azaltmıştır ve fotojenere edilmiş taşıyıcı koleksiyonunu destekleyerek cihazın foto-dönüşüm verimliliğini %6,84'e çıkardığı belirtilmiştir [17].

Tao ve arkadaşları (2019), Sb_2Se_3 ince film güneş pillerinde elektronik taşıma mekanizmalarını, sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri kullanarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada Sb_2Se_3 ince filmler, çift sıcaklık bölgeli boru şeklinde bir fırın sistemi kullanılarak buhar taşıma biriktirme yöntemiyle biriktirilmiştir ve fırın merkezinden üç farklı konumda bulunan substrat üzerinde oluşturulan Sb_2Se_3 filmleri için karşılaştırmalı çalışmalar yapılmıştır. Cihaz verimliliği %3,83 ile %6,24 arasında değişmiştir. İlk olarak, X-ışını kırınımı, Raman ve taramalı elektron mikroskobu ölçümleri ile elde edilen yapısal özellikler, en yüksek verimli hücre için optimal Sb_2Se_3 film kalitesi belirlenmiştir. Ardından, sıcaklığa bağlı doyumluk akımı ve açık devre voltajı (V_{oc}) ölçümleri, baskın taşıyıcı rekombinasyonunun, muhtemelen tüm hücreler için V_{oc} 'u etkileyen CdS/ Sb_2Se_3 arayüz bölgesinde meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Optimal Sb_2Se_3 hücresi için en yüksek V_{oc} ,

en düşük CdS/Sb₂Se₃ arayüz yeniden birleştirme oranına sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Son olarak, ters öngerilim akımı ilişkisi, düşük verimli hücreler daha yüksek ohmik olmayan şönt akıma sahip olduğundan, ohmik olmayan şönt akımının (uzay-yük-sınırlı akım, SCLC) güneş pillerinin performansını etkilemede önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir [18].

Tobnaghi ve arkadaşları (2013), güneş pillerinin elektrik parametreleri üzerinde sıcaklığın ve güneş ışığı yoğunluğunun rolünü incelediler. Ticari olarak kullanılan güneş pillinin bir örneğini deneysel ölçümler için kullandılar. Bu güneş pilinin, bir p-tipi silikon wafer fosfor difüzyonu kullanılarak mono-kristal yapıda üretildiğini belirtmektedirler. Ölçümler, 1000 W/m² ışık yoğunluğunda 15 ,25 ve 50°C’de yapılmıştır. Deneysel sonuç olarak, silikon pil için açık devre voltajı azalmaktadır ve bu azalma yaklaşık 2,2 mV/°C. Kısa devre akımı silikon güneş pili için sıcaklıkla biraz artmaktadır bu yaklaşık 0,0006 mA/°C’dir. Doldurma faktörü sıcaklık ile azalmaktadır her derecede yaklaşık olarak 0,0015 FF düşmektedir. Sonuçlara göre, artan sıcaklıkla azalan voltajın sıcaklığa bağımlılığını bildirmişlerdir. Güneş pillerinin çıkış akımı ışık şiddeti ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmışlardır [19].

Kosyachenko ve arkadaşları (2009), CdS/CdTe güneş pili açık devre voltajının, kısa devre akımının, doldurma faktörünün ve verimliliğinin p-CdTe soğurucu katmanın direnci ve kalınlığı, konsantrasyonu N_a-N_d ve taşıyıcı ömrü τ üzerindeki etkileri incelemiştir ve güneş pilinin verimliliğini artırmak için bu parametrelerin optimizasyonu yapılmıştır. CdS/CdTe güneş pillerinin gözlenen düşük veriminin, $10^{-10} - 10^{-9}$ s aralığında çok kısa elektron ömrü ve imalat için kullanılan çok ince (3-5 μ m) CdTe tabakasından kaynaklandığını göstermiştir. CdTe/CdS güneş pilleri ile %28-30’luk verim elde etmek için, CdTe emici tabakanın öz direnci ve kalınlığı, konsantrasyonu ve taşıyıcı ömrü sırasıyla $\sim 0,1 \Omega.cm$, $\geq 20 - 30 \mu m$, $\geq 10^{16} cm^{-3}$ ve $\geq 10^{-6}$ s olması gerektiğini belirtmişlerdir [20].

Artegiani ve arkadaşları (2020), bakır miktarının CdTe güneş pillerinin performansını ve arka temastaki kararlılığını üzerine etkisini incelemiştir. 0,1 nm kalınlığında Cu katmanı ile üretilen CdTe hücreleri, 2,0; 1,0 ve 0,5 nm kalınlığında Cu katmanları ile üretilen CdTe güneş pillerini karşılaştırmışlardır. Bakır miktarının, numunelerin performansını ve yaşlanmasını etkilediğini gözlemlemiştir. Elde edilen sonuçlar ile çok düşük bir bakır miktarının (0.1 nm) CdTe’yi takviye etmek için yeterli olduğunu ve daha yüksek bir bakır miktarının, taşıyıcı konsantrasyonunu artırmadığı açıklanmıştır [21].

Shen ve arkadaşları (2018), yakın alan süblimasyon (CSS – close -spaced sublimation) ile Sb_2Se_3 filmler hazırlamıştır. Şönt akımının kaynağı ve mekanizmaları azaliz edilmiştir. Ohmik olmayan yer şarjı sınırlı akımın (space-charge limited current), Sb_2Se_3 ince film güneş pillerinde doğrusal olmayan şönt akımına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu sorunu çözmek için pil ön kontağına yüksek dirençli SnO_2 tamponu yerleştirilmiştir. SnO_2 'nin eklenmesiyle, mikro şant yolları değiştirilmiş ve % 5,18'e varan önemli bir verimlilik artışı elde edildiği belirtilmiştir [22].

Amin ve arkadaşları (2007), çevre kirliliği endişelerini gidermek ve ayrıca emici katman boyunca taşıyıcı rekombinasyon kaybını azaltmak için, CdTe absorpsiyon katmanının kalınlığını 1 μm 'ye düşürmek için yapılan çalışmadan bahsetmişlerdir [10]. 1 μm CdTe katmanlarındaki problemleri gidermek için, sayısal analiz araçları yardımıyla yeni güneş pili yapıları kullanılarak daha yüksek verim elde etmek için olası yöntemler araştırılmıştır. Bu çalışmanın teori kısmında, bu yapıların simülasyonu için NSSP (Sayısal Güneş Pili Simülasyon Programı) adlı 1 boyutlu simülasyon programı ile sayısal analiz kullanılmıştır. Buradaki taşıyıcı rekombinasyon kaybını azaltmak için arka kontaklara daha yüksek bant boşluklu malzemelerin (yani ZnTe) eklenmesiyle birlikte CdTe kalınlığının 1 μm 'ye düşürülmesinin uygulanabilirliğini araştırılmıştır. Çalışma, 3 μm CdTe'nin altındaki hücreler için yaklaşık %16 verimliliğe sahip geleneksel bir CdS/CdTe/Cu katkılı C yapısı için CdTe absorpsiyon tabakasının kalınlık azalmasının potansiyel sonuçları gösterilmiştir. Arka temas arayüzünde azınlık taşıyıcı rekombinasyon kaybindan kaynaklanan spektral tepkide düşüşler bulunmuştur. Arka temasta azınlık taşıyıcı kaybını önlemek için bir arka yüzey alanı (BSF) üretmek için ZnTe gibi daha yüksek bant aralığına sahip bir malzeme yerleştirilmiştir. 1 μm inceliğinde bir CdTe hücresi için verimlilikte yaklaşık %20'ye varan bir artış bulunmuştur ve bu durum, daha ince CdTe bazlı hücrelerin arka temasında artan arka yüzey alanı etkisinin olabileceği şeklinde yorumlanmıştır [23].

Mahmood ve arkadaşları (2018), yakın alan süblimasyon (CSS) tekniği ile kontrollü kalınlıklara sahip CdS ince filmleri değişik pozlama süreleriyle sentezlemiştir. Bu ince filmlerin X-ışınları kırınım verileri, (002) yönü boyunca tercih edilen bir oryantasyon ile polikristal yapıyı ortaya çıkardığı belirtilmiştir. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) tabanlı morfolojik çalışmalar, 300-500 nm aralığında biriken ince filmlerin kalınlığındaki artışla tane boyutu varyasyonu gösterilmiştir. Elektriksel çalışmalar, 106 $\Omega\text{-cm}$ mertebesinde yüksek dirençliliği ortaya çıkarmıştır. CdS ince filmler için yapılan spektrofotometrik

çalışmalar, kırılma indisi, Swanepoel modeli kullanılarak absorpsiyon katsayısı ve Tauc ilişkisi kullanılarak $\sim 2,42$ eV enerji bant aralığı gibi optik parametrelerin hesaplanması ve ince film kalınlığı etkisi incelenmiştir. Optik enerji bant aralığı kalınlık arttıkça azaldığı ve bunun iletimi azalttığı, bu nedenle daha kalın filmlerin pencere katmanı için uygun olmadığı belirtilmiştir [24].

M. Bertoncello ve arkadaşları (2019), kısa süreli termal strese maruz kalan CdTe güneş pillerinin güvenilirlik incelemesini yaptı. Superstrate konfigürasyonda üretilen CdTe hücreyi karakterize etmek için döngüsel olarak termal stres testi uygulandı. Bu stres testi 1 saat 2 saat 4 saat 7 saat 17 saat 25 saat ve 41 saat 80°C 'de sürdürüldü ve her soğutma aşaması 25°C 'de 24 saat idi. Her stresin sonunda ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler; EQE, karanlık durumda I-V ölçümleri, aydınlatma altında IV ölçümleri ve (PVD) foto-voltaj düşüşü. Termal stres sonrasında hücre verimliliğinde azalma, taşıyıcı ömründe düşüş ve elektriksel parametrelerde değişiklik olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, stres sonrasında cihazın aktif bölgesine doğru Cu (temastan) veya O_2 'nin (havadan) difüzyonunun meydana geldiği şeklinde yorumlanmıştır. Bu kusurlar hem optik hem de elektriksel özellikleri etkilediği belirtilmiştir [25].

Ahn ve arkadaşları (2012), CdS/CdTe güneş pillerindeki jonksiyon bozunmasını, Cd boşluk konsantrasyonunun yüksek olduğu, Cd eksik bileşimli bir CdTe tabakası kullanılarak araştırılmıştır. Cu atomlarının CdTe'deki Cd boşluklarını kolaylıkla doldurduğu ve Cu arka temasından birleşme alanına taşındığı bulunmuştur. Fotoluminesans ölçümü ve spektral kuantum verimliliği ölçümü, Cu atomlarının CdS'ye dahil edilmesinin, CdS'deki iletim bandının 1.55 eV altında bir kusurlu enerji seviyesi oluşturduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, jonksiyon potansiyelinin azaldığı ve CdTe soğurucuya ışık girişinin engellendiği düşünülmüştür. Güvenilir ve kararlı CdTe hücreleri için, CdTe'nin dikkatli kontrolü ile CdTe'de Cd boşluğunun oluşmasından kaçınılması gerektiği belirtilmiştir [26].

Zhang ve arkadaşları (2019), yaygın olarak kullanılan pahalı altın elektrotun yerini almak amacıyla Sb_2Se_3 güneş pilleri için alternatif arka kontak araştırmışlardır. Ni ve Co gibi metaller de dahil olmak üzere çeşitli düşük maliyetli kontaklar test edilmiştir. Çıplak metalik elektrotlu güneş pillerinin performansı, Au kontaklı referans cihazla karşılaştırıldığında %45'e kadar daha düşük olduğu görülmüştür. Ek olarak, Ni teması kullanıldığında, metal difüzyonu ve ara yüzey kusurlarının oluşması sonucunda güneş pillerinin şönt direnci önemli

ölçüde azalmıştır. Termal olarak buharlaştırılmış ince NiO_x , difüzyon için bloke edici bir tabaka olarak ve boşluk çıkarma bariyerini azaltmak için kullanılmıştır. 7 nm NiO_x katmanlı ve Ni temaslı güneş pilleri, referans güneş pili performansının %97'sini elde ettiği belirtilmiştir. 25 günlük bir süre boyunca, arka kontak olarak 7 nm NiO_x/Ni 'ye sahip güneş pilleri, ilk performansının %93'ünü koruduğu ve bu, Au kontaklarının düşük maliyetli malzemelerle başarılı bir şekilde değiştirilebileceğini ve yüksek performansı koruyabildiği sonucuna varılmıştır [27].

Rahman ve Ahmed (2021), delik taşıma katmanı (hole transport layer – HTL) olarak antimon sülfür (Sb_2Se_3) ile kadmiyum tellür (CdTe) bazlı güneş pili yapısı oluşturdular. Standart ince film CdS/CdTe güneş pili ile oluşturdıkları $\text{Al}/\text{FTO}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{Ni}$ heteroeklem yapısı arasındaki fotovoltaiik performanslar üzerinde karşılaştırma çalışmaları yapmak için tek boyutlu güneş pili kapasitans simülatörü (SCAPS-1D) kullandılar. Hem CdS/CdTe hem de $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{S}_3$ arayüzlerinde arayüz kusurlarının etkisi analiz edildi. Bu çalışma, Sb_2S_3 'ün delik taşıma katmanı olarak tanıtılmasının, CdTe soğurucu ile uygun bant hizalaması oluşturarak Voc'u önemli ölçüde iyileştirdiğini ve böylece arka temas yüzeyinde taşıyıcı rekombinasyonunu azaltarak güneş pilinin verimliliğini önemli ölçüde artırdığını belirtilmiştir. Ayrıca, çalışma sıcaklığının etkileri, arka temas ve yüzey rekombinasyonu hızı açıklanmıştır. Soğurucu kalınlığı; $2,1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ katkılı konsantrasyonu ile $1,0 \mu\text{m}$ olacak şekilde optimize edilmiştir. Optimize edilmiş cihaz için $1,15 \text{ V Voc}$; $28,74 \text{ mA/cm}^2 \text{ Jsc}$ ve %86,03 FF gibi diğer parametrelerle birlikte %28,41'lik verim elde edilmiştir. Bu sonuçlar, delik taşıma katmanı olarak Sb_2S_3 'ün yüksek verimli ve ucuz ince film CdTe heteroeklemlili güneş hücreleri üretmek için kullanılabileceği yorumu yapılmıştır [28].

Liu ve arkadaşları (2021), yoğunluk fonsiyonel teorisine dayalı olarak hidrostatik basıncın CdTe 'nin kararlılığı, elektronik ve optik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Fonon dağılımlarının hesaplamalarından, CdTe yüksek basınçta (5,76 GPa) hala dinamik ve kararlı olduğu görülmüştür. Farklı basınç koşullarında CdTe için bant boşluğunda artış olmaktadır ve bunun mevcut deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde uyuştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, görünür ışık bölgesinde basınç altında CdTe 'nin optik absorpsiyon katsayısının azaldığını belirtmişlerdir [29].

Jin ve arkadaşları (2021), Sb_2Se_3 ince film güneş pillerinde CdS ve Al'nin birlikte püskürtülmesiyle N^+ katmanı olarak elde edilen ultra ince $\text{CdS}:\text{Al}$ filmi kullanmışlardır.

CdS:Al optimize edilerek FTO/CdS:Al/CdS/Sb₂Se₃/Au yapısına sahip güneş pili üretilmiştir. Bu pil, N⁺ tabakası olmayan güneş hücresi ile karşılaştırıldığında, N⁺ tabakası olan hücre tercih edilen fotoelektrik tepki, genişlemiş tükenme bölgesi, daha iyi diyot kalitesi ve azaltılmış taşıyıcı rekombinasyon sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, Sb₂Se₃ ince film güneş pilinin V_{OC} değeri %19 ve verimliliğinde %30 iyileşme gerçekleştiği bildirilmiştir [30].

Shen ve arkadaşları (2016), düşük ışık ışıması altında bir CdTe güneş pilinin performansını incelemiştir. Bu çalışmada, 0,015 güneş kadar düşük E_{irra} altında CdTe güneş pili performansı incelenmiştir. Hem doldurma faktörü (FF) hem de açık devre voltajının (V_{oc}), düşük E_{irra}'daki şönt direncinden kritik olarak etkilendiği bulundu. Akım geçişi, kritik olarak CdTe soğurucu katmanındaki geçiş yollarının fiziksel konumuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Uzun yükü sınırlı akımın (SCLC), ince film CdTe güneş pilinde şant akımına neden olduğu belirlenmiştir. 0,015 Güneş kadar düşük bir E_{irra}'da, yüksek şönt direncine sahip CdTe güneş pili, standart AM 1,5 E_{irra}'da test edilen değerin %70 ila %80'i arasında bir verim sağladığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, polikristal CdTe ince film güneş pilinin düşük E_{irra}'da elektrik enerjisi üretimi için iyi bir fotovoltaiik cihaz olduğunu göstermiştir [31].

Shukla ve Panda (2021), güneş pillerinde arka yüzey katmanı (back surface field) malzemesinin güneş pilinin performansına etkisini incelediler. Konvansiyonel olan güneş pilini ve arka yüzey katmanı yerleştirilen güneş pilinin performanslarını SCAPS-1D simülasyon programı kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonucu, konvansiyonel olan güneş pili (CdTe/CdS:O/ZnO/SnO₂) CdTe kalınlığı 5000 nm ve CdS kalınlığı 25 nm ile %14,87 (V_{OC} = 0,6482; J_{SC}=28,583508 ve FF=80,24) verim göstermiştir. Cu₂Te'yi BSF katmanı olarak yerleştirdikten ve CdS:O azaltıldıktan sonra: 5 nm'ye kadar olan hücre kalınlığı, sadece 1000 nm kalınlığında CdTe katmanı ile %19,06 (V_{OC} = 0,7909; J_{SC} = 29,49315 ve FF = 81,73) verimlilik gösterdiği belirtilmiştir [32].

3. GÜNEŞ PİLİ PARAMETRELERİ

Karakterizasyon, güneş pilleri ve fotovoltaik malzemelerin araştırılmasında kritik bir bölümdür. Çünkü belirli koşullar altında bu pillerin özellikleri kolaylıkla etkilenebilir. Bu nedenle bir güneş pilini karakterize etmek, bir hücreyi bilmek, yani onun davranışını, verimlilik durumunu ve performansını etkileyen kusurların veya parazitik unsurların varlığını tanımlayabilen tüm bilgileri toplamak gerekir. Bu güneş pillerini karakterize etmek ve elektronik davranışları hakkında detaylı bilgi elde edebilmek için, güneş pilleri çalışma prensibine en uygun devre modelini oluşturmak ve bu devre modeli için kullanılan parametreleri bilmemiz gerekir.

Bu bölümde güneş pilleri ile ilgili önemli kavramlar tanıtılmıştır.

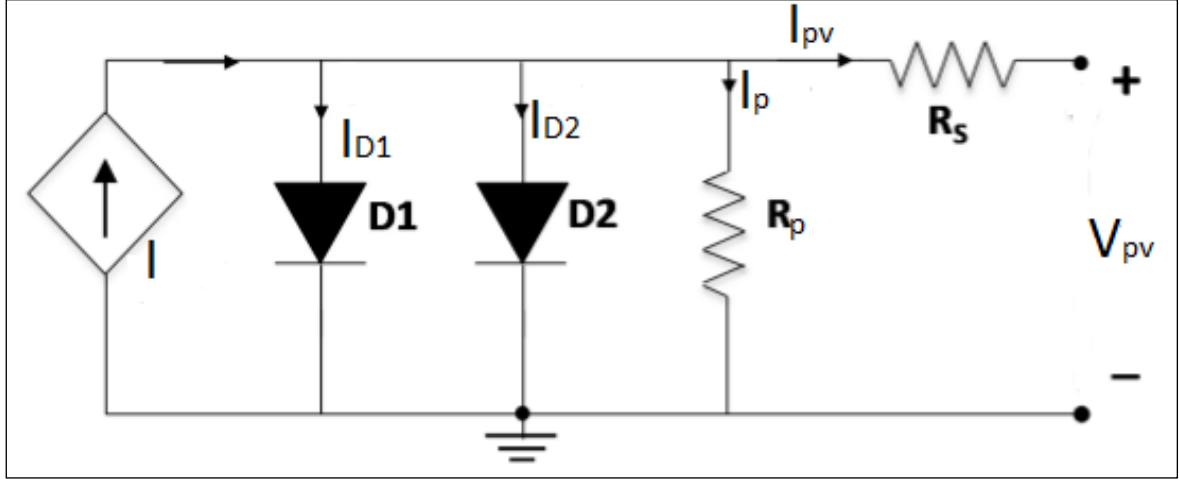
- I-V eğrisi
- Kısa devre akımı
- Açık devre gerilimi
- Doldurma faktörü
- Verimlilik
- Direnç etkileri
- Kuantum verimi (QE)
- Açık Devre Gerilim Düşüşü (OCVD)
- Rekombinasyon

3.1. Güneş Pili Çift Diyot Devre Modeli

Bir güneş pilinin elektronik davranışını anlamak için, hücrenin ideal elektrik bileşenlerini tanımlayan eşdeğer bir devre modeli oluşturmak faydalıdır. Yıllar içinde güneş pilini en iyi şekilde temsil eden birkaç model geliştirilmiştir. En doğru tanımlardan biri, hücreyi karakterize eden tüm ana etkileri dikkate alan bir çift diyot devre modelidir [33].

Çift diyot modelinde, birinci diyot PN-bağlantısını temsil eder ve ikinci diyot, bağlantının rekombinasyonunu temsil eder. Tek diyot modelinde idealite faktörü (n) sabit bir değer olarak alınır, ancak gerçekte idealite faktörü voltajın bir fonksiyonudur. Cihazda

rekombinasyon baskın olduğunda idealite faktörü 1'e yaklaşır. Bununla birlikte, düşük voltajlarda, bağlantı noktasındaki rekombinasyon etki artar ve idealite faktörü 2'ye yaklaşır. Bu nedenle, tek diyotlu devre modeline kıyasla birincisine paralel olarak ikinci bir diyot eklenir ve idealite faktörü 2 olarak ayarlanarak bağlantı rekombinasyonu çift diyot olarak modellenmiştir [34]. Ayrıca dirençlerdeki dağılma gücünü görüntülemek ve güneş pilinin azalan verimini görmek için seri ve paralel direnç eklenmiştir.



Şekil 3.1. Çift diyot modelinin devre şeması

Aydınlatma altında diyot Eş. 3.1 aşağıda verilmiştir.

$$I = I_L - I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I.R_S)}{kT} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I.R_S)}{2kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I.R_S}{R_{shunt}} \quad (3.1)$$

Aydınlatma altında ışık yoğunluğu, ikinci diyotun etkilerini sınırlar. Karanlıkta pratik ölçümler yapılır. Karanlık ortamda Eş. 3.2 aşağıda verilmiştir.

$$I = I_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - I.R_S)}{kT} \right] - 1 \right\} + I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - I.R_S)}{2kT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - I.R_S}{R_{shunt}} \quad (3.2)$$

Yukarıda verilen Eş. 3.1 ve 3.2 basitleştirmek için eksi bir (-1) terimi telafi edilir.

Bu sayede, aydınlatma altında Eş. 3.3 aşağıdaki gibidir.

$$I = I_L - I_{01} \exp \left[\frac{q(V + I.R_S)}{kT} \right] - I_{02} \exp \left[\frac{q(V + I.R_S)}{2kT} \right] - \frac{V + I.R_S}{R_{shunt}} \quad (3.3)$$

Karanlık ortamda Eş. 3.4 aşağıda gösterilmiştir.

$$I = I_{01} \exp \left[\frac{q(V-I.R_S)}{kT} \right] + I_{02} \exp \left[\frac{q(V-I.R_S)}{2kT} \right] + \frac{V-I.R_S}{R_{Shunt}} \quad (3.4)$$

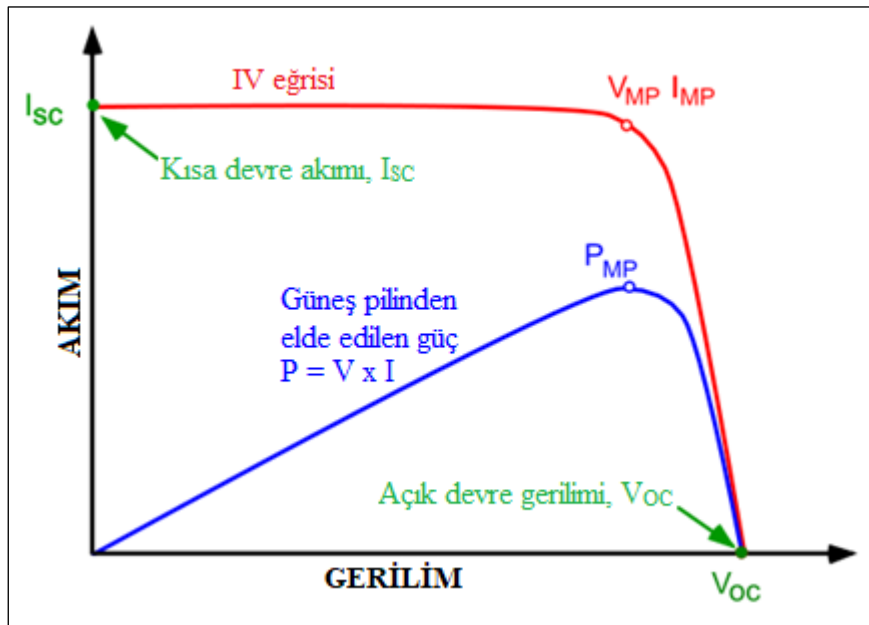
3.2. Güneş Pili I-V (Akım-Gerilim) Karakteristiği

Bir fotovoltaik güneş pilinin I-V eğrisi, akım-gerilim karakteristiğini gösterir ve güneş enerjisi dönüşüm yeteneği hakkında ayrıntılı bilgi verir.

Bir güneş pili tarafından üretilen akımın genel ifadesi Eş.3.5.

$$I = I_{SC} - I_{01} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Eş.3.5'te $e^{qV/kT}$, yarı-nötr bölgelerdeki rekombinasyon akımını temsil ederken, $e^{qV/2kT}$ tükenme bölgesindeki rekombinasyonu temsil eder.

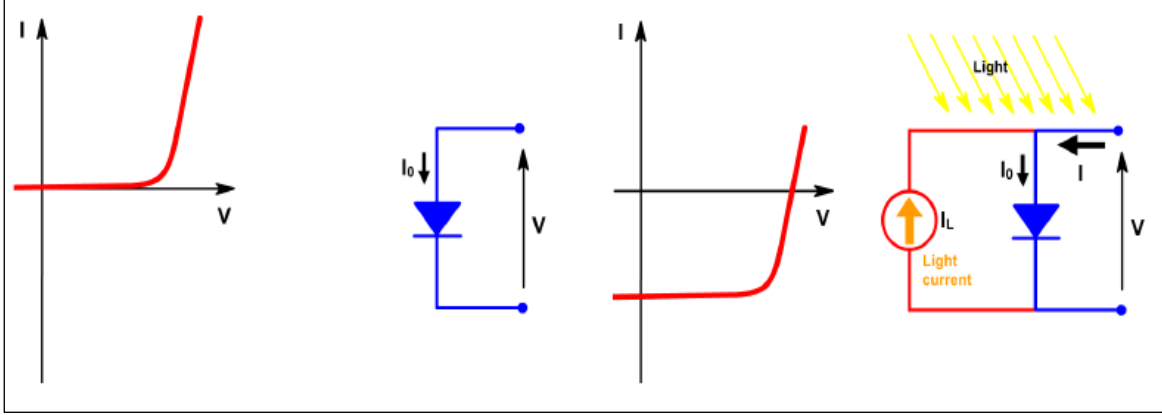


Şekil 3.2. Bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği [36]

Şekil 3.2 güneş pili için birkaç önemli parametreyi göstermektedir. Kısa devre akımı (I_{SC}), açık devre gerilimi (V_{OC}), verimlilik (η) ve doldurma faktörü (FF) gibi parametreler akım-devre karakteristiği ile belirlenir.

Hücrenin aydınlatılması, diyottaki normal akımlara eklenir, böylece diyot yasası Eş. 3.6.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (3.6)$$



Şekil 3.3. Karanlık I-V ve aydınlık I-V karakteristiği

Aydınlatma olmadan bir güneş pili, büyük bir diyotla aynı elektriksel özelliklere sahiptir.

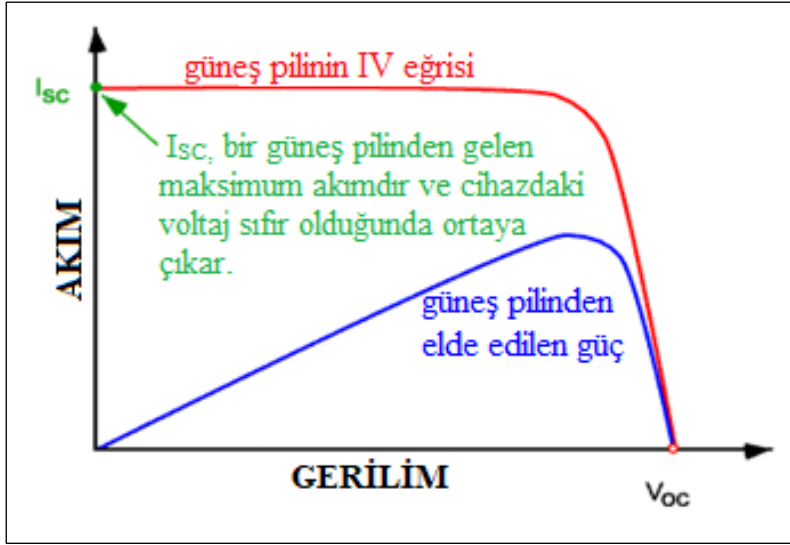
Pil üzerinde ışık parladığında, hücre güç üretmeye başlar ve IV eğrisi değişir.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.7)$$

Eş. 3.7’de -1 (eksi bir) değeri genellikle ihmal edilebilir. Üstel terim, 100 mV’nin altındaki gerilimler dışında genellikle 1’den büyüktür. Ayrıca, düşük gerilimlerde ışık ile üretilen akım (I_L), I_0 terimine hakimdir, bu nedenle -1 (eksi bir) değeri aydınlatma altında gerekli değildir ihmal edilir Eş.3.8.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (3.8)$$

Kısa devre akımı, I_{SC} (J_{SC}), bir güneş pilinin uçları arasındaki gerilimin sıfır olması durumunda gözlenen akımdır. Kısa devre akımı, ışık tarafından üretilen taşıyıcıların üretilmesi ve toplanmasından kaynaklanmaktadır. Şekilde gösterildiği gibi, I_{SC} güneş pilinden gelen maksimum akımdır.



Şekil 3.4. Kısa devre akımı, güneş pili I-V karakteristiği [37]

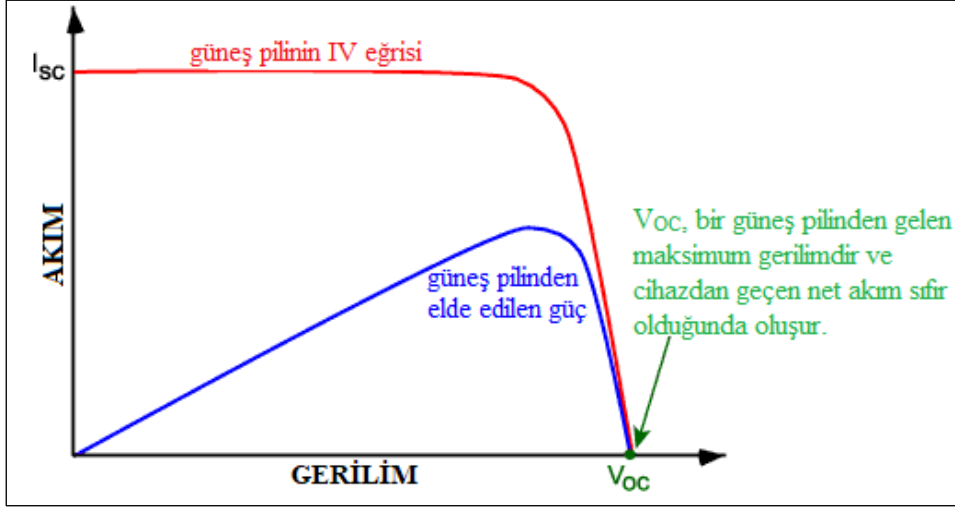
Kısa devre akımının bağlı olduğu faktörler [37];

- Güneş hücresinin alanı (I_{SC} mA/cm²)
- Foton sayısı (I_{SC} doğrudan ışık yoğunluğuna bağlıdır.)
- Gelen ışığın spektrumu (çoğu güneş pili için spektrum AM 1.5'tir.)
- Optik özellikler (güneş pilinin soğurulması ve yansımaları)

Açık devre gerilimi, V_{OC} , bir güneş hücresinden sağlanan maksimum gerilimdir. V_{OC} , akım sıfır olduğunda devrede görülen gerilimdir ve V_{OC} , güneş pilinde net akımı sıfıra eşitleyerek hesaplanır.

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.9)$$

Denklemden görülebileceği gibi V_{OC} , güneş pilinin doyma akımına ve üretilen akıma bağlıdır. Doyma akımı I_0 , güneş pilindeki rekombinasyona bağlıdır. Bu nedenle, V_{OC} , cihazdaki rekombinasyon miktarının bir ölçüsü olarak adlandırılabilir [38].



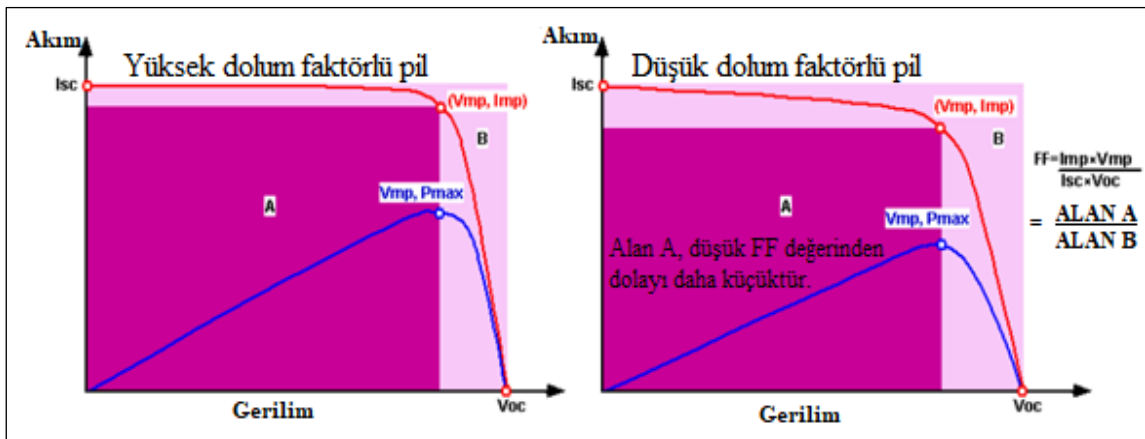
Şekil 3.5. Açık devre gerilimi, güneş pili I-V karakteristiği [38]

3.3. Doldurma Faktörü

Doldurma faktörü, ‘FF’ ile gösterilir, bir güneş pilinin kalitesinin bir ölçüsüdür. Yukarıda açıklanan I_{sc} ve V_{oc} , bir güneş pilinden gelen maksimum akım ve voltajdır. Ancak bu noktalarda güneş pilinden gelen güç sıfırdır. Doldurma faktörü, güneş pilinden elde edilen maksimum gücün I_{sc} ve V_{oc} çarpımlarının oranı olarak tanımlanır, doldurma faktörü 1 değerine ne kadar yakınsa pil o kadar verimli demektir.

Doldurma faktörü Eş. 3.10.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.10)$$



Şekil 3.6. Akım-gerilim fonksiyonu olarak doldurma faktörleri [39]

Şekil 3.6'daki grafikten de görülebileceği gibi, daha büyük dolum faktörü değeri daha yüksek çıkış gücü verir. Bir güneş hücresinin maksimum teorik dolum faktörü, güneş hücresinden gelen gücün voltaja göre diferansiyelinin sıfıra eşit olduğu yeri bularak belirlenebilir (Eş. 3.11).

$$\frac{d(IV)}{dV} = 0 \quad (3.11)$$

Elde edilen (Eş. 3.12);

$$V_{MP} = V_{OC} - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{qV_{MP}}{nkT} + 1 \right) \quad (3.12)$$

Bu denklemlerdeki önemli bir faktör, bunların olası bir maksimum doldurma faktörü değerini temsil etmeleridir ve pratikte, parazitik direnç kayıpları nedeniyle doldurma faktörü teorik denkleme kıyasla daha düşük olacaktır.

3.4. Verimlilik

Güneş pili verimliliği, fotovoltaiik etkiler yoluyla güneş pili tarafından elektrige dönüştürülebilen fotonun (güneş ışığı) enerjisidir. Bir güneş pilinin verimliliği, bir hücreyi diğeriyle karşılaştırmamızı sağlayan önemli bir parametredir. Güneş pilinin sıcaklığı ve gelen güneş ışığının yoğunluğu verimi etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, bir hücrenin verimini diğeriyle karşılaştırmak için aynı koşulların dikkatlice uygulanması gerekir. Bir güneş pilinin verimliliği (Eş. 3.13);

$$P_{max} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (3.13)$$

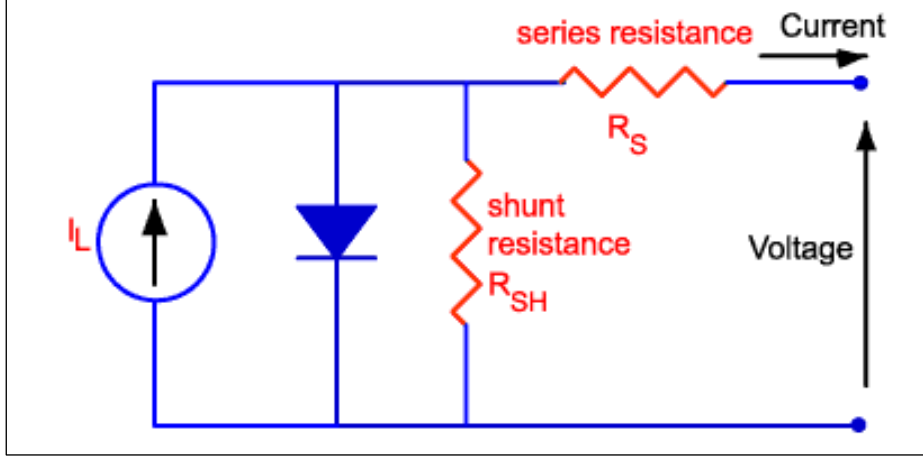
$$\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}} \quad (3.14)$$

3.5. Güneş Pillerinde Parazitik Dirençler

Seri direnç ve şönt direnci, güneş hücresindeki en iyi bilinen parazitik dirençlerdir. Bu direnç etkileri, dirençlerdeki gücü dağıtarak güneş pilinin verimini düşürür. Seri ve şönt dirençleri,

güneş pilinin geometrisinden etkilenir. Bu parazitik dirençler, doldurma faktörünü azaltarak güneş pili üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

Bu dirençler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Bir güneş pili devresi seri direnç (R_S) ve şönt dreci (R_{SH}) [40]

3.5.1. Seri direnç

Bir güneş hücresindeki seri direncin nedenleri şunlardır [41];

- Akımın güneş hücresi tabanı boyunca hareketi,
- Hücredeki metal kontak ile silikon arasındaki temas direnci
- Üst ve arka metal kontakların direnci

Güneş pilinin doldurma faktörü, esas olarak bu seri dirençten etkilenir ve bu direncin çok yüksek değeri kısa devre akımını azaltabilir. Güneş hücresinden gelen maksimum güç Eş. 3.16'da gösterilmiştir.

$$P'_{MP} \approx V_{MP}I_{MP} - I_{MP}^2 R_S = V_{MP}I_{MP} \left(1 - \frac{I_{MP}}{V_{MP}} R_S\right) = P_{MP} \left(1 - \frac{I_{SC}}{V_{OC}} R_S\right) \quad (3.15)$$

$$P'_{MP} = P_{MP} \left(1 - \frac{R_S}{R_{CH}}\right) \quad (3.16)$$

Normalize edilmiş bir seri direncin tanımlanması (Eş. 3.17).

$$r_S = \frac{R_S}{R_{CH}} \quad (3.17)$$

Seri direncin bir güneş pilinin çıkış gücü üzerindeki etkisini yaklaşık olarak Eş. 3.18.'de gösterilmiştir.

$$P'_{MP} = P_{MP}(1 - r_S) \quad (3.18)$$

Açık voltaj gerilimi ve kısa devre akımının seri dirençten etkilenmediği varsayıldığında, seri direncin doldurma faktörü üzerindeki etkisi Eş. 3.19 ve 3.20'de gösterilmiştir.

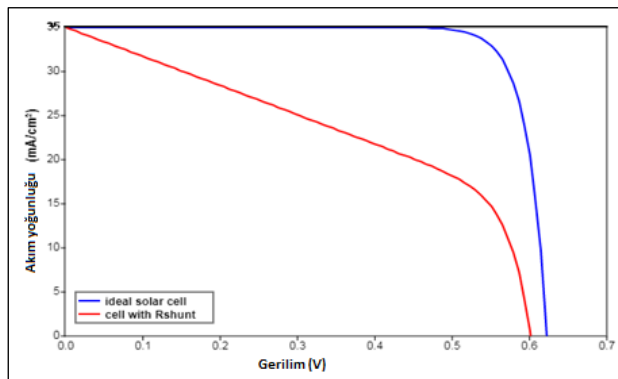
$$V'_{OC} I'_{SC} FF' = V_{OC} I_{SC} FF (1 - r_S) \quad (3.19)$$

$$FF' = FF (1 - r_S) \quad (3.20)$$

3.5.2. Paralel direnç

Paralel direnç (şönt direnci) R_{SH} , bir güneş hücresinde önemli güç kayıplarına yol açar. Bu direnç, güneş pilinde üretilen ışık için alternatif bir akım yolu sağlayarak güç kayıplarına neden olur. Bu alternatif akım yolu, güneş pilinden geçen akım miktarını azaltır ve güneş pilinin voltajını düşmesine neden olur. Paralel direnç etkisinde bir güneş pili için Eş. 3.21 aşağıda gösterilmiştir.

$$I = I_L - I_0 \exp \left[\frac{qV}{nkT} \right] - \frac{V}{R_{SH}} \quad (3.21)$$



Şekil 3.8. Bir güneş pilinde şönt direncinin dolum faktörüne etkisi, hücre alanı 1cm^2 , $T=300\text{K}$, $R_{SH}=30\text{ ohm.cm}^2$ [42]

Bir güneş pilinden elde edilebilecek maksimum güç Eş. 3.22 ve 3.23'te gösterilmiştir.

$$P'_{MP} \approx V_{MP}I_{MP} - \frac{V_{MP}^2}{R_{SH}} = V_{MP}I_{MP} \left(1 - \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \frac{1}{R_{SH}}\right) = P_{MP} \left(1 - \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \frac{1}{R_{SH}}\right) \quad (3.22)$$

$$P'_{MP} = P_{MP} \left(1 - \frac{R_{CH}}{R_S}\right) \quad (3.23)$$

Normalize edilmiş bir paralel direncin tanımlanması Eş. 3.24.

$$r_{SH} = \frac{R_{SH}}{R_{CH}} \quad (3.24)$$

O_{CV} ve I_{SC} 'nin şönt direncinden etkilenmediğini varsayarsak, şönt direncinin doldurma faktörüne (FF) etkisi Eş. 3.27'de gösterilmiştir.

$$P'_{MP} = P_{MP} \left(1 - \frac{1}{r_{SH}}\right) \quad (3.25)$$

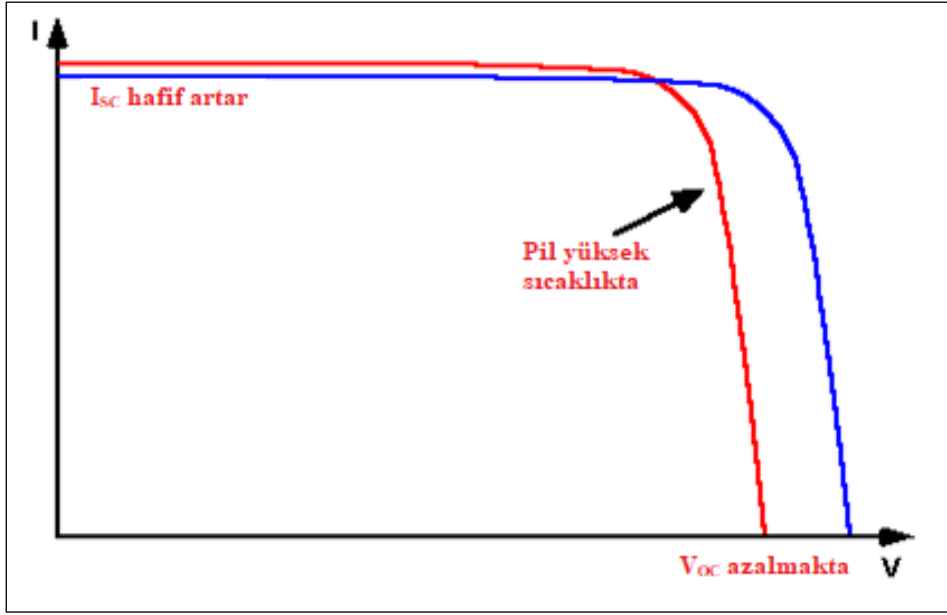
$$V'_{OC}I'_{SC}FF' = V_{OC}I_{SC}FF \left(1 - \frac{1}{r_{SH}}\right) \quad (3.26)$$

$$FF' = FF \left(1 - \frac{1}{r_{SH}}\right) \quad (3.27)$$

3.6. Sıcaklığın Etkisi

PV güneş pilleri sıcaklığa duyarlıdır çünkü sıcaklık artışı güneş pili yarı-iletkeninin bant aralığını azalmasına neden olur [43]. Bir güneş pilinde, I_0 'ın sıcaklığa olan bağımlılığı sebebiyle V_{OC} sıcaklık ile azalır.

Artan sıcaklığın etkisinin gösterimi şekil 3.9;



Şekil 3.9. Sıcaklığın bir güneş pilinin I-V karakteristiği üzerine etkisi [43]

P-N bağlantısı I_0 için (Eş. 3.28);

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D} \quad (3.28)$$

n_i ; sıcaklıktan etkilenen iç taşıyıcı konsantrasyonudur.

D , azınlık akım taşıyıcısının yayılımıdır.

N_D safsızlığı temsil eder, L azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğudur.

n_i için Eş. 3.29.

$$n_i^2 = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_{G0}}{kT} \right) = BT^3 \exp \left(-\frac{E_{G0}}{kT} \right) \quad (3.29)$$

m_e ve m_h sırasıyla elektronların ve deliklerin etkili kütleleridir.

E_{G0} , mutlak sıfıra doğrusal olarak ekstrapolasyon edilen bant aralığıdır,

B , sıcaklıktan bağımsız sabittir.

I_0 'ın V_{OC} üzerindeki etkisi, I_0 'ın V_{OC} içine aktararak hesaplanabilir (Eş. 3.30).

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} \right) = \frac{kT}{q} [\ln I_{SC} - \ln I_0] = \frac{kT}{q} \ln I_{SC} - \frac{kT}{q} \ln \left[B'T^{\gamma} \exp \left(-\frac{qV_{G0}}{kT} \right) \right] = \frac{kT}{q} \left(\ln I_{SC} - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{qV_{G0}}{kT} \right) \quad (3.30)$$

$E_{G0} = qV_{G0}$ eşitliği sağlandığında, dV_{OC} / dT 'nin dI_{SC} / dT 'ye bağlı olmadığını varsayarsak, dV_{OC} / dT şu şekilde bulunabilir.

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{V_{OC}-V_{G0}}{T} - \gamma \frac{k}{q} \quad (3.31)$$

Eş. 3.31, bir güneş pilinin sıcaklık hassasiyetinin pilin V_{OC} değerine bağlı olduğunu göstermektedir.

3.7 Işık Şiddetinin Etkisi

Işık yoğunluğu, V_{OC} , I_{SC} , verimlilik, dolum faktörü (FF), seri ve şönt dirençlerinin etkileri dahil olmak üzere güneş pili parametrelerini etkileyen önemli bir faktördür. Bir güneş hücresindeki ışık yoğunluğu, güneş sayısı olarak adlandırılır; burada 1 güneş spektrumu, AM 1.5 veya $1 \text{ kW} / \text{m}^2$ 'de standart aydınlatmaya karşılık gelir [44].

3.8. Kuantum Verimliliği

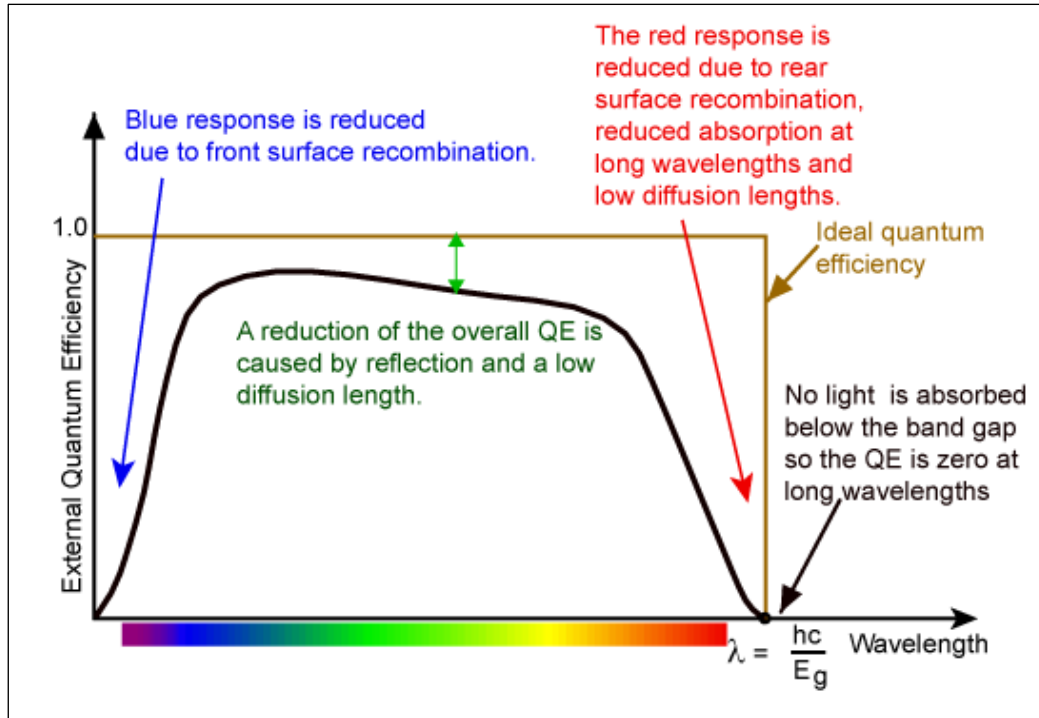
Kuantum verimliliği (QE), güneş pili tarafından toplanan yüklerin güneş hücresi üzerindeki gelen fotonların sayısına oranı olarak tanımlanır [45]. Bu parametre bize bir güneş pilinin kalitesi hakkında temel bilgileri verir. Kuantum verimliliği, (foton) ışığın elektronlara dönüşümünün verimliliğini ölçmemize olanak sağlar. Kuantum verimliliği çoğu zaman farklı bir dalga boyu aralığı ile ölçülür, çünkü bir fotonun enerjisi arasındaki ilişki dalga boyuyla ters orantılıdır [45]. Genellikle bir güneş pilinin iki tür kuantum verimi dikkate alınır. Dış kuantum verimi (EQE), hücrenin optik kayıplarını içeren bir kuantum verimliliğidir.

$$EQE = \frac{\text{elektron/s}}{\text{foton/s}} = \frac{(akım)/(elektron \text{ yükü})}{(\text{fotonların toplam gücü})/(\text{fotonların enerjisi})} \quad (3.32)$$

Eşitlik 3.32'de görüldüğü gibi, dış kuantum verimliliği ışığın emilmesine ve yüklerin toplanmasına bağlıdır.

İç kuantum verimi, yansıtılmayan fotonların toplanabilir taşıyıcılar üretebileceği verimliliği ifade eder [45]. Fotonların yansımadan dolayı kaybolmadığını düşünürsek (Eş. 3.33);

$$IQE = \frac{\text{elektron/s}}{\text{emilen fotonlar/s}} = \frac{EQE}{1 - \text{Yansima}} \quad (3.33)$$



Şekil 3.10. Kuantum verimliliği örnek grafik [45]

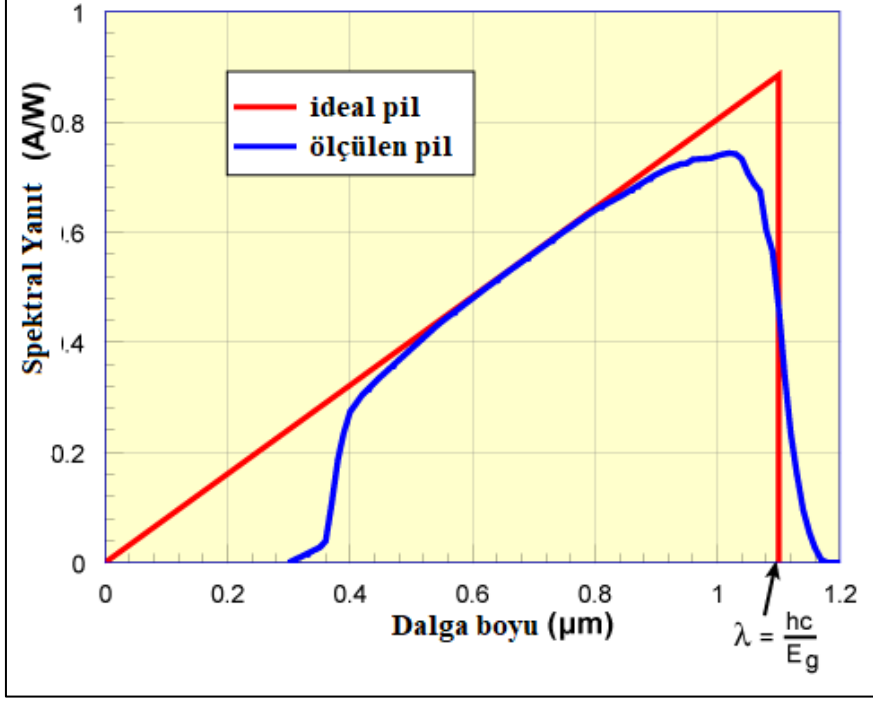
İdeal bir güneş pili için dış kuantum verimi (EQE) eğrisi şekil 3.10’da gösterilmiştir. Aslında, ideal kuantum verimliliği yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi kare şekle sahiptir. Ancak, bir güneş hücresinin kuantum verimi, yük taşıyıcılarının harici bir devreye giremediği rekombinasyon etkileri nedeniyle azalır [45]. Bant aralığının altındaki enerjiye sahip fotonlar soğurulmaz, bunların kuantum verimliliği sıfırdır.

3.9. Spektral Yanıt (SR)

Spektral yanıt, güneş pili tarafından üretilen akımın güneş piline gelen güce oranıdır [46]. Bu parametre, yukarıda açıklanan kuantum verimliliğine benzerdir.

Bilinen bir kavram olarak, bir güneş pilinde foton, elektron ve diğer yük taşıyıcıların daha yüksek bir enerji durumu elde etmesine neden olarak elektron-delik çifti oluşturur. Daha düşük dalga boyunda bir foton daha yüksek bir enerjiye sahiptir. Bir güneş pilindeki foton elektron-delik çifti oluşturur ve kalan fazla enerji ısı üreten fononlar oluşturur. Bu ısı, bir güneş pilinin verimini ve güç çıkışını azaltır. Bu nedenle, fotonların enerjisi tam olarak

kullanılamaz, çünkü daha düşük dalga boyundaki enerji fazlalığı ve foton enerjisinin bant aralığından daha düşük olması elektronları uyaramaz. Bunlar, bir güneş pilindeki güç kayıplarını temsil eder [46].



Şekil 3.11. Bir silikon güneş pilinin spektral yanıtı [46]

Yukarıdaki grafikte silikon güneş pilinin cam altındaki spektral tepkisini görüyoruz. 400 nm'nin altındaki kısa dalga boyunda cam, ışığın çoğunu emer ve spektral yanıt çok düşüktür. Orta dalga boylarında hücre ideale yaklaşır. Uzun dalga boylarında yanıt sıfıra döner [46]. Kuantum verimliliği ve spektral yanıt ikisi de güneş pili analizinde kullanılan parametrelerdir. Bununla birlikte, spektral yanıtın avantajı, doğrudan ölçülebilmesidir. Bu hesaplanmış parametreden sonra kuantum verimliliğini bilmek için kullanılır.

QE'yi SR'ye dönüştüren Eş. 3.34 aşağıda gösterilmiştir.

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE \quad (3.34)$$

h , c ve q fiziksel sabitler olduğundan, elde edilen yeni formül (Eş. 3.35);

$$SR(A/W) = \frac{QE \cdot \lambda(nm)}{1239.8} \quad (3.35)$$

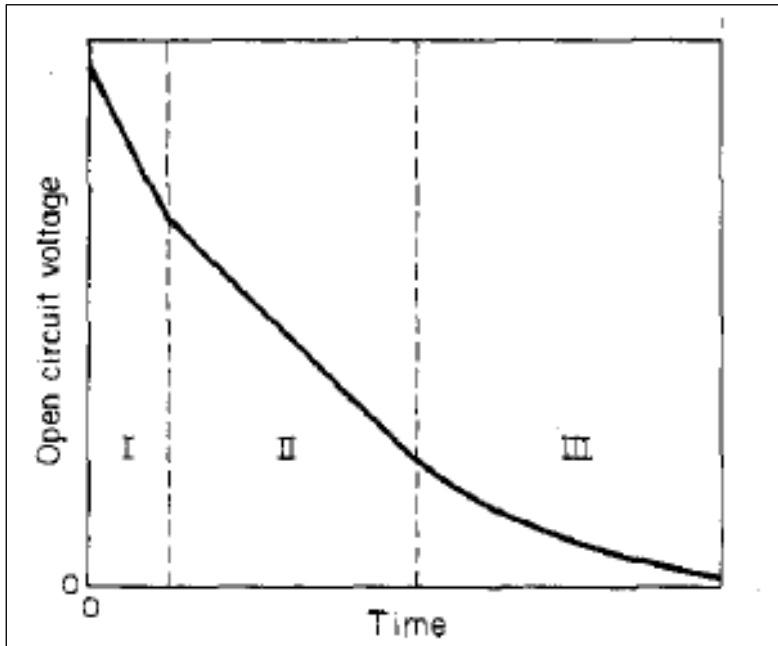
3.10. Açık Devre Gerilimi Düşümü (OCVD)

Foton ile üretilen fazla azınlık taşıyıcılarının ömrü, güneş pili tasarımında önemli bir parametredir. Bir fotovoltaiik hücrenin toplam enerji dönüşüm verimliliği, hücrenin temel bölge azınlık taşıyıcı ömrüne kritik olarak bağlıdır [47].

OCVD, p-n bağlantısının taban bölgesi içindeki fazla azınlık taşıyıcı ömrünü belirlemeye yönelik bir tekniktir [47].

Gerilim grafiğini gözlemleyerek, azınlık taşıyıcılarının yaşam süreleri hakkında önemli bilgiler elde etmek mümkün olacaktır, aslında, teoriden biliyoruz ki, bir p-n jonksiyonun açık devre gerilimi (V_{OC}), taşıyıcıların yaşam süresine bağlıdır.

Bir silikon hücre düşünürsek, V_{OC} 'nin iniş bölümünü şekil 3.14'te gösterildiği gibi üç alana bölebiliriz.



Şekil 3.12. Teorik olarak açık devre gerilimi azalma eğrisi [47]

İlk bölge, yüksek seviyeli geçiş durumunu gösterir, burada fazla azınlık taşıyıcı konsantrasyonu, hücrenin baz bölgesindeki denge durumu çoğunluk taşıyıcı

konsantrasyonunu aşar [47]. Bu bölümde eğri doğrusaldır ve taşıyıcı ömür şu şekilde hesaplanabilir (Eş. 3.36).

$$\tau = \frac{2kT}{q} \left| \frac{1}{dV_{OC}/dt} \right| \quad (3.36)$$

Burada k ; Boltzman sabiti, T ; sıcaklık ve q ; elektron yüküdür.

Bozunma eğrisinin ikinci bölgesi, bazdaki fazla azınlık taşıyıcı konsantrasyonunun termal dengeden daha büyük olduğu andaki geçiş durumuna karşılık gelir. Ancak termal denge çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonundan daha azdır [47]. Eğri halen doğrusaldır.

$$\tau = \frac{2kT}{q} \left| \frac{1}{dV_{OC}/dt} \right| \quad (3.37)$$

Bozunma eğrisinin üçüncü bölgesinde, denge durumunda geçiş ve azınlık taşıyıcılarının konsantrasyonu, çoğunluk taşıyıcılarından çok daha düşüktür.

$$\tau = \frac{kT}{q} \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.38)$$

Yukarıda açıklanan model silikon hücreler için geçerlidir, ancak bu model kullanılan yarı iletken tipine göre değişiklik gösterebilir.

3.11. Rekombinasyon

Foton enerjisi ile yarı iletkende elektron ve delik çifti oluşur. Bu mekanizmanın tersi bir işlemle, bir elektron bir delikle yeniden birleşir ve enerji ısı veya ışık üretmek için bırakılır [48]. Buna rekombinasyon denir. Yani rekombinasyon fotonun verdiği enerji ile serbest kalmış bir elektronun kontaklara ulaşmaya kadar sahip olduğu enerjiyi koruyamaması ve bir boşlukla birleşerek yok olması olayıdır. Üç temel rekombinasyon vardır. Bunlar;

Radyatif rekombinasyon, doğrudan bant aralıklı yarı iletkenlerde hakim olan rekombinasyon mekanizmasıdır [49].

Işınımsal rekombinasyonda, iletim bandından gelen bir elektron doğrudan değerlik bandındaki bir delikle birleşir ve bir foton salgılar, yayılan foton, bant boşluğuna benzer bir enerjiye sahiptir [49].

Auger rekombinasyonu, üç taşıyıcı içerir. Bir elektron ve bir delik yeniden birleşir, ancak enerjiyi ısı veya foton olarak yaymak yerine, enerji iletim bandındaki bir elektron olan üçüncü bir taşıyıcıya verilir. Bu elektron daha sonra termal olarak iletim bandına geri döner [50]. Auger rekombinasyonu, hücrenin katkılama işleminin neden olduğu yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarında daha belirgindir.

Shockley-Read-Hall rekombinasyonu, hücre içinde olan kusurlar yoluyla oluşan SRH rekombinasyonu olarak adlandırılır. Bu olay tamamen saf, bozulmamış materyalde meydana gelmez. SRH rekombinasyonu iki aşamalı bir süreçtir. Bunlar; Hücredeki kristal kafesteki kusurlar yoluyla sokulan bir elektron (veya delik), yasak bölgedeki bir enerji durumu tarafından yakalanır. Bu kusurlar kasıtsız olarak ortaya çıkabilir veya kasıtlı olarak malzemeye eklenebilir, örneğin bir malzeme katkılanması ile eğer bir delik (veya bir elektron), termal olarak iletim bandına yeniden yayılmadan önce aynı enerji durumuna hareket ederse, rekombinasyon yeniden olur [51].

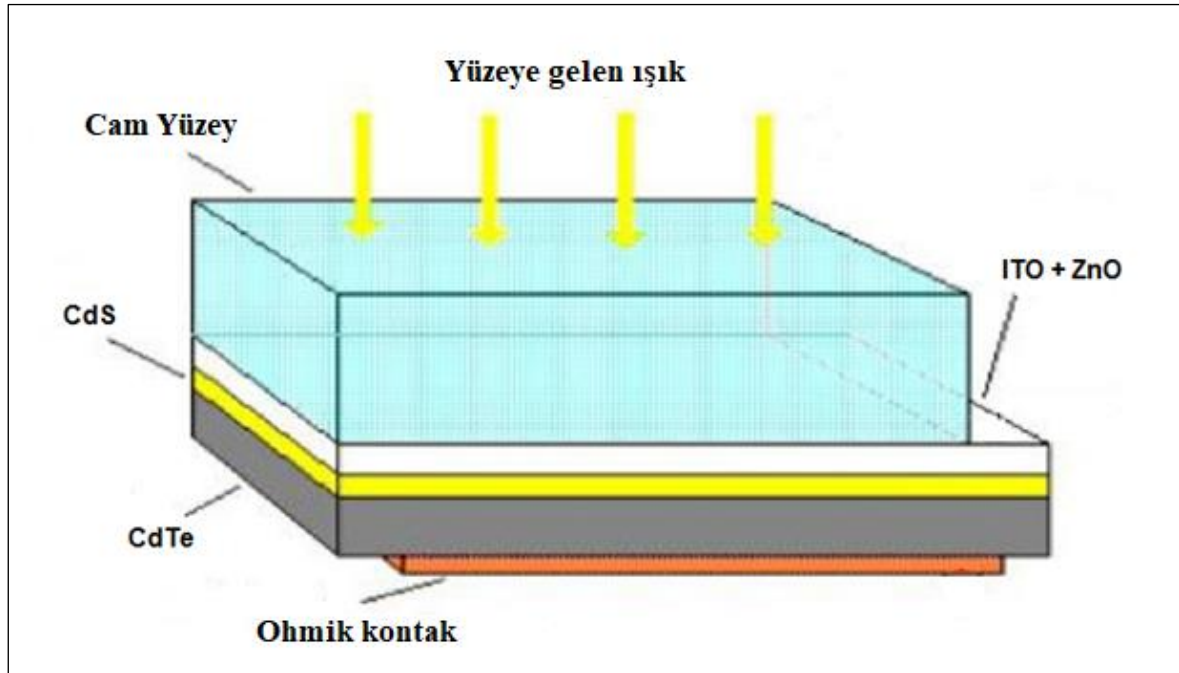
4. YÖNTEM ve METODLAR

4.1. CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS İnce Film Güneş Pili

CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film test hücreleri Verona Üniversitesi'nde (LAPS - Fotovoltaik ve Katı Hal Fiziği Laboratuvarı, Bilgisayar Bilimleri Bölümü) üretilmiştir. Bu bölümde Sb₂Se₃/CdS ve CdTe/CdS ince film güneş pillerinde kullanılan malzemelerin yapısal ve fotoelektrik özellikleri açıklandı. Ayrıca PV laboratuvarında karakterize edilen test pillerinden CdTe/CdS'in fabrikasyon sürecinden kısaca bahsedildi. Sb₂Se₃ katmanlı ince film güneş pili ise geliştirme aşamasında olduğu için fabrikasyon süreci hakkında bilgi paylaşamadı.

4.1.1. CdTe/CdS ince film güneş pili

Karakterize etmek için kullanılan CdTe / CdS ince film hücre superstrate yapıdaki, cam / ITO / ZnO / CdS / CdTe / Cu / Au katmanlardan oluşan hücre mimarisine sahiptir. CdTe/CdS güneş pilleri, üst tabaka (superstrate) konfigürasyonunda alt tabaka (substrate)'ye göre daha iyi bir performansa sahip oldukları için diğer hücrelerden farklıdır [52,53].

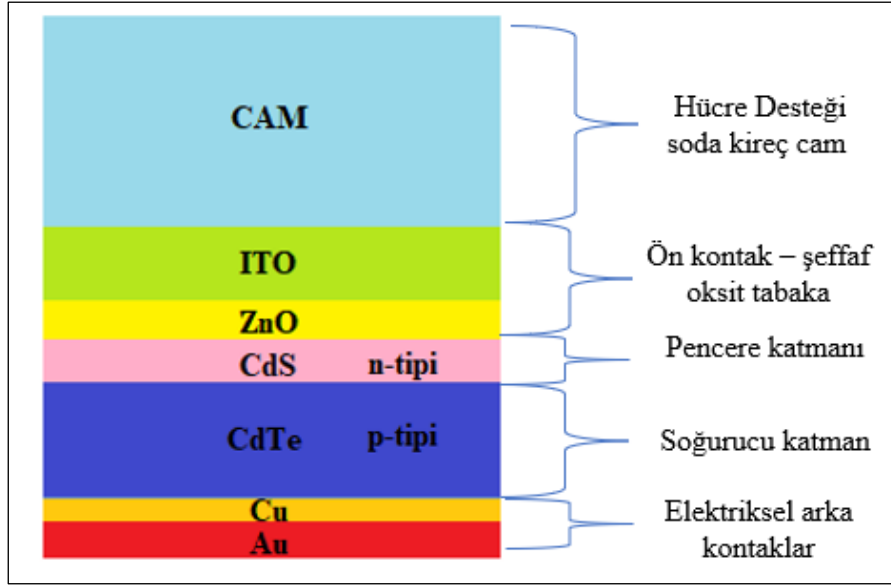


Şekil 4.1. CdTe ince film pilinin superstrate yapısı

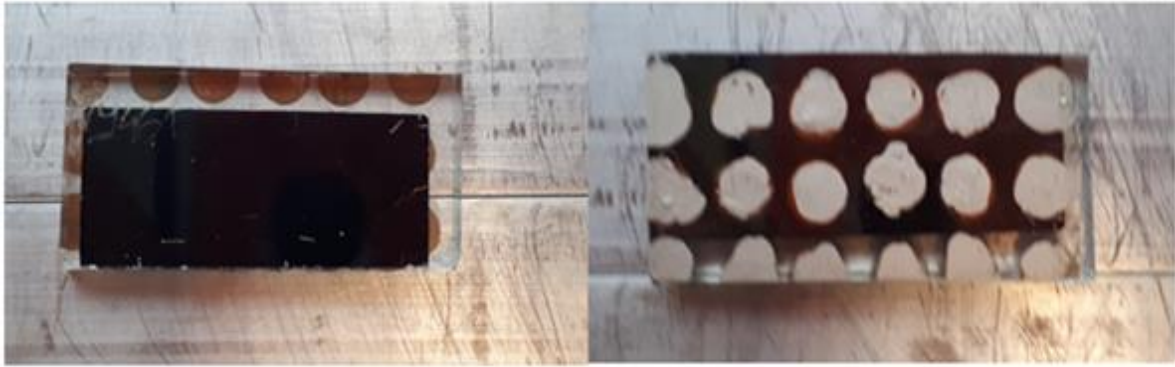
Elektron-boşluk çiftini ayırmak için, CdTe yarı iletkeni bir p-tipi soğurucu katman olarak katkılanmıştır ve CdS ise bir pencere katmanı görevi gören bir n-tipi katkılı malzemedir. Bu CdTe ve CdS yarı iletken katmanları temas ettirildiğinde, p-n hetero-eklemi oluşur [54]. Au-Cu, hücrede kontak malzeme olarak kullanılmıştır. Ayrıca, ITO ve ZnO, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi hücrede ön kontak olarak kullanılmıştır.

4.1.2. CdTe/CdS ince film pili üretim süreci

Bu hücrenin üretim süreci, superstrate konfigürasyonunda ön kontakların soda kireç camı olan şeffaf tabaka üzerine yerleştirilmesiyle başlar. 400 nm kalınlığında şeffaf iletken oksit (ITO) katmanı, ardından 100 nm kalınlığındaki ZnO katmanı radyo frekansı püskürtme (radio-frequency sputtering) ile biriktirilmiştir. Bu katmanlar hücrenin ön temasını oluşturur. Daha sonra 300 nm kalınlığında CdS pencere katmanı ve ardından 6 µm kalınlığında CdTe soğurucu katman vakumla buharlaştırılarak biriktirilmiştir. Bu katmanlar hücrenin p-n eklemine oluşturur. CdTe katmanını yeniden kristalleştirmek ve CdS ile CdTe arasındaki kafes uyumsuzluğunu azaltan $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ bileşiğinin oluşumunu desteklemek için ıslak çökeltme ile aktivasyon işlemi uygulanmıştır ve daha sonra yığın 400°C’de tavlansmıştır. CdCl_2 kalıntıları çıkarmak ve Te bakımından zengin bir tabaka oluşturmak için bromin-metanol çözeltisinde bir aşındırma gerçekleştirilmiştir. Bundan sonra sırasıyla 2 nm kalınlığında Cu tabakası ve 50 nm kalınlığında bir Au tabakası vakumla buharlaştırılarak biriktirilmiştir. Bu katmanlar hücrenin arka temasıdır. İyi verime ulaşmak için havada iki kez son tavlama yapılmıştır. Bakır difüzyonu için ilki 200 °C’de, ikincisi 300 °C’de 30 dk. tavlama süreci uygulanmıştır [25].



Şekil 4.2. CdTe/CdS ince film pilin şematik gösterimi



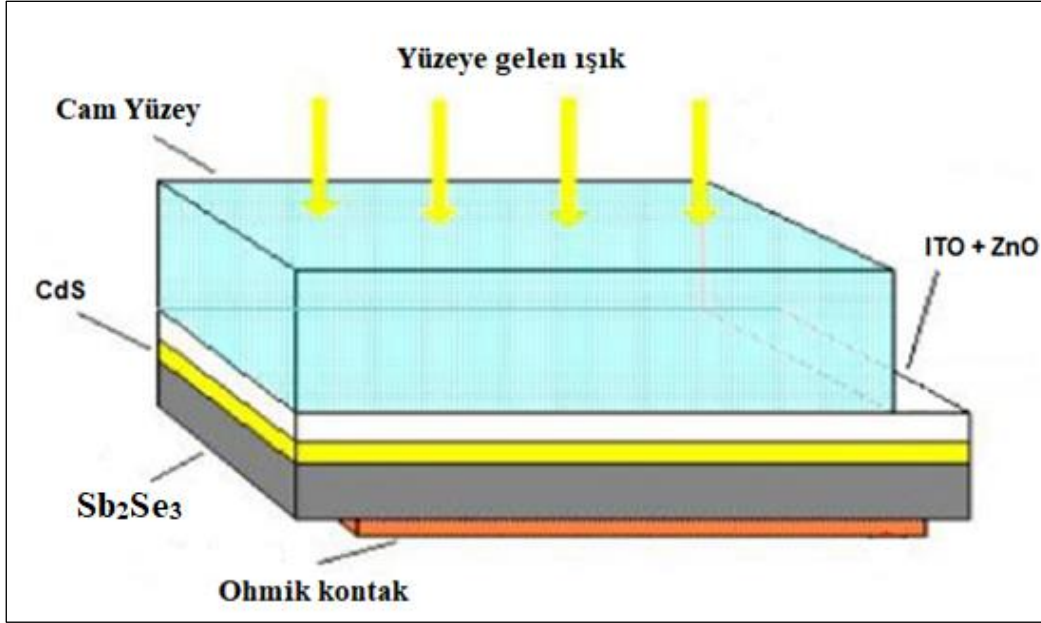
Resim 4.1. CdTe/CdS ince film güneş pili test numunesi

4.1.3. Sb₂Se₃/CdS ince film güneş pili

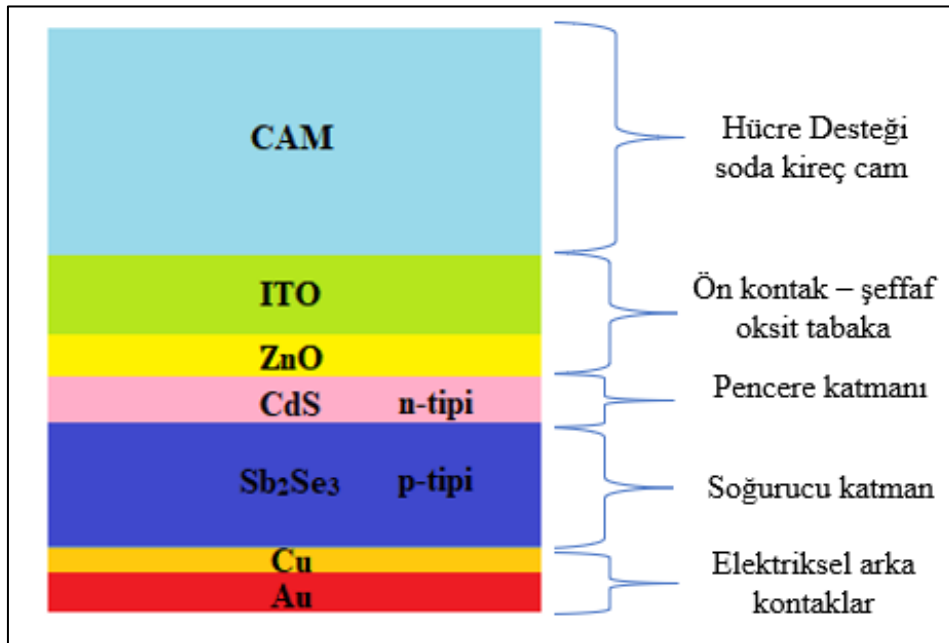
CdTe/CdS hücresine benzer olarak Sb₂Se₃/CdS ince film hücresi de CdTe/CdS hücresiyle aynı mimariye sahiptir. Superstrate yapıdaki hücre cam / ITO / ZnO / CdS / Sb₂Se₃ / Cu / Au katmanlarından oluşan mimariye sahiptir.

Bu Sb₂Se₃ fotovoltaiik malzeme uygun opto-elektronik özellikleri ve çevreye zararı olmayan bileşenleri sayesinde yeni bir alternatif emici tabaka olarak önem kazanmaktadır. Sb₂Se₃ tabanlı güneş pilleri, uygun bant aralığı, yüksek absorpsiyon katsayısı, düşük toksisite, düşük maliyeti ve doğada bol bulunan bileşenleri nedeniyle umut verici bir teknolojidir [15,16]. Elektron-delik çiftini ayırmak için p-tipi soğurucu katman olarak Sb₂Se₃ fotovoltaiik

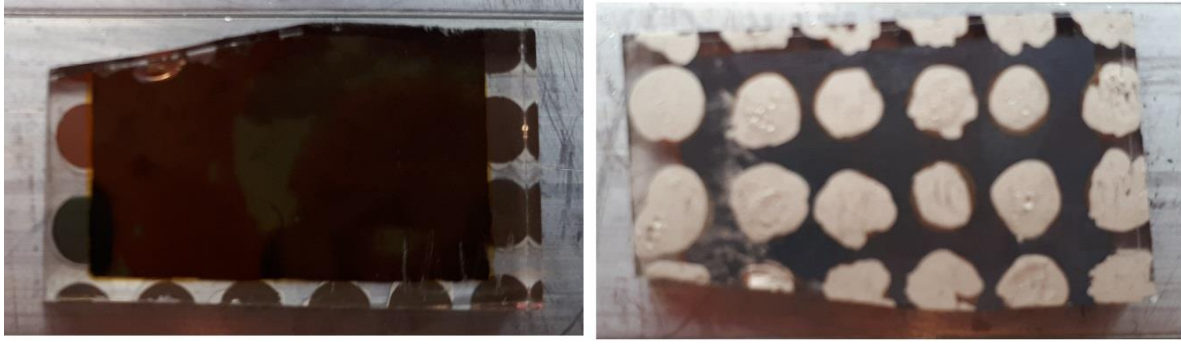
malzemesi ile pencere katmanı olarak görev n-tipi CdS yarı iletken katmanları temas ettirildiğinde p-n heterojonksiyonu oluşur. Au ve Cu Sb_2Se_3 pilinin arka kontağı olarak kullanıldı. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi ön kontak için ise CdTe hücresindeki gibi ITO ve ZnO kullanıldı.



Şekil 4.3. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film pil superstrate yapısı



Şekil 4.4. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film pilin şematik gösterimi



Resim 4.2. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film güneş pili test numunesi

4.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

4.2.1. CdTe soğurucu katmanı

CdTe, sırasıyla 48 ve 52 atom numaralı IIB - VIA bileşik elementlerinden oluşan yarı iletken bir malzemedir. CdTe, onu oluşturan elementlerden çok daha fazla olan 1092 °C'lik bir erime noktasına sahiptir. Kadmiyum erime noktası 321.1 °C ve telluride için 449.5 °C'dir [55]. Bu yarı iletken, elektriksel özellikleri ve büyük ölçekli endüstriyel üretim için yüksek işleme sıcaklıklarına karşı dikkate değer toleransı nedeniyle popüler bir malzemedir. Bu durum, CdTe'nin 1,45 eV olan doğrudan bant aralığı nedeniyle potansiyel olarak iyi bir soğurucu katman olmasını sağlar [55]. Ayrıca, geniş soğurma katsayısı ($1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$) sayesinde sadece birkaç mikron malzemenin fotonların %90'ını soğurmasına izin verir [55]. CdTe taşıyıcı ömrü küçüktür ve 10 ile 100 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ arasında değişir [55]. II-VI bileşiklerindeki kısa optik absorpsiyon uzunluğu aynı zamanda taşıyıcı difüzyon uzunluğunu da oluşturur [55]. CdTe film taneciklerinde difüzyon uzunluğu 1 ile 5 μm arasındadır ve bu nedenle aktif katmanın kalınlığı 1-5 μm arasında olmaktadır [55]. Bu sayede, ince film güneş pilleri daha az miktarda CdTe malzemesi kullanılarak imal edilebilir. Soğurucunun azaltılmış kalınlığı elektrik alanında artışa neden olur [55]. Elektronik olarak, CdTe amfoterik yarı iletken davranış sergiler ve CdTe'nin n ve p-tipi olarak katkı işlemini mümkün kılar [55].

CdTe'nin dezavantajlarından bahsedecek olursak, bu yarı-iletkenin içeriğindeki kadmiyum elementinin toksik bir malzeme olmasıdır [12,56]. Bu nedenle, bu materyalin kullanımı Avrupa Birliği tarafından kısıtlanmıştır.

4.2.2. Sb₂Se₃ soğurucu katmanı

Sb₂Se₃, ikili V₂-VI₃ bileşiği ailesindendir [13]. Sb₂Se₃, CdTe'den daha düşük olan 608 °C'lik erime noktasına sahiptir. Sb₂Se₃ kristalleri 300 °C – 400 °C'de sinterlendiğinde mikron boyutunda elde edilir [13]. Sb ve Se'nin elementel bolluğu, 0.005 ppm olan Te'den sırasıyla 0.2 ve 0.05 ppm daha yüksektir [13]. Sb₂Se₃ avantajlarına rağmen, bant aralığının büyüklüğü ile ilgili raporlarda önemli farklılıklar görülmektedir ve bunun dolaylı ya da doğrudan bant aralığına sahip yarı-iletken malzeme olduğu iddia edilmektedir. Bununla birlikte, Sb₂Se₃ genellikle 1.0-1.2 eV bant aralığına sahip dolaylı bir bant aralıklı yarı iletken olarak rapor edilmektedir [57,58]. İnce film Sb₂Se₃ genellikle p-tipi iletkenlik sergiler [13,58].

4.2.3. CdS pencere katmanı

Kadmiyum sülfür, CdS, sarıdan turuncuya değişen kimyasal bir bileşiktir. Erime noktası 980°C'dir. Bu yarı iletken malzeme, elektriksel ve yapısal özelliklerinden dolayı en çok ince film güneş pillerinde optik pencere katman olarak kullanılır. CdS, daha kısa dalga boyu bölgelerinde spektral yanıtla ilgili bir optik pencere katmanı görevi görür ve CdTe katmanının kristalleşmesi için hayati bir rol oynar. CdS ayrıca, CdS-CdTe ara yüzüne yakın geniş bant aralıklı CdTe_{1-x}S_x karışık kristal katmanlarının oluşumunu da kolaylaştırır. Buda soğurucu katmanın elektriksel özelliklerini iyileştirir [55]. CdS 2,42 eV'lik doğrudan optik bant aralığına sahiptir ve dışarı görünen kısmı şeffaftır ve ışığın soğurucu katmana ulaşmasına izin verir [59].

4.2.4. Ön kontaklar

Şeffaf iletken oksitler (Transparent conductive oxides -TCO), nispeten düşük ışık emilimine sahip elektriksel olarak iletken malzemelerdir [60]. Şeffaf iletken oksitler genellikle ince film hücrelerinin ön kontağı olarak kullanılır. Çünkü ön kontaklar, hücrede ışığın birleşim noktasına girmesine izin verir. Bunun gerçekleşmesi için ön kontağın şeffaf bir malzeme olması ve akımı toplamak için iyi bir iletim kabiliyetine sahip olması gerekir. Hücre mimarimizde ITO ve ZnO şeffaf iletken oksit olarak kullanılmaktadır [61]. İndiyum kalay oksit (ITO), tipik olarak ağırlıkça %90In₂O₃ ve ağırlıkça %10SnO₂ içeren katı bir indiyum (III) oksit (In₂O₃) ve kalay (IV) oksit (SnO₂) çözeltisidir. Bu madde, iyi bir elektrik iletkenliğine ve optik şeffaflığa sahiptir. Çinko oksit, (ZnO) çoğu üretim alanında kullanılan

inorganik bir bileşiktir. Genellikle saf çinko oksitlere, alüminyum ile n-tipi katkı işlemi uygulanır. Bu şeffaf iletken oksit ince filmlerin opto-elektronik özellikleri inert bir gaz veya reaktif gaz atmosferinde termal tavlama ile değiştirilebilir.

4.2.5. Arka kontaklar

Arka kontaklar (altın ve bakır), Sb_2Se_3 ve CdTe ince film güneş hücrelerinde kullanılmıştır. Bakır genellikle malzemelerde iyi bir iletken ve bağlayıcı olarak kullanılır. Bakır $1,7 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ elektriksel dirence ve 385 W/mK ısı iletkenliğine sahiptir. Düşük dirençli bakır, hücrenin performansını artırır. Bu nedenle bakır kalınlığının optimum oranda tutulması gerekmektedir. Bakır, tellür ile iyi bir afiniteye sahiptir ve CdTe'nin kafesinde bakırın hücre difüzyonu gerçekleştirmesi durumunda verimliliği arttırır. Bu etkiler nedeniyle Cu, hücrelerde arka kontak olarak kullanılır. Altın iyi bir iletken ve $2,2 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ elektrik direncine ve 301 W / mK termal iletkenliğe sahiptir. Altın, bakıra mekanik direnç kazandırmak için kullanılır. Çünkü bakır hücre içinde kolayca bozunur. Bakır çökeltmeden önce bromin metanol solüsyonu içinde kimyasal işlem yapılır, bu şekilde yüzey oksidasyonu giderilir. Bu işlem, bir ohmik kontak oluşumunu destekleyen p-tipini daha iletken hale getirmek için tellürün CdTe yüzeyini zenginleştirmek için yapılır. Bakır ve tellürden oluşan bu tür temas, bakırın CdTe içinde yayılmasını sınırlamaya yardımcı olur. Hücrenin doğru işleyişini korumak için bu aşırı difüzyondan kaçınılmalıdır.

4.2.6. Substrat

Soda kireç camı, superstrate konfigürasyonunda ince film hücresi için bir substrat olarak kullanılır. Bu konfigürasyonda güneş ışığı camdan geçmektedir. Soda-kireç-silika cam olarak da adlandırılan soda kireç camı, üretilen en yaygın cam şeklidir. Nispeten ucuzdur ve geri dönüşüme uygundur. Bu camın bileşimi üreticiye bağlı olarak değişir. Tipik bileşim ağırlıkça %70-75 SiO_2 , ağırlıkça %12-16 Na_2O ve ağırlıkça %10-15 CaO 'dur. Mekanik ve termal direnç, düşük pürüzlülük ve iyi yapışma özellikleri, substrat malzemesi için istenen özelliklerdir. Aradığımız bir diğer özellik ise hücreyi daha hafif ve daha esnek hale getirmektir.

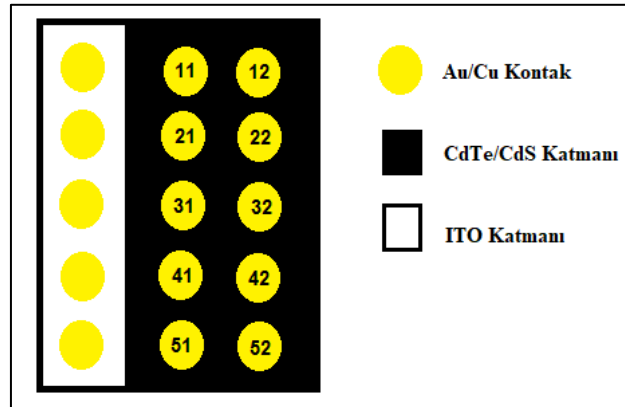
4.3. Deneysel Kurulum

Bu bölümde ince film güneş pillerini karakterize etmek için yapılan deneysel testler ve bu testleri yaparken kullanılan araçlar anlatılmıştır.

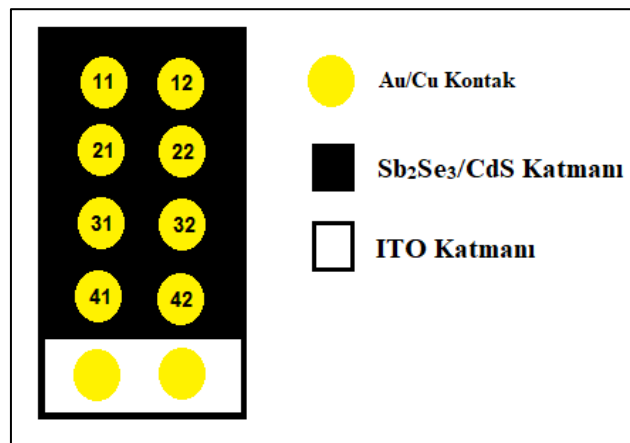
Çizelge 4.1. Kullanılan ince film güneş pili malzemeleri ve kalınlığı

	Cam (mm)	Ön Kontaklar	Soğurucu Katman	CdS (nm)	Cu (nm)	Au (nm)
Pil - 1	3	ITO/ZnO	CdTe - 6 μm	300	2	50
Pil - 2	3	ITO/ZnO	Sb ₂ Se ₃ - 700 nm	150	0.3	30

CdTe ve Sb₂Se₃ pillerinin her biri, kendi içinde şekil 4.5 ve 4.6’da görülebileceği gibi karışıklığı önlemek için numaralandırılmıştır.

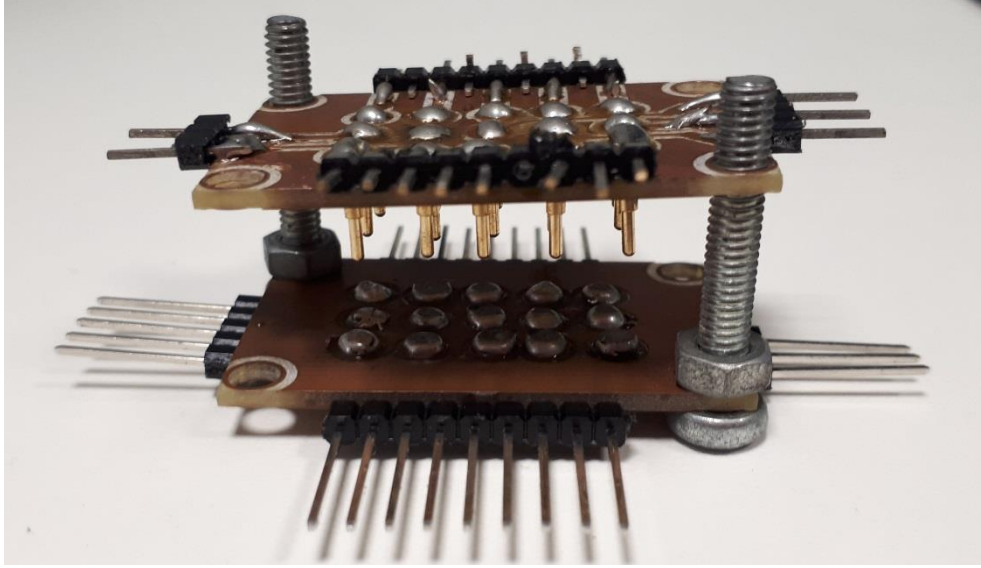


Şekil 4.5. CdTe/CdS ince film güneş pili hücreleri



Şekil 4.6. Sb₂Se₃/CdS ince film güneş pili hücreleri

İnce film güneş pili numunesinin testini gerçekleştirmek için numune tutucu (Resim 4.3) kullanıldı, bu numune tutucu tüm hücrelerle temas kurmamıza izin verir, ancak numuneyi söküp çıkararak bakır ve altın temasının bulunduğu alan zamanla bozunur ve hücre içinde temas kaybına neden olabilmektedir.



Resim 4.3. Hücre tutucu

4.4. Karakterizasyon

Bir hücreyi karakterize etmek, hücre davranışını tanımlayabilecek tüm bilgileri toplamak ve bilmek anlamına gelir. CdTe ve Sb_2Se_3 ince film güneş pillerini karakterize etmek için dış kuantum verimliliği, aydınlıktaki akım-gerilim karakteristiği, karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği ve PVD ölçümleri yapılmıştır.

Aydınlıktaki akım-gerilim ölçümlerinden V_{OC} , I_{SC} , dolum faktörü, verimlilik, maksimum güç değerleri hücre parametreleri elde edildi. Karanlık ortamdaki akım-gerilim değerlerinden ve PVD ölçümlerinden şönt direnci, seri direnç ve idealite faktörü verileri elde edildi.

Bu deneysel veriler matlab komut dosyası kullanılarak oluşturuldu. Bu matlab komut dosyası, Cern'de Fred James tarafından geliştirilen minuit2 kütüphanesini kullanmaktadır. Minuit2, fonksiyon minimizasyonu için kullanılan fizik analiz aracıdır. Bu kütüphanenin başlıca kullanım alanı, Cern'de kaydedilen deneysel verilerin istatistiksel veri analizidir.

Piller ilk olarak oda sıcaklığında karakterize edilmiştir. Test pillerinin dış kuantum verimi, Loana adı verilen cihaz kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 5.8). Bu cihaz her ölçümden önce kalibre edildi ve pil hücre kompartımana pilin içindeki her bir hücrenin ölçümü yapılacak şekilde yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirildi. Güneş pilinin aydınlık ortamda akım-gerilim karakteristiği keithley cihazı (Şekil 4.10) ile voltaj uygulanarak solar simülatör yardımıyla 1,5 AM ve ışık şiddeti 1 kW / m² olacak şekilde I-V (akım – gerilim) karakteristiği elde edildi.

Burada θ dikey açıdır. Güneş tam tepedeyken Hava kütlesi 1'dir. (Eş. 4.1);

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (4.1)$$

Karanlıkta akım-gerilim ölçümü, keithley 2651a cihazı ile voltaj uygulanarak pil karanlık durumda karakterize edilir.

Pilin PVD ölçümü, ışık darbesi ile güneş pilinde bir voltaj düşüşü oluşturup osiloskop ile ölçülmesinden oluşan bir ölçüm tekniğidir. Işık darbesi 100 Hz frekansında, Agilent ve sinyal üretici rigol tarafından yönlendirilen led ile üretilmiştir.

4.5. Termal Karakterizasyon

Pillerin genel olarak ilk karakterizasyonu yapıldıktan sonra pillerin termal karakterizasyonu yapıldı.

Çizelge 4.2. Pillerin fırında tutulduğu sıcaklık ve zaman

Aşama	Süre (Dakika)	Temperature (°C)
1	10	25 °C
2	10	35 °C
3	10	45 °C
4	10	55 °C
5	10	65 °C
6	10	75 °C
7	10	85 °C
8	10	95 °C
9	10	105 °C

İnce film güneş pillerinin termal karakterizasyonunu yapmak için numuneler her adımda sıcaklığı 10°C arttırarak 25°C'den 105°C'ye kadar fırında tutulmuştur. Bu aşamaların her birinde fırının içinde homojen bir sıcaklık oluşması beklendi ve hücre 10 dakika süre boyunca fırında tutuldu. Hücre fırında tutulduğu ve ölçümler fırında yapıldığı için bu noktada EQE ölçümü yapılmamıştır. Bununla birlikte, aydınlık ortamda akım-gerilim, karanlık ortamda akım-gerilim ve foto-voltaj düşüşü, ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen parametreler grafiğe dökülmüştür.

Termal karakterizasyonun amacı, hücrelerin farklı sıcaklıklardaki davranışlarını görmektir. Bu testte sıcaklık değişiminin numunenin performansını nasıl etkilediğini ve diğer parametreleri ne yönde değiştirdiğini görüyoruz. Sıcaklığın hücreler üzerindeki etkisi teorik olarak bölüm 3.6'da matematiksel denklemlerle açıklanmıştır.

4.6. Işık Şiddetinin Etkisi

Güneş pilleri, gerçek dünya koşullarında düşünüldüğünde, güneşten gelen ışık yoğunluğunda günlük değişimler yaşanır. Işık yoğunluğunun piller üzerindeki etkisini görmek için piranometre ve güneş simülatörü kullanıldı. Bu deneyde, güneş simülatörü kalibre edildi ve farklı ışık şiddeti altındaki pillerin performansını izlendi. Solar simülatörün altında, hücreyi her zaman aynı konumda tutmamızı sağlayan ve bu sayede hücrenin merkezine ışığın gelmesini sağlayan bir numune tutucu bulunmaktadır. Piranometre sayesinde güneş simülatörü kullanılarak pil üzerine gelen ışık yoğunluğu 500 W/m²'den başlayarak her adımda ışık yoğunluğunun şiddeti 500 W/m² artırılarak 3000 W/m²'ye kadar pillerin akım-gerilim karakteristiği dair veriler elde edilmiştir.

4.7. Kullanılan Cihazlar

Bu bölümde pillerin karakterizasyonu için kullanılan cihazlar anlatılmaktadır.

4.7.1. Keithley 2651A

Keithley 2651A, yüksek güç elektroniklerini test etmek için tasarlanmıştır. Bu alet yapılan araştırmaların analizine yardımcı olmaktadır. Özellikle Keithley 2651A SMU, yarı iletkenler, piller ve güneş pilleri olan yüksek voltaj / akım elektroniklerini karakterize etmek

ve test etmek için kullanılır. Bu alet ile gerilim ve akım dalga biçimleri oluşturmak mümkündür.

Bu enstrümanın (Keithley 2651A) iki ölçüm modu vardır ve her birinin kendi analog / dijital dönüştürücüsü vardır. Geçici karakteristikleri doğru bir şekilde ölçmemize izin veren ilişkili dönüştürücü ile birlikte ayrıca bu modelde, 22 bitlik bir A / D dönüştürücüye güvenerek ölçümleri iyileştirme şansı veren entegre ölçüm modu bulunmaktadır.



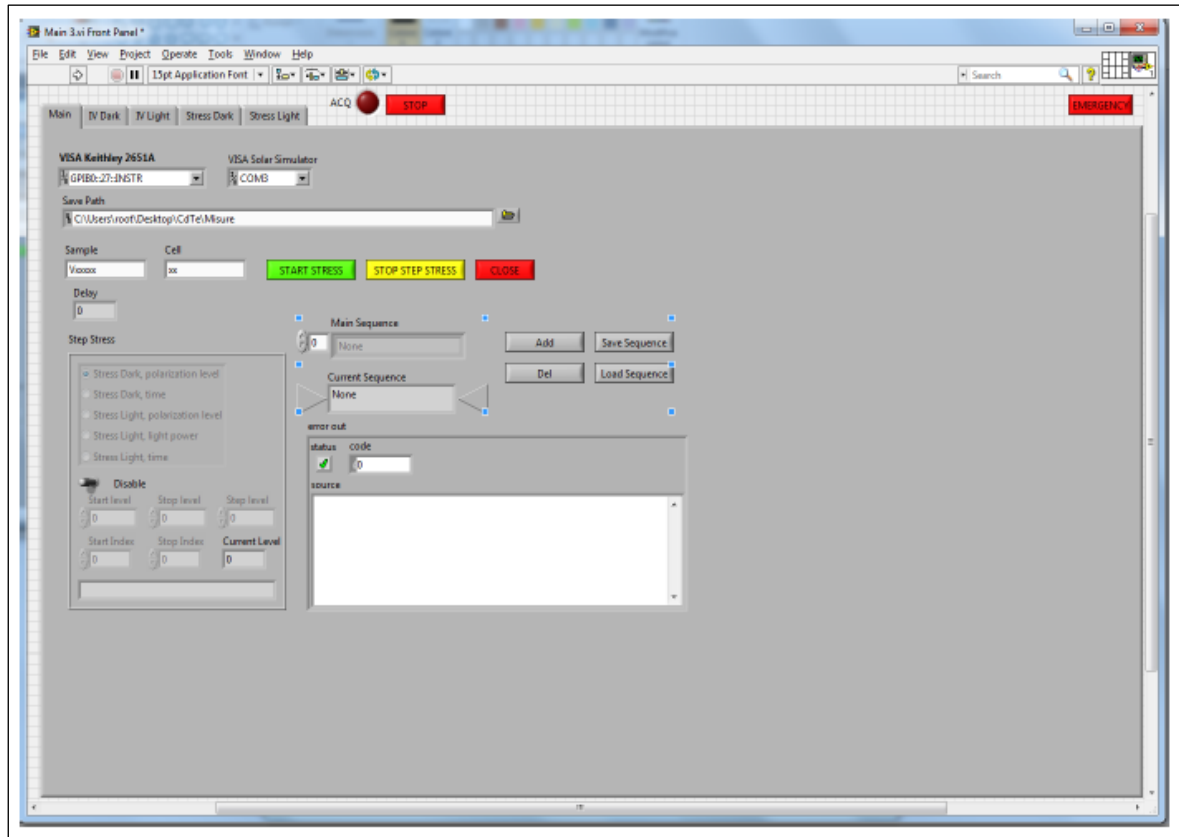
Resim 4.4. Keithley 2651A

Ek olarak bu model, LAN, RS-232 veya GBIP olan uzak arabirim tarafından kontrol edilebilecek bir özelliğe sahiptir. Bu cihaz yerel Alan Ağı (LAN) iletişimi, ölçeklenebilir ve işlevsel test veya veri toplama sistemleri oluşturmak için büyük ölçüde esneklik sağlamak için kullanışlıdır. RS-232 arayüz iletişimi, IEA (The electronic Industries Alliance) standartlarını uygulayan bağlantı noktası sağlar. Bu tür bir bağlantı, cihazlardan büyük miktarda veri alışverişi için düşük iletim hızlı iletişim için kullanılır.

GBIP (Genel Amaçlı Arayüz Veriyolu), donanım ve programlama standartlarına sahip IEEE-488 (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) enstrümantasyon veri yolunu kullanır. Kısaca bu cihaz, düşük veya yüksek akımlarda (50A'ya kadar) ve farklı voltajlarda çalışmamıza izin verir. Ayrıca cihaz, testler sırasında kendi kendine ısınmanın istenmeyen etkilerini en aza indirmeye izin vermektedir.

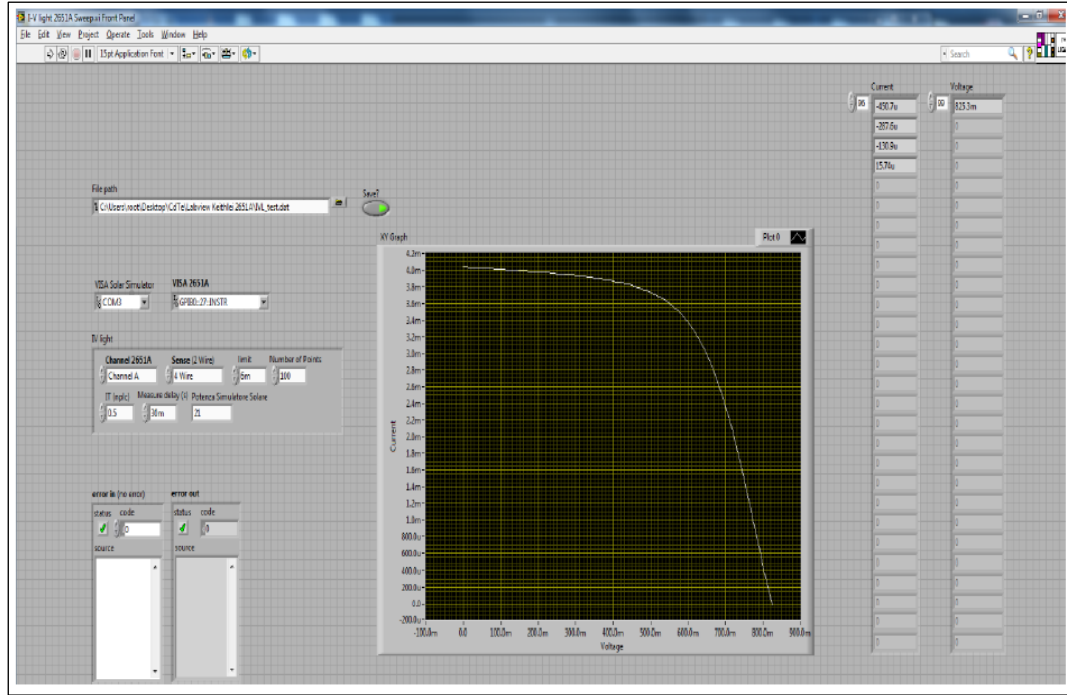
4.7.2. Labview arayüzü ve ölçümler

Laboratuvar Sanal Enstrüman Mühendislik Tezgağı (Labview) bir sistem tasarım platformudur. Labview, çeşitli işletim sistemlerinde veri toplama, cihaz kontrolü ve endüstriyel otomasyon için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullandığımız laboratuvar bilgisayarında bir ".dat" dosyası oluşturan labview arayüzünü kullanılır ve bu veriler Matlab veya excel'de detaylandırılabilir. Bu yapılan çalışmamız da deneysel ölçümlerden sonra, labview arayüzü ile üretilen veriler Microsoft Excel'de incelenmiştir.



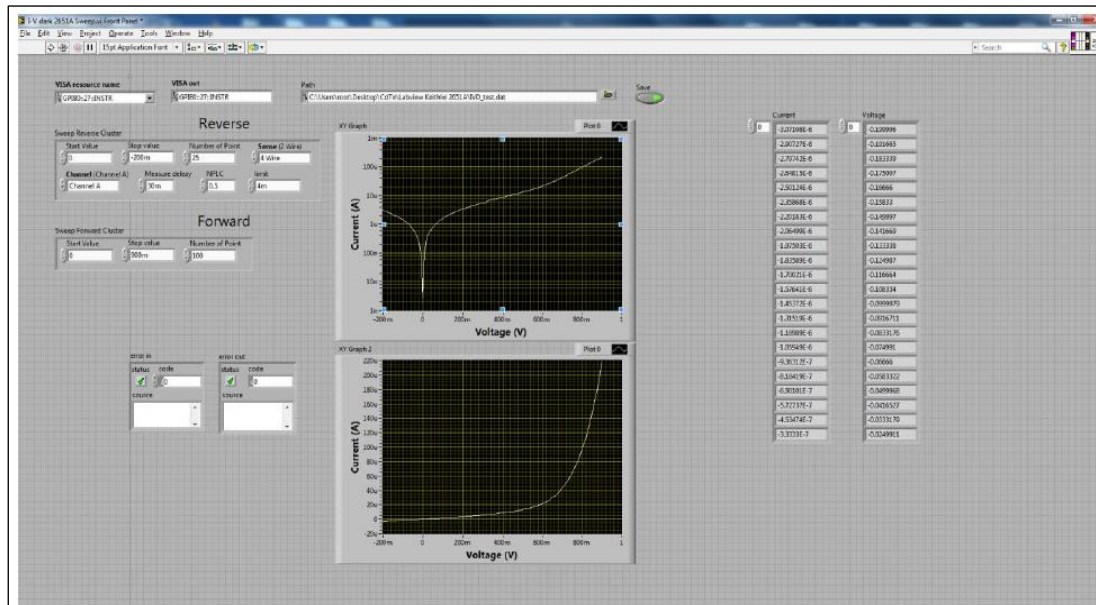
Şekil 4.7. Keithley 2651A'yı yönetmemizi sağlayan Labview program arayüzü

Bu labview arayüzü ile karanlıkta IV, aydınlık IV, akım stres testi ve gerilim stres testini uygulayabiliriz. Her ölçümde grafik gösterilir ve bir ".dat" dosyası verileri (sayısal veriler), başlıklı bir dosya adı ile bilgisayara kaydedilir. Karışıklığı önlemek için belirli bir yöntem izlenmelidir. Numuneyi ve numune içindeki her hücreyi adlandırdıktan sonra, deney yapmak için gerekli ölçüm değerleri alınır ve ölçüm verileri (akım, gerilim, zaman, frekans vb.) istediğimiz koşullar girilir. Tüm parametreler yerleştirildikten sonra, stresse başla menüsünden (start stress) ve ölçüm gerçekleştirilir.



Şekil 4.8. I-V Light kontrol arayüzü

Keithley'e ek olarak aydınlıkta I-V karakterizasyonunu gerçekleştirmek için güneş simülatörünü yönetmek de gereklidir. Güneş simülatörü, V_{oc} 'yi hesaplamak için birkaç saniyelik ilk ateşlemeyi yapar. Şekil (4.8), aydınlık ortamda I-V karakterizasyonunun bir örneğini göstermektedir. Grafikte gördüğümüz gibi, sayısal veriler de ".dat" dosyasına kaydedildi ve sonuçları incelemek için microsoft excel'de grafik ile incelenmektedir.



Şekil 4.9. I-V Dark kontrol arayüzü

Karanlık ortamda IV ölçümü, şekil (4.9) 'da görüldüğü gibi doğrusal veya logaritmik olarak grafiğe dökülmektedir. Keithley cihazı ile programda akım / voltaj taraması gerçekleştiririz ve kullandığımız program ile hücredeki akımı algılamak için verilen voltaj değiştirilir. Kaydedilen grafik ve sayısal veriler Microsoft excel veya matlab sonuçları incelemek için değerlendirilir.

4.7.3. Güneş simülatörü

Güneş simülatörü (yapay güneş), doğal güneş ışığına yaklaşan aydınlatma sağlayan bir cihazdır.



Resim 4.5. Güneş Simülatörü

Resim (4.5)'teki bu güneş simülatörü, güneş pilinin çalıştığı frekanslar etrafında güneş ışınımına benzer bir yapay ışınım yaymak için kullanılmaktadır. Bu simülatör, hücreyi yere sabitlemek için alüminyum destek ve ahşap tutucudan oluşur. Mesafe ve konum, tüm hücreyi bir güneşin ışık yoğunluğuna maruz bırakmak için dikkatlice ölçülür. Bu cihaz, besleme ünitesi ve numune bölmesi olmak üzere iki birimden oluşmaktadır. Temel kısım, güç

kaynağı ile beslenen ve Labview ve Matlab'da geliştirilen yazılımlarla bilgisayar kontrollü olan led matrisidir.



Resim 4.6. Led matrisi



Resim 4.7. Güç kaynağı

Güç kaynağı, giriş gücünü led matrisini ve düzeneği kontrol için kullanılan bilgisayara uygun olan DC akımına dönüştürür. Üretilen ısıyı led ve hücre yeri tarafından dağıtmak için soğutma kanatlı ısı emici tarafından oluşturulan soğutma sistemi kullanılır.

4.7.4. Loana ve EQE ölçümü

Loana, PV-tools GmbH tarafından tasarlanmış bir sistemdir. Bu, genel olarak silikon güneş pilinin analizini yapmak için bir ölçüm cihazıdır. Bu sistem ayrıca tek bir kompakt aparatta çeşitli ölçüm yöntemlerine sahiptir. QE (kuantum verimliliği), elektrolüminesans, kısa devre akımı, IV Karanlık, IV aydınlık ve diğer ölçümler yapılabilir.



Resim 4.8. PV-Tools tarafından loana sistemi

Loana üç üniteden oluşan kompakt sistemdir.

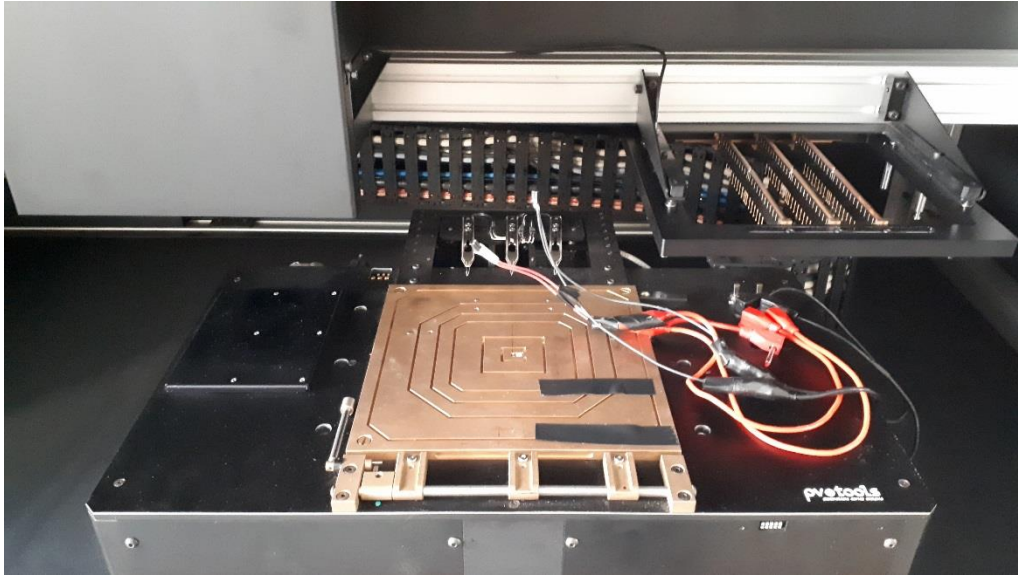
Makinenin sol tarafında monokromatik ışık kaynağı ve güç kaynaklarından oluşan besleme ünitesi bulunmaktadır.

Ortada xyz yönünde hareket edebilen masalı, kameralı, optikli ve motor stoplu numune bölmesi bulunmaktadır.

Makinenin iki monitörlü kontrol bilgisayar, ölçülü kontrol rafı, kontrol elektroniği ve acil stop bulunmaktadır.



Resim 4.9. Loana güç kaynağı ünitesi ve monokromatik ışık kaynağı



Resim 4.10. Loana sistemi numunenin yerleştiği orta kısım

Loana sistemi yukarıda bahsedildiği gibi, silikon hücreleri karakterize etmek için oluşturulmuştur ancak silikonlardan farklı olarak CdTe, Sb₂Se₃ gibi ince film hücrelerinin sadece EQE (external quantum efficiency) ölçümleri için de kullanabilmekteyiz. Çünkü silikon hücreler için yapılan bu ölçüm ince film hücreler için de oldukça benzerdir. Ancak,

loana sisteminin kullandığı spektrum, CdTe ve Sb₂Se₃ hücrelerinin absorbe ettiği ışık spektrumundan farklı olduğu için I-V aydınlık ve I-V karanlık gibi farklı ölçümler yapmak mümkün değildir.

Monokromatik ışık kaynağı; QE (kuantum verimliliği) analizi, monokromatik bir ışık kaynağı tarafından gerçekleştirilir. Bir monokromatör, daha geniş bir dalga boyu aralığından seçilen ışık veya radyasyonun mekanik olarak seçilebilir dar bir dalga boyu bandını ileten optik bir cihazdır. Bu ışık kaynağı loana sisteminin temel parçasıdır. Bu ışık, 250 W tungsten halojen lamba ve diğeri 300 W Xe ark lambası olmak üzere iki ışık kaynağı tarafından üretilir. Önceden tanımlanmış dalga boyları ile çok renkli bir ışığın ışık spektrumu, monokromatör tarafından monokromatik ışığa ayrıştırılır.

Bir optik kıyıcı kullanılarak, ışık kaynağı, yanlı ışıktan ayırt etmek için monokromatöre girmeden önce 375 Hz'de modüle edilir. Monokromatik ışıkla, hücreyi 2x2 cm² veya 1,5 mm x 10 mm şerit veya yaklaşık 1,5 mm x 3 mm odak noktası üzerinde aydınlatmak için üç yol seçmek mümkündür. Çünkü bize tedarik edilen CdTe ve Sb₂Se₃ ince film hücreleri 0.125 cm² alana sahiptir. Bu yüzden odak noktasını 1,5 mm x 3 mm ölçülerinde aydınlatma konumlandırılmıştır.

Monitör hücresi; kötü konumlandırma ve bozulma, EQE ölçümlerinde büyük bir belirsizlik gösterir, bu nedenle sistem her seferinde yeniden kalibre edilmelidir. Sistem ilk açıldığında ve her 20 dakikada bir yeniden kalibrasyon yapılır. Kalibrasyon ve ölçüm arasındaki monokromatik ışığın yoğunluğundaki değişiklikleri hesaba katmak için bu ödünç sistem iki monitör hücresi kullanır. Ayrıca, biri kısa dalga boyu için kullanılan silikon, diğeri 800 nm'den büyük uzun dalga boyları için kullanılan germanyum dedektörü olmak üzere 2 dedektör vardır.

Bias aydınlatma; genellikle güneş pilleri EQE ölçerken doğrusal davranış göstermez, kısa devre akımı ışığın yoğunluğu ile tam olarak orantılı değildir. Hücrelerin yüksek akım koşullarında seri dirençleri ve daha da önemlisi rekombinasyon parametreleri bu olgunun gerçek nedenidir. Ayrıca hücredeki rekombinasyon parametreleri taşıyıcı konsantrasyonuna bağlıdır. Bu nedenle, monokromatik ışığa ek olarak, bir güneşe (1000W/m²) kadar yoğunluğa sahip beyaz yanlı ışık gereklidir. İki ışık kaynağından kaynaklanan kısa devre

akımlarını ayırmak için optik kıyıcı kullanılır. Son olarak, aynı faz ve frekansa sahip akım sinyalinin ayırmak için Lock-in amplifikatörler kullanılır.

Entegre küre; yansıma spektrumunu ölçmek için kullanılır, çapı 11 cm'dir ve içi baryum sülfat (BaSO₄) ile kaplanmıştır. Küre, numune portu ile güneş pili arasında yaklaşık 300 µm yer almaktadır. Yansıyan ışık küre tarafından toplandığında, iki dedektörden (Si ve Ge) biri tarafından ölçülür. Hem difüzyonla yansıyan ışığı hem de speküler olarak yansıyan ışığı algılamak için gelme açısı 8° eğimlidir. Bu şekilde ayna bileşeninin giriş kapısından bütünleştirici küreden çıkması engellenmiştir. Dahili deflektörler, dedektöre çarpan ışığın en az bir kez duvarlardan yansımalarını sağlar. Bu sistem sayesinde küre, yansımanın ve dolayısıyla EQE'nin hesaplanmasına izin verir.

Dış kuantum verimliliğinin hesaplanması; dış kuantum verimliliği (EQE), güneş pili tarafından toplanan yük taşıyıcılarının sayısının, güneş pili üzerinde dışarıdan parlayan belirli bir enerjinin fotonlarının (olay fotonları) sayısına oranıdır.

$$EQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{photons/sec}}, \quad EQE = \frac{\text{collected charges at give wavelength}}{\text{photons in a given wavelength}}, \quad EQE = \frac{J_{sc}/q}{P_0 \lambda / hc} \quad (4.2)$$

EQE hesaplanırken, numunenin dış kuantum verimliliği EQE_{örnek}, bilinen kuantum verimliliği EQE_{kal}'e sahip bir referans göre belirlenir. Loana her açıldığında ve ölçümler sırasında yaklaşık 30 dakikalık aralıklarla kalibrasyon gerçekleştirilir, sırasıyla kalibrasyonun kısa devre akımının sinyali (S_{Jsc,kal}) ve diyod monitörün sinyali (S_{mon,cal}) olan iki temel sinyal alınır. Örnek EQE;

$$EQE_{\text{örnek}}(\lambda) = EQE_{\text{kal}}(\lambda) \cdot \frac{S_{Jsc}(\lambda)}{S_{Jsc,kal}(\lambda)} \cdot \frac{S_{mon,kal}(\lambda)}{S_{mon}(\lambda)} \quad (4.3)$$

EQE_{örnek}, talep edilen EQE'dir,

EQE_{kal}, kalibrasyon için kullanılan bilinen EQE'dir,

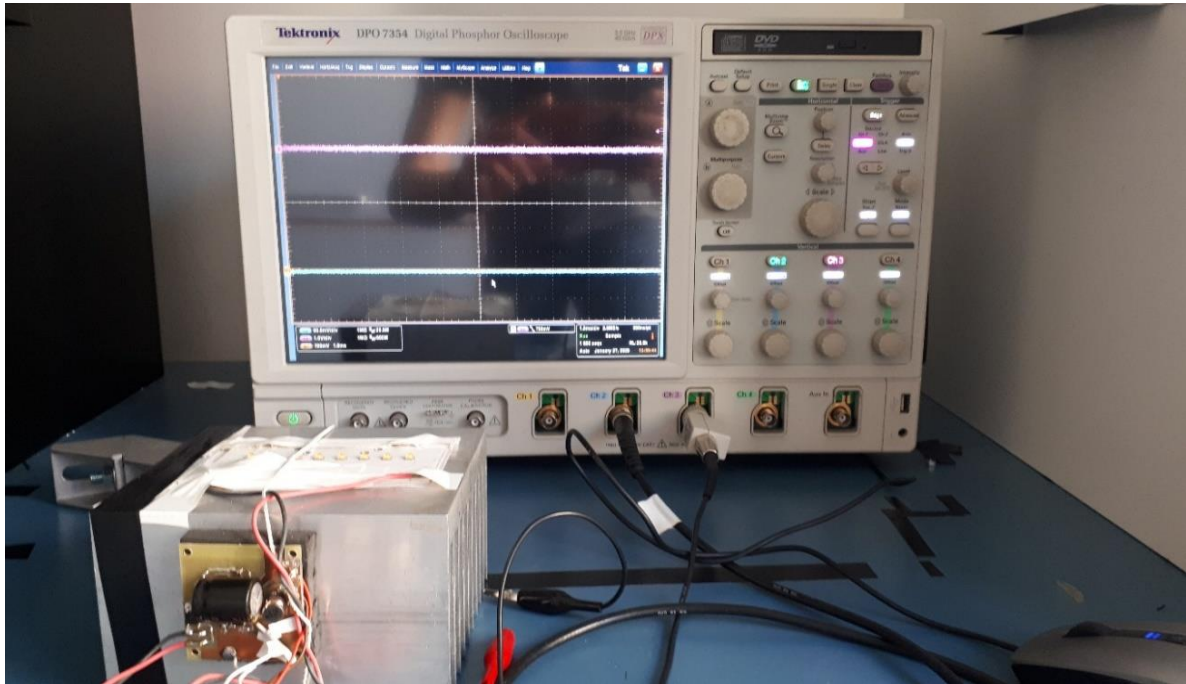
S_{Jsc}, örneğin ölçülen I_{sc} sinyalidir,

S_{mon}, örneğin ölçülen monitör diyot sinyalidir,

S_{mon,kal}, kalibrasyonun ölçülen monitör diyot sinyalidir.

4.7.5. Tektronix dijital fosfor osiloskop DPO 7354

Bir osiloskop, zamanın bir fonksiyonu olarak değişen sinyal voltajlarını grafiksel olarak gösteren elektronik bir araçtır. Osiloskop, bir elektrik sinyalinin zaman içindeki değişimini, voltaj ve zamanla, kalibre edilmiş bir ölçekte sırasıyla x ve y eksenleri olarak görüntüler [28]. Tektronix DPO 7354, seri ve dijital uygulamalar için 3.5 GHz bant genişliği modeline sahip 4 kanallı bir dijital osiloskoptur. Bir kanalda 40GS/s'ye kadar gerçek zamanlı örnekleme hızı ve dört kanalın tamamında 10GS/s'ye kadar. Düşük frekanslarda daha iyi ölçüm doğruluğu için bant genişliği sınırlayıcı filtrelerle sahiptir. Bu osiloskop cihazı, işletim yazılımı ile bir bilgisayar işlevine sahiptir ve verilerin arşivlenmesi, yazdırılması ve kaydedilmesi için USB arabirimine sahiptir. Bu osiloskop, sinyal bütünlüğü, zamanlama analizi, geçici olayların araştırılması, güç ölçümü ve analizi, spektral analiz vb. için kullanılabilir. Bu çalışmada osiloskop cihazı hücrenin OCVD (açık devre voltaj düşüşü), PVD (foto-voltaj düşüşü) ölçümlerini yapmak için kullanıldı.



Resim 4.11. Tektronix dijital osiloskop DPO 7354

4.7.6. Agilent E3649A güç kaynağı ünitesi

Agilent E3649A, programlanabilir bir DC güç kaynağı ünitesidir. 30 W - 100 W çıkış gücüne sahiptir. Hem kısa devre hem de aşırı gerilimlere karşı korumalı iki çıkış ile donatılmıştır.

Bu güç kaynakları birimi, bir GPIB (IEEE-488) kartı veya RS232 arabirimi ile herhangi bir PC'ye uyarlanabilen uzak arabirimi destekler. Bu cihaz, ışık kaynağını PVD, OCVD ölçümleriyle modüle etmek için kullanılmıştır.



Resim 4.12. Agilent E3649A

4.7.7. Rigol DG 5071

Rigol DG5071, çeşitli frekans ve genliklerde çeşitli voltaj modelleri üretebilen bir sinyal üretici veya fonksiyon üretici cihazıdır. Rigol fonksiyon üretici, RS-232 tipi arayüz olan bir uzak arayüze, bir Lan portuna ve normal GPIB arayüzüne sahiptir.

Bu cihaz yaygın kullanımı, devrelerin bilinen bir giriş sinyaline tepkisini test etmektedir. Çoğu fonksiyon üretici sinüs, kare veya üçgen AC dalga fonksiyon sinyalleri üretmemize izin verir.

Bu cihaz OCVD ölçümü sırasında kullanılmıştır, modülasyon kartına 100 Hz frekanslı bir kare dalga aracılığıyla 0-2 V arasında bir tepeden tepeye voltaj uygulandı. Fonksiyon üreticini osiloskopa bağlayarak üretilen sinyalleri görebiliriz. Led, ışık darbesi üretmek için kare sinyallere ihtiyaç duyar. Böylece veri toplama işlemini yeterince halledebiliriz.



Resim 4.13. Rigol DG5071

4.7.8. Havalandırma fırını

Havalandırma fırını, hücrelerin kısa süreli termal strese maruz bırakmak için kullanılmıştır. Bu fırın, hassas uygulamalara uygun cebri havalandırmalı fırın tipi M400-vf modelidir. Bu fırının sıcaklık kontrolü, iyi bir stabilite sağlamak için termoregülatör tarafından stabilize edilir. Sıcaklık görüntüleme doğruluğunu $\pm 1^{\circ}\text{C}$, a $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ arasında değiştirmek mümkündür.



Resim 4.14. M400-VF Tipi Havalandırma Fırını

Fırın, ısı kaybını önlemek için silikon contalı çift yalıtımlı kapıya sahiptir. Koruma için fırının görsel alarm güvenlik termostatu (+50°C ile +280°C arası) ve manuel sıfırlama vardır. Ayrıca, eşit ısıtmayı garanti etmek için ısıtma elemanları bir ön oda içine yerleştirilmiştir.

4.7.9. Piranometre



Resim 4.15. LP PYRA 08

Piranometre, düz bir yüzeye gelen güneş ışınımının değerini ölçen bir cihazdır. Işınım birimi (SI cinsinden) W/m^2 . Bu cihaz çevresel, iklimsel durumlarda ve fotovoltaiik sistemlerde kullanılmaktadır. Çalışması, siyah ve beyaz bir yüzey arasındaki sıcaklık farkının ölçülmesine dayanır. 305 nm ultraviyolede 2800 nm kızılötesine kadar geniş bir güneş radyasyonu spektrumu bandını ölçmeye izin verir.

Piranometre, deneyimizde solar simülatöre kalibre etmek ve 3000 W/m^2 'ye kadar farklı ışık yoğunluğunda hücrelerin gücünü izlemek ve hücrelerin dayanma kabiliyetini görmek için kullanılmıştır.

Delta Ohm tarafından üretilen piranometre “LP Pyra 08” ait teknik özellikler;

Tipik hassasiyet 10 mV (kW/m^2)

Empedans 5 – 50 Ω

Görüntüleme alanı $2\pi sr$

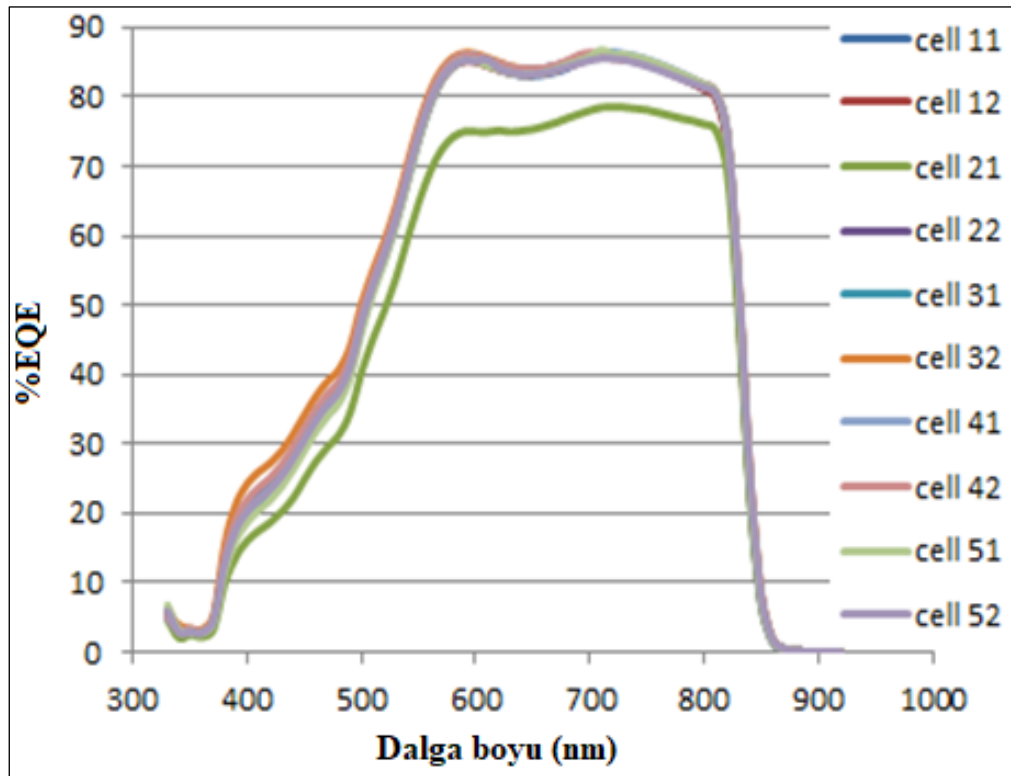
Spektral Alan 305 nm – 2800 nm

Çalışma Sıcaklığı 40 – 80 °C

5. BULGULAR VE İRDELEME

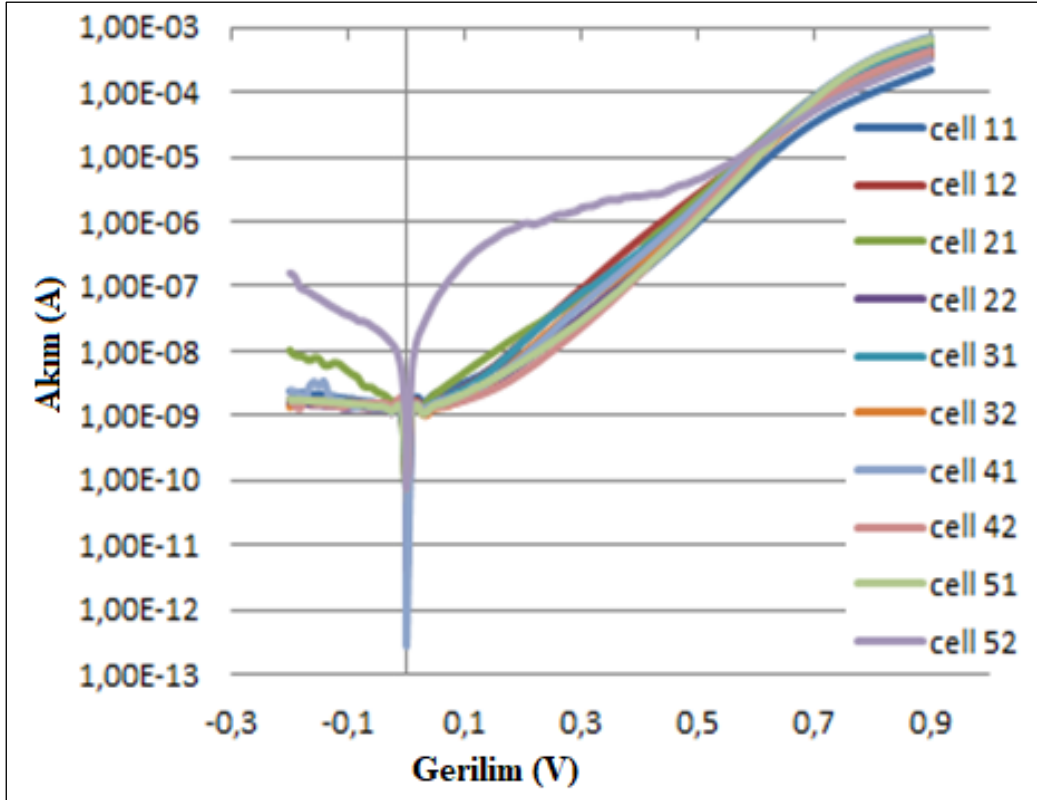
CdTe/CdS ve $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film güneş hücrelerinin oda şartlarında EQE, aydınlık ve karanlıkta akım-gerilim karakteristiği ve PVD ölçümlerine ait deneysel bulgular verilmiştir.

5.1. CdTe/CdS İnce Film Güneş Pili Karakterizasyonu



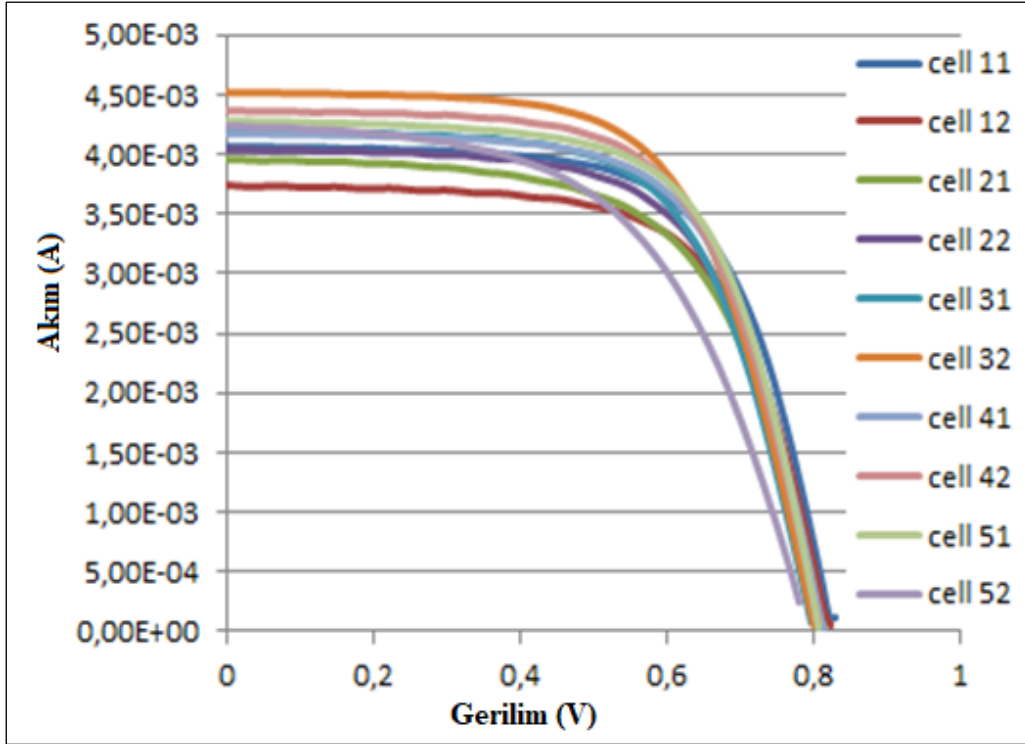
Şekil 5.1. CdTe/CdS ince film pilin EQE grafiği

Şekil 5.1’de CdTe/CdS pili için 21 numaralı hücre diğer hücrelerden daha düşük EQE değeri göstermektedir. Bunun sebebi 350-500 nm değerindeki kısa dalga boylarında yüzey rekombinasyonu ve 500-800 nm değerindeki görünür dalga boylarında ise yansıma ve düşük difüzyon uzunluğundan kaynaklı olabilmektedir.



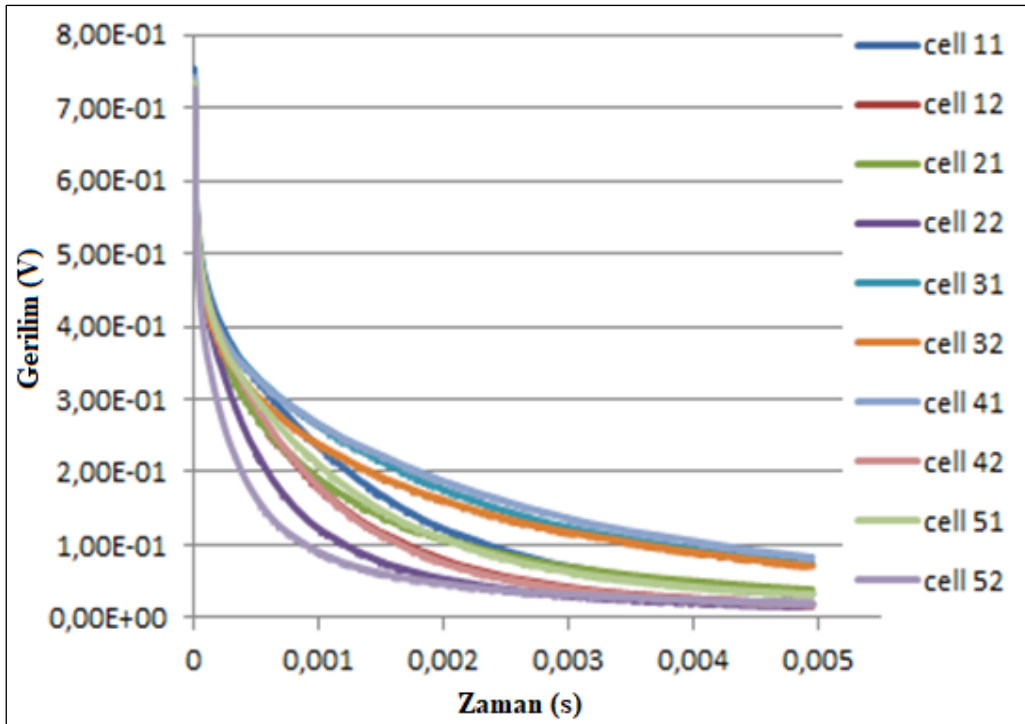
Şekil 5.2. CdTe/CdS ince film pilin karanlıkta akım-gerilim karakteristiği

Karanlık ortamda akım-gerilim karakteristiği, çift diyot modelinin elektriksel karakterizasyonunu temsil eder. Grafikler, çift diyot modelinin farklı bileşenlerine ilişkin eğrinin varyasyonlarını açıkça görmek için logaritmik ölçekte yapılmıştır. Yüksek gerilim alanı seri direnç etkisini, düşük gerilim alanı ise paralel direnç etkisini gösterir. Şekil 5.2’de 52 numaralı hücre için paralel direnç etkisi görülmektedir.



Şekil 5.3. CdTe/CdS ince film pilin aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği

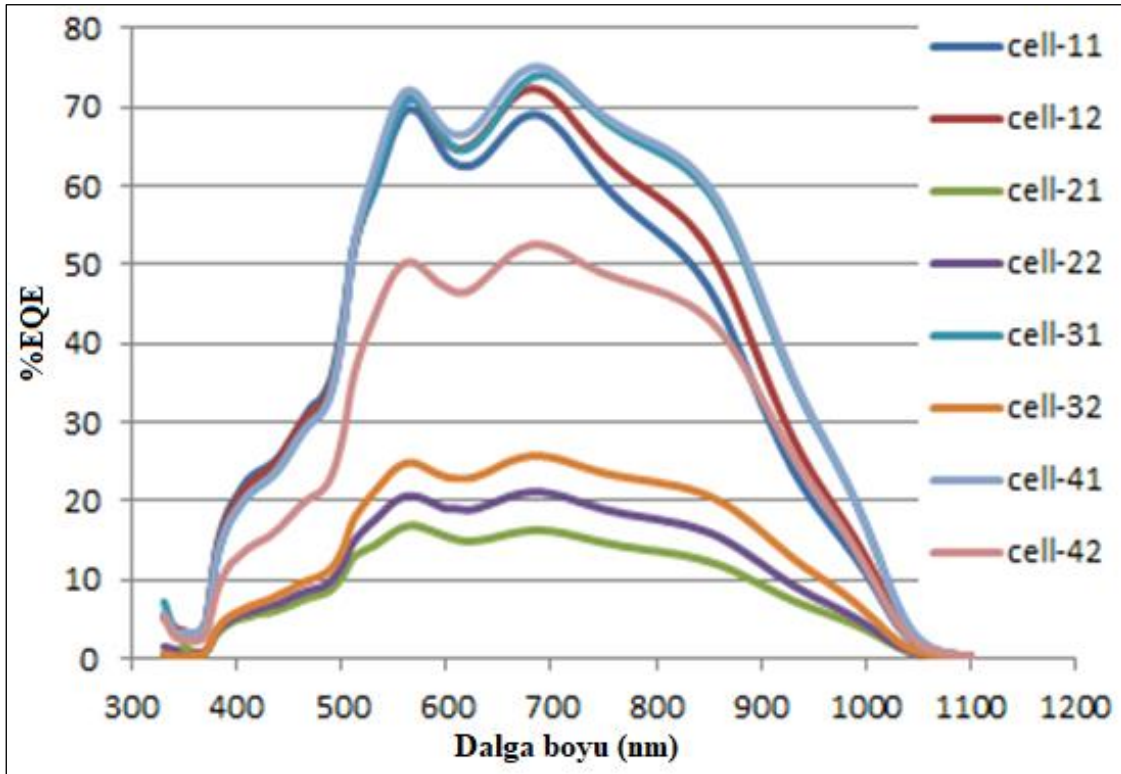
Şekil 5.3'te grafikten bakılarak CdTe/CdS pilinin hücreleri için V_{OC} değeri yaklaşık olarak 0,8 V değerini görmekteyiz.



Şekil 5.4. CdTe/CdS ince film pilin PVD grafiği

Açık gerilim devre düşümü, hücredeki azınlık taşıyıcılarının bir tahminini sağlar. Foto-voltaj düşümü, hücrede bulunan ve azınlık taşıyıcılarının ömrü nedeniyle etkiyi bastıran kapasitif etkilerden güçlü bir şekilde etkilenir. Şekil 5.4'te gösterilen eğri düşük ışık darbesi ile voltaj düşümünü temsil etmektedir.

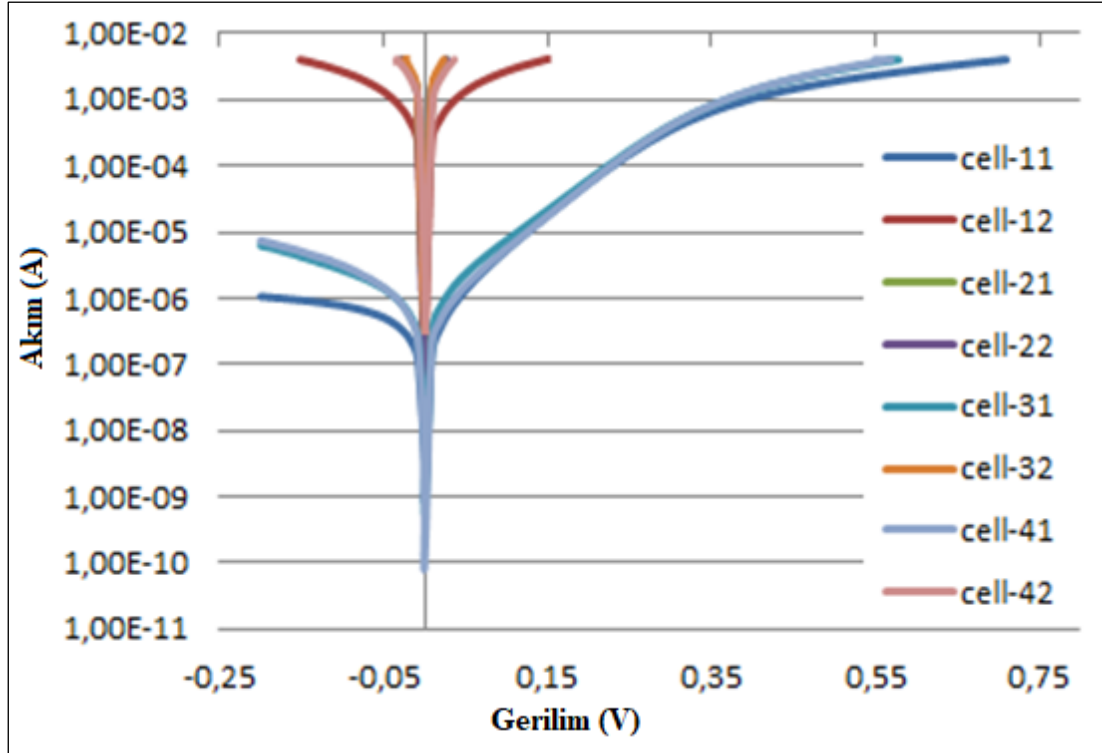
5.2. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ İnce Film Güneş Pili Karakterizasyonu



Şekil 5.5. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film pilin EQE grafiği

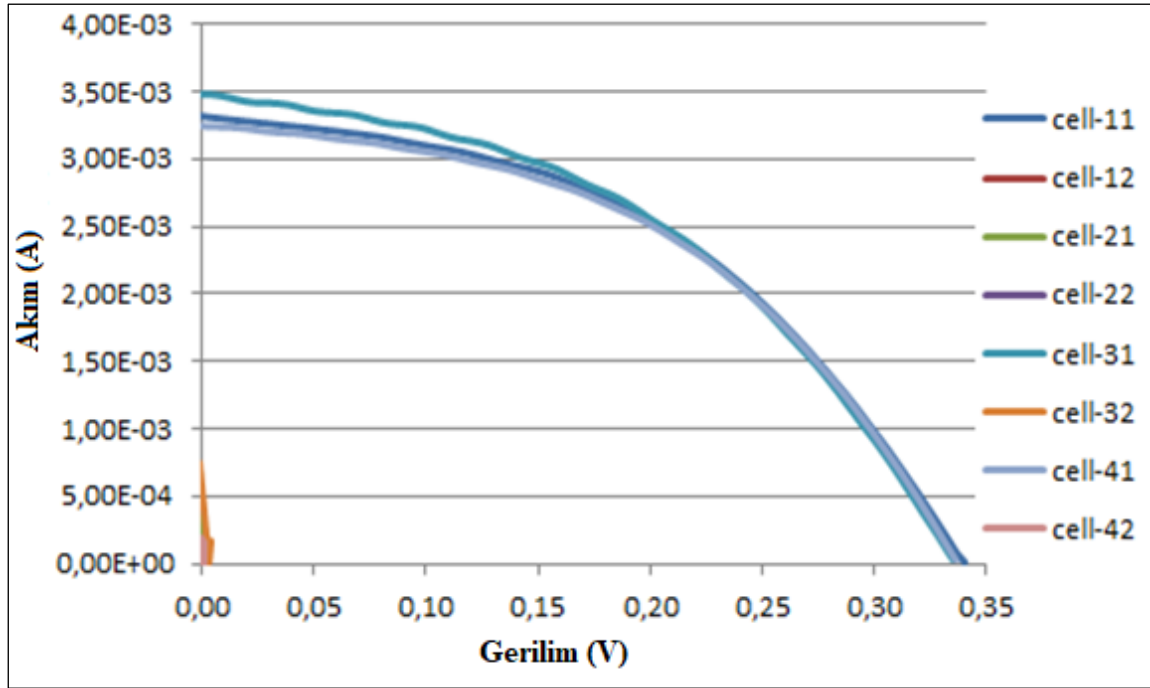
Şekil 5.5'te görüldüğü üzere $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film pilin hücrelerinin EQE değerlerini görmekteyiz. Bu grafiğine baktığımızda 11, 12, 31 ve 41 numaralı hücreler daha yüksek dönüşüm verimliliği göstermektedir ve bu hücrelerde dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ışığın elektronlara dönüşümünün daha yüksek olduğu anlamına gelir.

Ayrıca Şekil 5.1 ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, hücrelerin davranışlarını karşılaştırdığımızda EQE grafiklerinde hücrelerin farklı dalga boylarındaki ışığı absorbe ettiğini görüyoruz. CdTe için yaklaşık 320 nm ila 900 nm arasındadır, Sb_2Se_3 için yaklaşık 340 nm ila 1100 nm arasındadır. Bunun nedeni, bu soğurucu katmanların farklı bant aralığı enerjisine sahip olmasından dolayıdır.



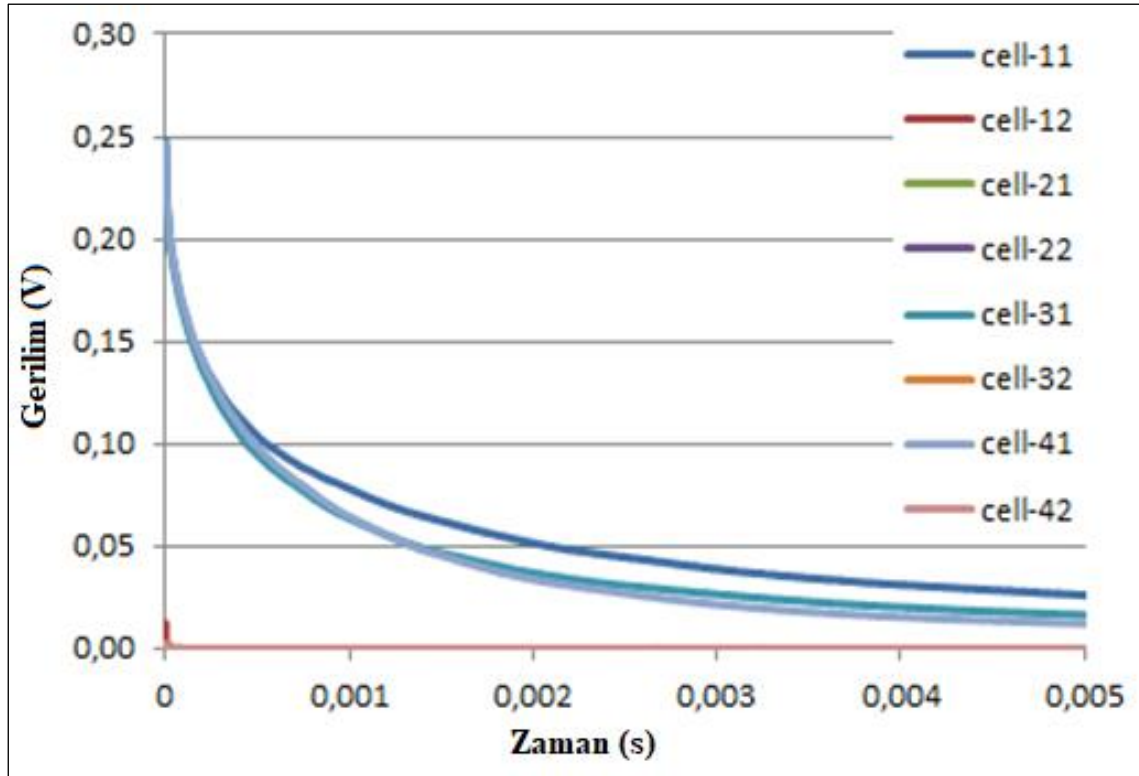
Şekil 5.6. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film pilin karanlıkta akım-gerilim karakteristiği

Şekil 5.6’da sadece 11, 31 ve 41 numaralı hücrelerin uygun akım-gerilim karakteristiği gösterdiğini, diğer hücrelerin ise artan akım ile düşük voltaj bölgesiyle öne çıktığı için paralel direnç etkisinin olduğunu söyleyebiliriz. Düşük paralel direnç, hücredeki akım için alternatif akım yolu sağlayarak güç kayıplarına neden olabilmektedir.



Şekil 5.7. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ ince film pilin aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği

Şekil 5.7’de aydınlık ortamda I-V grafiği sadece 11, 31 ve 41 numaralı hücreler için uygun eğriyi göstermektedir, ancak diğer hücreler için voltaj ve akım neredeyse sıfır olduğundan sadece 11, 31 ve 41 hücreleri için aktiftir diyebiliriz. Burada elde edilen grafik karanlık ortamda yapılan akım-gerilim karakteristiği ile tutarlı sonuç vermektedir.



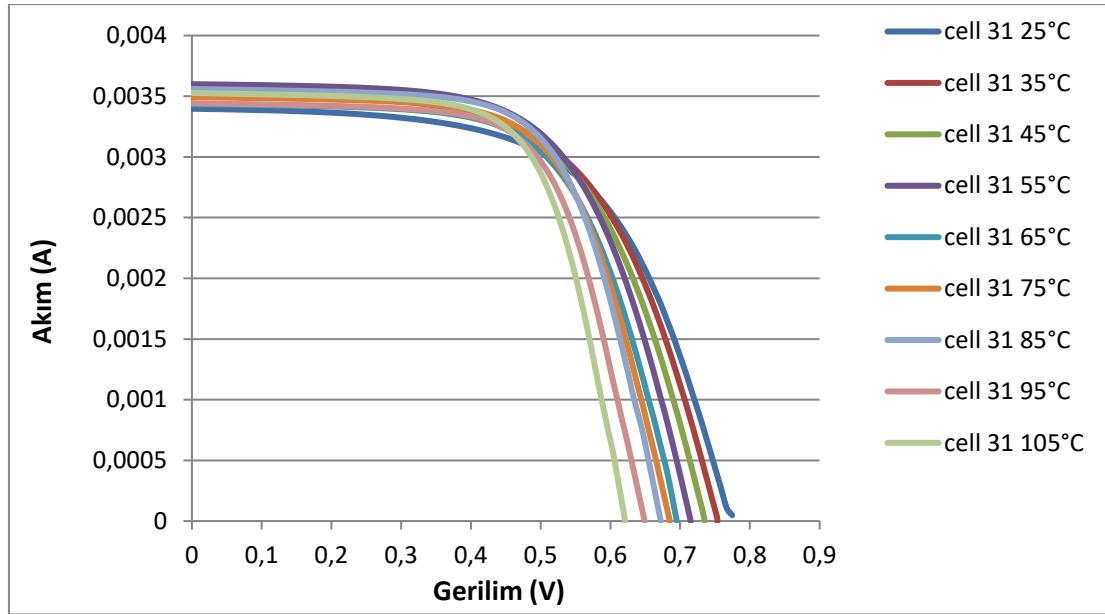
Şekil 5.8. Sb₂Se₃/CdS ince film pilin PVD grafiği

PVD ölçüm tekniği ile ilgili çok fazla referans olmadığından dolayı ve konu üzerinde inceleme ve çalışmaların hala devam etmesi nedeniyle bu ölçüm ile ilgili olarak konuya genel bir bakış açısı katmak amaçlanmıştır. PVD ölçümü sonucunda şekil 5.8 grafiğine bakıldığında sadece 11, 31 ve 41 numaralı hücreler tutarlı grafik eğrisi göstermektedir. Diğer hücrelerin gerilimi 0'a yakın olup dikkate alınmayacak bir değerdedir.

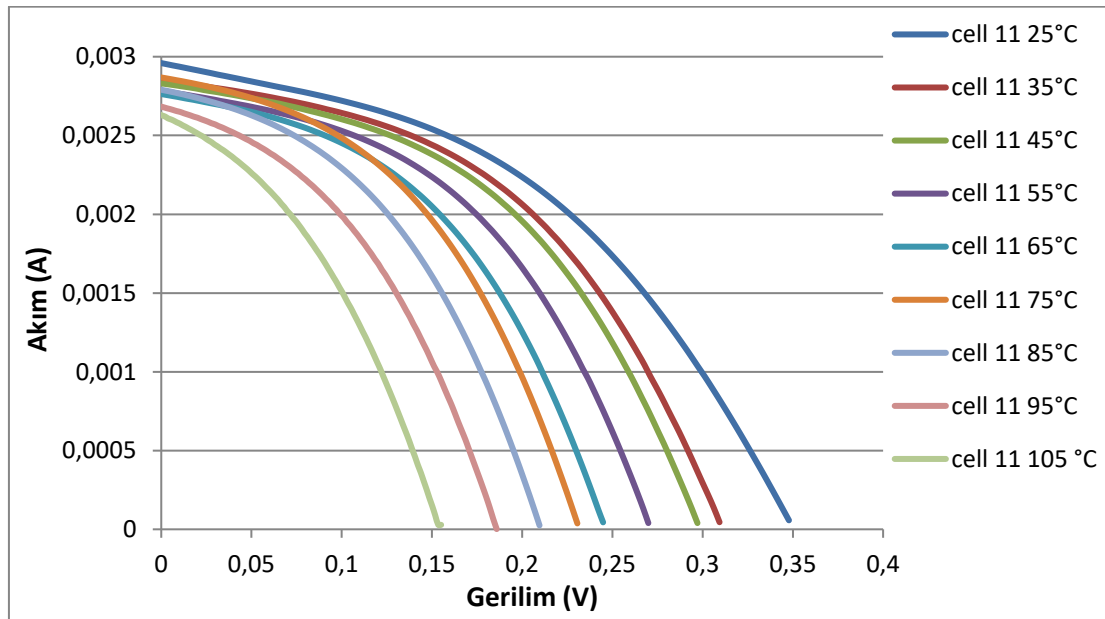
CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film güneş pillerinin oda koşullarında yapılan karakterizasyonu ile elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde CdTe tabanlı pil, Sb₂Se₃ tabanlı pile göre daha kararlı davranış göstermektedir. Bunun sebebi son yıllarda CdTe üzerine yapılan verim ve kararlılık çalışmaları ile bu hücrelerin geliştirilmiş olması ve üretim tekniklerinin iyileştirilmiş olmasıdır. Sb₂Se₃ yeni çalışılan ince film fotovoltaik malzemedir ve üzerinde yapılacak geliştirme çalışmaları ile bu pillerin kararlılık ve verimlerinin iyileştirilmesi mümkündür. Elde edilen bulgular ile CdTe ve Sb₂Se₃ hücrelerinin ilk durumu hakkında bilgi sahibi olmaktayız.

5.3. CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS Termal Karakterizasyon

İlk yapılan karakterizasyon sonucunda elde edilen veriler ışığında termal karakterizasyon için CdTe ve Sb₂Se₃ pillerinden en tutarlı eğriyi veren hücreler kullanılmıştır. CdTe pili için 31 hücresi ve Sb₂Se₃ için ise 11 hücresi seçilmiştir.

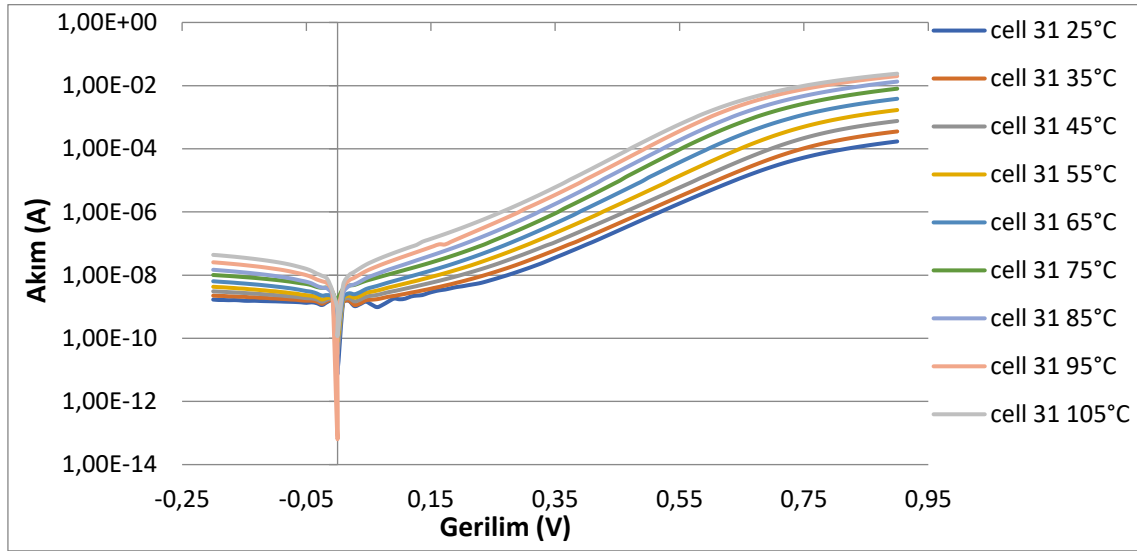


Şekil 5.9. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda aydınlıkta akım-gerilim grafiği

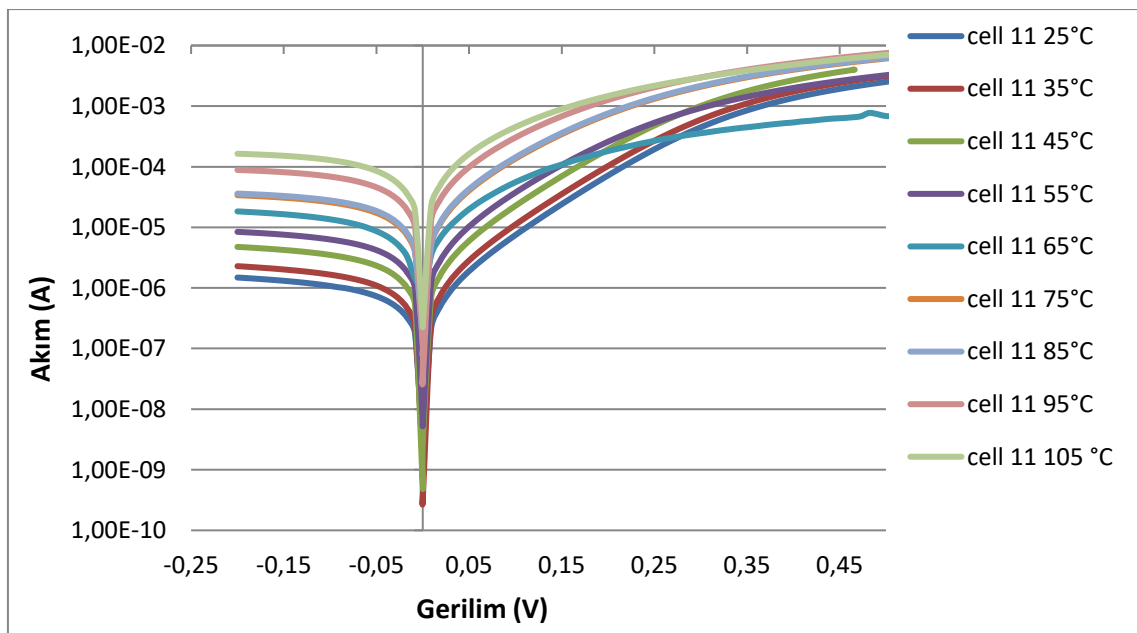


Şekil 5.10. Sb₂Se₃/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda aydınlıkta akım-gerilim grafiği

Şekil 5.9 ve 5.10 grafiklerine bakıldığında sıcaklık arttığında her iki hücrede de voltaj önemli ölçüde azalmaktadır. Akım ise Sb_2Se_3 hücresi için biraz azalmakta ve CdTe hücresi için hemen hemen aynıdır. Bu durum, artan sıcaklığın, gerilimin düşmesi sonucu hücre verimliliğinin azalttığını göstermektedir. Bundan dolayı artan sıcaklığın hücre üzerinde olumsuz etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Bu, bölüm 3.6'da açıklanan matematiksel denklem ile tutarlıdır. Ayrıca grafiklerde CdTe hücresinin Sb_2Se_3 'ten daha yüksek bir I-V değeri vermesi CdTe pilinin daha yüksek bir güç çıkışına sahip olduğunu göstermektedir.

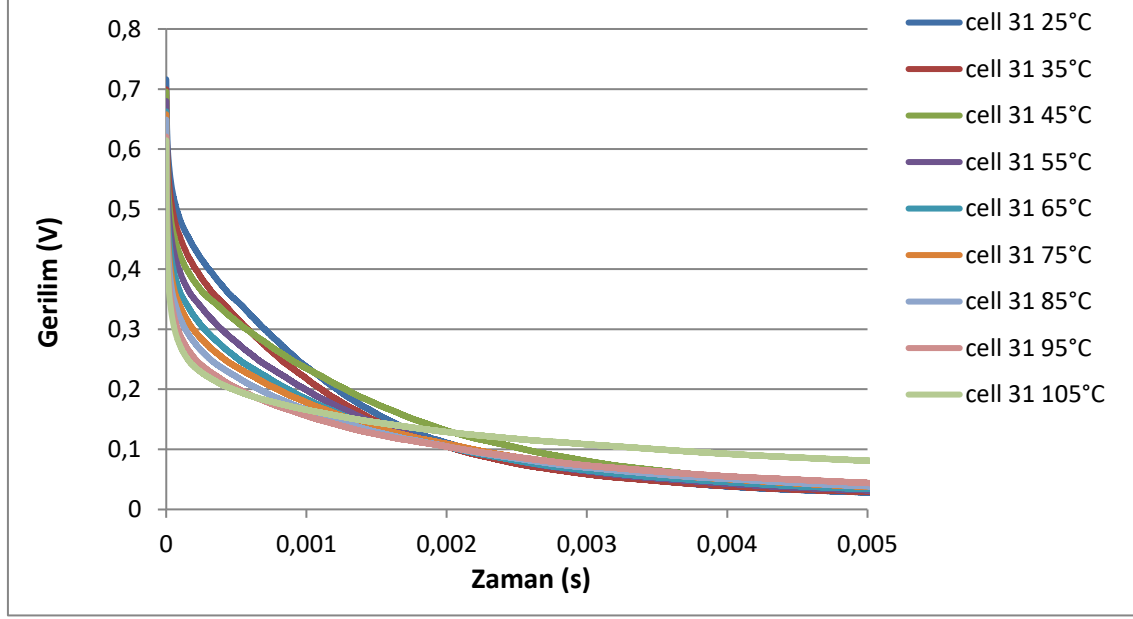


Şekil 5.11. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda karanlıkta akım-gerilim grafiği

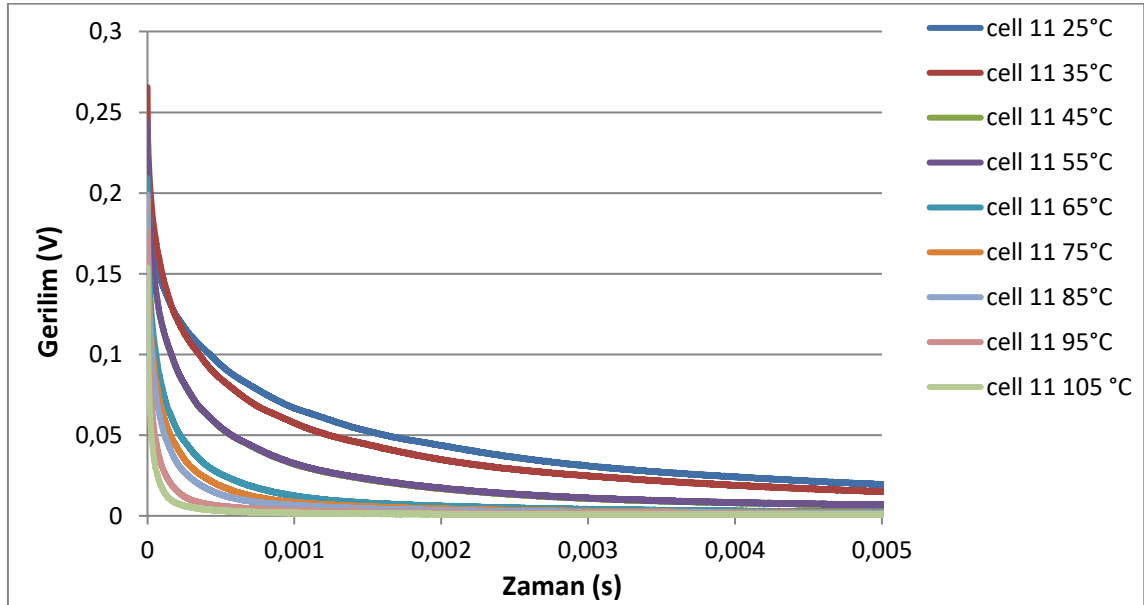


Şekil 5.12. Sb_2Se_3 /CdS pilinin farklı sıcaklıklarda karanlıkta akım-gerilim grafiği

Şekil 5.11 ve 5.12’de görüldüğü gibi sıcaklık arttığında, koyu doygunluk akımının arttığı görülmektedir (Bkz. Bölüm 3.1). Bununla birlikte, her iki grafikte her eğri benzer davranış göstermektedir ve seri ve paralel direnç etkisi gözlemlenmemiştir, ancak CdTe/CdS hücresi daha kararlı davranış göstermiştir, çünkü artan sıcaklık ile eğriler dalgalanma olmadan tutarlı olarak değişmiştir.

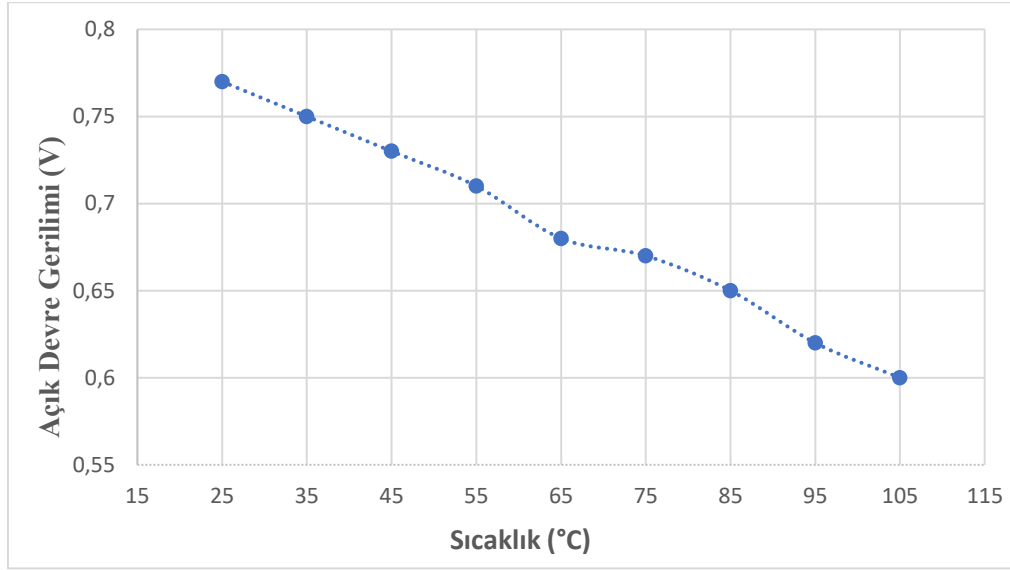


Şekil 5.13. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda PVD grafiği

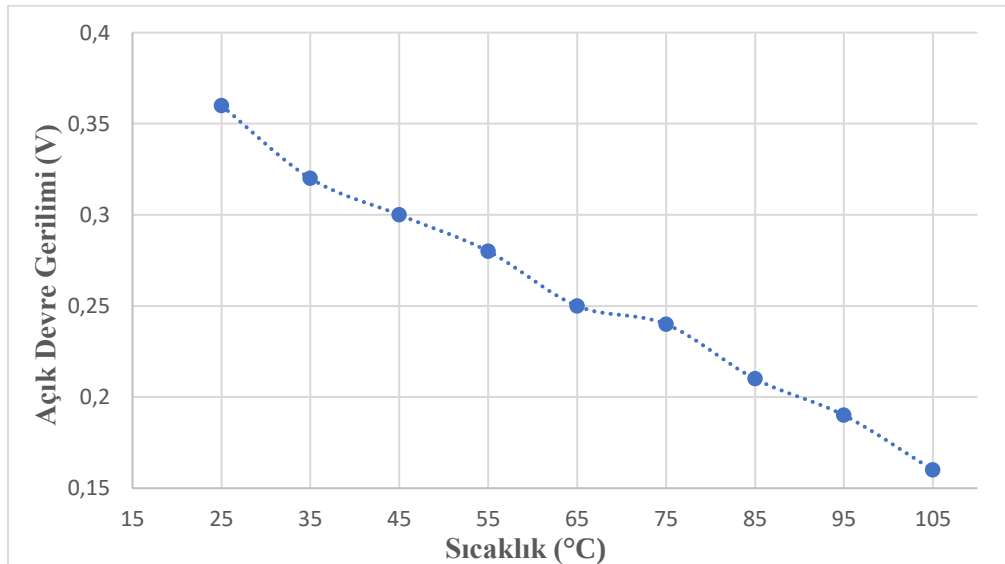


Şekil 5.14. Sb₂Se₃/CdS pilinin farklı sıcaklıklarda PVD grafiği

Şekil 5.13 ve 5.14'teki grafiklerde, farklı sıcaklıklar için iki pil için PVD değerini görmektedir. PVD, açık devre durumunda gerçekleştirilmektedir; bu nedenle eğri, ışığı kapattığımızda açık devre geriliminde voltaj düşüşünü temsil eder. Sb_2Se_3 için sıcaklığın artması ile her adımda gerilim kademeli olarak düşmektedir. CdTe grafiğinde ise artan sıcaklık hücrenin parazitik kapasitansını etkilediği düşünülmektedir [62].

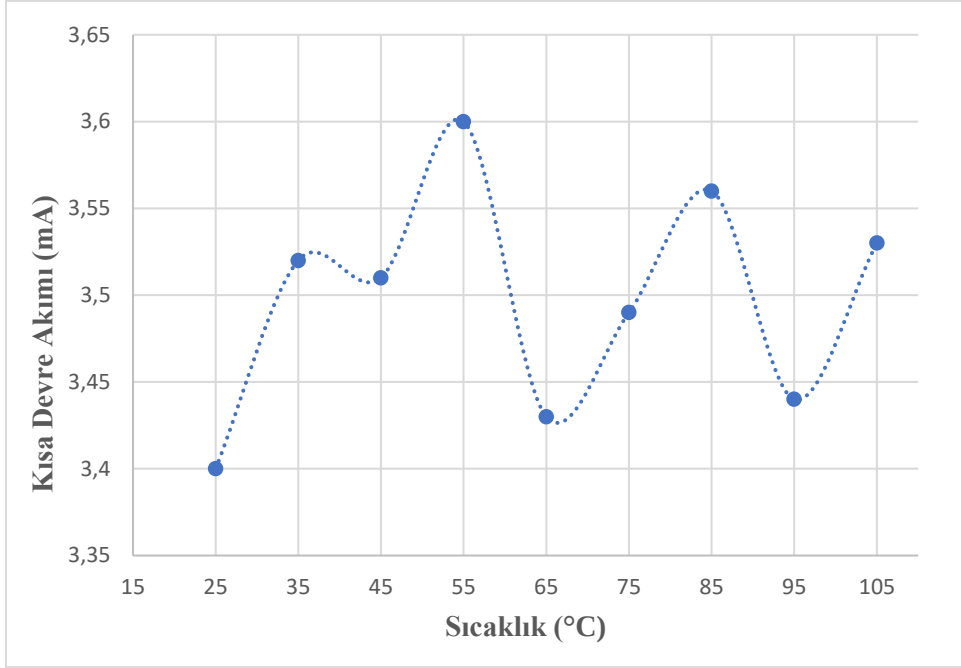


Şekil 5.15. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıkta V_{OC} değeri,

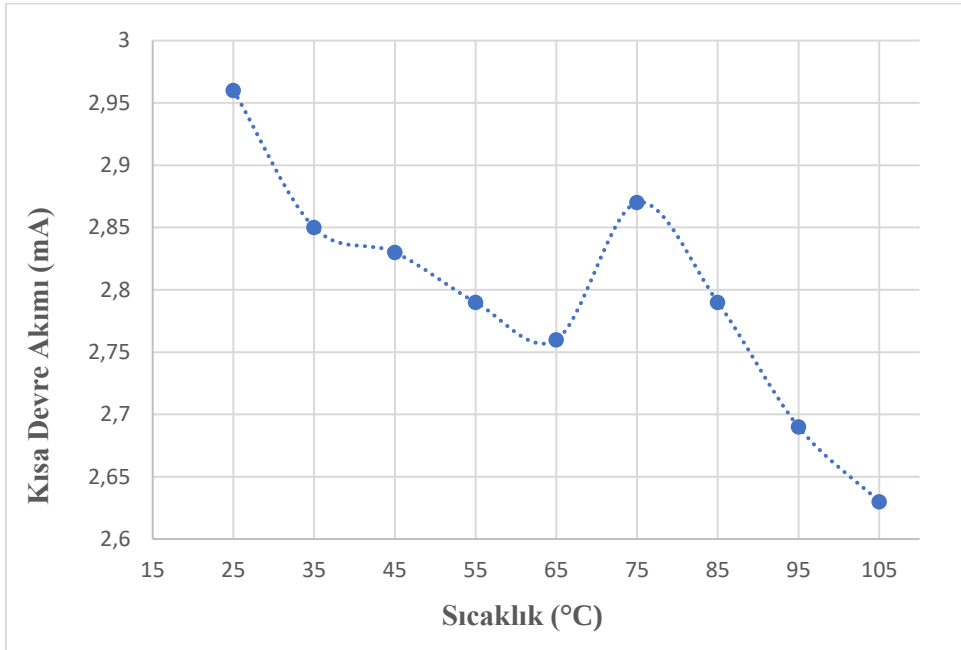


Şekil 5.16. $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ pilinin farklı sıcaklıkta V_{OC} değeri,

Şekil 5.15 ve 5.16'da bakıldığında sıcaklık arttıkça, açık devre gerilimi her iki pilde kademeli olarak azalmaktadır.

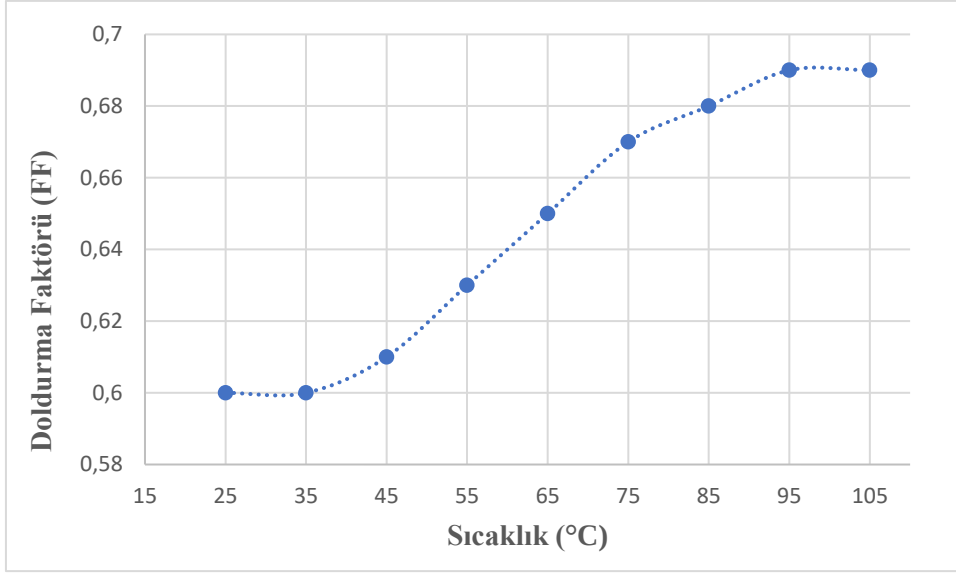


Şekil 5.17. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıkta I_{SC} değeri

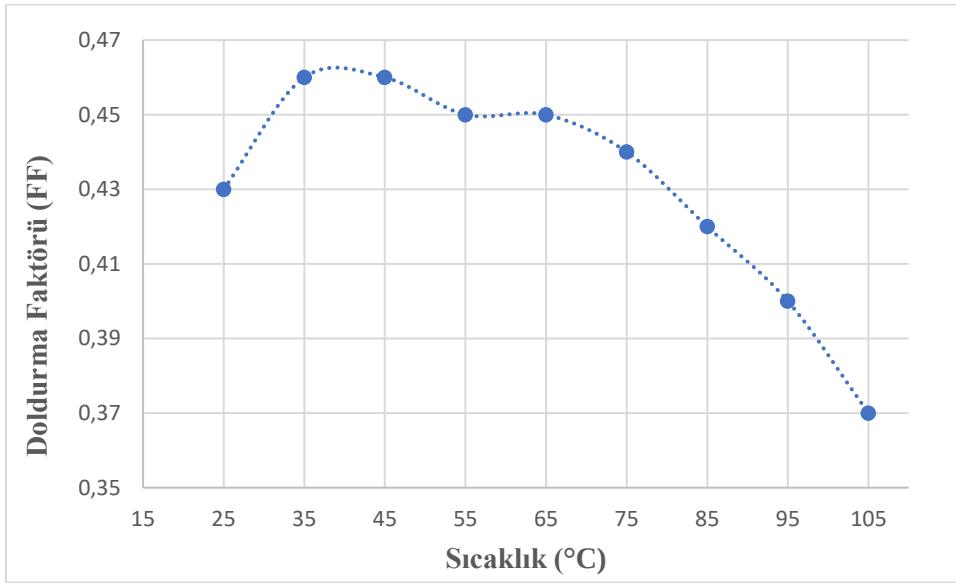


Şekil 5.18. Sb₂Se₃/CdS pilinin farklı sıcaklıkta I_{SC} değeri

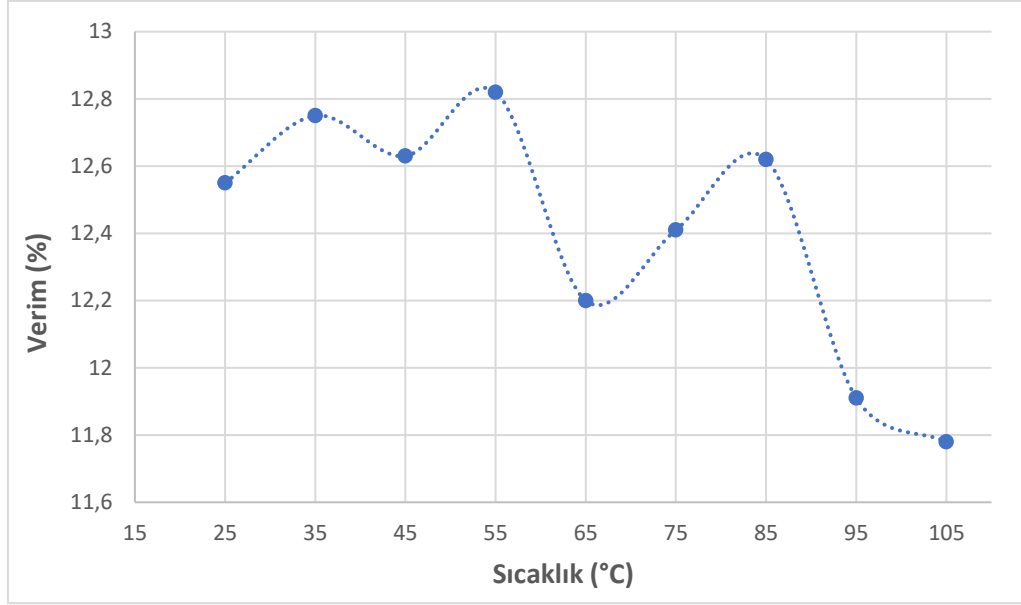
Şekil 5.17 ve 5.18’de görüldüğü gibi sıcaklık değiştikçe her iki hücrede kısa devre akımı küçük dalgalı değişim göstermektedir. CdTe pilinin kısa devre akımı yukarı ve aşağı dalgalıdır Sb₂Se₃ hücresi ise genellikle düşüş göstermiştir. Bu değer pilin doldurma faktörünü etkilemektedir.



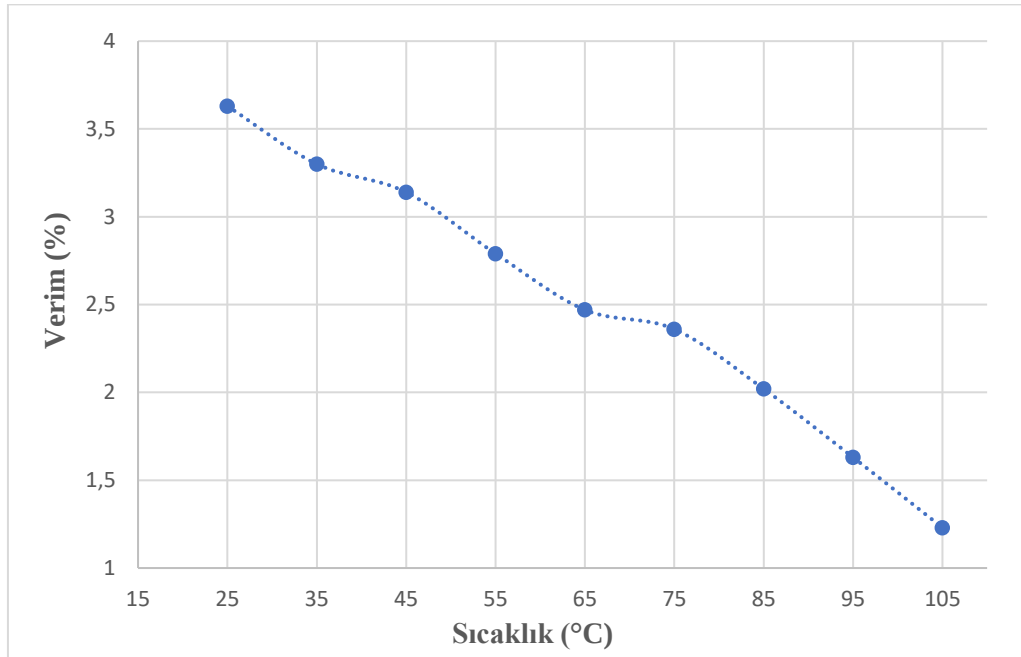
Şekil 5.19. CdTe/CdS pilinin farklı sıcaklıkta doldurma faktörü



Şekil 5.20. Sb₂Se₃/CdS pilinin farklı sıcaklıkta doldurma faktörü

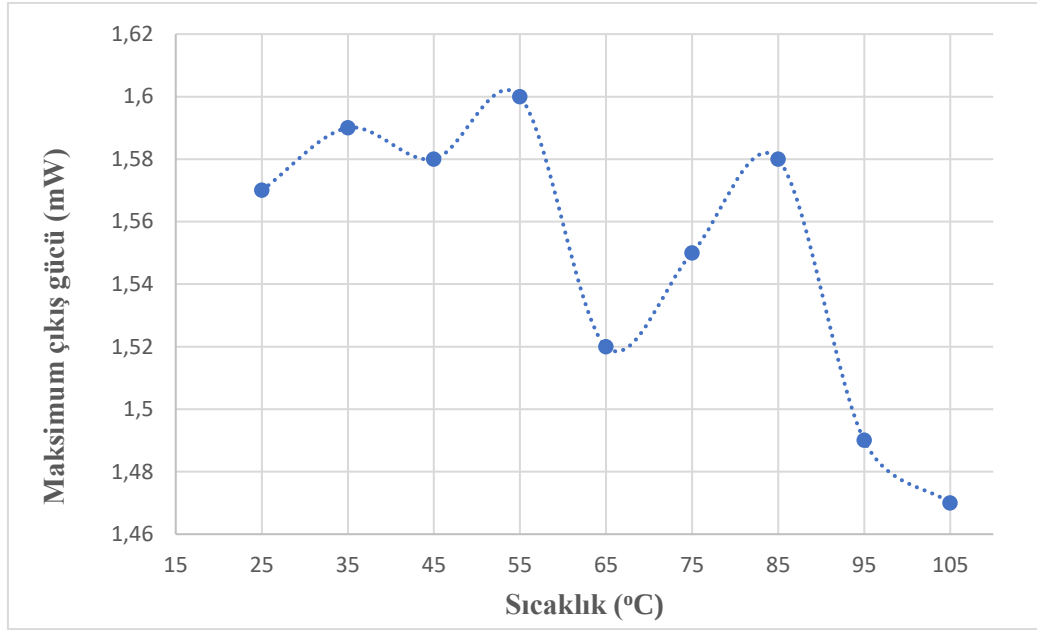


Şekil 5.21. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta verimi

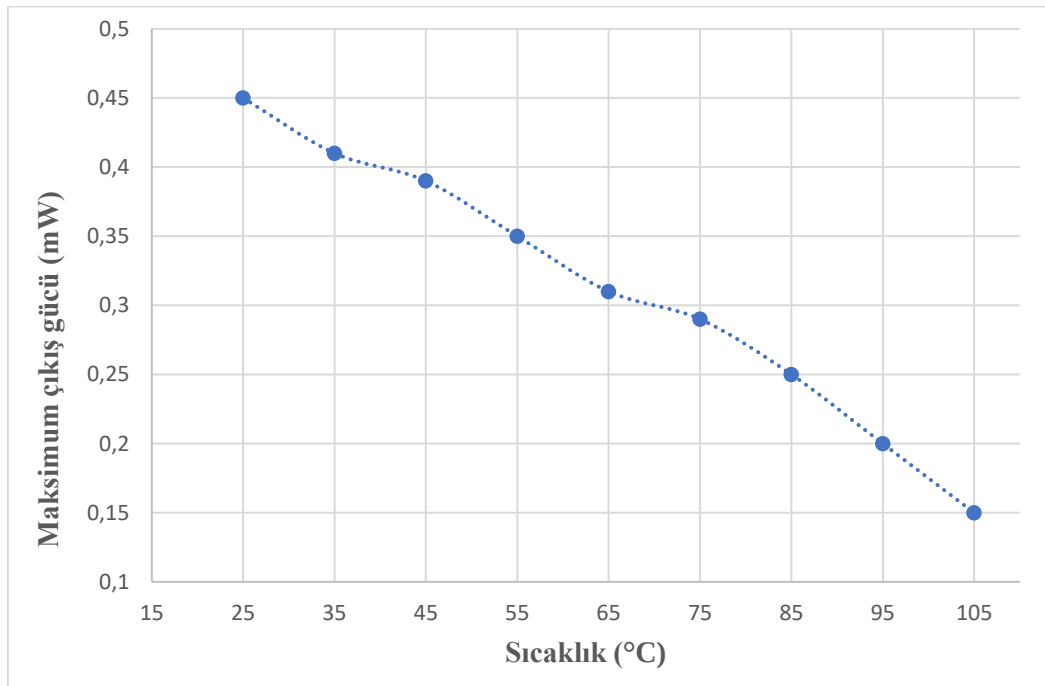


Şekil 5.22. Sb₂Se₃/CdS pili farklı sıcaklıkta verimi

CdTe hücresi için verim Şekil 5.21’de görüldüğü gibi belli sıcaklıklarda ufak iyileşmelerle beraber sert düşüş göstermektedir. Artan sıcaklık ile verimdeki ufak iyileşmelerin sebebi kısa süreli sıcaklık artışının hücrenin iç kristal yapısı ve elektriksel özelliklerini olumlu etkilemiş olabileceğidir. Şekil 5.22’de ise Sb₂Se₃ için verim kademeli olarak düşmektedir.



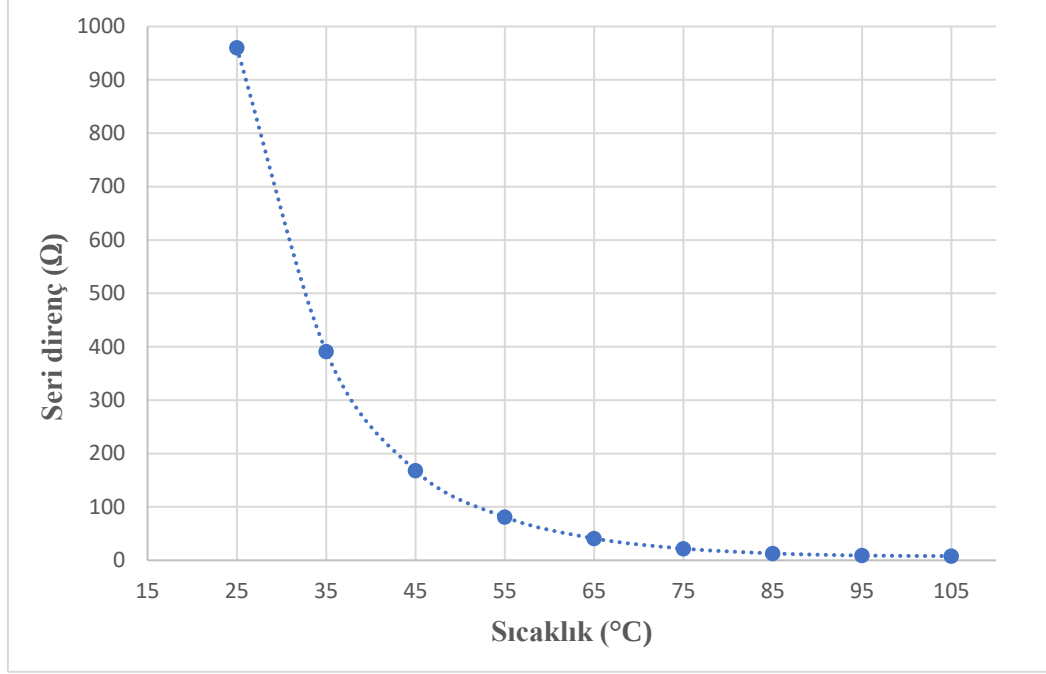
Şekil 5.23. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta maksimum çıkış gücü



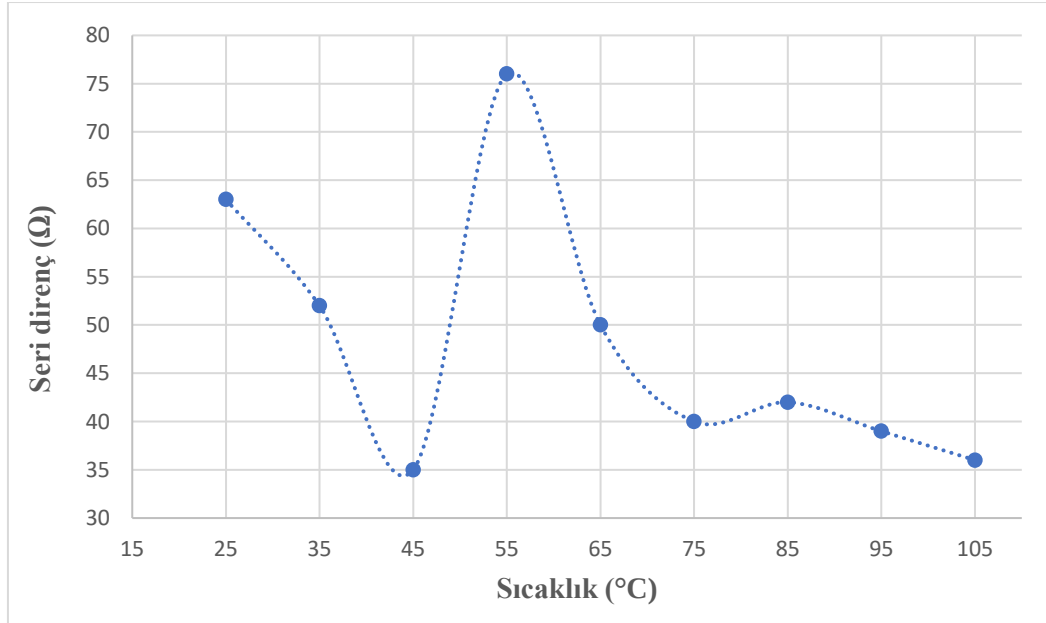
Şekil 5.24. Sb₂Se₃/CdS pili farklı sıcaklıkta maksimum çıkış gücü

Şekil 5.23 ve 5.24'te bakıldığında CdTe hücresi için artan sıcaklık ile çıkış gücü dalgalı olarak düşmektedir. Sb₂Se₃ hücresi için ise elde edilen maksimum çıkış gücü kademeli olarak düşmektedir. Hücrelerden elde edilen maksimum çıkış gücü farklıdır ve CdTe tabanlı hücrenin daha yüksek çıkış gücüne sahip olduğunu görmekteyiz. Bunun sebebi ilk karakterizasyon yapıldığında elde edilen verilerde söylendiği gibi son yıllarda CdTe üzerine

yapılan geliştirme çalışmaları ile bu pillerin verim ve kararlılıkları geliştirilmiştir. Sb_2Se_3 ise CdTe piline kıyasla son yıllarda yeni çalışılan bir fotovoltaik malzemedir.

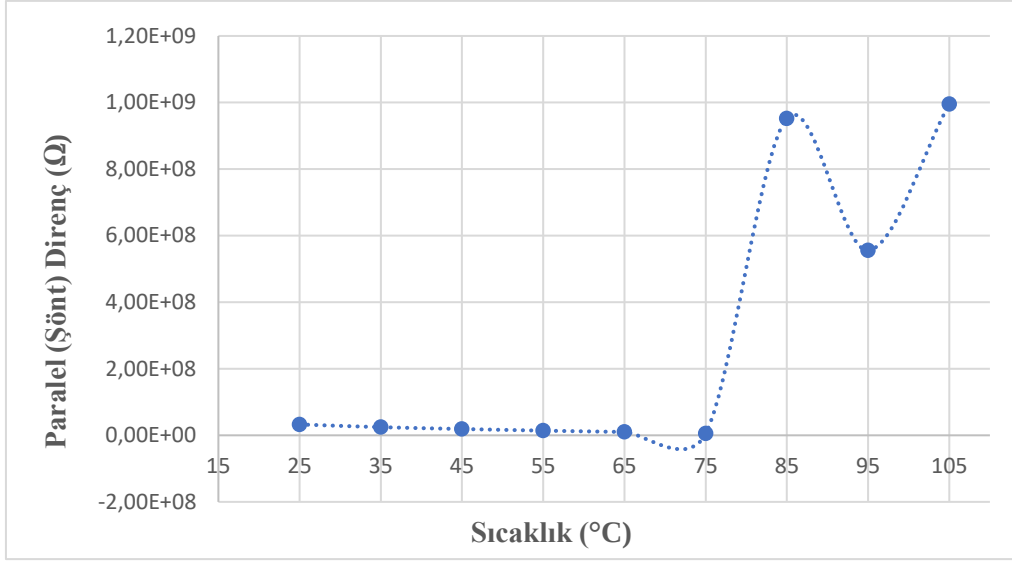


Şekil 5.25. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta seri direnç değeri

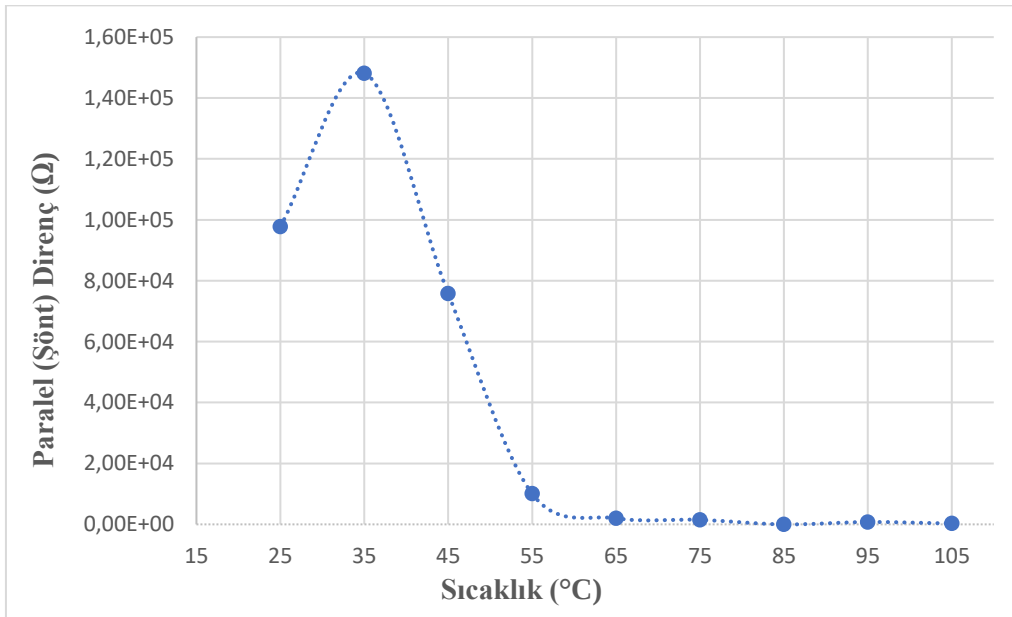


Şekil 5.26. Sb_2Se_3 /CdS pili farklı sıcaklıkta seri direnç değeri

Şekil 5.25 ve 5.26'da görüldüğü üzere pillerin arka kontak kalınlığı farklı olduğu için direnç değeri de farklıdır. Bakır kalınlığı CdTe için 2nm ve Sb_2Se_3 pili için 0,3 nm'dir.



Şekil 5.27. CdTe/CdS pili farklı sıcaklıkta paralel direnç değeri

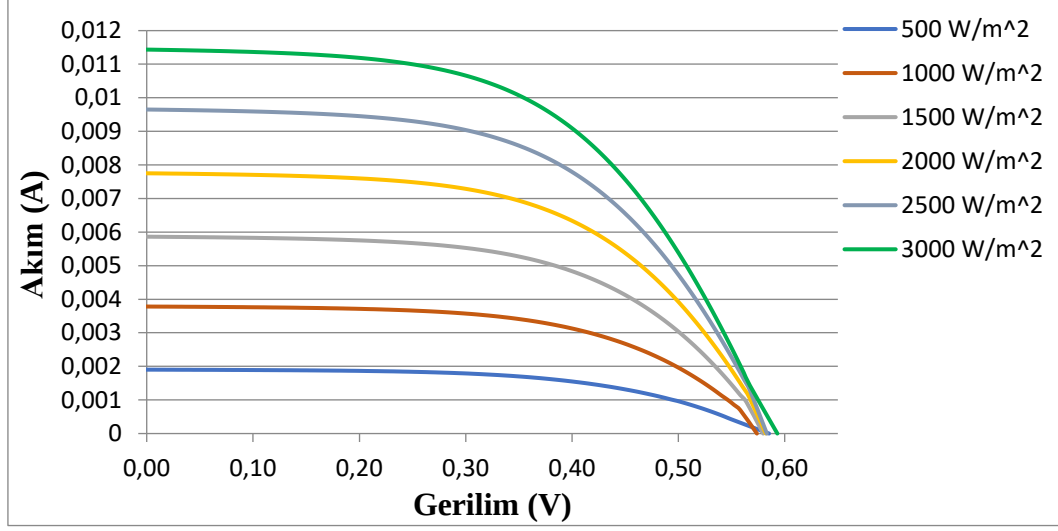


Şekil 5.28. Sb₂Se₃/CdS pili farklı sıcaklıkta paralel direnç değeri

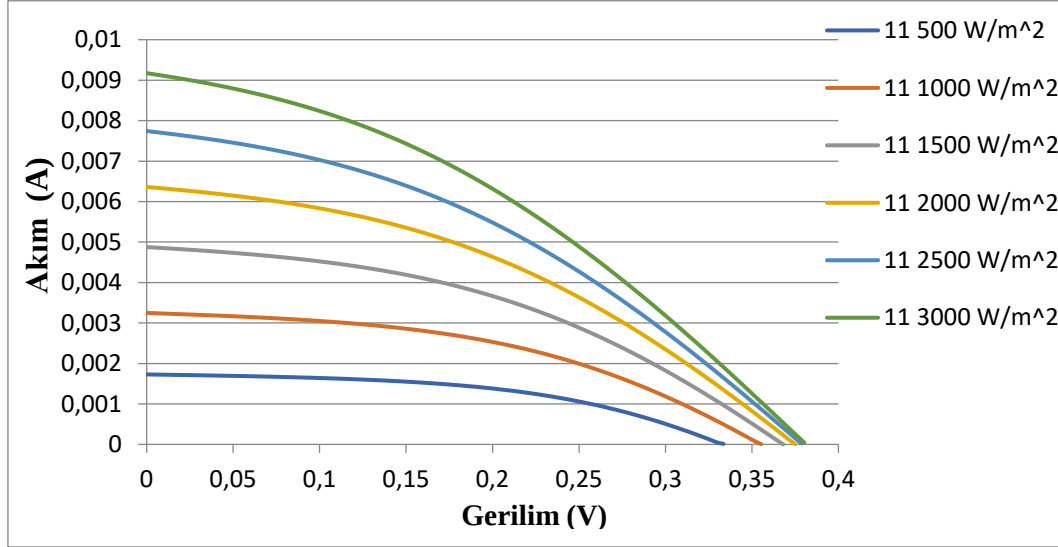
Her iki hücrede kristal kafesindeki kusurlar nedeniyle paralel direncin etkisi gözükmemektedir.

CdTe/CdS ve Sb₂Se₃/CdS ince film pillerinin termal karakterizasyonu ile elde edilen parametreler genel olarak değerlendirildiğinde CdTe tabanlı hücre 25°C'de yaklaşık %12,6 ve 105°C'de yaklaşık %11,8'dir. Bu iki sıcaklık arasında verim dalgalı değişim göstermiştir (şekil 5.21). Sb₂Se₃ tabanlı hücre için ise verimlilik kademeli olarak yaklaşık %3,6'dan %1,25'e ani düşüş göstermektedir (şekil 5.22).

5.4. Işık Şiddetinin Etkisi

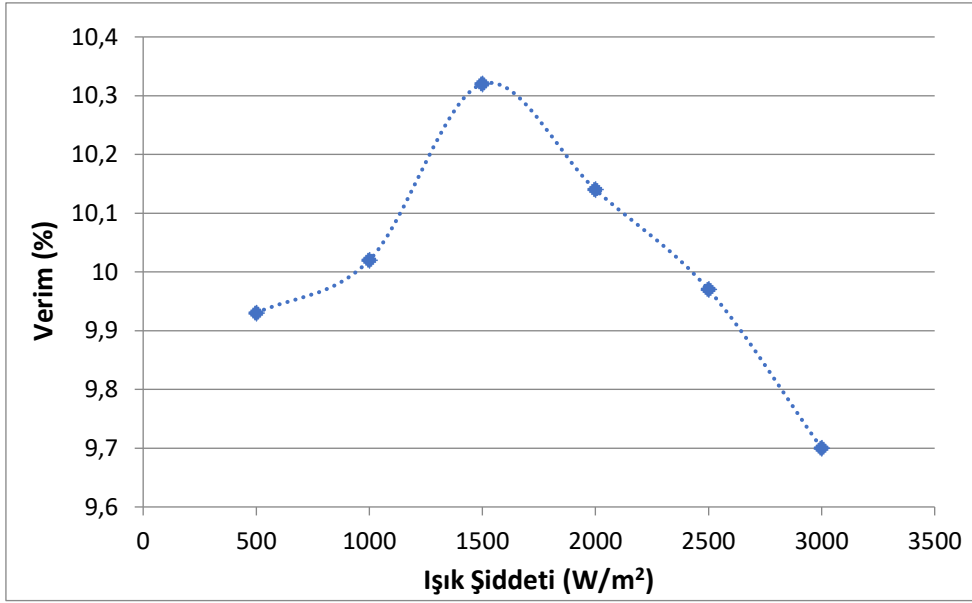


Şekil 5.29. CdTe/CdS pili farklı ışık şiddeti altında akım-gerilim karakteristiği

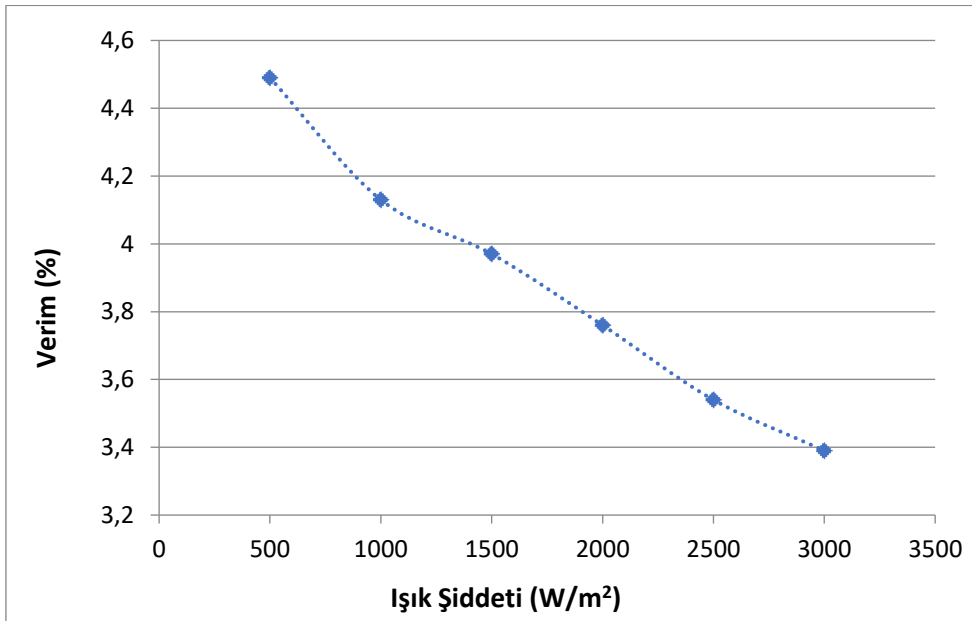


Şekil 5.30. Sb₂Se₃/CdS pili farklı ışık şiddeti altında akım-gerilim karakteristiği

Şekil 5.29 ve 5.30'da pillerin farklı ışık yoğunluğu altında I-V eğrisi gösterilmektedir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere Sb₂Se₃ pilinin grafiği, eğrinin yüksek eğimi ile hücredeki seri direncin karakteristiğinin sert etkisi gözlemlenmektedir. Muhtemelen bu etki, hücrelerin delik-elektron çiftinin oluşturmasındaki verimin düşük olmasından dolayıdır. Ayrıca, CdTe güneş pili içinde seri direnç etkisi gözlemlenmektedir ancak bu Sb₂Se₃ güneş piline oranla daha azdır. Her iki güneş pili için, gelen ışınlam ile akımın artmasıyla seri direncin etkisinin arttığı açıktır.



Şekil 5.31. CdTe/CdS pili farklı ışık şiddeti altında verimi



Şekil 5.32. Sb₂Se₃/CdS pili farklı ışık şiddeti altında verimi

Şekil 5.31’de grafiğe bakıldığında, CdTe pilinin verimi 1500 W/m² ışık şiddetine kadar artmaktadır ve bu değerin üzerinde pilin veriminde düşüş meydana gelmektedir. Şekil 5.32’de ise Sb₂Se₃ pili için ışık şiddetinin artmasıyla her aşamada veriminde düşüş gözlemlenmiştir. Bu verim azalması, ışığın ısıtma etkisinden dolayı hücre sıcaklığındaki artışa bağlanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Araştırmacılar, maliyetleri düşürmek için basit üretim yöntemleriyle verimliliği yüksek güneş hücreleri elde etmek için en iyi malzeme konfigürasyonu üzerine çalışmaktadırlar. Bununla birlikte, bir diğer önemli durum bu hücrelerin uzun süre kararlılığıdır, çünkü termal değişiklikler, nem ve yüksek potansiyeller vb. gibi durumlar güneş pillerini etkileyebilmektedir.

Son yıllarda CdTe ince yarı-iletkeni üzerine yapılan yoğun çalışmalar ile bu ince film güneş pillerinin verimi ve kararlılığı önemli ölçüde geliştirilmiştir. Ancak, CdTe bileşiğindeki kadmiyumun çevreye zararlı etkilerinden dolayı CdTe pillerinin kullanımı kısıtlanmaktadır.

Literatürde Sb_2Se_3 fotovoltaiik soğurucu malzemesi için uygun optik ve elektriksel özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir. Sb_2Se_3 teorik açıdan iyi bir alternatif fotovoltaiik malzeme olduğunu söyleyebiliriz. Ancak, Sb_2Se_3 yeni çalışılan bir malzeme olması sebebiyle bu cihazlardan elde edilen verim düşüktür. Bu çalışmada yapılan testler sonucunda bu pillerin farklı sıcaklık ve değişen ışık şiddeti altında verimlerindeki ani düşüş göstermektedir ki bu ince film güneş pillerinin üretim yöntemlerinin iyileştirilmesi ve ayrıca verimi ve kararlılığı üzerine geliştirme çalışmaları yapılmalıdır.

Bu tezde CdTe/CdS ve Sb_2Se_3 /CdS ince film test hücrelerinin dış kuantum verimliliği, karanlık ve aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği ve PVD ölçümü yöntemleri ile karakterizasyonu yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan karakterizasyon sonucunda bu hücreler hakkında bilgi edinilmiş olup bu bilgiler araştırmacıların yapacağı çalışmalara temel oluşturabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Soeder, D. J. and Borglum, S. J. (2019). *The fossil fuel revolution: Shale gas and tight oil*. Amsterdam: Elsevier, 173-174.
2. Basu, S. and Antia, H. M. (2008). Helioseismology and solar abundances. *Physics Reports*, 457(5-6), 217-283.
3. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Properties of sunlight, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/the-sun>. Son Erişim Tarihi: 15.03.2021.
4. İnternet: Wikipedia, Sun properties. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>. Son Erişim Tarihi: 30.10.2021.
5. İnternet: Nasa, Solar irradiance. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/science/Solar%20Irradiance.html. Son Erişim Tarihi: 22.04.2020.
6. Khan, J. and Arsalan, M. H. (2016). Solar power technologies for sustainable electricity generation—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 414-425.
7. Luque A and Hegedus S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 20-100.
8. Venkateswari, R. and Sreejith, S. (2019). Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 376-394.
9. Zakutayev, A. (2017). Brief review of emerging photovoltaic absorbers. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 8-15.
10. Lee, T. D. and Ebong, A. U. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1286-1297.
11. Green A. M., Emery K., Hishikawa Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J. and Ho-Baillie, A. W. (2018). Solar cell efficiency tables (Version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Application*. 26(7), 427-436.
12. Qi, W. Y., Li, Q., Chen, H., Liu, J., Xing, S. F., Xu, M., Yan, Z., Song, C. and Wang, S. G. (2021). Selenium nanoparticles ameliorate Brassica napus L. cadmium toxicity by inhibiting the respiratory burst and scavenging reactive oxygen species. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 125900.
13. Zeng, K., Xue, D. J. and Tang, J. (2016). Antimony selenide thin-film solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 31(6), 063001.
14. Lee, D., Cho, J. Y. and Heo, J. (2018). Improved efficiency of Sb₂Se₃/CdS thin-film solar cells: the effect of low-temperature pre-annealing of the absorbers. *Solar Energy*, 173, 1073-1079.

15. Guo, L., Grice, C., Zhang, B., Xing, S., Li, L., Qian, X. and Yan, F. (2019). Improved stability and efficiency of CdSe/Sb₂Se₃ thin-film solar cells. *Solar energy*, 188, 586-592.
16. Ju, T., Koo, B., Jo, J. W. and Ko, M. J. (2020). Enhanced photovoltaic performance of solution-processed Sb₂Se₃ thin film solar cells by optimizing device structure. *Current Applied Physics*, 20(2), 282-287.
17. Li, D. B., Yin, X., Grice, C. R., Guan, L., Song, Z., Wang, C., Chen, C., Li, K., Cimaroli, A. J., Awni, R. A., Zhao, D., Song, H., Tang, W., Yan, Y. and Tang, J. (2018). Stable and efficient CdS/Sb₂Se₃ solar cells prepared by scalable close space sublimation. *Nano Energy*, 49, 346-353.
18. Tao, J., Hu, X., Xue, J., Wang, Y., Weng, G., Chen, S., Zhu, Z. and Chu, J. (2019). Investigation of electronic transport mechanisms in Sb₂Se₃ thin-film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 197, 1-6.
19. Tobnaghi, D. M., Madatov, R. and Farhadi, P. (2013). Investigation of light intensity and temperature dependency of solar cells electric parameters. *In the proceedings of the 2013 Conference on Electric Power Engineering and Control Systems*. 90-93.
20. Kosyachenko, L. A., Savchuk, A. I. and Grushko, E. V. (2009). Dependence of efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cell on parameters of absorber layer and barrier structure. *Thin Solid Films*, 517(7), 2386-2391.
21. Artegiani, E., Major, J. D., Shiel, H., Dhanak, V., Ferrari, C. and Romeo, A. (2020). How the amount of copper influences the formation and stability of defects in CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 204, 110228.
22. Shen, K., Ou, C., Huang, T., Zhu, H., Li, J., Li, Z. and Mai, Y. (2018). Mechanisms and modification of nonlinear shunt leakage in Sb₂Se₃ thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 186, 58-65.
23. Amin, N., Sopian, K. and Konagai, M. (2007). Numerical modeling of CdS/CdTe and CdS/CdTe/ZnTe solar cells as a function of CdTe thickness. *Solar energy materials and solar cells*, 91(13), 1202-1208.
24. Mahmood, W., Ali, J., Zahid, I., Thomas, A. and ul Haq, A. (2018). Optical and electrical studies of CdS thin films with thickness variation. *Optik*, 158, 1558-1566.
25. Bertoncello, M., Barbato, M., Meneghini, M., Artegiani, E., Romeo, A. and Meneghesso, G. (2019). Reliability investigation on CdTe solar cells submitted to short-term thermal stress. *Microelectronics Reliability*, 100, 113490.
26. Ahn, B. T., Yun, J. H., Cha, E. S. and Park, K. C. (2012). Understanding the junction degradation mechanism in CdS/CdTe solar cells using a Cd-deficient CdTe layer. *Current Applied Physics*, 12(1), 174-178.
27. Zhang, J., Kondrotas, R., Lu, S., Wang, C., Chen, C. and Tang, J. (2019). Alternative back contacts for Sb₂Se₃ solar cells. *Solar Energy*, 182, 96-101.

28. Rahman, S. and Al Ahmed, S. R. (2021). Photovoltaic performance enhancement in CdTe thin-film heterojunction solar cell with Sb₂S₃ as hole transport layer. *Solar Energy*, 230, 605-617.
29. Liu, D., Feng, J., Tian, M., Li, Q. and Sa, R. (2021). First-principles study of the stability, electronic and optical properties of CdTe under hydrostatic pressure. *Chemical Physics Letters*, 764, 138272.
30. Jin, M., Feng, Z., Zhang, J., Guo, H., Jia, X., Su, J., Qui, J., Yuan, N., and Ding, J. (2021). Enhancement in the efficiency of Sb₂Se₃ solar cell with the adding of high electrical concentration CdS: Al film. *Physica B: Condensed Matter*, 619, 413211.
31. Shen, K., Li, Q., Wang, D., Yang, R., Deng, Y., Jeng, M. J., and Wang, D. (2016). CdTe solar cell performance under low-intensity light irradiance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 472-480.
32. Shukla, V. and Panda, G. (2021). Effect of BSF layer on the performance of CdTe solar cell. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2300-2303.
33. Breitenstein, O. and Rißland, S. (2013). A two-diode model regarding the distributed series resistance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 110, 77-86.
34. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Double diode model, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/double-diode-model>. Son Erişim Tarihi: 15.09.2021.
35. Luque A, and Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Solar Cell Fundamentals*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. 90-100.
36. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). I-V curve, Solar cell operation, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>. Son Erişim Tarihi: 22.09.2021.
37. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell short circuit current, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current>. Son Erişim Tarihi: 22.09.2021.
38. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell open circuit voltage, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage>. Son Erişim Tarihi: 22.09.2021.
39. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar Cell Fill-factor, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>. Son Erişim Tarihi: 25.09.2021.
40. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Effect of parasitic resistances, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-parasitic-resistances>. Son Erişim Tarihi: 25.09.2021.
41. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell series-resistance, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance>. Son Erişim Tarihi: 25.09.2021.

42. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell shunt-resistance, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance>. Son Erişim Tarihi: 27.09.2021.
43. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell effect of temperature, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>. Son Erişim Tarihi: 27.09.2021.
44. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell effect of light intensity, Photovoltaics Education Website. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-light-intensity>. Son Erişim Tarihi: 30.09.2021.
45. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S. G. (2019). Solar cell quantum-efficiency, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency>. Son Erişim Tarihi: 30.09.2021.
46. İnternet: Honsberg C. B. and Bowden S.G (2019). Solar cell spectral response, Photovoltaics Education Website. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/spectral-response>. Son Erişim Tarihi: 30.09.2021.
47. Mahan, J. E., Ekstedt, T. W., Frank, R. I. and Kaplow, R. (1979). Measurement of minority carrier lifetime in solar cells from photo-induced open-circuit voltage decay. *IEEE Transactions on Electron devices*, 26(5), 733-739.
48. Hersch, P. and Zweibel, K. (1982). Basic photovoltaic principles and methods. *Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA)*. 290-1448.
49. Collins, S., Vataavu, S., Evani, V., Khan, M., Bakhshi, S., Palekis, V., Rotaru, C. and Ferekides, C. (2015). Radiative recombination mechanisms in CdTe thin films deposited by elemental vapor transport. *Thin Solid Films*, 582, 139-145.
50. Richter, A., Werner, F., Cuevas, A., Schmidt, J. and Glunz, S. W. (2012). Improved parameterization of Auger recombination in silicon. *Energy Procedia*, 27, 88-94.
51. Min, B., Wagner, H., Dastgheib-Shirazi, A. and Altermatt, P. P. (2014). Limitation of industrial phosphorus-diffused emitters by SRH recombination. *Energy Procedia*, 55, 115-120.
52. Ramanujam, J., Bishop, D. M., Todorov, T. K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., Artegiani, E. and Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, 110, 100619.
53. Xu, B. L., Rimmaudo, I., Salavei, A., Piccinelli, F., Di Mare, S., Menossi, D., Bosio, A., Romeo, N. and Romeo, A. (2015). CdCl₂ activation treatment: A comprehensive study by monitoring the annealing temperature. *Thin Solid Films*, 582, 110-114.
54. Tian, L., Yang, H., Ding, J., Li, Q., Mu, Y. and Zhang, Y. (2014). Synthesis of the wheat-like CdSe/CdTe thin film heterojunction and their photovoltaic applications. *Current Applied Physics*, 14(6), 881-885.

55. Kumar, S. G. and Rao, K. K. (2014). Physics and chemistry of CdTe/CdS thin film heterojunction photovoltaic devices: fundamental and critical aspects. *Energy and Environmental Science*, 7(1), 45-102.
56. Chen, J., Shen, H., Zhai, Z., Li, Y. and Li, S. (2020). Cd-free Cu (InGa) Se₂ solar cells with eco-friendly a-Si buffer layers. *Applied Surface Science*, 512, 145729.
57. Vadapoo, R., Krishnan, S., Yilmaz, H. and Marin, C. (2011). Electronic structure of antimony selenide (Sb₂Se₃) from GW calculations. *Physica Status Solidi (b)*, 248(3), 700-705.
58. Singh, Y., Maurya, K. K. and Singh, V. N. (2021). A review on properties, applications, and deposition techniques of antimony selenide. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111223.
59. Afzaal, M. and O'Brien, P. (2006). Recent developments in II–VI and III–VI semiconductors and their applications in solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 16(17), 1597-1602.
60. Sanchez-Sobrado, O., Mendes, M. J., Mateus, T., Costa, J., Nunes, D., Aguas, H., Fortunato E. and Martins, R. (2020). Photonic-structured TCO front contacts yielding optical and electrically enhanced thin-film solar cells. *Solar Energy*, 196, 92-98.
61. Gezgin, S. Y. and Kılıç, H. Ş. (2019). The electrical characteristics of ITO/CZTS/ZnO/Al and ITO/ZnO/CZTS/Al heterojunction diodes. *Optik*, 182, 356-371.
62. Price, K., Lacy, C. and Hunley, D. P. (2006, May). *Photovoltage decay in CdTe/CdS solar cells*. In 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference. IEEE. Waikoloa-Hawaii, 1, 436-437.



GAZİ GELECEKTİR..