



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PCDTBT TABANLI ORGANİK DİYOT VE GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

MERVE KURTAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. KADİR GÖKŞEN**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PCDTBT TABANLI ORGANİK DİYOT VE GÜNEŞ
HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Merve Kurtay tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Kadir Gökşen

Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

İzmir Bakırçay Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa ANUTGAN

Karabük Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 08/07/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

8 Temmuz 2019

Merve KURTAY

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Kadir Gökşen'e,

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Doç. Dr. Özge Tüzün Özmen'e,

Deneyisel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Muzaffer Şağban'a,

Bu tezin yazım sürecinde hiçbir zaman beni geri çevirmeyerek yardıma ihtiyacım olduğu anda teze katkıda bulunan ve manevi desteğini hiç esirgemeyen Batuhan Aykanat'a ve Mine Kurtay'a,

En önemlisi, hayatıma akademik kariyer ile devam etme kararını verdiğim andan itibaren desteğini bir an olsun esirgemeyen, rahat bir eğitim hayatı geçirmem için her türlü fedakarlıkta bulunup maddi ve manevi imkanlarını sonuna kadar zorlayan, hayatta ve akademik alanda başarımlarım için dualarını hiçbir zaman eksik etmeyeceğine inandığım sevgili aileme

Sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

08.07.2019

MERVE KURTAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
ÇİZELGE LİSTESİ	VI
KISALTMALAR.....	VII
SİMGELER	VIII
ABSTRACT	XI
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK YAKLAŞIM.....	3
2.1. SCHOTTKY DİYOTLARI	3
2.1.1. Enerji- Band Diyagramı.....	3
2.1.2. Deplasyon Bölgesinin Genişliği.....	6
2.1.3. Schottky Etkisi (Olayı)	7
2.1.4. Akım- Gerilim Karakteristikleri	9
2.2. KONJUGE POLİMERLER.....	13
2.2.1 KONJUGE POLİMERLERİN TARİHİ	13
2.3. GEÇİRGENLİK SPEKTROSKOPİSİ	15
2.3.1. Optik Geçirgenlik Deneyleri	15
2.3.2 Soğurma Katsayısının Hesaplanması	15
2.3.3. Yasak Enerji Bant Aralığı Hesaplanması.....	16
2.4. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ	16
2.4.1. Foto uyarılma, Eksitonlar, Yük Transferi	16
2.4.2. Aygıt Tipleri	17
2.4.3. Yük Ayrımı.....	21
2.4.4. Organik Güneş Hücrelerinin Karakteristiği.....	22
2.4.5. Hava Kütlesi (Air Mass, AM)	25
2.4.6. Eşdeğer Devre	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	28

3.1. ÜRETİM SİSTEMLERİ	28
3.1.1. Spin Kaplama Sistemi	28
3.1.2. Termal Kaplama Cihazı.....	29
3.1.3. Üretimde Kullanılan Malzemeler.....	29
3.1.4. Ag/n-Si/PCDTBT:PC ₆₁ BM/Au Diyotlarının Üretimi.....	30
3.1.5. ITO/PCDTBT:PC ₆₁ BM/Ag Güneş Hücrelerinin Üretimi.....	32
3.1. KARAKTERİZASYON SİSTEMLERİ	33
3.2.1. Akım-Gerilim Ölçüm Sistemi	33
3.2.2. Kapalı Döngü Helyum Soğutma Sistemi	34
3.2.3. Morötesi-Görünür Spektrofotometre	35
3.2.4. Güneş Simülatörü	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
4.1. AG/N-SI/PCDTBT:PC ₆₁ BM/AU DIYOTLARININ AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİKLERİ	38
4.2. PCDTBT:PC ₆₁ BM İNCE FILMLERİNİN OPTİK KARAKTERİZASYONU	49
4.3. ITO/PCDTBT:PC ₆₁ BM/AG GÜNEŞ HÜCRELERİNİN OPTOELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU.....	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	66

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Bir metal ve bir yarıiletken (ayrı ayrı) enerji bandları.....	3
Şekil 2.2. Bir metal/n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu Schottky kontağın denge durumundaki enerji band diyagramı	5
Şekil 2.3. Bir metal – yarıiletken kontakta enerji-bant diyagramı; (a) Düz beslem, (b) Ters beslem durumunda.....	6
Şekil 2.4. (a) Bir metaldeki görüntü (imaj) yükü (b) Potansiyel engelinin azalması.....	19
Şekil 2.5. Düz beslem altında beş temel iletim işlemi. (1) Termiyonik emisyon, (2) Tünelleme, (3) Rekombinasyon, (4) Elektronların difüzyonu, (5) Deşiklerin difüzyon teorisi.....	21
Şekil 2.6. Ara yüzey hallerinin varlığında bir metal-yarıiletken Schottky kontakta, kontakta önce (a) ve sonra (b) enerji bantları.....	23
Şekil 2.7. sp ² hibritleşmiş karbon atomları üzerinde elektron delokalizasyonu.....	24
Şekil 2.8. PCDTBT'nin kimyasal yapısı.....	25
Şekil 2.9. PCBM'nin kimyasal yapısı.....	26
Şekil 2.10. Polimer ve PC ₆₁ BM arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi.....	28
Şekil 2.11. Hacim heteroekleminin şematik gösterim.....	29
Şekil 2.12. Çok eklemli yığılmış hücrelerin, (a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması (b) Monolitik (series constrained) uygulaması.....	30
Şekil 2.13. İki eklemli monolitik hücrelerde, (a) E _g 'si küçük olan p-n ekleminin J-V karakteristiği (b) E _g 'si büyük olan p-n ekleminin J-V karakteristiği (c) Hücrenin J-V karakteristiği.....	31
Şekil 2.14. Hacim heteroeklem güneş hücresi.....	32
Şekil 2.15. MIM modelleri. İki metal elektrot arasına sıkıştırılmış organik yarı iletken tabakaların farklı çalışma prensipleri: (a) kısa devre durumu (b) açık devre durumu (c) ters yönde kutuplama (d) ileri yönde kutuplama. ITO: yüksek iş fonksiyonlu elektrot, Al: düşük iş fonksiyonlu elektrot.....	33
Şekil 2.16. Organik fotovoltaiik hücrenin karanlık ve aydınlık akım-gerilim eğrileri.....	34

Şekil 2.17. Hava kütlesi.....	36
Şekil 2.18. Bir güneş hücresinin eşdeğer devresi.....	36
Şekil 3.1 Spin Kaplama Cihazı.....	38
Şekil 3.2. Termal Kaplama Cihazı.....	39
Şekil 3.3. Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au organik diyotunun yapısının şematik gösterimi.....	41
Şekil 3.4. Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au organik diyot.....	41
Şekil 3.5. ITO/PCDTBT: PC ₆₁ BM /Ag organik güneş hücrelerinin yapılarının şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.6. ITO/PCDTBT:PCBM/Ag organik güneş hücresi.....	42
Şekil 3.7. Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi.....	43
Şekil 3.8. Kapalı Döngü Helyum Soğutma Sistemi.....	43
Şekil 3.9. Morötesi-Görünür Spektrofotometre.....	44
Şekil 3.10. Solar simülatör.....	45
Şekil 4.1. Ag/n-Si/PCDTBT(66): PC ₆₁ BM (34)/Au organik diyotunun (a) 240 – 290 K ve (b) 300 – 350 K aralıklarında I-V karakteristiklerinin yarı-logaritmik ölçekle gösterimi.....	46
Şekil 4.2. Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC ₆₁ BM(50)/Au organik diyotunun (a) 240 – 290 K ve (b) 300 – 350 K aralıklarında I-V karakteristiklerinin yarı-logaritmik ölçekle gösterimi.....	47
Şekil 4.3. Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC ₆₁ BM(80)/Au organik diyotunun (a) 240 – 290 K ve (b) 300 – 350 K aralıklarında I-V karakteristiklerinin yarı-logaritmik ölçekle gösterimi.....	48
Şekil 4.4. Ag/n-Si/PCDTBT):PC ₆₁ BM/Au organik diyotlarının idealite faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.	53
Şekil 4.5. PCDTBT:PC ₆₁ BM organik ince filmlerin optik geçirgenlik grafikleri.....	56
Şekil 4.6. PCDTBT:PC ₆₁ BM organik ince filmlerin soğurma katsayılarının gelen ışığın enerjisine bağımlılığı.....	57
Şekil 4.7. PCDTBT:PC ₆₁ BM organik ince filmleri için $\alpha^{0.5}$ değerinin gelen ışığın enerjisine bağımlılığını gösteren grafik.....	58
Şekil 4.8. ITO/PCDTBT:PC ₆₁ BM /Ag güneş hücreleri için J-V karakteristikleri.....	60
Şekil 4.9. ITO/PCDTBT:PC ₆₁ BM /Ag güneş hücreleri için elektriksel güç yoğunluğunun hücreye uygulanan potansiyel farka (V) bağımlılığı.....	61

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1. Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC ₆₁ BM(34)/Au organik diyotunun farklı sıcaklıklarda hesaplanan karakteristik parametreleri.....	49
Çizelge 4.2. Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC ₆₁ BM(50)/Au organik diyotunun farklı sıcaklıklarda idealite faktörleri.....	50
Çizelge 4.3. Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC ₆₁ BM(80)/Au organik diyotunun farklı sıcaklıklarda idealite faktörleri.....	51
Çizelge 4.4. ITO/PCDTBT:PC ₆₁ BM/Ag güneş hücrelerinin karakteristik parametreleri.....	61



KISALTMALAR

AM	Hava kütlesi
C-V	Kapasitans-voltaj
I-V	Akım-voltaj
ITO	İndiyum kalay oksit
J-V	Akım yoğunluğu-voltaj
OMPY	Organik Metal Polimer Yariletken
PCBM	(1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil[6, 6]C61)
PCDTBT	Poli[N-9'-heptadekanil-2,7-karbazol-alt-5,5-(4',7'- di-2-tienil-2',1',3'- Benzotiadiazol]
SBD	Schottky Bariyer Diyot

SİMGELER

A	Doğrultucu kontak alanı
AC	Alternatif akım
AE	Alan emisyonu
Ag	Gümüş
Au	Altın
A^*	Etkin Richardson sabiti
d	Arayüzey tabakanın kalınlığı
DC	Doğru akım
D_n	Elektron difüzyon sabiti
E_C	İletkenlik band kıyısı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak band aralığı
E_m	Maksimum elektrik alan
$E(x)$	Schottky bölgesindeki elektrik alan
G	İletkenlik
H	Planck sabiti
Hz	Frekans birimi (Hertz)
I	Akım
$I_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkeniden metale doğru akım yoğunluğu
$I_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akım yoğunluğu
I_0	Doyum Akımı
J_0	Ters doyum akımı
k	Boltzmann Sabiti
kHz	Kilohertz
n	İdealite Faktörü
Si	Silisyum
T	Mutlak Sıcaklık
V	Voltaj
B	Engel yüksekliğinin voltaj ile değişim katsayısı

$\Delta\Phi_B$	Schottky engel alçalması
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
χ_s	Elektron yakınlığı
q	Elektron Yüğü



ÖZET

PCDTBT TABANLI ORGANİK DİYOT VE GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Merve Kurtay

Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN, Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

Temmuz 2019, 65 sayfa

Bu çalışmada Gümüş/n-tipi Silisyum/poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole:[6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester/Altın (Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au) organik metal-polimer yarıiletken Schottky bariyer diyotları, polimer arayüz olarak %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 oranlarında PCDTBT:PC₆₁BM karışımı kullanılarak üretilmiştir. Üretilen diyotların 240 - 350 K sıcaklık aralığında akım-voltaj ölçümleri yapılarak, idealite faktörü (n), doyum akımı (I₀) ve potansiyel bariyer yüksekliği (φ₀) değerleri hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklardaki diyot idealite faktörlerinin %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 karışım oranları için sırasıyla 2,29-3,82; 1,38-1,53 ve 1,80-2,26 aralıklarında değiştikleri gözlemlenmiştir. Diyotlarda kullanılan karışımların optik özellikleri, %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 oranlarına sahip PCDTBT:PC₆₁BM ince filmlerin cam üzerine kaplanmasından sonra 400-1100 nm dalgaboyu aralığında yapılan optik geçirgenlik deneyleri aracılığıyla incelenmiştir. İncelenen filmlerin dolaylı yasak enerji bant aralıklarına sahip oldukları açığa çıkarılmış ve yasak enerji bant aralığı değerleri %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 oranları için sırasıyla 1,03; 0,84 ve 0,84 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın son aşamasında İndiyum Kalay Oksit/PCDTBT:PCBM/Gümüş (ITO/PCDTBT:PCBM/Ag) organik güneş hücreleri %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 oranlarında PCDTBT:PC₆₁BM karışımları kullanılarak üretilmiştir. Üretilen güneş hücrelerinin optoelektronik özellikleri 300 °K oda sıcaklığında AM 1.5 güneş radyasyonu altında akım yoğunluğu-voltaj deneyleri aracılığıyla incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda hücrelerden alınabilecek maksimum güç yoğunluğu (P_{maks}), dolum faktörü (FF) ve güç dönüştürme verimi (η) değerleri tüm hücreler için hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu, %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 PCDTBT:PC₆₁BM karışım oranları kullanılarak üretilen güneş hücrelerinin güç dönüştürme verimlerinin sırasıyla % 0,39, % 0,57 ve % 0,85 olduğu açığa çıkarılmış ve güneş hücrelerindeki PC₆₁BM oranının artırılmasının hücre verimini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: PCDTBT, PCBM, güneş hücresi, elektriksel karakterizasyon, optik karakterizasyon.

ABSTRACT

THE PRODUCTION CHARACTERIZATION OF PCDTBT- BASED ORGANIC DIODES AND SOLAR CELLS

Merve KURTAY

Duzce University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Asoc. Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN, Asoc. Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

July 2019, 65 pages

In this study, Silver/n-type Silicon/poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole:[6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester/Gold (Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au) organic metal-polymer semiconductor Schottky barrier diodes were produced by using PCDTBT:PC₆₁BM mixtures with percentage ratios of %66:34%, 50%:50%, and 20%:80% as a polymer interface. The ideality factor (n), saturation current (I₀) and potential barrier height (φ₀) values of the produced diodes were investigated by employing Current-Voltage measurements in the temperature range of 240 – 350 °K. The ideality factors for %66:%34, %50:%50, and %20:%80 mixture ratios were found to vary between 2,29-3,82; 1,38-1,53 and 1,80-2,26, respectively. The optical properties of the mixtures used in the diodes were investigated by transmission measurements in the wavelength range of 400-1100 nm after coating of PCDTBT:PC₆₁BM thin films with mixture ratios of 66%:34%, 50%:50%, and 20%:80% on a glass substrate. The forbidden band gap for the investigated films were found to be indirect in nature and the band gap energy values were found to be 1,03; 0,84 ve 0,84 eV for films with the ratios %66:%34, %50:%50, and %20:%80, respectively. In the final stage of the study, Indium Tin Oxide/PCDTBT:PC₆₁BM/Silver (ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag) organic solar cells were produced by using 66%:33%, 50%:50%, and 20%:80% PCDTBT: PC₆₁BM mixture ratios. The optoelectronic properties of the produced solar cells were investigated by employing Current Density-Voltage measurements at 300°K room temperature under AM 1.5 solar radiation. As a result of the analysis, maximum power density (P_{max}), fill factor (FF) and power conversion efficiency (η) values were calculated for all of the produced cells. As a result of calculations, solar power conversion efficiencies of 0.39%, 0.57% and 0.85% were calculated for the cells having 66%:34%, 50%:50%, and 20%:80% PCDTBT:PC₆₁BM mixture ratios. It was also revealed that the increase of percentage ratio of PC₆₁BM in solar cells significantly increased cell power conversion efficiency.

Keywords: PCDTBT, PC₆₁BM, solar cell, electrical characterization, optical characterization.

1. GİRİŞ

Organik yarıiletken malzemeler, araştırmacılar tarafından yıllardır ilgi ile incelenen malzemeler olmuşturlardır. Bu malzemelerin elektronik, optik ve manyetik özellikleri bu ilginin temel sebebi olarak gösterilebilir. Organik yarıiletkenler bu özelliklerinden dolayı elektronik aygıt üretimi süreçlerinde maliyet düşüklükleri, esnek yapısal özellikleri, kolay işlenebilirlikleri ve geniş alan üretimi uygulamalarına uygunlukları gibi potansiyel avantajlara sahiptirler. Bahsedilen nedenlerden dolayı organik yarıiletken temelli Schottky diyotları, güneş hücreleri, alan etkili transistörler ve ışık yayıcı diyotlar gibi birçok uygulamalar mevcuttur [1-5]. Elektronik aygıt üretiminde organik yarıiletkenler arasında poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole) (PCDTBT) ve [6,6]-phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PC₆₁BM)'in kullanılması son zamanlarda ilgi gören bir konu olmuştur [6-11]. PCBM'in özellikle bir türevi olan PC₇₁BM kullanılarak üretilen yığın heteroeklem (dağılmış heteroeklem) yapısına sahip aygıtlarda kayda değer güç dönüştürme verimleri ve verimlilik süreleri elde edilmiştir [12-22].

Elektronik aygıt uygulamaları arasında özellikle diyotlar ve güneş hücreleri benzer temel çalışma prensiplerine sahiptirler. Bundan ötürü her iki uygulamada da üretilen aygıtların karakteristik özellikleri ağırlıklı olarak aygıtın aktif katmanı içerisinde oluşan iç elektrik alanın özelliklerine bağlıdır. Başarılı olarak üretilecek organik bir diyotun işlevini yerine getirmesi durumunda, aynı organik katmana sahip olan bir güneş hücresi üretilmesi ihtimali de değerlendirilebilir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, benzer yapıya sahip P3HT:PC₆₁BM güneş hücrelerinde kullanılan PC₆₁BM oranının %44 - %50 aralığında, PTB7:PC₇₁BM güneş hücrelerinde kullanılan PC₇₁BM oranının %57 - %67 aralığında, PCDTBT: PC₇₁BM güneş hücrelerinde kullanılan PC₇₁BM oranının ise %67 - %80 aralığında değiştiği görülmektedir [12-62]. Bu alanda yapılan çeşitli çalışmalara rağmen, literatürde PC₆₁BM kullanılarak üretilen diyotların sıcaklığa ve PCDTBT:PC₆₁BM oranına bağlı karakteristiklerinin henüz detaylı olarak incelenmediği görülmektedir. Bunun yanı sıra, yapılan tüm çalışmalarda benzer hacimsel oranlar kullanıldığı da dikkat çekmektedir. Tüm bunlara ek olarak, PC₆₁BM kullanılarak üretilen güneş hücrelerinin karakteristiklerinin PCDTBT: PC₆₁BM oranına bağımlılığının da aynı

koşullar altında üretilen hücreler için detaylı olarak henüz incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmanın yapılmasındaki ana amaç, farklı oranlarda PCDTBT: PC₆₁BM kullanılarak başarılı bir şekilde organik diyotlar üretilmesi ve üretilecek olan organik diyotların sıcaklığa bağımlı karakterizasyonunun yapılmasıdır. Üretim sürecinin başarı ile tamamlanması durumunda, karakterizasyon işleminden elde edilecek sonuçlar ışığında farklı oranlarda PCDTBT:PC₆₁BM kullanılarak üretilecek olan organik güneş hücrelerinin en yüksek verimle çalışacağı sıcaklık aralığının belirlenmesi ve güneş hücrelerinin karakteristik özelliklerinin bu orana bağımlılığının bu sıcaklık değerlerinde incelenmesi mümkün olacaktır.

Bahsedilen nedenlerden dolayı, bu çalışmanın ilk aşamasında Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au organik metal-polimer yarıiletken (OMPY) Schottky bariyer diyotları (SBD), polimer ara yüz olarak %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 oranlarında PCDTBT:PC₆₁BM karışımları kullanılarak üretilmiştir. Burada diyotların sıcaklığa bağlı karakteristiklerinin PC₆₁BM oranına bağlı olarak incelenmesi, PC₆₁BM oranının kademeli olarak artırılmasıyla sağlanmaya çalışılmıştır. Üretilen diyotların 240- 350 K sıcaklık aralığında diyot idealite faktörü n , doyum akımı I_0 ve potansiyel bariyer yüksekliği ϕ_{b0} gibi karakteristik özellikleri ve bu özelliklerin sıcaklığa bağımlılıkları akım-voltaj ölçümleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, başarılı bir şekilde üretilen diyotlar ile aynı organik katmanların kullanıldığı ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag organik güneş hücreleri %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 PCDTBT:PC₆₁BM hacimsel oranlarına sahip olacak şekilde üretilmiş ve hücre karakteristiklerinin bu orana bağımlılığı incelenmiştir.

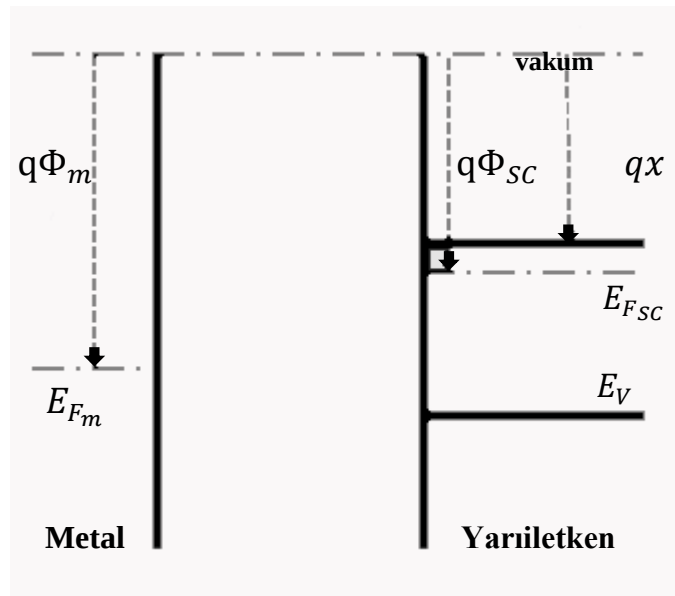
2. TEORİK YAKLAŞIM

2.1. SCHOTTKY DİYOTLARI

Schottky diyot bir yarıiletken ile bir metal arasında bir doğrultucu kontak oluştuğunda meydana gelmektedir. Schottky diyotun doğrultucu özelliği pn eklemesinin özellikleri ile benzer özellik göstermektedir. F. Braun 1874 yılında metal-yarıiletken kontak diyotlarda doğrultma olayını keşfetti. Schottky ve Moss tarafından da bu keşif 1938 yılında açıklandı.

2.1.1. Enerji- Band Diyagramı

Bir metal ile n-tipi bir yarıiletkeni incelediğimizde Şekil 2.1’de enerji diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.1. Bir metal ve bir yarıiletkende (ayrı ayrı) enerji bandları.

Bir dalga boyuna sahip bir ışık vakum ortamında bir metal üzerine düşürüldüğünde metalden elektronlar kopararak fotoelektrik olayının gerçekleşmesini sağlar (A.Einstein Nobel Ödülü 1921). Ayrıca fotoelektrik olay da elektronları vakum ortamına kadar itmesi için fotonların elektronları metalden koparacak kadar enerjiye sahip olması gerekir. $E = hv$ enerjisi metalin iş fonksiyonuna ($q\Phi_m$) eşittir. Metalin Fermi enerji seviyesindeki (E_{F_m}) bir elektronu metalden uzaklaştırmak için elektrona verilen enerji iş fonksiyonu

olarak tanımlanır. Bir elektronu yarıiletkenin fermi enerji seviyesinden (E_{FSC}) uzaklaştırmak için gerekli enerji de yarıiletkenin iş fonksiyonunu ifade eder.

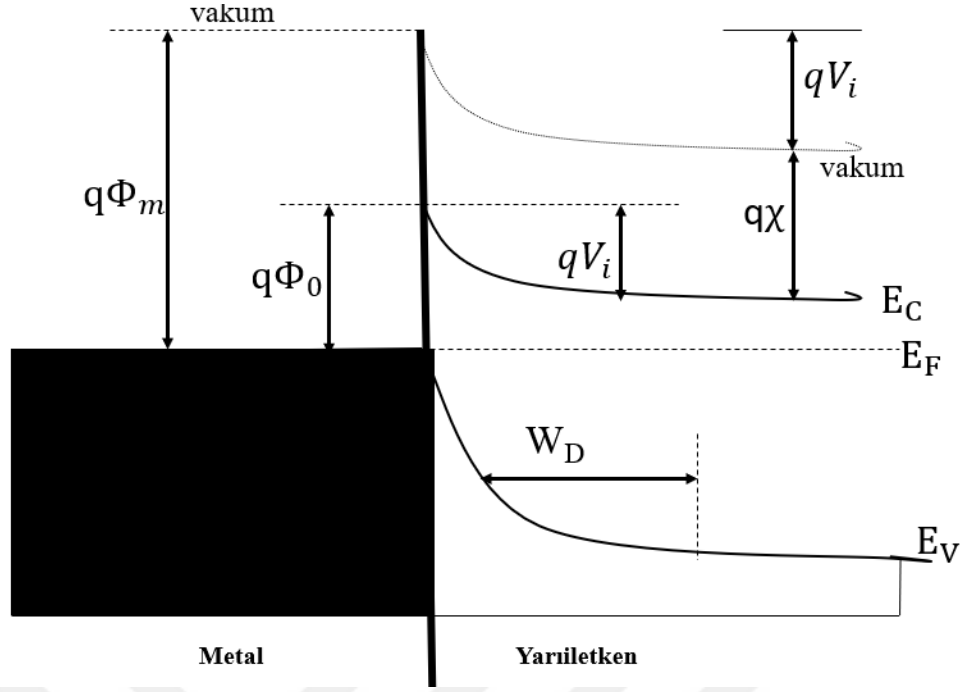
Bir yarıiletkenlerde iletkenlik bandında bulunan bazı elektronlar E_{FSC} 'den daha fazla enerjiye sahiptirler ve bu enerji yaklaşık olarak E_C 'ye eşittir. Elektron ilgisi bir elektronun iletkenlik bandından vakum seviyesine çıkması için gereken enerjidir. $q\chi$ ile gösterilir. Fermi seviyeleri n-tipi yarıiletken ile bir metal kontak haline getirildiklerinde eşit olur. Termodinamik denge hali $E_C > E_{Fm}$ olan yarıiletkenin iletkenlik bandından metale elektron geçmesi durumunda oluşur. Metale geçen elektronlar, yarıiletkenlerde pozitif yüklü verici saf atomları bırakırlar ve böylelikle yarıiletkenin yüzeyine yakın, yarıiletkenler ile metaller ara yüzeyinde bir uzay yükü bölgesi oluşur. Bu bölgeye boşaltılmış (deplasyon) bölgesi denir ve genişliği W_D ile gösterilir. Yarıiletken-metal ara yüzeyinde deplasyon yüküne eşit elektron yükü görülür. Bu yük bölgesi sonsuz ince kabul edilir. Bu yük dağılımı 'yük tabakası' olarak da bilinir. Yarıiletkendeki band bükülmesi deplasyon bölgesinin varlığından ve fermi seviyelerinin eşitlenmesinden kaynaklanır. Band bükülmesi;

$$qV_i = q(\Phi_m - \Phi_{SC}) \quad (2.1)$$

ile ifade edilir. Daha fazla elektronun metale geçmesini engelleyen bu eğrilik bir V_i potansiyel engelini ifade eder. Metaldeki elektronlar,

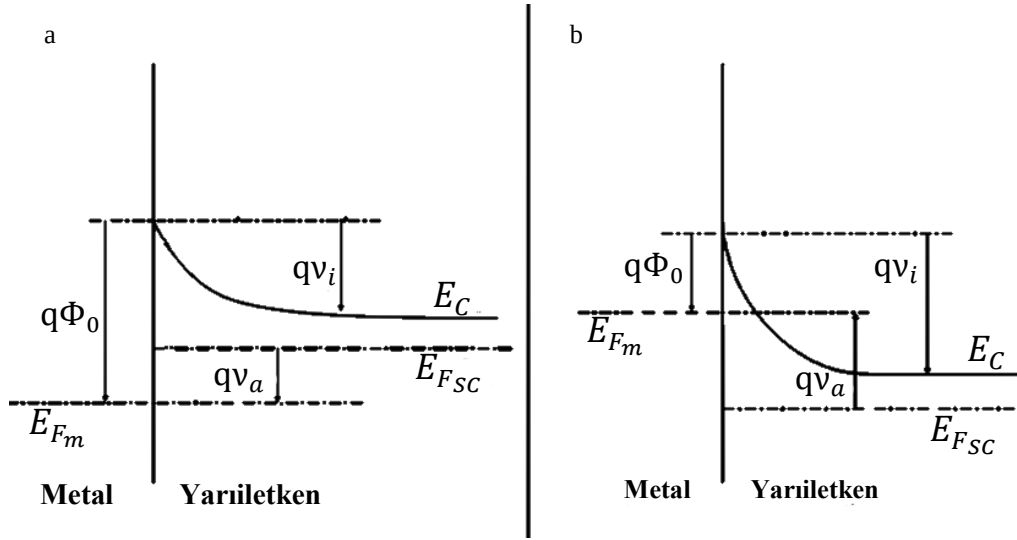
$$q\Phi_0 = q(\Phi_m - \chi) = qV_i + (E_C - E_F) \quad (2.2)$$

ifadesine eşit bir Φ_0 potansiyel engeli görürler (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Bir metal/ n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu Schottky kontağın denge durumundaki enerji band diyagramı.

Birkaç tane elektronun potansiyel engeli aşabilecek kadar enerjisi vardır ve bu engeller oda sıcaklığında kT/q 'dan çok daha büyüktür. Sonuç akım, engeli aşıp metale geçen elektronlardan kaynaklanır. Elektronların negatif yük taşımasından dolayı bu akım $I_{m \rightarrow s}$ ile gösterilir. $I_{m \rightarrow s}$ akımı tamamen $I_{s \rightarrow m}$ ile dış bir geriliminin olmaması ve termodinamik denge durumunda dengelenmiştir. Denge durumunda $-I_{m \rightarrow s} = I_{s \rightarrow m}$ olur. Potansiyel engelinin V_i 'den $V_i - V_a$ 'ya düşmesi için, $V_a > 0$ olacak şekilde düz beslem gerilimi uygulanması (metal tarafına +, yarıiletken tarafına-) gerekir (şekil 2.3). Bu durumda çok daha fazla sayıda elektron metale geçer ve $I_{s \rightarrow m}$, metalden yarıiletkene elektron akışı sabit kalır. Çünkü potansiyel engeli ϕ_0 değişmez. Yarıiletkenden metale net bir elektron akımı olduğu gözlenir. Yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli V_i 'den $V_i - V_a$ 'ya yükselmesi için $V_a > 0$ olacak şekilde bir ters beslem gerilimi uygulanması (metal tarafına-, yarıiletken tarafına +) gerekir (Şekil 2.3). Bu durumda yarıiletkenden metale doğru elektron akışı, $I_{m \rightarrow s}$ azalırken, $I_{s \rightarrow m}$ değişmeden kalır ve bir küçük ters beslem akımı ($I_{s \rightarrow m} - I_{m \rightarrow s}$) ölçülür.



Şekil 2.3. Bir metal – yarıiletken kontakta enerji-bant diyagramı; a: Düz beslem, Ters beslem durumunda.

2.1.2. Deplasyon Bölgesinin Genişliği

Poisson denklemi ve deplasyon yaklaşımı kullanılarak Schottky diyotta deplasyon bölgesinin genişliği hesaplanabilir.

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_{SC}} = -\frac{qN_d}{\epsilon_{SC}} \quad (2.3)$$

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = +\frac{qN_d}{\epsilon_{SC}} (W - x) \quad (0 \leq x \leq W) \quad (2.4)$$

Burada W uygulanan V_a gerilimi altında deplasyon bölgesinin genişliğidir. $x = W$ 'daki sınır şartlarında $\phi(W) = 0$ ve $\frac{d\phi(W)}{dx} = 0$ 'dir. E elektrik alanının değeri yarıiletkenin sözde (quasi) nötral bölgesinde sıfıra eşittir. (2.4) ifadesinin integrali alınarak belirtilen sınır şartları kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\Phi(x) = -\frac{qN_d}{2\epsilon_{SC}} \left(w_x - \frac{x^2}{2} \right) \quad (2.5)$$

Yarıiletken tarafındaki $x = 0$ 'daki potansiyel ($V_i - V_a$) potansiyel engeline eşittir. Diyot düz beslem altındayken V_a pozitif alınır. (2.5) deplasyon genişliğini bulmak için $V_i - V_a$ $\phi(x=0)$ için yerine yazılır. Deplasyon bölgesinin genişliği;

$$W = x \rightarrow w(V_a) \sqrt{\frac{2\epsilon_{SC}}{qN_d} (V_i - V_a)} \quad (2.6)$$

olur. $x = 0$ 'daki elektrik alan $E(0) = -\frac{qN_d W}{\epsilon_{SC}}$ olur veya (2.6) eşitliği kullanılarak;

$$E(0) = -\sqrt{\frac{2qN_d}{\epsilon_{SC}} (V_i - V_a)} \quad (2.7)$$

yazılabilir.

2.1.3. Schottky Etkisi (Olayı)

Metal tarafındaki (Φ_0) potansiyel engel yüksekliğinin tamamen sabit değildir ve az da olsa uygulanan gerilimden etkilenmektedir. Yarıiletkendeki elektronlar tarafından metalde oluşturulan görüntü yükü nedeniyle Φ_0 'de gerçek manada azalma gözlenmektedir. Elektrik alan uygulandığında yük taşıyıcı emisyonun için potansiyel enerjinin düşük olduğu zaman imaj kuvvet içermesine Schottky etkisi denir. Ara yüzey oksit tabakanın varlığına bağlı olmayan bu etki, bir tabaka mevcut değilken meydana gelmektedir. Şekil 2.4'te yer alan imaj kuvvet engel alçalmasında ilk olarak metal-vakum sistemi akla gelmektedir. Metalden bir x uzaklığında bir elektron varsa, metal yüzeyinde bir pozitif yük indüklenmesine neden olacaktır. Elektron ve indüklenmiş pozitif yük arasında yer alan çekim kuvveti, elektrona $-x$ uzaklıkta yerleşmiş olan bir pozitif yük arasındaki kuvvete eşittir. Pozitif yük imaj yükü, aradaki çekim kuvveti ise imaj kuvveti olarak tanımlanmaktadır. İmaj kuvveti 2.8'de gösterilmektedir.

$$F_x = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0x^2} \quad (2.8)$$

Boş uzayın dielektrik sabiti olan ϵ_0 , negatif bir potansiyel enerjiye sahiptir ve bu potansiyel enerji engel yüksekliğine eklenmelidir. Bir dış E elektrik alanı uygulandığında toplam potansiyel enerji (PE) uzaklığın bir fonksiyonu olarak eşitlik 2.9'de gösterildiği şekilde verilmektedir.

$$PE = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0x} + qEx \quad (2.9)$$

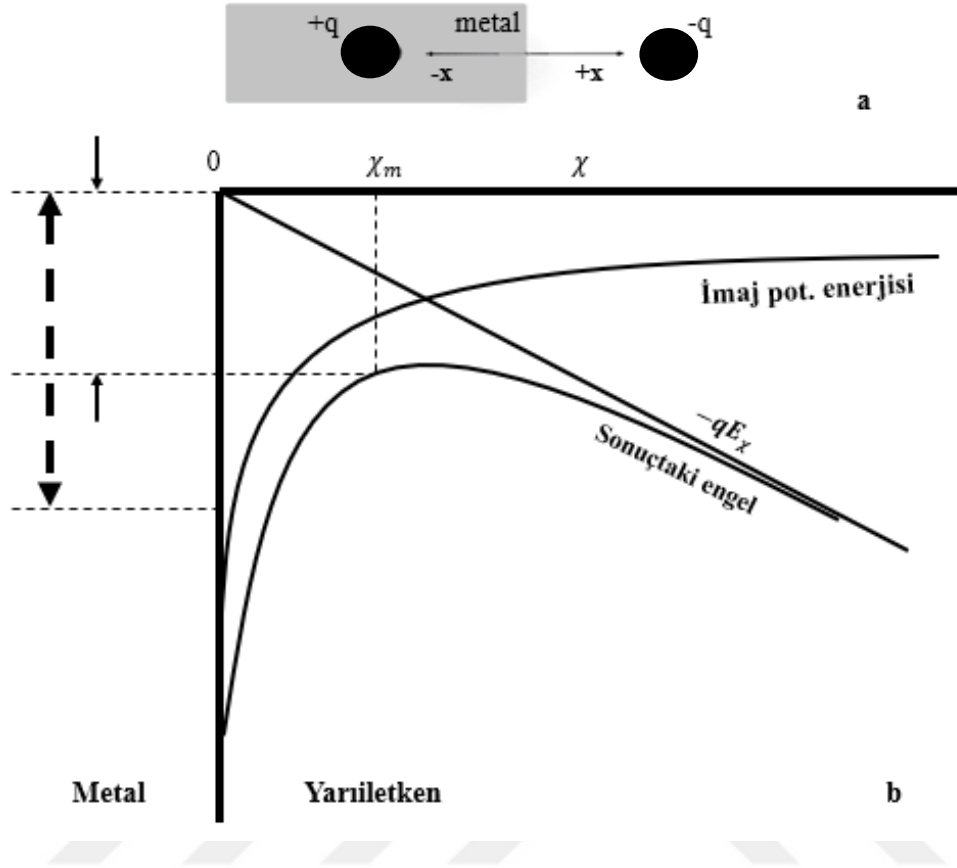
Schottky engel düşmesi $\Delta\Phi$ ve bu düşmenin gerçekleştiği uzaklık χ_m olarak kabul edilirse, $dPE(x)/dx = 0$ şartında,

$$\chi_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_0 E}} \quad (2.10)$$

ve

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} = 2E\chi_m \quad (2.11)$$

yazılabilir. Yüksek alanlarda Schottky engel düşmesinin azalmasıyla akım iletim mekanizmaları da değişmektedir.



Şekil 2.4. (a) Bir metaldeki görüntü (imaj) yükü (b) Potansiyel engelinin azalması.

Bu durumda,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{q\varepsilon_{max}}{4\pi\varepsilon_s}} \quad (2.12)$$

elde edilmektedir. Burada ε_s ile ifade edilen değer yarı iletkenin durgun dielektrik sabitinden farklı olmalıdır. Elektronun emisyon sürecinin tamamında metal/yarıiletken ara yüzeyindeki maksimum engeli geçiş süresi dielektrik gevşeme zamanından daha kısa ise yarıiletken ortası yeterli polarizasyon zamanına sahip olamaz. Bu durumda durgun permitiviteden daha küçük bir permitivite beklenir. Si için bilinen tüm permitivite değerleri durgun permitivite değerleri ile aynıdır. Şekil 2.4’de farklı voltajlar altında metal/n- tipi yarıiletken için Schottky etkisinin genel enerji diyagramı gösterilmektedir. Doğru beslem durumunda ($V_a > 0$) engel yüksekliği sıfır beslem engel yüksekliğinden daha büyük olacaktır ve alan ile imaj kuvveti ise daha küçük olacaktır. Ters beslem durumunda ise ($V_a < 0$) engel yüksekliği daha küçük olacaktır. Engelin imaj kuvvet

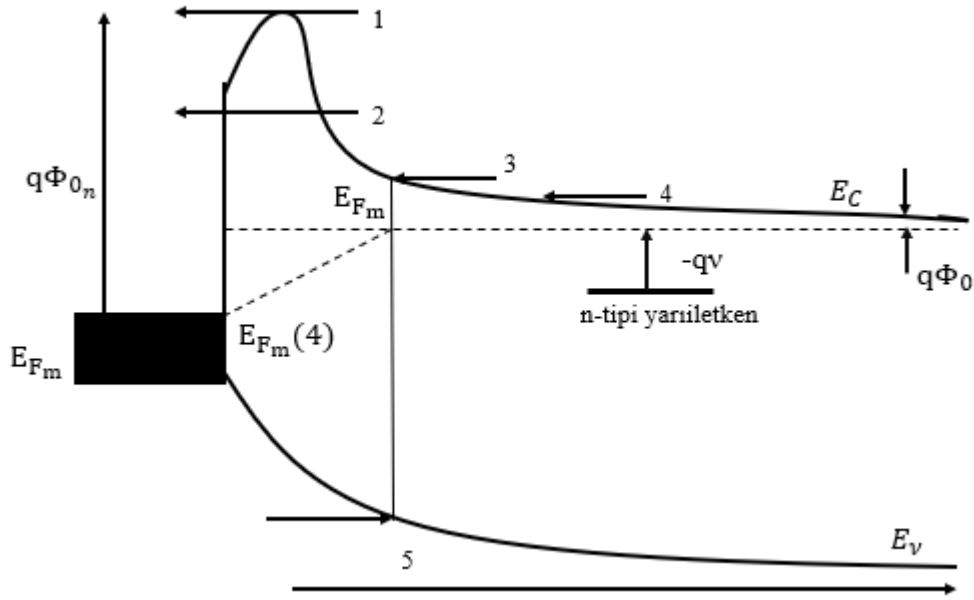
alçalması, elektron tarafından alan üretilmesi sonucunu doğurur. Bu sayede yarıiletken iletim band yakınındaki engel tepesinde elektron olmadığında engel alçalması olmayacaktır. Bunun sonucunda engel yüksekliği engele doğru elektron hareketi gerektirmeyen bir metotla ölçüldüğünde Φ_0 'nin gözlenen değeri imaj kuvveti tarafından düşürülmez.

2.1.4. Akım- Gerilim Karakteristikleri

2.1.4.1. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Yarıiletken- metal kontaklarda akım iletimi azınlık taşıyıcıları ile gerçekleşen pn ekleminde farklı olarak çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleşir. Şekil 2.5 düz beslem altında beş tane temel iletim mekanizmasını göstermektedir (Ters beslemde bu işlemlerin tam tersi gerçekleşir.). Bu işlemler;

1. Schottky diyotlarda normal sıcaklıklarda yapılan elektronların yarıiletkendeki potansiyel engeli üzerinden metale geçmesi baskın bir işlemdir.
2. Elektron için kuantum mekaniksel tünellenmesi (Omik kontaklardan sorumlu ve yarıiletkenler için önemlidir).
3. Uzay yükü (deplasyon) bölgesinde rekombinasyon (pn eklemindeki rekombinasyona benzerdir).
4. Deplasyon bölgesinde elektronların difüzyonu
5. Metalden yarıiletkene difüzyonla enjekte olandeşik nötral bölgedeki rekombinasyona eşdeğerdir.



Şekil 2.5. Düz beslem altında beş temel iletim işlemi. (1) Termiyonik emisyon, (2) Tünelleme, (3) Rekombinasyon, (4) Elektronların difüzyonu, (5) Deşiklerin difüzyon teorisi.

Schottky kontaklarda yeterli termal enerjiyi kazanan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden metalden yarıiletkene geçmeleri ve sıcak bir yüzeyden elektron salınması termiyonik emisyon olarak ifade edilir. Potansiyel engeli açık bir şekilde kT/q 'dan daha büyüktür. Bir V_a düz beslem gerilimi aygıtı uygulandığında $\Phi_0 - V_a$ yarıiletken den metale geçmek için aşacakları potansiyel engele eşittir. Sonuçtaki termiyonik emisyon akımı şu ifade ile verilir:

$$I_{m \rightarrow s} = AR * T^2 \exp\left[-\frac{q(\Phi_0 - V)}{nkT}\right] \quad (2.13)$$

Burada R^* , 'Richardson sabiti' olarak adlandırılıp $\frac{4\pi m_e q k^2}{h^3}$ 'e eşittir ve A diyotun yüzey alanıdır. $V_a = 0$ iken $I_{m \rightarrow s} = I_{s \rightarrow m}$ ve $I_{s \rightarrow m}$ 'nin sabit olduğu ve uygulanan gerilimden bağımsız olması dikkate alınarak;

$$I_{s \rightarrow m} = AR * T^2 \exp\left[-\frac{q(\Phi_0)}{nkT}\right] \quad (2.14)$$

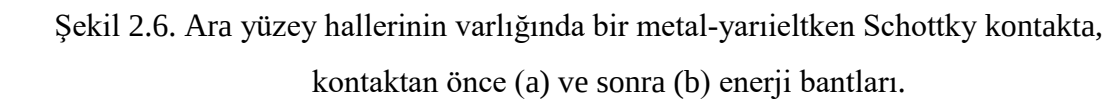
yazabiliriz. Diyottaki net akım $I_{m \rightarrow s} + I_{s \rightarrow m}$ olduğundan akım ifadesi gerilimin ifadesi olarak şöyle olur:

$$I = AR * T^2 \exp\left[-\frac{q(\Phi_0)}{nkT}\right] \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \quad (2.15)$$

Bu denklem akım- gerilim karakteristiğini ifade eder. Akım hem yarıiletken ile metal arasındaki potansiyel engel yüksekliğine hem de sıcaklığa bağlıdır.

2.1.4.2. Ara yüzey Hallerinin Etkisi

Eşitlik 2.14’de yer alan denklem, Schottky diyotun metalin varlığından etkilenmeyen yarıiletkenin özelliklerini tanımlamaktadır. Gerçekte ara yüzeydeki yarıiletken kristalin periyodik tabiatı bozulmaktadır. Bu durumda yarıiletkenin yasak enerji aralığında, yüzeye yakın yerde çok sayıda hallerin sayısı artar. Artan bu haller ‘arayüzey halleri’ veya ‘arayüzey tuzakları’ olarak adlandırılır. Bu tuzaklar E_V ’den E_C ’ye kadar değişen enerji değerleri alabilir ve Fermi seviyesinin altında bir enerji değerinde bulunduklarında elektronlarla doludurlar. Yarıiletken kristalden etkilenen elektronlar ara yüzey hallerini oluşturmaktadır. Yarıiletkende deplasyon bölgesi oluşumuna neden olan elektronlar negatif bir yüzey yükü meydana getirmektedirler (Şekil 2.6.). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde bir $q\Phi_0 = E_F - E_V$ kadarlık bir band bükülmesi gözlenir. Çok sayıda arayüzey hal yoğunluğunun bulunduğu durumlarda küçük bir bant bükülmesinin artışı δE Fermi seviyesinde fazla sayıda δE ve $E_F - \delta E$ arayüzey halini hareket ettirecektir. Bu haller tuzaklanmış elektronları kaybedecek ve sonuçta Fermi seviyelerinin eşitlenmesi, yarıiletkenden metale geçişi ile değil elektronların tuzaklardan metale geçişi ile gerçekleşecektir. Bu durumdan dolayı fermi seviyelerinin eşitlenmesinin sonucunda bant bükülmesi ihmal edilecek ve potansiyel engel yüksekliği $q\Phi_b = E_s - q\Phi_0$ olacaktır. Çok sayıdaki ara yüzey hal yoğunluğu dikkate alındığında, sonsuz küçük bir bant bükülmesinin artışı δE Fermi seviyesinin üzerine (δE ve $E_F - \delta E$ arasında) çok sayıda ara yüzey hali hareket ettirecektir. Tüm bu haller tuzaklanmış elektronları kaybedecek ve sonuçta Fermi seviyelerinin eşitlenmesini sağlayarak, yarıiletkenden metale geçiş yerine, elektronların tuzaklardan metale geçişleri gerçekleştirecektir. Bunun sonucunda Fermi seviyeleri eşitlenir ve bant bükülmesi ihmal edilerek potansiyel engel yüksekliği $q\Phi_b = E_g - q\Phi_0$ ile ifade edilir. Gerçek aygıtlarda ara yüzey hal yoğunluğu, potansiyel engel yüksekliği $q\Phi_b = E_g - q\Phi_0$ ile $q\Phi_0 = q\Phi_m - q\chi$ arasında ortada bir yerdedir.

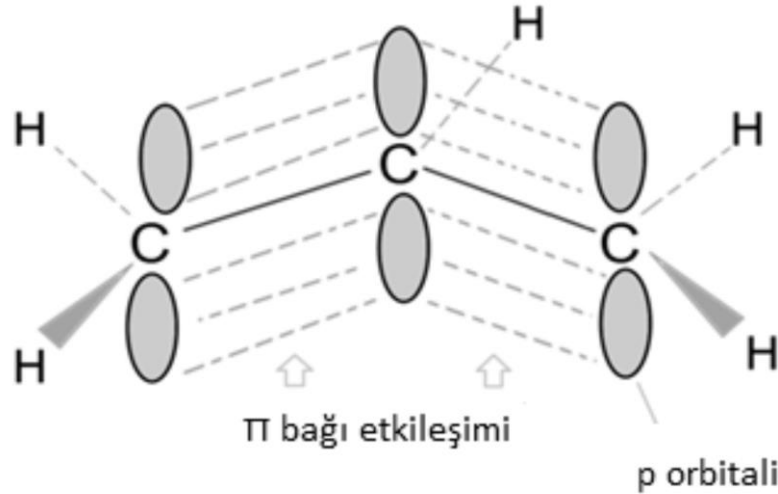

$$I = AR * T^2 \exp\left[-\frac{q(\Phi_0)}{nkT}\right] \left[\exp\left(\frac{qV_a}{nkT}\right) - 1\right] \quad (2.16)$$
$$I_0 = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{nkT}\right) \quad (2.17)$$
$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_a}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.18)$$
$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V)}{d(\ln(I))} \quad (2.19)$$

12

2.2. KONJUGE POLİMERLER

2.2.1 Konjuge Polimerlerin Tarihi

Heeger, MacDiarmid ve Shirakawa 1977 yılında poliasetilenin metalik özelliklerini bildirerek elektronik olarak iletken polimerleri bulmuş oldular. Konjuge polimerlerin elektronik iletkenliği birkaç merteye arttırmasında kimyasal olarak katkılamanın etkisini keşfettiler. Bu çalışma ile kimya dalında 2000 yılında Nobel Ödülü'nü almışlardır [63]. Son 25 yılda bu malzemelerin optik, elektriksel, fiziksel ve yapısal özellikleri üzerine birden fazla deneysel ve teorik çalışma yapıldı. Bunun sonucu olarak, günümüzde transistörler, LEDler, fotodiyotlar, güneş hücreleri ve biosensörler, gibi birçok uygulama mevcuttur. Konjuge polimerlerin yapısı değişken çift ve tek bağlı karbonların bulunduğu lineer bir zincir halindedir. Bu lineer zincirde, karbon atomları üst üste binen sp^2 , hibritleşmiş orbitaller σ , düzlemdışı pz orbitalleri komşu pz orbitalleri ile üst üste binerek π bağlarını oluşturmaktadır [64]. Bu konjuge polimerlerin kimyasal yapısı değişebilen tek ve çift bağlar içermektedir ve π bağlarını oluşturan elektronlar lokalize olmayan ancak izomerik etki nedeniyle komşu atomlar üzerinde ilerleyebilmektedir. Ayrıca bu π bağlarını oluşturan elektronlar lokalize olmamasına rağmen izomerik etki nedeniyle komşu atomlar üzerinde ilerleyebilmektedir.



Şekil 2.7. sp^2 hibritleşmiş karbon atomları üzerinde elektron delokalizasyonu.

Delokalizasyon polimerlerin iletkenlik özelliklerini de açıklar. İki pz – orbitalinin üst üste binmesi bir bağlayıcı π orbitalini ve ikincisi de antibağlayıcı π^* – orbitalini oluşturur. π – orbitali daha alçak bağlayıcıdır ve inorganik bir yarıiletkenin valans bandını oluşturur.

İletim bandını ise daha yüksek enerjili olan π^* – orbitali oluşturur. Bu enerji farkı “bant aralığı” olarak tanımlanır. Bant aralığına bağlı olarak bir malzemenin optik ve elektriksel özellikleri değişkenlik gösterebilir [65].

Valans bandındaki yük taşıyıcılar genellikle deşik iletkendir (boş durumlar). Bu türdeki malzemelere “p– tipi malzeme” denir. “n– tipi malzeme” ise iletim bandındaki yük taşıyıcıları elektronlar olan malzemelerdir [66]. Organik güneş hücrelerinde katkılama olayı bir vericinin işgal edilmemiş olan en alçak moleküler orbitalinden (LUMO), kendisinden düşüğe bulunan bir elektron alıcı molekülün en alçak moleküler orbitaline (LUMO) fotoindüklenmiş bir elektron transferi ile gerçekleşir. Güneş hücresi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan konjuge polimerler yaklaşık olarak 2 eV bant aralığına sahiptir ve bu inorganik yarıiletkenlerinkinden daha yüksektir. Bu durum kısıtlı spektruma neden olur ve güneşten yayılan 600-800 nm aralığındaki spektrumları kapsamaz [67].

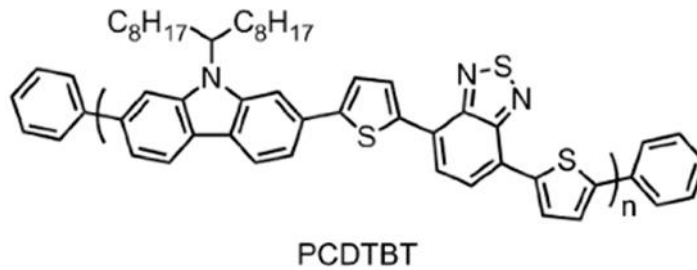
2.2.2. Üretimde Kullanılan Malzemeler

2.2.2.1. İndiyum Kalay Oksit (ITO)

İndiyum Oksit (In_2O_3) ve Kalay (2) Oksit (SnO_2)’nin karışımından oluşan iletkenliği yüksek malzemedir. İnce filminin renksiz ve görünür bölgede yüksek oranda geçirgen olması nedeniyle, optoelektronik uygulamalarda ve özellikle güneş hücresi üretiminde şeffaf elektrot olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [68].

2.2.2.2. PCDTBT

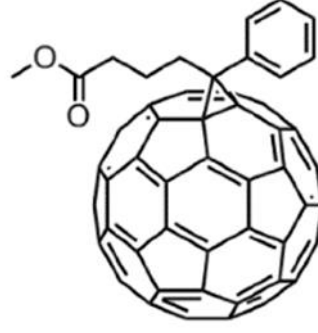
Organik güneş hücrelerinde Poli[N-9’-heptadekanil-2,7-karbazol-alt-5,5-(4’,7’-di-2-tienil-2’,1’,3’-benzotiadiazol) elektron verici olarak kullanılan bir malzemedir. LUMO seviyesi ise 3.6 eV’, HOMO seviyesi 5.4 eV’ta bulunur [69].



Şekil 2.8. PCDTBT’nin kimyasal yapısı.

2.2.2.3. PCBM

PCBM, elektron alıcı olarak kullanılan ve C60'ın yüksek çözünürlüğe sahip bir türevi olan malzemedir. (1-(3-metoksikarbonil) propil-1-fenil grubunun yan zincir olarak eklenmesi ile çözünürlüğü sağlanır. PC₆₁BM; tolüen, klorobenzen ve benzer organik çözücülerde çözünür. PC₆₁BM'nin kimyasal yapısı şekilde gösterilmiştir [70].



60-PCBM

Şekil 2.9. PCBM'nin kimyasal yapısı.

2.3. GEÇİRGENLİK SPEKTROSKOPİSİ

2.3.1. Optik Geçirgenlik Deneyleri

İnce filmlerin yasak enerji bant aralıkları (E_g) optik geçirgenlik deneyleri aracılığıyla hesaplanabilir. Optik geçirgenlik deneylerinde, numunenin üzerine çeşitli dalga boylarında gönderilen ışığın malzeme tarafından malzeme içinden geçme oranları kullanılarak bu analiz yapılır.

2.3.2 Soğurma Katsayısının Hesaplanması

Yasak enerji bant aralığı hesaplanırken Beer Lambert yasası kullanılabilir [63]. Beer Lambert yasası,

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.20)$$

formülü ile ifade edilir. Burada, I₀ filme gelen ışık şiddetini, α ince filmin soğurma katsayısını, I filmin içinden karşıya geçen ışık şiddetini, d ise ışığın film içerisinde aldığı toplam yolu ifade etmektedir. Yapılan geçirgenlik deneylerinde tüm ince film tabakasının ışık tarafından geçilmesinden dolayı, d değeri aynı zamanda filmin kalınlığını da temsil eder. Bu durumda filmlerin soğurma katsayıları tüm dalga boyu değerlerinde geçerli olmak üzere,

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{1}{I_0}\right) = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{\%T}{100}\right) \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, geçirgenlik spektroskopisi ile elde edilen değerler %T ile ifade edilir. Denklem (2.21)'den soğurma katsayılarının hesaplanabilmesi için, ince filmlere ait kalınlıkların ölçülmesi gerekmektedir. Ölçülen kalınlık değerleri Denklem (2.21)'de yerine koyularak soğurma katsayılarının gelen ışığın enerjisine bağlı değerleri hesaplanabilir ve davranışları analiz edilebilir.

2.3.3. Yasak Enerji Bant Aralığı Hesaplanması

Işığın enerjisine bağlı soğurma katsayıları hesaplanan ince filmlerin yasak enerji bant aralıklarının hesaplanması için aşağıda verilen Tauc denklemi kullanılabilir [63]:

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^p \quad (2.22)$$

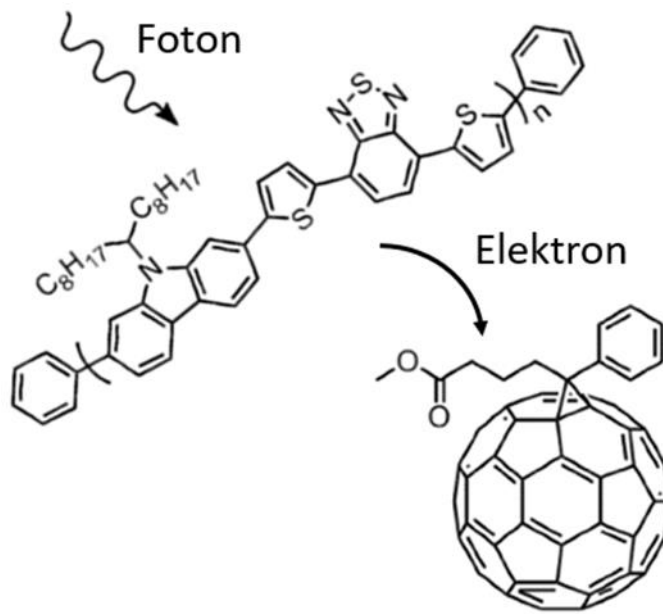
Burada, gelen ışığın enerjisi $h\nu$ ile, filmin yasak enerji bant aralığı değeri E_g ile ve enerji seviyeleri arasında geçiş olasılığı ise birimsiz bir sabit olan A ile ifade edilir. Eşitlik 2.22'de yer alan birimsiz p sabitinin değeri ise fononlarla etkileşim içermeyen doğrudan geçişler için 0,5 olarak, fononlarla etkileşim içeren dolaylı geçişler için ise 2 olarak hesaplanmıştır. p sabitinin değeri, soğurma katsayısının gelen ışığın enerjisine bağlı grafiği çizilerek açığa çıkarılabilir. p 'nin değerinin 0,5 olması durumunda, eşitlik 2.22'de her iki tarafın karesi alınarak, p 'nin değerinin 2 olması durumunda ise eşitlik 2.22'de her iki tarafın karekökü alınarak soğurma katsayısı ve $h\nu - E_g$ terimi arasında doğrusal bir ilişki elde edilir. Bu doğrusal ilişki kullanılarak soğurma katsayısının kuvveti olan $\alpha^{1/p}$ değerinin 0 olduğu noktada, $h\nu$ değeri E_g 'ye eşit olur. Bu grafiksel metot kullanılarak ince filmlerin E_g değeri kolayca hesaplanabilir.

2.4. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

2.4.1. Foto uyarılma, Eksitonlar, Yük Transferi

İnorganik yarıiletkenlerden oluşan güneş hücreleri ile organik yarıiletkenlerden oluşan güneş hücrelerinde birbirinden farklıdır. İnorganik yarıiletkenlerden oluşan güneş hücrelerinde fotonlar doğrudan serbest yük taşıyıcılarına dönüştürülür. Dönüştürülen yükler daha sonra uygun elektrotlarda toplanır. Organik fotovoltaiik cihazlarda eksiton meydana gelmesi molekülün foto uyarılması sonucu deşik-elektron çifti oluşması ile olur. Eksitonlar bağlanma enerjisi 0.05 ile 1 eV arasında değişen kulombik bağlı yük

taşıyıcılarından oluşur ve aynı zamanda 5 – 15 nm üzeri bir uzunlukta dağılma sonunda ışıyarak veya ışımayarak bozulabilir [70]. Fotovoltaik uygulamalarda eksitonların serbest yüklere bölünmesi için bir alıcı molekül bu bölünmeyi tetiklemek amaçlı kullanılır. Aktif malzemenin HOMO'sundan LUMO'suna bir elektron geçişi, iletim bandı ve valans bandı arasındaki yasak enerji aralığından daha büyük bir enerji ile gelen bir fotonun soğrulması sonucunda olur. Oluşan eksiton, LUMO'su soğuran malzemeninkinden daha düşük olan başka bir malzemeye elektron geçişi yaparsa elektron, alıcı birime geçer [69]. Organik fotovoltaiklerde fotoindüklenmiş yük transferinin nasıl olduğu şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Polimer PC₆₁BM arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi.

2.4.2. Aygıt Tipleri

2.4.2.1 Tek Katmanlı Organik Güneş Hücreleri

Organik fotovoltaik hücreler iş fonksiyonları farklı iki elektrot arasına kaplanmış yarıiletken polimerden oluşmaktadır Fotovoltaik hücreler için organik yarıiletkenlerde ortaya çıkan eksitonların serbest yük taşıyıcılarına dönüşmesi gerekmektedir. Elektrik alanlardan faydalanarak en verimli şekilde eksitonları ayırmak sadece polimer içeren bu tip aygıtlarda mümkündür. Elektron-deşik çiftleri arasındaki meydana gelen bağlanma enerjisi organik yarıiletkenlerde inorganik yarıiletkenlere göre çok büyüktür. Bundan dolayı organik yarıiletkenlerde yapısal elektrik alan etkisi altında bu eksitonların yaşam süreleri içerisinde ayrılmaları mümkün değildir. Bu tip aygıtlarda fotoakım üretimi kısıtlı

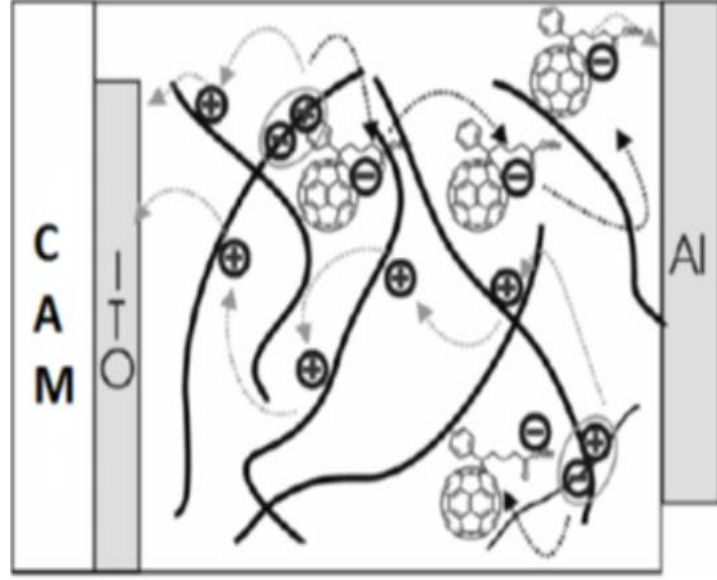
bir bölgede olduğu için verim kısıtlıdır ve verim kısıtlı olduğu için iki katlı heteroeklem yaklaşımı geliştirilmiştir [70].

2.4.2.2 İki Katlı Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri

Organik güneş hücrelerinde iki tip yaklaşım vardır. Birinci yaklaşım iki katlı heteroeklemdir. İki katlı heteroeklemlerde verici ve üzerine alıcı malzemenin gelmesi sonucu keskin bir ara yüzey oluşur. Yük ayrımının gerçekleşmesi gelen fotonun soğurulması sonucu alıcı veya vericide oluşan eksitonun ara yüzeye gelmesi ile olur [71]. Organik güneş hücrelerinde alıcı ve verici çiftleri arasındaki ara yüzeye sadece 5-15 nm uzaklıkta oluşan eksitonlar ayrışabilir ve hücre tarafından üretilcek akıma katkı sağlayabilir. Bunun sebebi, bu hücrelerde oluşan eksitonların bu değerler civarında difüzyon uzunluklarına sahip olmalarıdır [72]. Bu durumda, arayüzeyden belirli bir uzaklıkta soğurulacak fotonların oluşturacağı eksitonlar akıma katkı sağlamaz ve verimi sınırlandırır. Hacim heteroeklem yaklaşımının geliştirilme sebebi budur.

2.4.2.3 Hacim Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri

Elektron verici malzemenin (konjüge polimer) LUMO'su ile elektron alıcı malzemenin (fulleren) LUMO'su arasında foto uyarılmış elektron transferi aracılığıyla yük taşıyıcılar oluşur. Karışımın herhangi bir noktasında ortaya çıkan eksitonun yaşamı içerisinde alıcı arayüzeyine ulaşması yük üretimini verimli kılar. Eksitonun difüzyon uzunluğu, izin verilen maksimum faz ayrımının büyüklüğünü belirler. Yük taşıyıcıları hücreden iki kontak üzerinden alınır. Buharlaştırılan ince bir alüminyum metal kontak diğer tarafta polimerin LUMO'suna karşılık gelirken, aydınlatılan yüzde ise saydam indium kalay oksit (ITO) kaplı bir cam konjüge polimerin HOMO'suna denk gelir. Bugün kullanılan hücrelerde, deşik aktarım katmanı olarak ince (100 nm) bir PEDOT:PSS tabakası kullanılmaktadır ve aynı zamanda bu tabaka cihaz kararlılığının artmasını ve ITO yüzeyinin pürüzsüzleşmesini sağlar [73].



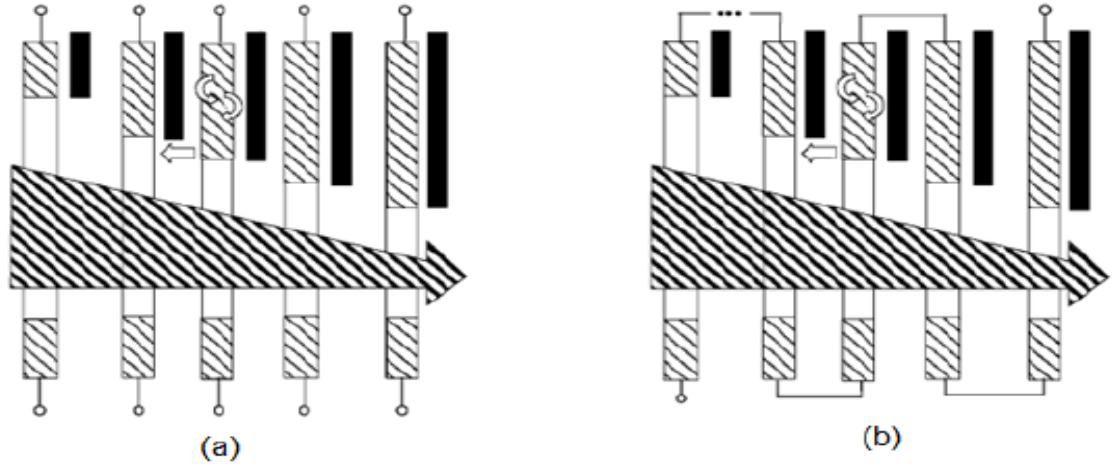
Şekil 2.11. Hacim heteroekleminin şematik gösterim.

2.4.2.4 Çok Eklemlı Organik Güneş Hücreleri

p-n eklem güneş hücrelerinde, düşük enerjili fotonların soğurulamaması ve yüksek enerjili fotonların enerji fazlalıklarının ısıya dönüşmesi gibi sorunların verim kayıplarına neden olur ve bu da güneş hücrelerinin verimini %44'e sınırlamaktadır [74]. Güneş spektrumunu farklı enerji aralıklarına bölerek oluşan bu kayıp önlenabilir. Yasak bant aralığına sahip p-n eklemlerini oluşturmak için her bir enerji aralığında belirtilen kaybın en aza indirildiği fotovoltaiik dönüşümleri gerçekleştirmek gerekir [75]. Güneş hücresinin veriminin artırılması için düşük enerjili fotonların da fotovoltaiik dönüşümde kullanılması sağlanarak ve yüksek enerjili fotonların daha fazla elektron-deşik çifti oluşturması gerekir. Çok eklemlı güneş hücreleri hazırlanış şekline göre yığın hücreler (stacked cells) ve tandem güneş hücreleri olmak üzere ikiye ayrılır. Tandem hücrelerde; farklı hücreler için farklı malzemeler, yığın hücrelerde ise farklı hücreler için aynı malzemeler kullanılmaktadır.

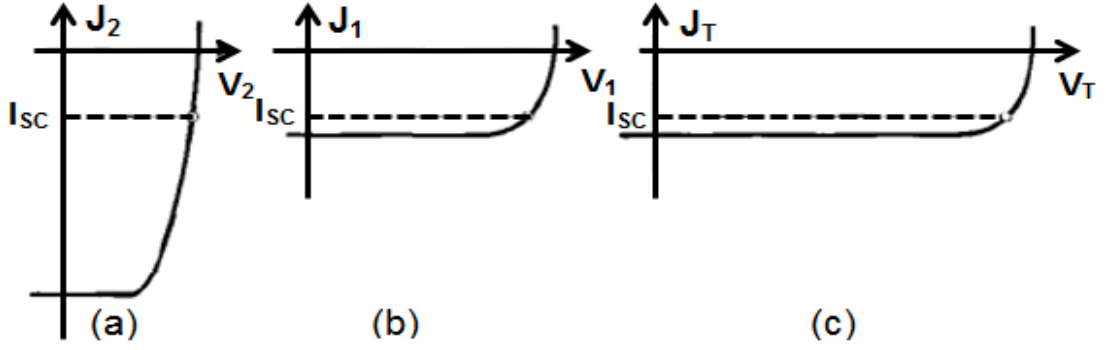
Yığın Güneş Hücreleri (Stacked Cells)

Aynı malzemelerle hazırlanmış hücrelerin ardışık sıralanması ile verim arttığı için yığın hücreler kullanılmaktadır. Tek heteroeklem hücrelerin üst üste konulması ile çok katmanlı bir yapı oluşturulması sonucunda çok eklemlı yığın hücreler elde edilir. Yığın yapılarda, verimi yükseltmek için hücrelerin mümkün olduğu kadar birbirinden ayrılmış olarak çalışması gerekmektedir. İzole edilmesi için hücreler arasına optik filtreler yerleştirilir.



Şekil 2.12. Çok eklemlili yığılmış hücrelerin, (a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması (b) Monolitik (series constrained) uygulaması.

Yığın hücrelerin farklı iki uygulaması vardır. Birincisi teorik olarak en yüksek verim elde etmek için tüm hücrelerin birbirinden bağımsız olarak çalıştırıldığı mekanik olarak bağımsız (Şekil 2.12) uygulamasıdır. Fakat, her p-n eklemine ayrı ayrı çıkışı olduğu için sistemi karışıktır bu da pratik uygulamalarda tercih edilmeme nedeni olarak bilinmektedir [76]. İkinci uygulama ise p-n eklemlerinin birbirine seri olarak bağlandığı Şekil 2.12’de görülen monolitik yapıdır. Bu yapıda p-n eklemleri birbirine seri olarak bağlandığı için, çok eklemlili hücrenin toplam akım yoğunluğu, en küçük akım yoğunluğuna sahip p-n eklemine akımı ile sınırlı kalmaktadır (Şekil 2.13). Bu durum, diğer uygulamaya göre çıkış gücünün daha az olmasına neden olmaktadır. Ancak, hücrenin çıkış geriliminin tüm p-n eklemlerinin çıkış gerilimlerinin toplamına eşit olmasından dolayı, hücrenin toplam gücü artmaktadır (Şekil 2.13) [76].



Şekil 2.13. İki eklemli monolitik hücrelerde, (a) E_g 'si küçük olan p-n eklemine J-V karakteristiği (b) E_g 'si büyük olan p-n eklemine J-V karakteristiği (c) Hücrenin J-V karakteristiği.

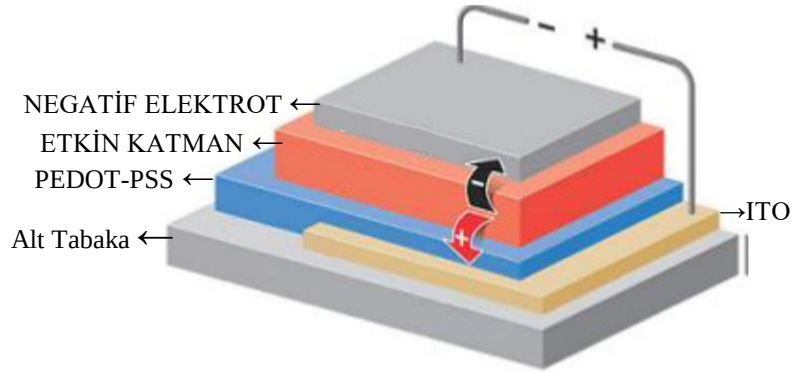
Tandem Güneş Hücreleri

Tandem güneş hücrelerinde farklı malzemelerle hazırlanmış hücreler kullanılarak ve her bir hücrenin farklı optik soğurması dengelenerek verimi arttırmak mümkündür. Tandem güneş hücreleri, farklı yasak band aralığına sahip p-n eklemelerinden, yasak band aralığı en düşük olanın alt kısma yasak band aralığı en yüksek olanın ise üst kısma gelecek şekilde yerleştirilmesi ile oluşturulur [77]. Düşük enerjili fotonlar alttaki p-n eklemi, yüksek enerjili fotonlar üstteki p-n eklemi tarafından soğurulur. Eğer varsa, ortada olan p-n eklemi, bir önceki eklemde saçılan fotonları ve diğer eklemeler tarafından soğurulmayan fotonları soğurur. p-n eklemeleri monolitik uygulamalarda seri olarak bağlanmaktadır. Hücrelerin toplam akım yoğunluğu en az akım yoğunluğu olan p-n eklemi ile sınırlanmaktadır. Bu uygulamada toplam gücün diğer uygulamaya göre daha fazla olmasının nedeni seri bağlı güçlerin toplamına eşit olmasıdır. Monolitik yapılarda birbirine seri olarak tünel diyotları ile bağlanan farklı p-n eklemeleri bulunmaktadır. Geleneksel p-n eklem güneş hücresi modül yapılarındaki çok eklemli monolitik güneş hücrelerinde her bir p-n eklemine akımlarının uyumlandırılması (current matching) gerekmektedir [75].

2.4.3. Yük Ayrımı

Eksiton, alıcı ve verici arasındaki yüzeye geldiğinde yük ayrımı 45 femtosaniyeye sahip çok yüksek bir hızda gerçekleşir. Elektronların alıcıya hareketi sırasında deşik polimer üzerinde kalır. Bu geçiş işlemi sonrasında yükler elektrotlara taşınır. Bu transfer işlemine, elektrot olarak kullanılan farklı iş fonksiyonlarına sahip metallerin indüklediği alanın

neden olduğu kabul edilir. Tipik bir hacim heteroeklem güneş hücresi [79] Şekil 2.14'deki gibidir.

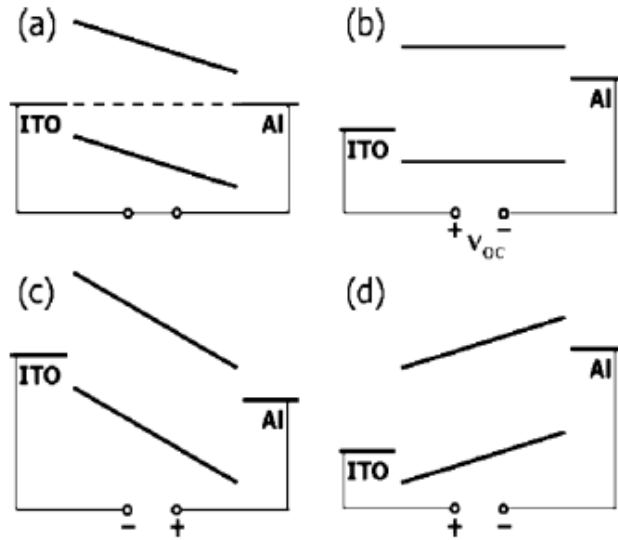


Şekil 2.14. Hacim heteroeklem güneş hücresi.

2.4.4. Organik Güneş Hücrelerinin Karakteristiği

2.4.4.1. Çalışma Prensipleri

Organik diyotlar metal-yalıtkan-metal (MIM) modeli ile tanımlanır [91]. Bu model cihaz içerisindeki enerji seviyeleri ile ilgili izlenimi veren ilk yaklaşım olarak bilinmektedir. Alıcı-verici tabanlı bir cihazın farklı çalışma koşulları altındaki MIM modelleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. MIM modelleri. İki metal elektrot arasına sıkıştırılmış organik yarı iletken tabakaların farklı çalışma prensipleri: (a) kısa devre durumu (b) açık devre durumu (c) ters yönde kutuplama (d) ileri yönde kutuplama. ITO: yüksek iş fonksiyonlu elektrot, Al: düşük iş fonksiyonlu elektrot.

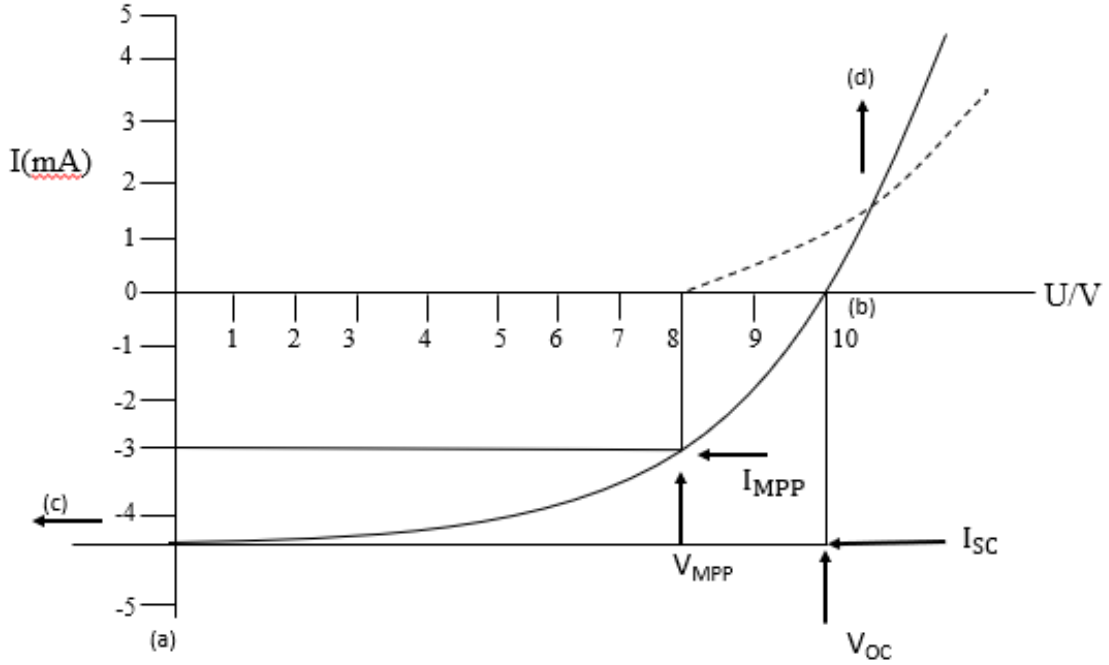
İki elektrotun Fermi seviyeleri kısa devre durumunda aynı hizaya gelir ve hacim heteroekleminde yerleşik bir alan oluşturur. Bu alan alıcı ve vericinin HOMO, LUMO ve vakum seviyeleri için sabit bir eğime yol açar. Işık altında, fotonların gelmesi ile oluşan yükler, ilgili elektronlar için deşikler yüksek iş fonksiyonlu elektroda, elektronlar ise düşük iş fonksiyonlu elektroda geçer. Farklı malzemelerin vakum seviyeleri açık devre koşulunda sıralanır. Ayrıca cihaz içerisinde herhangi bir alan bulunmamaktadır ve yük taşıyıcılarını hareket ettirecek herhangi bir kuvvet olmadığı için akım sıfırdır. Diyotun ileri yönde beslendiği durumda, yani yüksek iş fonksiyonlu elektrot pozitif kutba, düşük iş fonksiyonlu elektrot ise negatif kutba bağlandığında, elektronlar düşük iş fonksiyonlu elektrot üzerinden alıcı malzemenin LUMO'suna, boşluklar ise yüksek iş fonksiyonlu elektrot üzerinden verici malzemenin HOMO'suna geçer. Bu durumda, cihaz içerisindeki alanın etkisi ile elektronlar düşük iş fonksiyonuna sahip olan elektrottan yüksek iş fonksiyonlu olana, boşluklar ise yüksek iş fonksiyonuna sahip olan elektrottan düşük iş fonksiyonlu olana doğru akar. Bu yükler tekrar birleşip bir ışımaya neden olursa, cihaz LED olarak işlev görür. Diyotun yüksek iş fonksiyonlu elektrotu negatif kontağa ve düşük iş fonksiyonlu elektrotu pozitif kontağa bağlandığında, yük akışı cihaz içerisindeki alan nedeni ile engellenmiş olur. Bu durumda, ışık etkisi altında oluşacak yük taşıyıcılar iç elektrik alan etkisi ile ilgili elektrotlara aktarılırsa, diyot fotodedektör olarak çalışır [76].

2.4.4.2. Akım-Gerilim Karakteristikleri

Güneş hücreleri kısa devre ve açık devre durumlarında çalışır. Bu durum akım-gerilim karakteristiğinin dördüncü bölgesinde gösterilmektedir. Cihaz karakteristiği belirleyen bazı parametreler aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

2.4.4.3. Açık Devre Gerilimi (V_{OC})

Güneş hücresinden elde edilen en yüksek gerilim değeri V_{OC} ve akım değeri sıfırdır. Heteroeklem cihazlarda, V_{OC} 'yi alıcının LUMO'su ile vericinin HOMO'su arasındaki enerji farkı kısıtlar [92].



Şekil 2.16. Organik fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlık akım-gerilim eğrileri.

2.4.4.4. Kısa Devre Akımı (I_{SC})

Bir cihaza herhangi bir dış alanın etkilemediği, yüklerin yalnızca iç alanın etkisi ile çekildiğinde akım değerine I_{SC} denir. Kısa devre akımının genel olarak hücrenin elektrotlarının iş fonksiyonlarının farklı olması ile belirlendiği düşünülür. Hücre kısa devre durumuna geldiğinde, iki elektrotun Fermi seviyeleri eşitlenir. Kısa devre akımı hücre içerisindeki yük ayrımı ve hücreyi oluşturan malzemelerin yükleri iletme özellikleri hakkında bilgi verir [93].

2.4.4.5. Maksimum Güç Noktası (mpp)

Mpp , akım ve gerilim çarpımının maksimum sonucu verdiği noktadır ve cihazın bu noktada çalışması beklenir. Cihazın karakteristik gerilim ve akım değerleri V_{mpp} ve I_{mpp} 'dir. Bu verilerden yararlanarak Dolgu Faktörü (FF) hesaplanabilir ve bu güneş hücresinin ne kadar iyi bir diyot olduğunu gösteren ifadedir. Dolgu faktörü (2.23) nolu eşitlikle verilebilir:

$$FF = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (2.23)$$

Güneş hücresinin fotovoltaik enerji dönüşüm verimi aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$\eta_{AM1.5} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{SC} * V_{OC} * FF}{P_{in}} \quad (2.24)$$

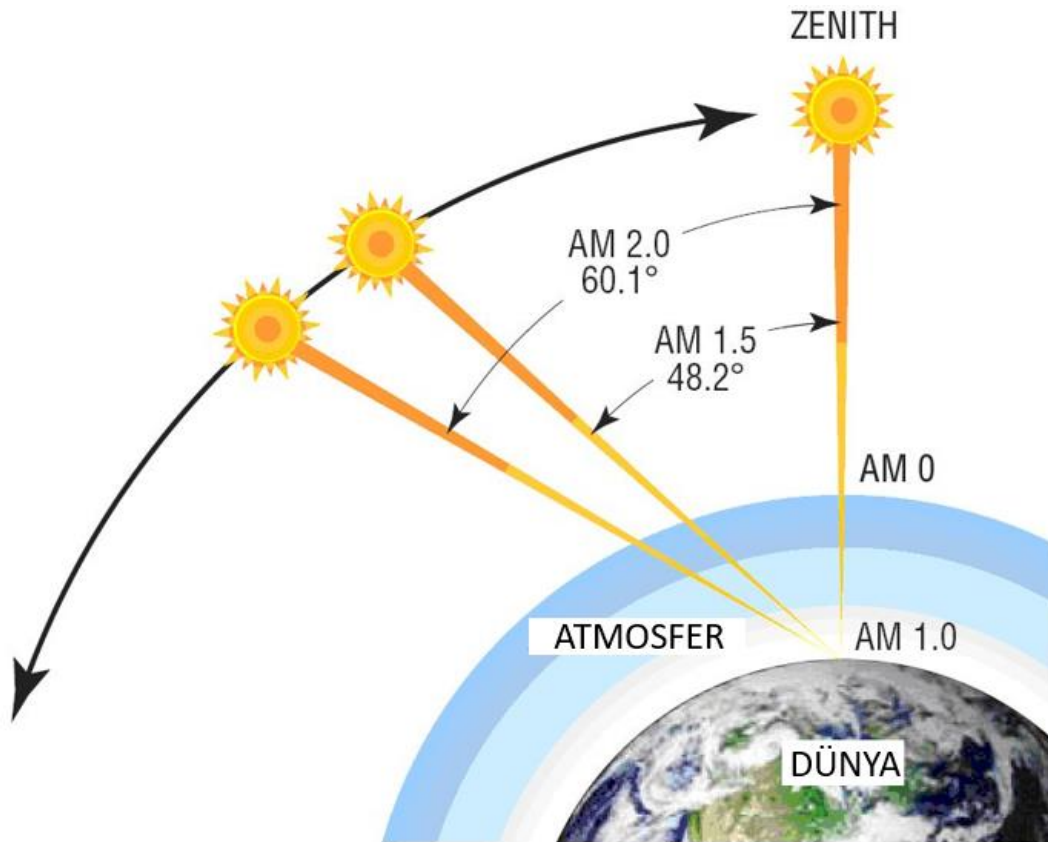
Eşitlik 2.24'deki P_{out} hücrenin maksimum güç noktasında (mpp) ürettiği elektrik enerjisi ve P_{in} gelen ışığın gücüdür. Gelen ışığın gücü için genellikle AM 1.5 spektrumu standart kabul edilir [94]. Güneş hücresinin verimi; 1000 W/m² gücü ile ışık etkisinde, 25 °C oda sıcaklığı altında ve ışığın spektral dağılımının 1.5 AM olduğu şartlar altında hesaplanmalıdır.

2.4.5. Hava Kütlesi (Air Mass, AM)

Hava kütlesi, ışığın atmosferde izlediği yolda tozlar veya hava tarafından soğurulurken gücünde meydana gelen azalmayı ölçer ve (2.25) nolu eşitlikle verilir.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.25)$$

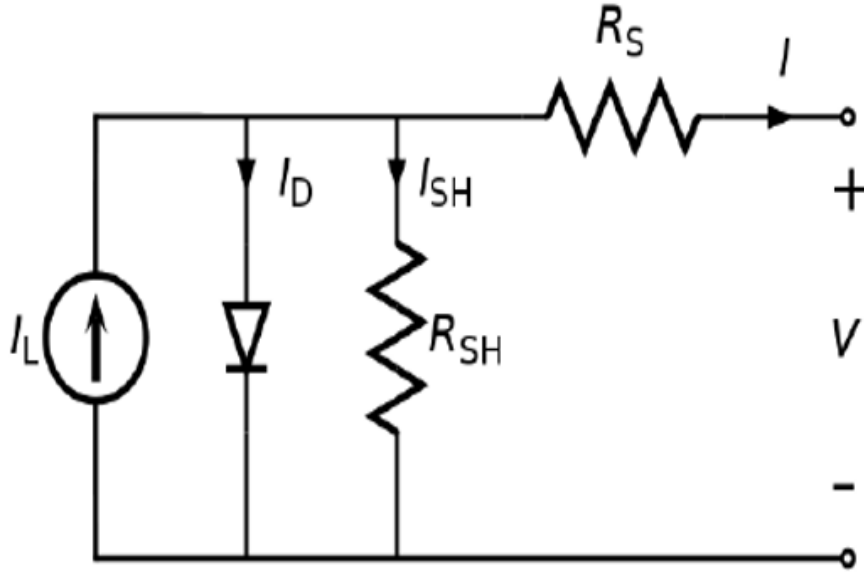
Burada θ dikey ile açıdır ve zenit açısı olarak adlandırılır. Şekil 2.17'de hava kütlesi gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Hava kütlesi.

2.4.6. Eşdeğer Devre

Fotovoltaik bir hücrenin eşdeğer devre diyagramı aşağıdaki şekilde gibidir ve dört farklı ögeden oluşmuştur.



Şekil 2.18. Bir güneş hücresinin eşdeğer devresi.

Yukarıdaki şekilde gösterilen akım kaynağı ışık etkisi altındaki hücrede meydana gelen fototakımı temsil etmektedir. Bu akımın şiddeti cihaz üzerindeki gerilime bağlıdır ve akış yönü diyot akımına zıt yöndedir. Şekilde gösterilen seri direnç ise elektrotlar ile organik yarıiletken arasındaki kontaklar ve aktif malzemenin öz direncini içerir. Verimin artması için bu direncin mümkün olan en az değere sahip olması gerekir. Bunun yanı sıra, ışık şiddeti ve sıcaklığın artırılması veya hücre kalınlığının azaltılması bu direnci düşürür [80]. Hücre içerisinde oluşacak kaçak akımlar ise paralel bir direnç ile temsil edilir. Hücresinin veriminin artırılması için bu direncin mümkün olan en yüksek değere sahip olması gerekir. Paralel direncin değeri hücre kalınlığı artarken artmakla beraber, artan ışık şiddeti ile keskin şekilde azalır.

Şekil 2.18’de I_0 karanlık doyma akımını, I_D diyot akımını, I_{SH} kaçak akımı, I_L ışık altında meydana gelen akımı (foto akım), R_{SH} paralel direnci, R_S seri direnci olarak verilmiştir. a düzeltilmiş idealite faktörünü temsil etmek üzere, devreden geçen akım a , I_L , I_0 , R_S , R_{SH} ’ye bağlıdır. Düzeltilmiş idealite faktörü,

$$a = \frac{N_{CS} n k_B T}{q} \quad (2.26)$$

ile hesaplanır. Burada Ngh seri bağı güneş hücresi sayısını, n diyot idealite faktörünü, kB Boltzmann sabitini, q elektron yükünü, Tc mutlak sıcaklığı temsil etmektedir. Hücre üzerindeki gerilim V ile ifade edilirse, devreden geçen akım,

$$I = I_L - I_d - I_{sh} \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Id diyot akımı ve paralel direnç üzerinden geçen Ish kaçak akım yukarıdaki denklemde yerine konulursa devreden geçen akım;

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V + I_{RS}}{a} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I_{RS}}{R_{SH}} \quad (2.28)$$

olarak elde edilir. I_0 , ile ifade edilen karanlık doyma akımı fotovoltaiik hücrelerin yapıldığı malzemelerin bant yapısına ve büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır [81]. Herhangi bir besleme olmadığı durumda, ışık altında devreden geçen akım Isc kısa devre akımı olarak ifade edilir. Kısa devre akımının şiddeti hücre üzerine gelen ışığın özellikleri ile yakından ilişkilidir ve yaklaşık olarak I_L 'nin değerine eşittir. İdeal yapıdaki bir güneş hücresinde seri direnç sıfır ve paralel direnç de sonsuz olmalıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Üretim Sistemleri

3.1.1. Spin Kaplama Sistemi

İnce film oluşturulacak iletken altlıklar spin coating yöntemi ile Specialty Coating Systems G3 marka G3P8 model Spin Kaplama cihazıyla kaplanmıştır (Şekil 3.1). Uygun şekillerde kesilen altlıklar cihaz içine yerleştirildikten sonra hazırlanan çözelti yavaş yavaş damlatılmış ve cihaz 2000 rpm ayarlanarak altlıkların döndürme işlemine geçilmiştir. Cihazın dönme etkisiyle altlıkların üzerine damlatılan çözelti saçılarak homojen olarak dağılmıştır. Bu işlem sonunda tüm altlıklar bir kat kaplanması sağlanmıştır.



Şekil 3.1. SCS marka G3P8 model Spin Kaplama Cihazı.

3.1.2. Termal Kaplama Cihazı

Evaporasyon yöntemi olarak da bilinen termal kaplama 10^{-6} torr vakum değeri altında gerçekleşen bir işlemdir. Bu işlemde öncelikle yüksek ergime noktasına sahip malzeme bir pota içerisine yerleştirilir. Direnç ile buharlaştırma durumunda pota içerisinden çeşitli değerlerde elektrik akımı geçirilerek ve film malzemesinin buharlaşma sıcaklığına ulaşması sağlanır. Kontakların kaplama işleminde Düzce Üniversitesi Fizik Bölümü Numune Hazırlama Laboratuvarına ait Nanovak NVBJ-300TH marka termal buharlaştırma kaplama sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Nanovak NVBJ-300TH marka Termal Kaplama Cihazı.

3.1.3. Üretimde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmamızda Sigma Aldrich Ltd. Şirketinden temin ettiğimiz PC₆₁BM ve PCDTBT organik polimer malzeme kullanılmıştır. Si pullar 350 ± 25 μm kalınlığında ve birer yüzü fabrikasyon olarak parlatılmış şekilde temin edilmiştir. Doğrultucu kontak oluşturmak için ise Sigma Aldrich Ltd. Şirketinden temin ettiğimiz Au ve Ag metalleri kullanılmıştır. n-tipi, <100> yönelime sahip tek kristal silisyum (n-Si) pullar altlık malzemesi olarak

kullanılmıştır. Si pullar 350 ± 25 μm kalınlığında ve birer yüzü fabrikasyon olarak parlatılmış şekilde temin edilmiştir.

3.1.4. Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au Diyotlarının Üretimi

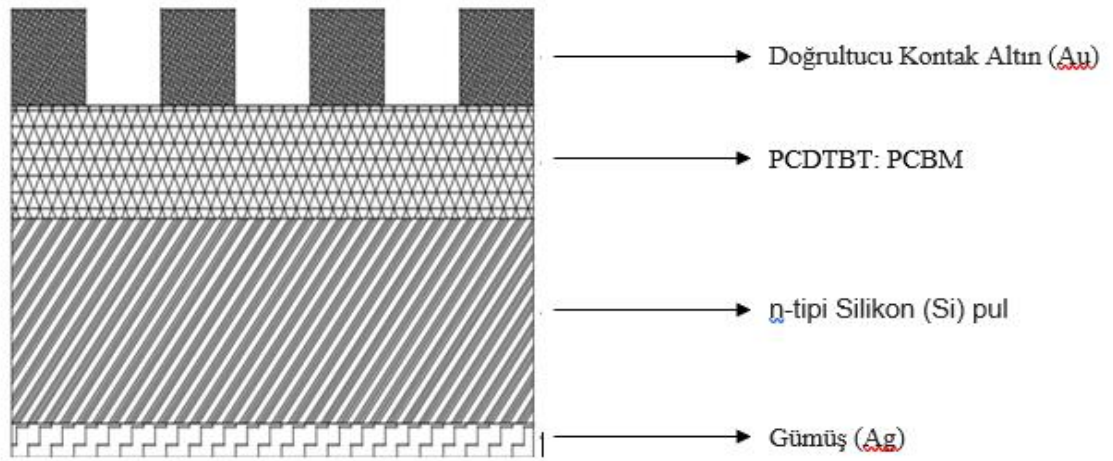
Organik arayüzey tabakası oluşturmak için bir karışım hazırlanarak Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au OMPY SBD'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au OMPY SBD üretim işleminin ilk aşaması, diyotlara altlık olarak kullanılacak Si pulların hazırlanmasıdır. Deneysel işlemlere başlamadan önce ultrasonik banyo ile Si pullar için daha hızlı ve etkili bir temizlik yapılması sağlanmıştır. Si pul RCA temizleme yöntemi ile kimyasal olarak temizlenmiştir [26]. Temizlik sonrası Helyum (He) inört gazı ile Si pulların yüzeyinde oluşabilecek oksit tabakalarını engellemek için kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Üretim işleminin ikinci aşamasında omik kontak oluşturulması planlanmıştır. Bu amaç için üretilecek Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au OMPY SBD'lerin kontaktları için kullanılacak malzemeler iş fonksiyonuna uygun seçilip kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Temizlenen Si pulların mat (arka) yüzeyi omik kontak oluşturmak amacıyla herhangi bir maskeleme yapılmaksızın $\sim 2500\text{\AA}$ kalınlığında gümüş (Ag) ile termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Kontaktların kaplama işleminde Düzce Üniversitesi Fizik Bölümü Numune Hazırlama Laboratuvarına ait Nanovak NVBJ-300TH marka termal buharlaştırma kaplama sistemi kullanılmıştır.

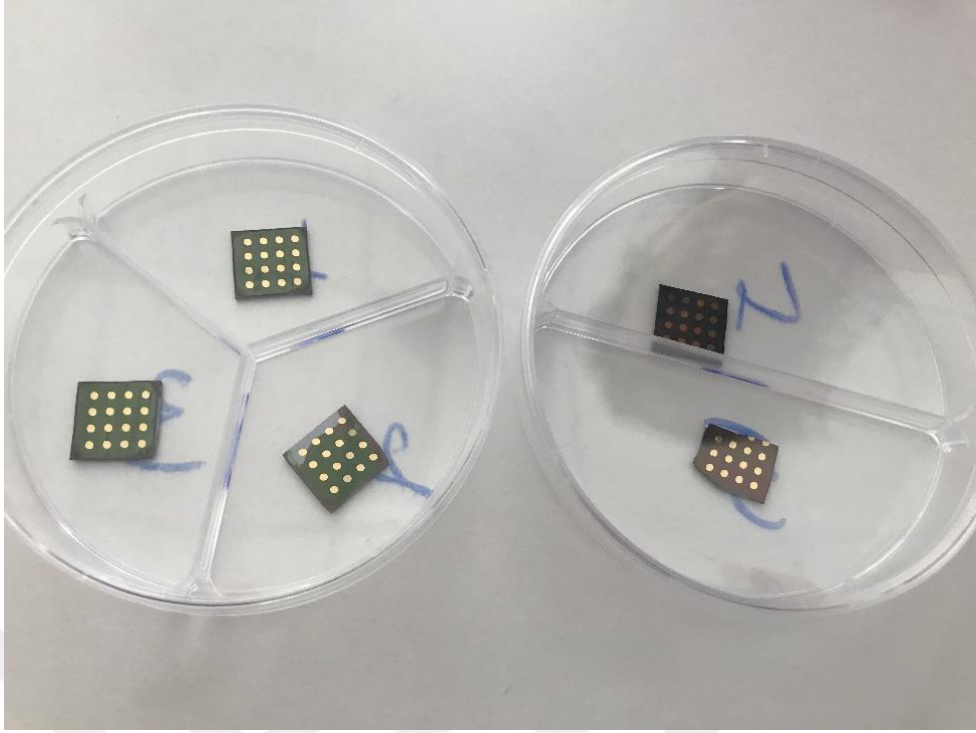
Üretim işleminin üçüncü aşamasında diyotların aktif katmanı olarak iş görecektir polimer karışımının oluşturulması planlanmıştır. Bu amaç için satın alınan toz halindeki polimerlerin öncelikle sıvı çözelti haline getirilmesi gerekmektedir. PCDTBT ve PCBM organik polimerlerin ortak çözücüsü klorobenzen olduğu için, her bir polimer için farklı tüplerde 3 saat süreyle 60°C 'de 25 mg/mL'lik çözeltiler oluşturacak şekilde karıştırma işlemi manyetik balıklar aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde Dragon Lab M57-H550-Pro markalı manyetik karıştırıcı cihaz kullanılmıştır. Polimerler çözeltilerinin hazırlanmasından sonra, aktif katman olarak planlanan polimer karışımı %66:%34, %50:%50, %20:%80 PCDTBT:PC₆₁BM hacimsel oranına sahip olacak şekilde 12 saat boyunca homojen bir çözelti elde etmek için 60°C 'de manyetik karıştırıcıda karıştırılmışlardır.

Üretim işleminin dördüncü aşamasında, hazırlanan polimer karışımların altlıklar üzerine kaplanması planlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda temizlenmiş olan Si pulların parlatılmış yüzeyine Specialty Coating Systems G3 marka spin kaplama cihazı kullanılarak, 1500 devir/dakika sabit dönme hızıyla 30 saniye süreyle polimer kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplama sonucunda elde edilen PCDTBT:PC₆₁BM tabakasının kalınlığı kesit alanı görüntü alma yöntemi kullanılarak FEI Quanta FEG 250 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla yaklaşık 1000 Å olarak ölçülmüştür. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından numuneler için 80°C’de yaklaşık 15 dakika ısıtma işlemi gerçekleştirilerek organik yüzeyde bulunan çözücünün buharlaşması sağlanmıştır.

Üretim işleminin son aşamasında, diyotların doğrultucu özellik göstermesi için gerekli olan doğrultucu kontak kaplanması işlemi planlanmıştır. Doğrultucu kontak oluşturmak için Au metali kullanılmıştır. Kaplama işlemi Nanovak NVBJ-300TH marka termal buharlaştırma cihazı aracılığıyla yapılmıştır. Kontakların kaplanması için paslanmaz çelikten üretilmiş ve üzerinde 1 mm çapa sahip delikler olan özel yapım bir maske kullanılmıştır. Numunelerin üzerine bu maske yardımıyla dairesel şekilli Au kontaklar kaplanmıştır. Doğrultucu kontakların kalınlığı cihaz üzerindeki kalınlık monitörü ile takip edilerek, bu kalınlığın yaklaşık olarak 2500 Å olması sağlanmıştır. Üretilen diyotların yapısı Şekil 3.3’de şematik olarak, resimleri ise şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au organik diyotunun yapısının şematik gösterimi.

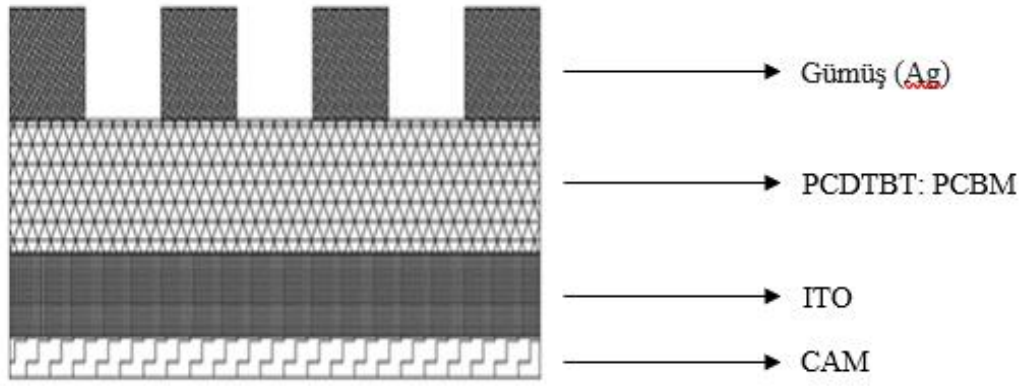


Şekil 3.4. Ag/n-Si/PCDTBT:PCBM/Au organik diyot.

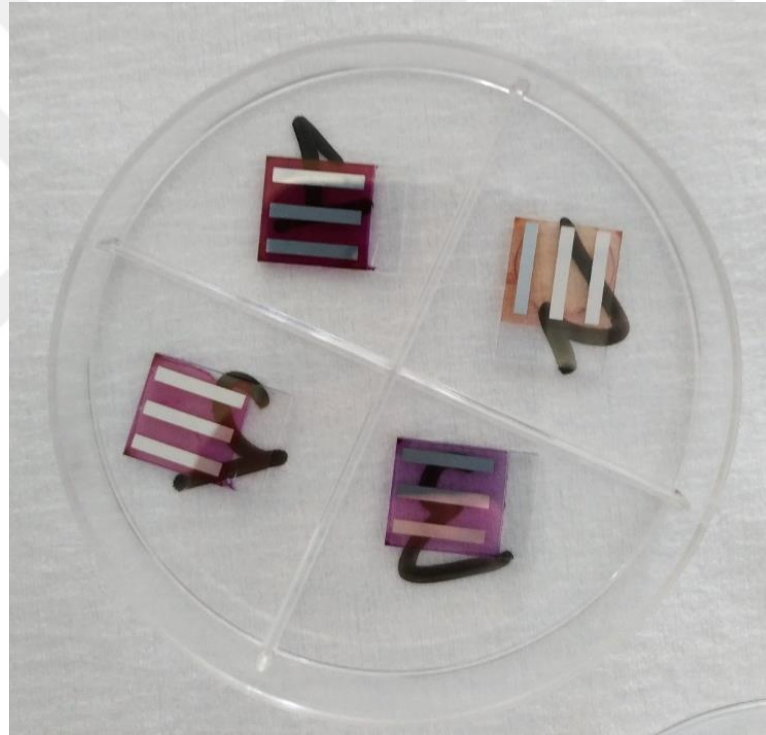
3.1.5. ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag Güneş Hücrelerinin Üretimi

Organik arayüzey tabakası oluşturmak için bir karışım hazırlanarak ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag organik güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir.

PCDTBT ve PC₆₁BM ilave bir saflaştırma işlemine tabi tutulmadan kullanılmıştır. Toz halindeki polimerlerin öncelikle sıvı çözelti haline getirilmesi gerekmektedir. PCDTBT ve PC₆₁BM organik polimerlerin ortak çözücüsü klorobenzen olduğu için, farklı tüplerde 6 saat süreyle 60°C’de 20 mg/mL’lik çözeltiler oluşturacak şekilde karıştırma işlemi manyetik balıklar aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Polimer karışımları %50:%50, %66:%34 ve %20:%80 PCDTBT:PC₆₁BM hacimsel oranlarına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. ITO kaplı cam altlıklar önce izopropil alkolde ve daha sonra bir ultrasonik temizleyicide saf su ile temizlenmiştir. Hazırlanan karışımlar temizlenen altlıklar üzerine Specialty Coating Systems G3 marka spin kaplama cihazı kullanılarak, 1000 devir/dakika sabit dönme hızıyla kaplanmıştır. Cihazın karakterizasyonu için gerekli Gümüş kontaklar Nanovak NVB3-300TH marka termal buharlaştırma cihazı aracılığıyla kaplanmıştır. Üretilen güneş hücrelerinin yapıları Şekil 3.5’de şematik olarak, resimleri ise şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.5. ITO/PCDTBT:PCBM/Ag organik güneş hücrelerinin yapılarının şematik gösterimi.



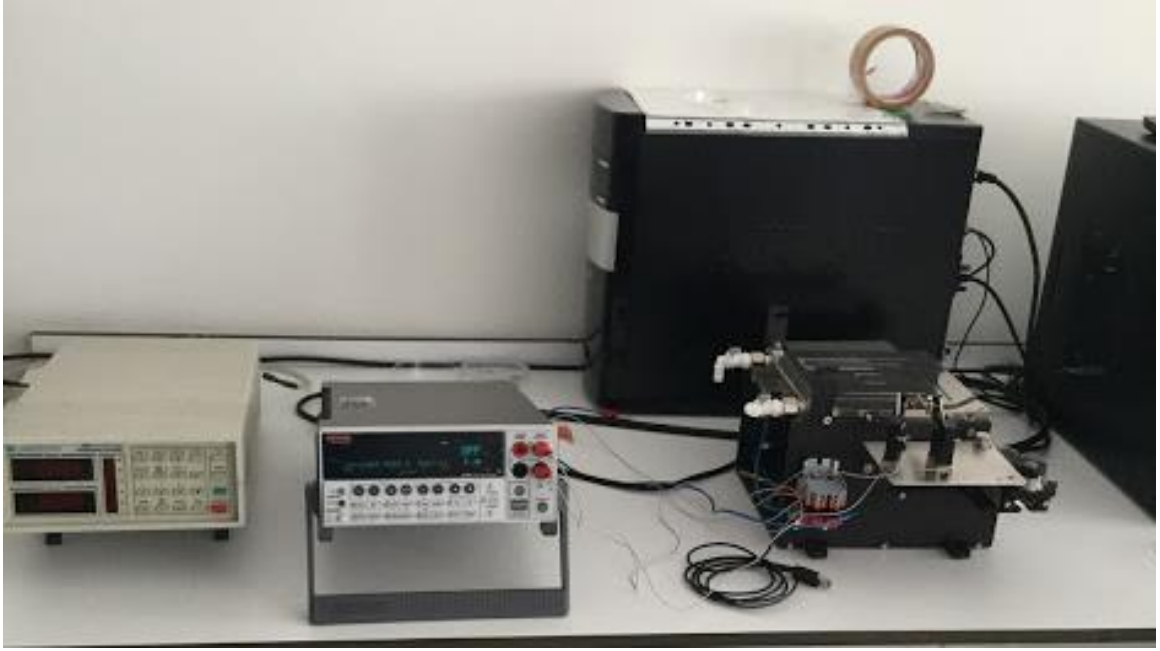
Şekil 3.6. ITO/PCDTBT:PCBM/Ag organik güneş hücresi.

3.1. Karakterizasyon Sistemleri

3.2.1. Akım-Gerilim Ölçüm Sistemi

Üretilen diyot yapılarının 240 –350 K sıcaklık aralığında ve karanlıkta I–V ölçümü için, hem hassas akım ve voltaj kaynağı hem de ölçüm cihazı olarak sabit DC güç kaynağına sahip Şekil 3.7’de gösterilerilen Keithley 2400 marka akım-voltaj kaynağı kullanılmıştır. Cihaz ile numune arasındaki bağlantı numune tutucusuyla sağlanmıştır. Doğru akım, ters

ve ileri besleme özelliğindeki cihaz -35 V ile +35 V aralığında ayarlanabilmektedir. $\pm 0,15\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz bilgisayar ile kontrol edilmektedir.



Şekil 3.7. Keithley 2400 Akım-Gerilim (I-V) Ölçüm Sistemi.

3.2.2. Kapalı Döngü Helyum Soğutma Sistemi

Ölçümlerde kullandığımız I-V ölçüm sisteminin kapalı devre sıvı He gazı soğutma sistemi ile 15-325 K arasında sıcaklık kontrolü sağlanabilmektedir. Sistemin kontrollü bir şekilde soğutulup ısıtılabilmesi için numune vakum altında tutularak ölçümler alınmıştır. Ölçümler CRYOGENICS INC HC-2 Cold Edge marka cihaz ile yapılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. CRYOGENICS INC HC-2 Cold Edge marka Kapalı Döngü Helyum Soğutma Sistemi.

3.2.3. Morötesi-Görünür Spektrofotometre

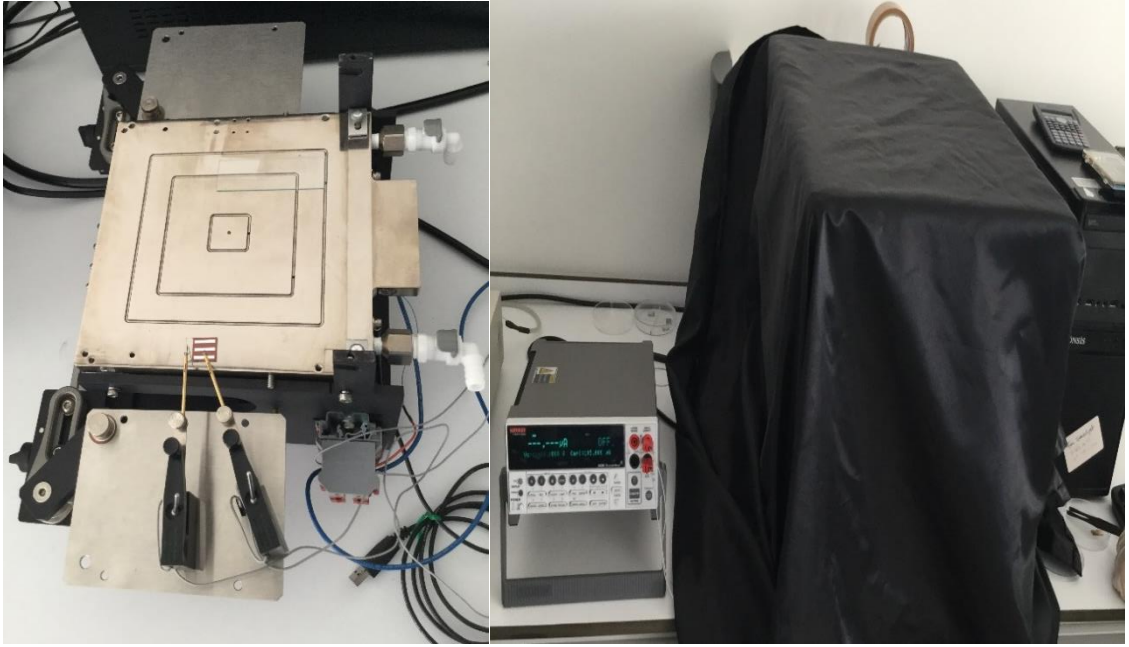
Üretilen numuneler optik geçirgenlik ölçümleri 0,5 nm spektral banda sahip 200 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında ölçüm yapabilen PG Instruments T70+UV/VIS model Spektrofotometre cihazı ile yapılmıştır. Optik ölçümler için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.9 ile verilmiştir.



Şekil 3.9. PG Instruments T70+UV/VIS model Morötesi-Görünür Spektrofotometre.

3.2.4. Güneş Simülatörü

Güneş hücrelerinin optoelektronik karakterizasyonu için Abet marka 10500 model güneş simülatörü (Şekil 3.10) kullanılmıştır. Kullanılan simülatör 50 x 50 mm ile 35 x 35 cm boyutları arasında değişen alanlara sahip numuneler üzerine 0 W – 150 W güç aralığında ışık enerjisi verebilen bir cihazdır. Cihaz aynı zamanda ASTM, IEC ve JIS standartlarına uygun çalışmaktadır. Aydınlatma yönü; aşağı, yatay veya dikey yukarı olarak değişebilmektedir.

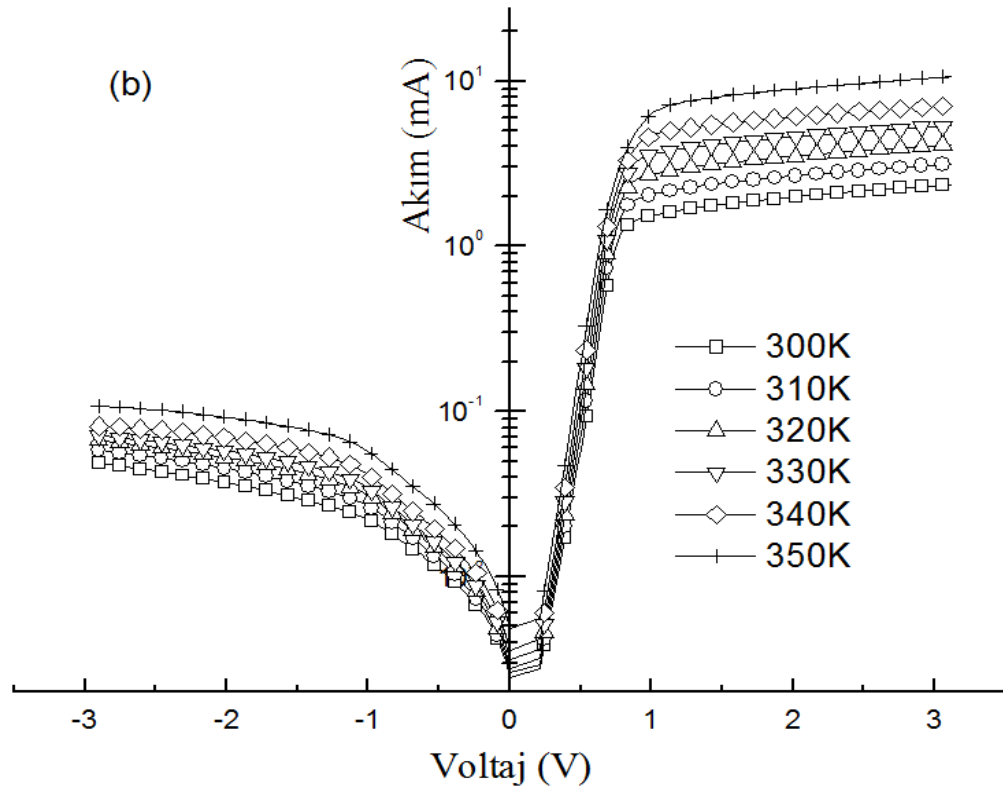
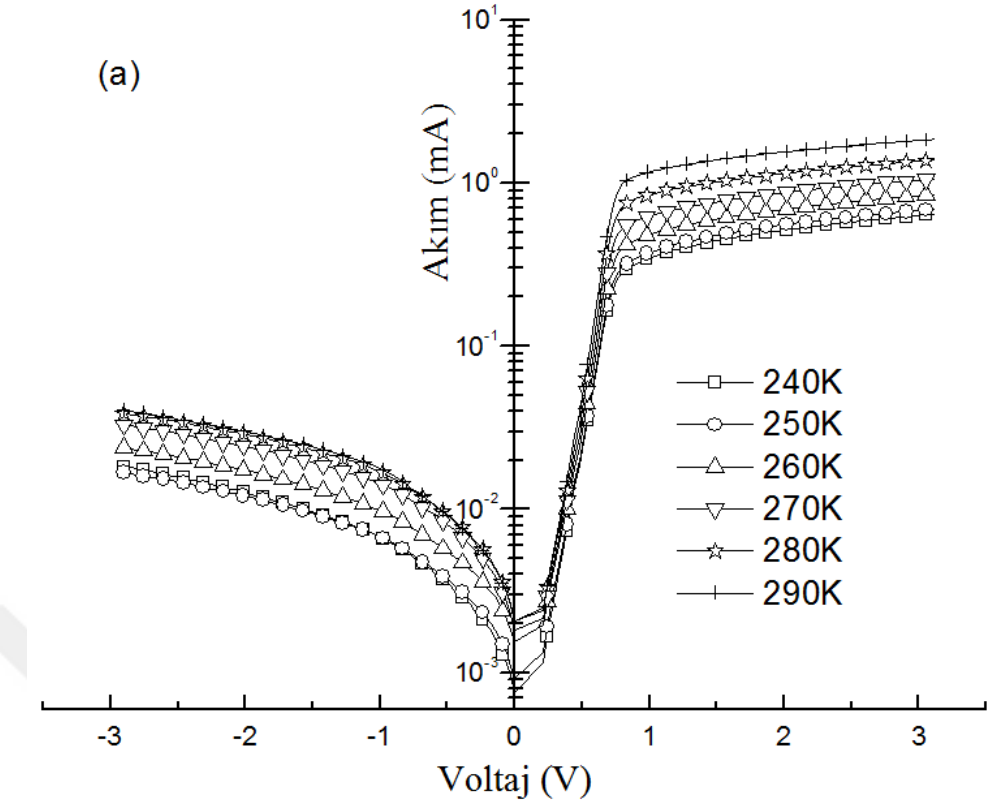


Şekil 3.10. Abet marka 10500 model simülatör.

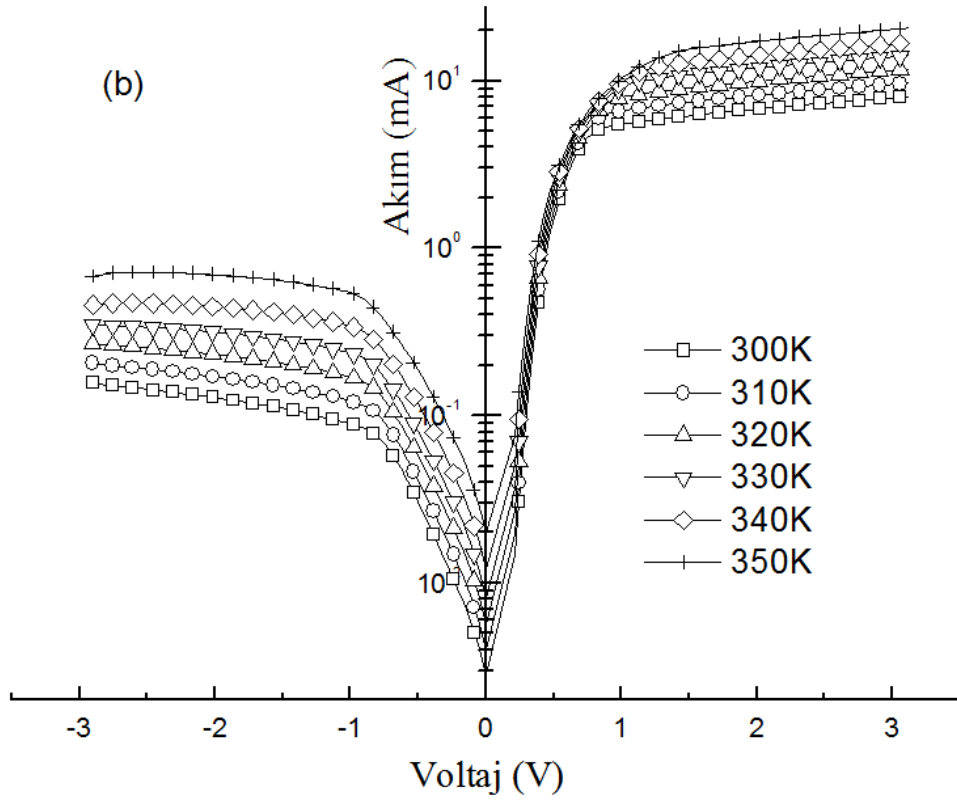
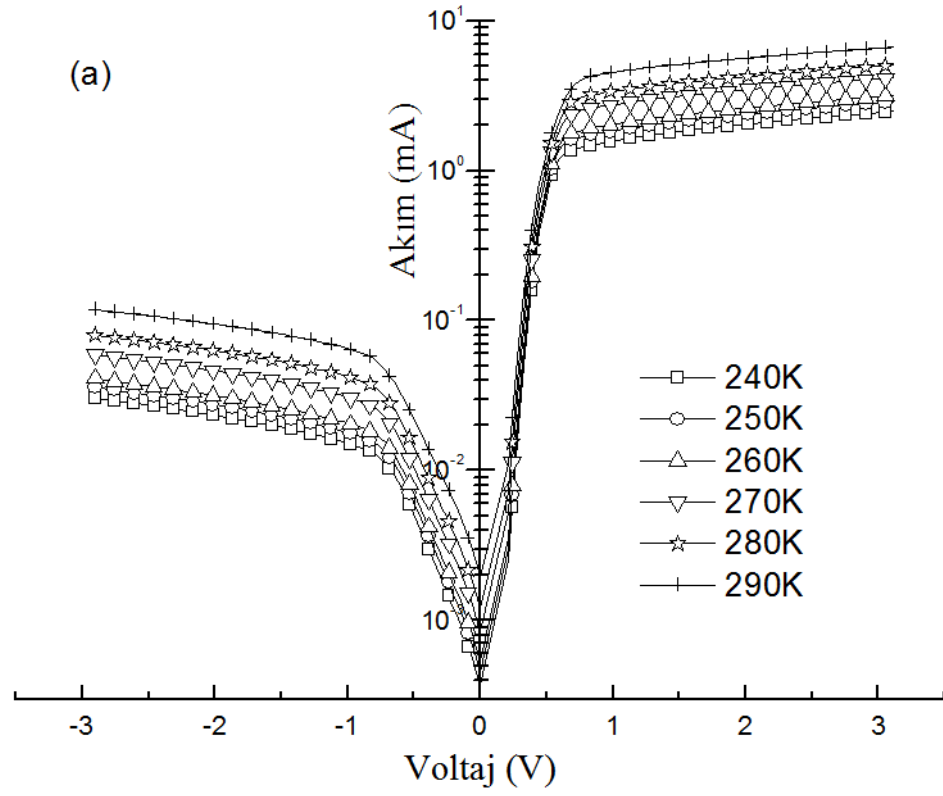
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au Diyotlarının Akım-Gerilim Karakteristikleri

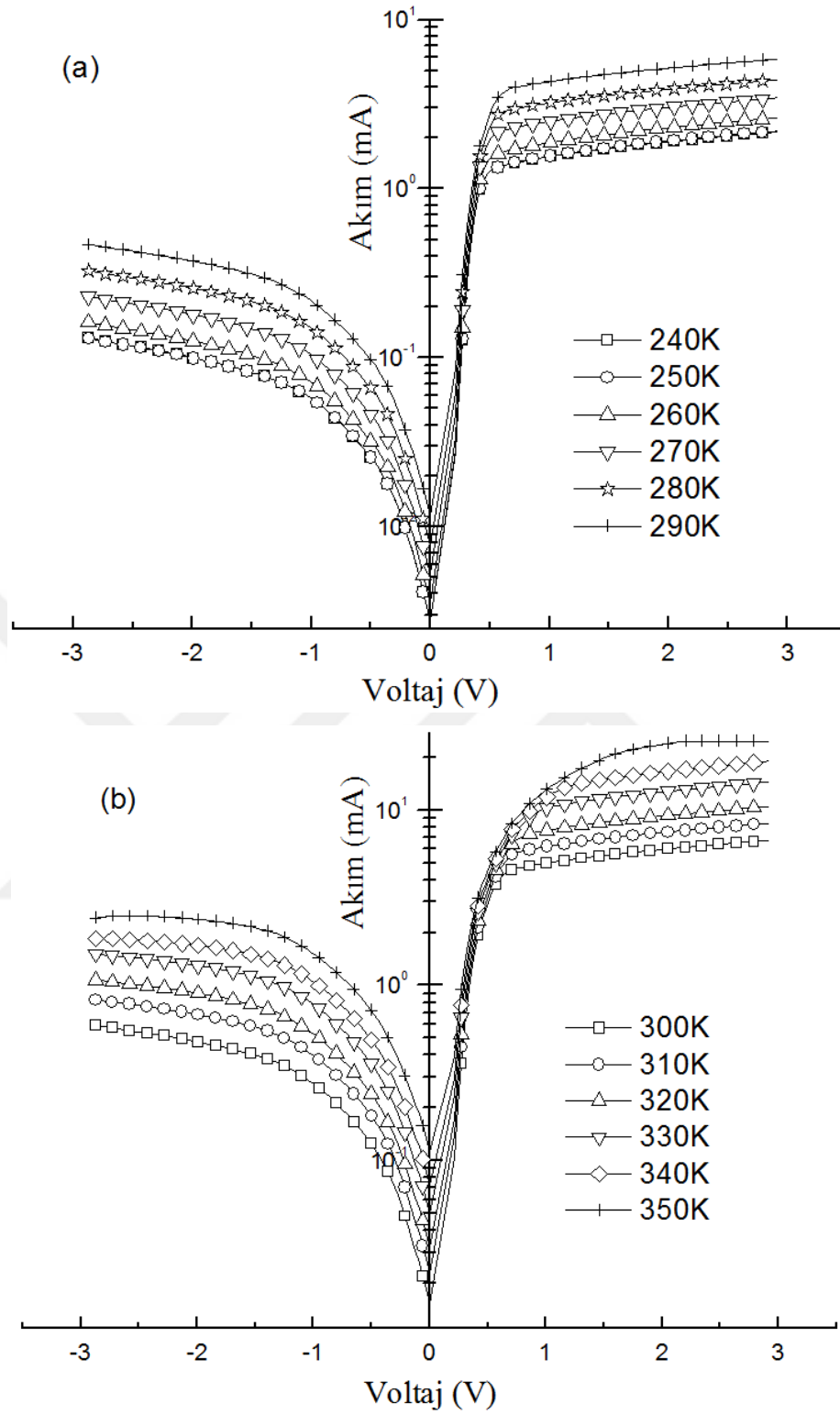
Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler kullanılarak çizilen Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au organik diyotlarının 240 K – 350 K aralığındaki sıcaklık değerlerindeki akım-voltaj (I-V) eğrileri Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te yarı-logaritmik ölçek ile gösterilmiştir. Şekillerden Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au, Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au ve Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotlarının tümünün I-V davranışlarının doğrultucu bir karakteristik gösterdiği görülmektedir. Bir başka deyişle, negatif voltaj bölgesinde oluşan ters akımın değerinin ve voltaja bağlı değişiminin, pozitif voltaj bölgesinde oluşan ileri akımın değeri ile kıyaslandığında nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, tüm diyotlarda akımın düşük voltaj değerlerinde voltaja eksponansiyel bir bağımlılık gösterdiği görülmektedir. Yani, I-V karakteristikleri asimetric bir davranış göstermektedir. Buradan, tüm diyotlarda doğrultucu arayüzün yapılan üretim sonucu başarıyla oluşturulduğu anlaşılmaktadır. Grafikler incelendiğinde, doğrultma oranlarının Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au, Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au ve Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotları için sırasıyla 97, 26 ve 10 olduğu hesaplanmıştır. Bu sonuçtan anlaşılabacağı gibi, karışımdaki PC₆₁BM oranının artırılması doğrultma oranını belirgin bir şekilde düşürürken aynı sıcaklıktaki maksimum akımı ise artırmıştır.



Şekil 4.1. Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC61BM(34)/Au organik diyotunun (a) 240 – 290 K ve (b) 300 – 350 K aralıklarında I-V karakteristiklerinin yarı-logaritmik ölçekle gösterimi.



Şekil 4.2. Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au organik diyotunun (a) 240 – 290 K ve (b) 300 – 350 K aralıklarında I-V karakteristiklerinin yarı-logaritmik ölçekle gösterimi.



Şekil 4.3. Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au organik diyotunun (a) 240 – 290 K ve (b) 300 – 350 K aralıklarında I-V karakteristiklerinin yarı-logaritmik ölçekle gösterimi.

Çalışmanın ikinci bölümünde daha önceden belirtildiği gibi, bir diyotun I-V karakteristiği teorik olarak Eşitlik 2.16 ve 2.17 ile ifade edilebilir [64].

Denklemler incelendiğinde, bir diyotun I-V davranışının teorik olarak ekponansiyel bağıllık gösteren bir karakteristik sergilemesi beklenmektedir. Bu karakteristiğin daha kolay gözlemlenebilmesi ve analizlerin daha kolay yapılabilmesi için, üretilen diyotların I-V grafiklerinin tüm sıcaklık değerleri için yarı-logaritmik ölçek ile çizilmesi daha uygun görülmüştür.

Üretilen Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au organik diyotlarının yüzey alanları $7,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ olarak ölçülmüştür. Diyotun idealite faktörü n Eşitlik 2.19 kullanılarak hesaplanabilir.

İdealite faktörü, diyotun davranışının ideal diyot denklemine ne kadar uyumlu olduğunu ve dolayısıyla ideal bir diyot karakteristiğine ne kadar yakın davrandığını gösterir ve değeri 1'e yaklaştıkça diyot ideal bir diyot davranışına yaklaşır. İdealite faktörünü değeri diyota ait yarı logaritmik I-V grafiğinin ileri besleme bölgesindeki doğrusal kısmın eğiminin kullanılmasıyla hesaplanabilir. Bu metot kullanılarak Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au organik diyotlarının farklı sıcaklıklardaki n değerleri, Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilen yarı logaritmik I-V grafiklerinin ileri besleme bölgesindeki doğrusal kısımların eğimlerinin kullanılmasıyla hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. Benzer şekilde, I-V grafiklerinin ileri besleme bölgesindeki doğrusal kısımların I-eksenini kestiği noktaların kullanılmasıyla da diyot için farklı sıcaklıklardaki doyum akımı I_0 değerleri hesaplanabilir. Yine diyotun önemli bir karakteristiği olan 0 potansiyel bariyeri ϕ_{b0} değerleri, hesaplanan I_0 değerlerinin Eşitlik 2.14'te yerine koyulmasıyla kullanılarak hesaplanabilir. Tüm hesaplar sonucu elde edilen I_0 ve ϕ_{b0} değerleri Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir. Numunelerimiz için Richardson sabitinin (R^*) deneysel değeri elimizde bulunmamasına rağmen, bu durumda genel olarak kabul gören bir uygulama olarak, serbest elektronlar için geçerli olan $120 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ değerinin kullanılmasının sonucu önemli bir oranda etkilemeyeceği düşünülerek, hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır [67], [68].

Çizelge 4.1. Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au organik diyotunun farklı sıcaklıklarda hesaplanan karakteristik parametreleri.

Sıcaklık (K°)	n	I ₀ (mA)	φ _{bo} (eV)
240	3,82	9,05×10 ⁻⁵	0,218
250	3,79	10,05×10 ⁻⁵	0,230
260	3,72	11,05×10 ⁻⁵	0,246
270	3,65	12,85×10 ⁻⁵	0,254
280	3,42	13,28×10 ⁻⁵	0,264
290	3,28	13,42×10 ⁻⁵	0,275
300	3,05	13,19×10 ⁻⁵	0,286
310	2,80	11,94×10 ⁻⁵	0,300
320	2,66	12,14×10 ⁻⁵	0,311
330	2,54	13,11×10 ⁻⁵	0,321
340	2,37	13,31×10 ⁻⁵	0,332
350	2,29	17,45×10 ⁻⁵	0,335

Çizelge 4.2. Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au organik diyotunun farklı sıcaklıklarda idealite faktörleri.

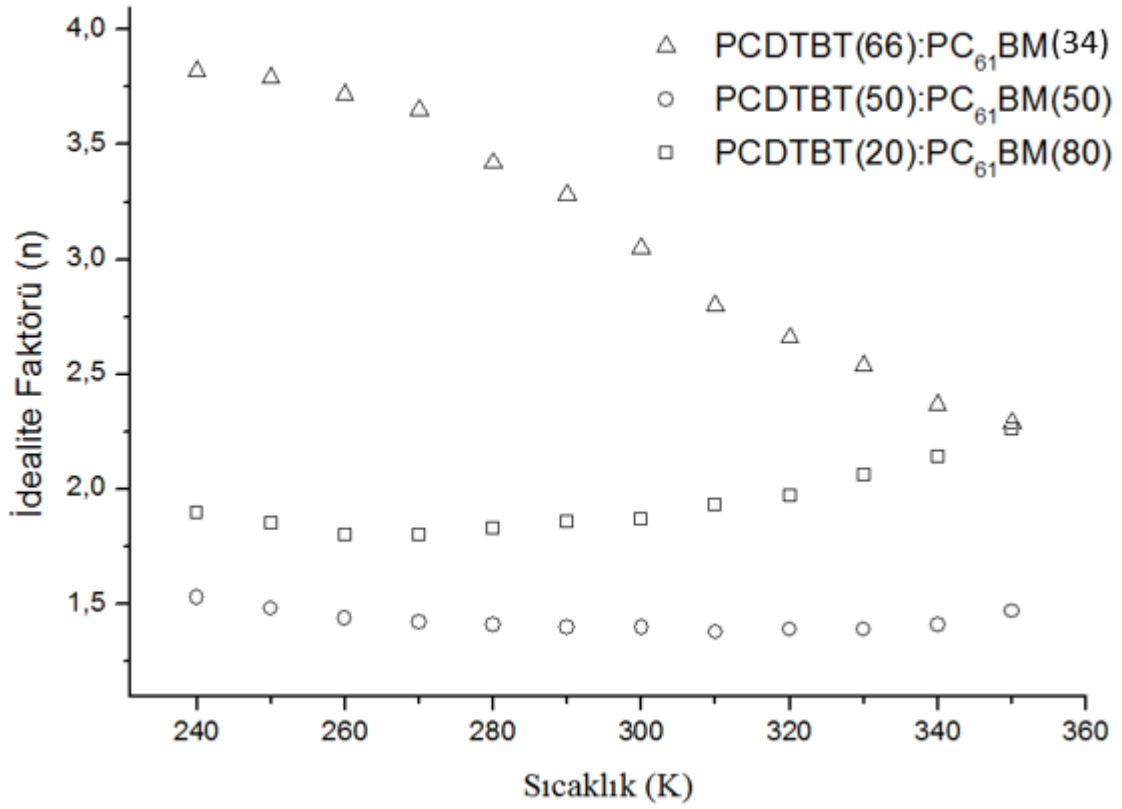
Sıcaklık (K°)	n	I ₀ (mA)	φ _{bo} (eV)
240	1,53	1,13×10 ⁻⁵	0,314
250	1,48	1,63×10 ⁻⁵	0,326
260	1,44	2,07×10 ⁻⁵	0,335
270	1,42	3,72×10 ⁻⁵	0,336
280	1,41	6,26×10 ⁻⁵	0,338
290	1,40	1,15×10 ⁻⁵	0,336
300	1,40	1,94×10 ⁻⁵	0,336
310	1,38	3,00×10 ⁻⁵	0,337
320	1,39	5,14×10 ⁻⁵	0,335
330	1,39	8,38×10 ⁻⁵	0,333
340	1,41	14,90×10 ⁻⁵	0,328
350	1,47	33,44×10 ⁻⁵	0,315

Çizelge 4.3. Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au organik diyotunun farklı sıcaklıklarda idealite faktörleri.

Sıcaklık (K°)	n	I ₀ (mA)	φ _{bo} (eV)
240	1,90	13,50×10 ⁻⁵	0,219
250	1,85	14,72×10 ⁻⁵	0,229
260	1,80	18,90×10 ⁻⁵	0,234
270	1,80	3,12×10 ⁻⁵	0,233
280	1,83	5,36×10 ⁻⁵	0,230
290	1,86	9,35×10 ⁻⁵	0,226
300	1,87	135,11×10 ⁻⁵	0,226
310	1,93	233,77×10 ⁻⁵	0,221
320	1,97	362,56×10 ⁻⁵	0,218
330	2,06	657,65×10 ⁻⁵	0,209
340	2,14	1043,11×10 ⁻⁵	0,204
350	2,26	1806,44×10 ⁻⁵	0,195

Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotlarının idealite faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimini gözlemleyebilmek için Şekil 4.4. çizilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotunun idealite faktörünün değeri 1,80 ile 2,26 arasında düzenli olarak değişmektedir. Bu değer 240 – 270 K arası sıcaklık arttıkça azalmakta, 260 ve 270 K sıcaklık değerlerinde en küçük değerine ulaşmakta ve daha sonra 350 K sıcaklık değerine kadar sıcaklık arttıkça artmaktadır. Benzer şekilde, Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au diyotunun idealite faktörünün değeri ise 1,38 ile 1,53 arasında düzenli olarak değişmektedir. Bu değer 240 – 310 K arası sıcaklık arttıkça azalmakta, 310 K sıcaklık değerlerinde en küçük değerine ulaşmakta ve daha sonra 350 K sıcaklık değerine kadar sıcaklık arttıkça artmaktadır. Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au diyotunun idealite faktörünün değeri ise 3,82 ile 2,29 arasında düzenli olarak sıcaklık arttıkça azalmaktadır. İdealite faktörü diyotun saf termiyonik emisyon davranışına ne kadar uyduğunu gösteren bir niceliktir ve değerinin en

ideal durumda 1 veya ideal olmayan durumlarda ise işlevini yerine getiren bir diyot için 1'e yakın olması beklenir [22]. İdealite faktörünün değeri aynı zamanda akım taşıyıcıların deplesyon bölgesini geçerken meydana gelebilecek rekombinasyon ihtimalleri ile ilgilidir ve bu nedenle arayüz düzgünlüğünün de bir göstergesidir. Gözlemlenen idealite faktörlerinden üretilen Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au ve Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotlarının I-V davranışlarının tüm sıcaklıklar için ideale yakın bir karakteristik gösterdiği söylenebilir. Aynı durumun Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au diyotu için geçerli olmadığı ve bu diyotun sadece yüksek sıcaklık değerlerinde ideale yakın davranış gösterdiği şekilden görülmektedir. İdeal durumdan küçük sapmaların arayüz düzgünlüğü ve kontak kalitesi gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Pürüzsüz bir arayüz, doğrultucu karakteristik için önemli bir özelliktir. İdealite faktörünün değerinin 1 civarında olması, bu değer geçeri olduğu bölgeler için yük taşıyıcıların rekombinasyonlarının cihazın nötral alanlarında gerçekleştiği anlamına gelmektedir. İdealite faktörünün 2 civarında veya daha fazla olduğu bölgelerde, yük taşıyıcıların rekombinasyonlarının baskın olarak cihazın deplesyon bölgesi civarında gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu durum elektron ve boşlukların deplesyon bölgesinde yüksek rekombinasyon olasılıklarına sahip olmalarıyla açıklanabilir [74]. Üretilen Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotları arasında ortalama idealite faktörü değeri dikkate alınırsa, ideale en yakın davranışın Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au tarafından gösterildiği görülmektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, karışımındaki PC₆₁BM oranının artırılması, belirli bir orana kadar idealite faktörünün değerini düşürmekte, ancak daha sonra tekrar yükseltmektedir. İdealite faktörünün değeri aynı zamanda PCDTBT:PC₆₁BM aktif katmanı kullanılarak üretilen güneş hücrelerinin de dolum faktörü değerini etkileyecektir. İdealite faktörünün değerinin artması, dolum faktörünün değerini de azaltacaktır ve bu da bir güneş hücresi için istenmeyen bir durumdur. Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotlarının idealite faktörlerinin sıcaklık bağımlılığı incelendiğinde ortalama olarak yaklaşık 300 K sıcaklık değerinde ideale en yakın davranış gösterdikleri görülmektedir. Bu durumda, PCDTBT:PC₆₁BM aktif katmanı kullanılarak üretilecek bir güneş hücresinin en iyi performansı bu aralıkta göstereceği ve analizlerin bu sıcaklık aralığında yapılmasının isabetli olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. Ag/n-Si/PCDTBT):PC₆₁BM/Au organik diyotlarının idealite faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

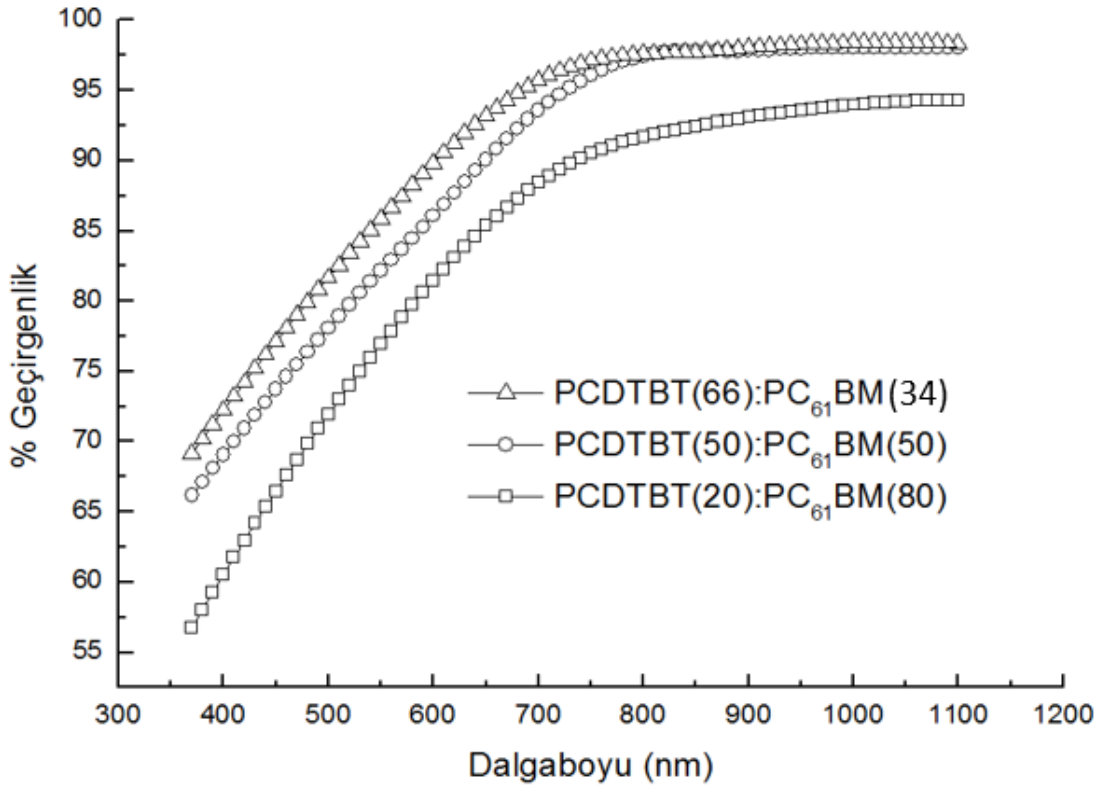
Diyotun deplesyon bölgesinden difüzyon ile içeri veya dışarı hareket eden yük taşıyıcıların hareketleri sonucunda I_0 doyum akımı oluşmaktadır. Bu akımının değeri belirli bir sıcaklık değeri için uygulanan voltajdan bağımsızdır. Doyum akımının değeri daha önce de bahsedildiği gibi I-V grafiklerinin ileri besleme bölgesindeki doğrusal kısımların I-eksenini kestiği noktaların kullanılmasıyla hesaplanabilir. Tüm Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotları için bu metot aracılığıyla hesaplanan I_0 değerleri Tablo 4.1., 4.2. ve 4.3.'te verilmiştir. Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotlarının I_0 değerleri incelendiğinde, doyum akımının sıcaklık arttıkça düzenli olarak arttığı görülmektedir. I_0 akımının sıcaklık arttıkça artmasının nedeni, bu akımın kaynağının azınlık yük taşıyıcıların termal uyarılması olması ile açıklanan bir durumdur. Genel kural olarak sıcaklıktaki her 10 K° artışın doyum akımının değerinin iki katına çıkmasıyla sonuçlanmasının beklendiği daha önce yapılan bir çalışmada rapor edilmiştir [29]. Elde edilen sonuçlar, Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotlarının bu kurala tam olarak değil ancak belirli sapma limitleri içinde uyduğunu göstermektedir.

Diyot içerisinde oluşan elektrik alan ise potansiyel bariyeri ϕ_{b0} 'ın oluşmasına neden olmaktadır. Bu bariyer yük taşıyıcıların deplesyon bölgesinden serbestçe geçmelerini engeller. Daha önceden bahsedildiği gibi, potansiyel bariyerlerinin değerleri, hesaplanan I_0 değerlerinin Eşitlik 2.14'te yerlerine koyulmasıyla hesaplanabilir. Tüm Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotları için bu metot aracılığıyla hesaplanan ϕ_{b0} değerleri Tablo 4.1., 4.2. ve 4.3.'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au diyotlarının ϕ_{b0} değerlerinin sıcaklık arttıkça arttığı gözlemlenmektedir. Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au diyotlarının ϕ_{b0} değerlerinin ise 240-260 K sıcaklık aralığında düzenli olarak artarken, 260-320 K aralığında maksimum değerine ulaşmakta olduğu, 320-350 K aralığında ise düzenli olarak azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotlarının ϕ_{b0} değerlerinin ise 240-260 K sıcaklık aralığında düzenli olarak artarken, 260-270 K aralığında maksimum değerine ulaşmakta olduğu, 270-350 K aralığında ise düzenli olarak azaldığı görülmektedir. ϕ_{b0} değerlerinin sıcaklığa bağımlı bu davranışı akım mekanizması üzerinde hem termo-iyonik akımın hem de tünelleme akımının etkin olmasıyla açıklanabilir [78-83]. Eşitlik 2.16'e göre, yalnızca termo-iyonik akımın etkin olduğu durumlarda sıcaklık arttıkça ϕ_{b0} değerinin düzenli olarak azalması beklenir. Ancak, her iki akım mekanizmasının da etkin olduğu durumlarda, sıcaklık arttıkça belirli bir sıcaklık değerine kadar ϕ_{b0} değerinin önce artıp, maksimum bir değere ulaştıktan sonra azalması da beklenen bir durumdur [79]. Bu durumda tünelleme akımının toplam akım mekanizmasını maskeleyiği söylenebilir. Yani düşük sıcaklıklarda tünelleme akımının değerinin artması ϕ_{b0} değerlerinin beklenenden daha düşük değere sahip olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au diyotu için ϕ_{b0} değerinin sıcaklık arttıkça azalması davranışı ancak sıcaklık 320 K değerini aşınca gerçekleşmektedir. Benzer şekilde, Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotu için ise bu durum ancak sıcaklık 260 K değerini aşınca gözlemlenmiştir. Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au diyotunun ϕ_{b0} değerinin sıcaklık arttıkça artması ise, bu diyotun ϕ_{b0} değerinin sıcaklık arttıkça azalacağı kritik sıcaklık değerine hiç ulaşamadığı için gözlemlenemediği sonucuna varılmıştır.

Yapılan analizler sonucu, Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotlarının organik katmanı olan PCDTBT:PC₆₁BM karışımının, bir diyotun temel fonksiyonunu göstermesi için işlevini başarıyla yerine getirdiği yapılan deneyler ve analizler sonucu görülmüştür.

4.2. PCDTBT:PC₆₁BM İnce Filmlerinin Optik Karakterizasyonu

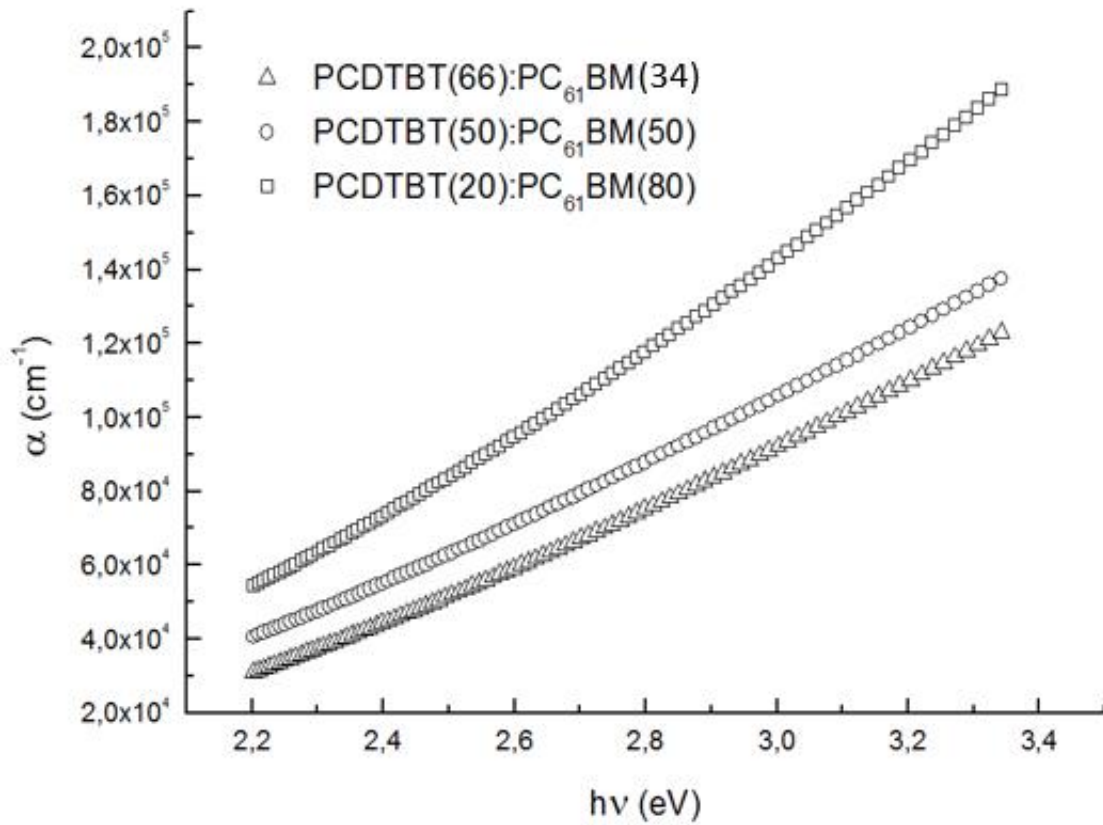
Diyot üretiminin başarıyla tamamlanmasından sonra, çalışmanın ikinci aşaması olarak planlanan ve üretilen diyotlarla aynı organik katmana sahip olacak ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag organik güneş hücrelerinin üretilmesi aşamasına geçilmiştir. Diyot üretiminde olduğu gibi, güneş hücrelerinde kullanılacak karışım oranları ITO/PCDTBT(66):PC₆₁BM(33)/Ag, ITO/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Ag ve ITO/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Ag olarak seçilmiştir. Güneş hücrelerinin üretilmesinden önce, hücrelerde organik katman olarak kullanılması planlanan PCDTBT(66):PC₆₁BM(33), PCDTBT(50):PC₆₁BM(50) ve PCDTBT(20):PC₆₁BM(80) organik ince filmlerinin ışık soğurma özelliklerinin ve bu özelliklerin güneş hücresi karakteristiklerine etkilerinin geçirgenlik spektroskopisi aracılığıyla incelenmesi de planlanmıştır. Bu amaçla yapılan geçirgenlik deneylerinin sonucu Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. PCDTBT:PC₆₁BM organik ince filmlerin optik geçirgenlik grafikleri.

Şekil 4.5 incelendiğinde, PCDTBT(66):PC₆₁BM(34), PCDTBT(50):PC₆₁BM(50) ve PCDTBT(20):PC₆₁BM(80) ince filmlerinin geçirgenliklerinin karışımdaki PC₆₁BM oranı arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu da PC₆₁BM oranı fazla olan ince filmlerin ışığı daha iyi soğurduğu anlamına gelebilir. Ancak bu konuda net bir yargıya varabilmek için

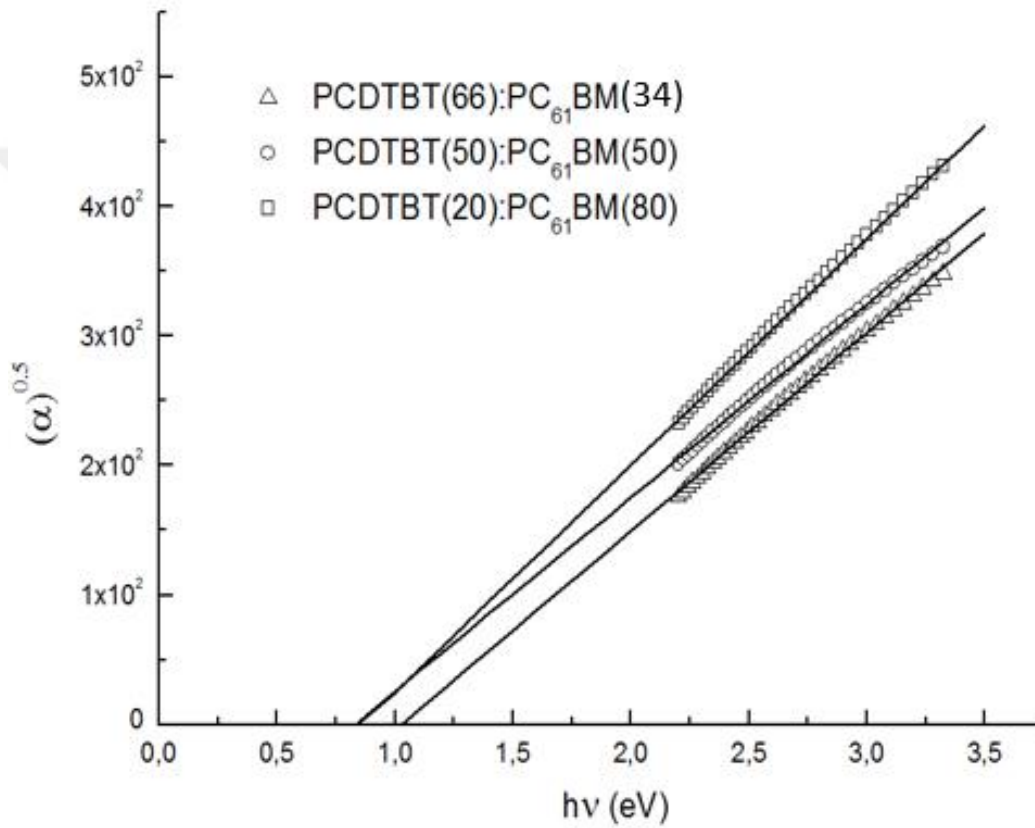
soğurma katsayılarının incelenmesi gerekir. Malzemelerin ışığı daha iyi soğurması, ışıktan gelen enerjinin bu malzemenin kullanıldığı aygıt tarafından elektrik enerjisine dönüştürülme ihtimalinin daha fazla olması anlamına gelmektedir. Daha detaylı bir analiz için ince filmlerin yasak enerji bant aralıklarını incelemek uygun olacaktır. Bu durumda öncelikle soğurma katsayılarının hesaplanması gerekir. Bunun için daha önce Eşitlik 2.20 ve 2.21’de bahsedilen Beer Lambert Yasası kullanılabilir. Burada %T ifadesi optik geçirgenlik deneyleri sonucu elde edilen yüzde geçirgenlik değerini ifade etmektedir. İnce filmlerin daha önceden ölçülen kalınlıkları da kullanılarak hesaplanan soğurma katsayılarının malzemelere gönderilen ışığın enerjisine bağlı grafikleri Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. PCDTBT:PC₆₁BM organik ince filmlerin soğurma katsayılarının gelen ışığın enerjisine bağımlılığı.

Şekil 4.6 incelendiğinde, karışımdaki PC₆₁BM oranı arttıkça, üretilen ince filmlerin soğurma katsayılarının arttığı görülmektedir. Yani artan PC₆₁BM oranının gelen ışığın daha yüksek oranlarda soğurulmasına neden olduğu anlaşılmaktadır. Bu aşamadan sonra, filmlerin yasak enerji bant aralıklarının hesaplanması için Eşitlik 2.22’de verilen Tauc denklemi kullanılabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi, Eşitlik 2.22’deki *p* birimsiz

sabitinin değeri 0,5 ise malzeme içerisinde doğrudan geçişlerin gerçekleştiği, 2 ise malzeme içerisinde dolaylı geçişlerin gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde, p 'nin değerinin parabolik davranıştan dolayı 2 olduğu görülmektedir. p 'nin değeri yerine koyularak Eşitlik 2.23 elde edilebilir. Eşitlik 2.23'de her iki tarafın karekökünün alınması sonucu, $\alpha^{0,5}$ değerinin, ışık enerjisine doğrusal olarak bağımlı olduğu Eşitlik 2.24 elde edilir. Eşitlik 2.24'dan $\alpha^{0,5}$ değerinin 0 olduğu noktadaki enerji değerinin yasak enerji bant aralığı değerine eşit olduğu görülmektedir. Bu analiz için Şekil 4.7 çizilmiştir.



Şekil 4.7. PCDTBT:PC61BM organik ince filmleri için $\alpha^{0,5}$ değerinin gelen ışığın enerjisine bağımlılığını gösteren grafik.

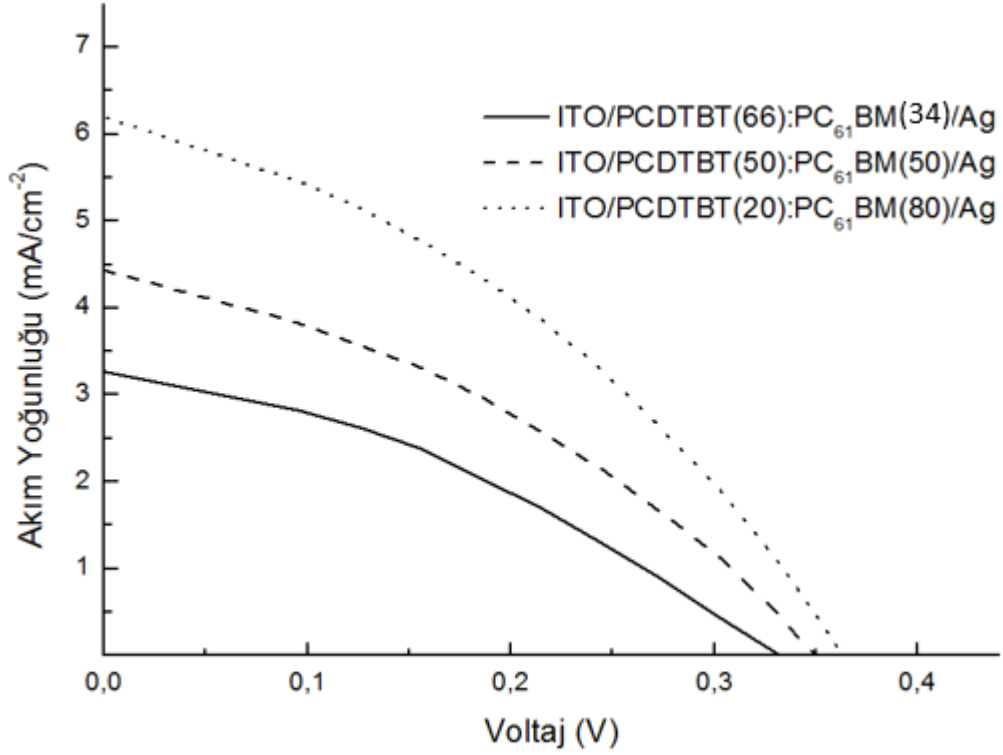
Şekil 4.7'de tüm filmler için çizilen doğruların enerji eksenini kestiği noktalar E_g değerlerini vermektedir. Yapılan analizler sonucu PCDTBT(66):PC₆₁BM(33), PCDTBT(50):PC₆₁BM(50) ve PCDTBT(20):PC₆₁BM(80) ince filmlerinin E_g değerleri, 1,03; 0,84 ve 0,84 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi karışımdaki PC₆₁BM oranının artırılması belirli bir orana kadar ince filmlerin yasak enerji bant aralığı değerini düşürmüştür. Bu değerın düşmesi, daha düşük enerjiye sahip fotonların malzeme tarafından soğurulma ihtimalini artırması açısından olumlu bir sonuç olarak kabul

edilebilir. Bu ihtimalin artmasının üretilecek güneş hücrelerinin verimini de artırmasının beklenmesi de doğal bir sonuçtur.

4.3. ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag Güneş Hücrelerinin Optoelektronik Karakterizasyonu

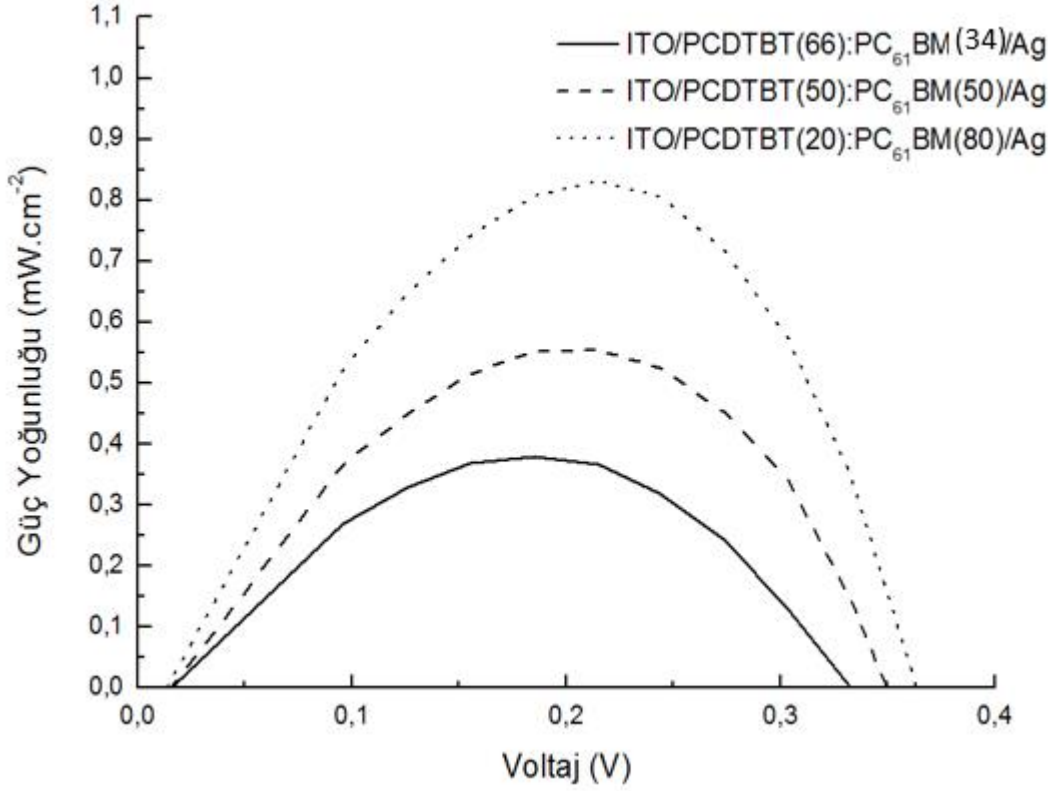
Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotlarının idealite faktörlerinin sıcaklık bağımlılığının incelenmesi sonucu, her bir diyot için bireysel olarak geçerli olmamasına rağmen, tüm diyotlar için bu değerlerin ortalama olarak 300 °K sıcaklık değerinde en düşük değerlerine yakın değerler aldıkları görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, idealite faktörünün değeri aynı organik katmanı kullanılarak üretilecek güneş hücrelerinin de dolum faktörü değerini etkileyecektir. İdealite faktörünün değerinin artması, dolum faktörünün değerini de azaltacaktır ve bu da bir güneş hücresi için istenmeyen bir durumdur. Bu durumda, üretilen güneş hücrelerinin optoelektronik karakterizasyonlarının hem deneysel şartların daha kolay oluşturulabilmesi, hem de ilgili diyot idealite faktörlerinin nispeten en düşük değerlerine sahip olmaları nedenleriyle 300 °K sıcaklık değerinde yapılması uygun görülmüştür.

Üretilen ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücrelerinin 300 °K oda sıcaklığındaki karakteristik özellikleri AM 1.5 güneş radyasyonu altında Akım Yoğunluğu (J) –Voltaj (V) davranışları kaydedilerek incelenmiştir. Tüm filmlerin J-V karakteristikleri geleneksel olarak daha anlaşılabilir olabilmesi için -1 ile çarpılarak Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, güneş hücrelerinin üretiminin başarı ile gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.8. ITO/PCDTBT:PC61BM/Ag güneş hücreleri için J-V karakteristikleri.

Bir güneş hücresinin karakteristik özelliklerini belirleyen en önemli parametreler hücreden alınabilecek maksimum güç yoğunluğu (P_{maks}), dolum faktörü (FF) ve güç dönüştürme verimi (η) olarak sıralanabilir. Bu parametrelerden P_{maks} değerinin kolayca hesaplanması için hücre tarafından üretilen elektriksel gücün hücreye uygulanan potansiyel farka bağımlılığını gösteren grafik Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Bir diğer parametre olan FF'nin matematiksel ifadesi Eşitlik 2.25 ile verilmiştir. Buna ek olarak, bir güneş hücresinin üzerine düşen ışık enerjisi miktarının hangi oranda elektrik enerjisine dönüştürülebildiğinin göstergesi olan güç dönüştürme verimi η ise Eşitlik 2.26'de ifade edilmiştir. Burada P_{gelen} güneş hücresinin birim yüzey alanı üzerine gelen ışık enerjisinin gücünü göstermektedir. AM 1.5 güneş radyasyonu için bu değer 100 mW.cm^{-2} 'dir.



Şekil 4.9. ITO/PCDTBT:PC61BM/Ag güneş hücreleri için elektriksel güç yoğunluğunun hücreye uygulanan potansiyel farka (V) bağımlılığı.

Yapılan analizler sonucu, ITO/PCDTBT:PC61BM/Ag güneş hücrelerine ait tüm karakteristik parametrelerin değerleri hesaplanarak organik katmanı oluşturan karışım oranlarına göre sınıflandırılarak Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. ITO/PCDTBT:PC61BM/Ag güneş hücrelerinin karakteristik parametreleri.

Karışım Oranı	V _{oc}	J _{sc}	P _{maks} (mW)	FF	η
PCDTBT(66):PC ₆₁ BM(34)	0,333	3,25	0,39	0,36	0,0039
PCDTBT(50):PC ₆₁ BM(50)	0,355	4,45	0,57	0,36	0,0057
PCDTBT(20):PC ₆₁ BM(80)	0,364	6,20	0,85	0,37	0,0085

PC₇₁BM tabanlı organik güneş hücreleri üzerinde daha önceden yapılan çalışmalar incelendiğinde, organik katmanı oluşturan karışımdaki PC₇₁BM oranının % 67 ile % 80 arasında değiştirilerek kullanıldığı saptanmıştır [15-19]. Yapılan incelemeler sonucu PC₇₁BM kullanılarak üretilen güneş hücrelerinden elde edilen V_{oc} değerlerinin, 0,62 – 0,93 V aralığında değiştiği görülmektedir. Aynı hücreler için η değerleri incelendiğinde ise verim değerlerinin 0,0378 – 0,0677 aralığında değiştiği, yani hücrelerden %3,78 ile

%6,77 arasında verim alındığı görülmektedir. Bu değerler bizim elde ettiğimiz sonuçlar ile kıyaslandığında, ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücrelerinin sahip olduğu V_{oc} değerlerinin, literatürdekiler ile kıyaslanabilir derecede başarılı olduğu görülmektedir. Ancak, η değerleri için aynı durum geçerli değildir. ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücresinin veriminin, literatürdeki değerlere oranla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Üretilen hücrelerden elde edilen sonuçların literatürdekiler kadar başarılı olmamasının temel sebeplerinden birinin, hücre üretimi aşamalarında kullanılan havasız ortam kabini kullanma olanağının elimizde olmaması olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca, Şekil 4.8 incelendiğinde, η değerlerinin nispeten daha düşük olmasının temel sebebinin ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücrelerinin geçirdiği J_{sc} akım yoğunluğu değerlerinin nispeten düşük olmasına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. J_{sc} 'nin göreceli olarak düşük olması, üretilen güneş hücresinden elde edilebilecek akımın miktarının düşük olduğunu göstermektedir. Bu akım miktarı güneş hücresinin iç özellikleri kadar, elektrot kontaklarının da özelliklerinden etkilenmektedir. Özellikle elektrotlarda kullanılan kontak malzemesinin türüne ve kontak alma metoduna yüksek oranda bağlıdır. Bunun yansıması, güneş hücresinin organik katmanında PC₆₁BM yerine PC₇₁BM türevinin kullanılmasının da verim üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir [15-19]. Tüm bunlara ek olarak, elektrotlar ile güneş hücresinin aktif katmanı arasına eklenen boşluk ve elektron transfer katmanlarının, arayüzdeki doğrultucu davranışı engelleyerek yük taşıyıcı transferini önemli oranlarda artırdığı da bilinmektedir [85-87]. Bu çalışmamızda, elimizdeki olanakların yeterli olmaması nedeniyle, güneş hücresinin yapısına eklenecek transfer katmanlarının, hücre parametrelerine etkisi incelenememiştir.

Tüm bu bahsedilen sebeplerden dolayı, çalışmamız sürecinde üretilen ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücrelerinin literatürde farklı şekillerde üretilen PCBM tabanlı organik güneş hücreleri veya ticari olarak kullanılan inorganik güneş hücreleri ile karşılaştırıldığında, onlarla rekabet edecek özelliklere bu aşamada sahip olmadığı görülmektedir. Ancak, üretilen hücrelerin birer ön çalışma niteliği taşımaları ve literatürde özellikle PCDTBT:PC₆₁BM tabanlı güneş hücresi araştırmalarının azlığı gibi nedenler, çalışma sonuçlarına değer katmaktadır. Bu hücrelerin yapılarında, üretim koşullarında ve elektrotlar üzerinde yapılacak geliştirmeler ile diğer organik güneş hücreleri ile rekabet edebilecek karakteristiklere sahip olmalarının mümkün olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmayı tamamlayıcı ve aynı zamanda devamı niteliğinde bir çalışma olarak, üretilen ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücrelerinin yapılarında

ITO/PCDTBT:PC₆₁BM ve PCDTBT:PC₆₁BM/Ag arayüzlerine boşluk ve elektron transfer katmanları eklenerek yapılacak değişiklikler ile bu hücrelerin verimlerinin kayda değer miktarda artırılması planlanmaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ilk aşamasında, Ag/n-Si/PCDTBT: PC₆₁BM /Au organik metal-polimer yarıiletken Schottky bariyer diyotları, %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 yüzdelik hacimsel karışım oranlarına sahip PCDTBT: PC₆₁BM karışımları kullanılarak, başarı ile üretilmiştir. Üretilen diyotların yüzey alanları $7,85 \times 10^{-7}$ m² olarak ölçülmüştür. Diyotların sıcaklığa bağlı karakteristik özellikleri 240-350 °K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Bu amaçla yapılan I-V ölçümleri sonucu elde edilen veriler kullanılarak, üretilen diyotların idealite faktörü (n), doyum akımı (I₀) ve potansiyel bariyer yüksekliği (ϕ_b) gibi karakteristik özellikleri ve bu özelliklerin sıcaklığa bağımlılıkları analiz edilmiştir. Ölçümler sonucu diyotların I-V karakteristiklerinin beklendiği gibi ekponansiyel bir davranış sergilediği görülmüştür. Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au, Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au ve Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au diyotlarının n değerlerinin sırasıyla 2,29-3,82; 1,53-1,38 ve 1,80-2,26 aralıklarında değiştikleri gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucu, gözlemlenen idealite faktörü değerlerinin bir organik diyot için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu, ideal durumdan küçük sapmaların ise arayüz düzgünlüğü ve kontak kalitesi gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Benzer şekilde, diyotların I₀ ve ϕ_b değerleri tüm sıcaklık değerlerinde hesaplanarak bu değerlerin sıcaklığa bağlı değişimlerinin altında yatan mekanizmalar açıklanmıştır.

Güneş hücrelerinin üretilmesinden önce, çalışmanın ara aşaması olarak, hücrelerde organik katman olarak kullanılması planlanan PCDTBT(66):PC₆₁BM(34), PCDTBT(50):PC₆₁BM(50) ve PCDTBT(20):PC₆₁BM(80) organik ince filmleri cam lameller üzerine kaplanarak, ışık soğurma özellikleri optik geçirgenlik spektroskopisi aracılığıyla incelenmiştir. Geçirgenlik deneyleri aracılığıyla elde edilen veriler kullanılarak yapılan analizler sonucu PCDTBT(66):PC₆₁BM(34), PCDTBT(50):PC₆₁BM(50) ve PCDTBT(20):PC₆₁BM(80) ince filmlerinin dolaylı yasak enerji bant aralıklarına sahip oldukları ve E_g değerlerinin 1,03; 0,84 ve 0,84 olduğu açığa çıkarılmıştır. Buna ek olarak, tüm ince filmler arasında PCDTBT(20):PC₆₁BM(80) ince filminin en yüksek soğurma katsayısı α değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ikinci ve son aşamasında, Ag/n-Si/PCDTBT:PC₆₁BM/Au diyotları ile aynı organik katmanların kullanıldığı ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag organik güneş hücreleri, %66:%34, %50:%50 ve %20:%80 PCDTBT:PC₆₁BM yüzdelik hacimsel karışım oranlarına sahip olacak şekilde üretilmiştir. Üretilen güneş hücrelerinin 300 °K oda sıcaklığındaki karakteristik özellikleri AM 1.5 güneş radyasyonu altında Akım Yoğunluğu–Voltaj (J-V) davranışları kaydedilerek incelenmiştir. Hücrelerin maksimum güç yoğunluğu (Pmaks), dolum faktörü (FF) ve güç dönüştürme verimi (η) değerleri hesaplanarak, bu değerlerin karışımdaki yüzdelik hacimsel oranlara bağımlılığı analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu, üretilen Ag/n-Si/PCDTBT(66):PC₆₁BM(34)/Au, Ag/n-Si/PCDTBT(50):PC₆₁BM(50)/Au ve Ag/n-Si/PCDTBT(20):PC₆₁BM(80)/Au güneş hücrelerinin güç dönüştürme verimleri sırasıyla % 0,39, % 0,57 ve % 0,85 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, hücrelerin aktif katmanını oluşturan PCDTBT:PC₆₁BM karışımındaki PC₆₁BM oranının artırılmasının, hücre verimini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Yapılan çalışmanın devamı niteliğinde bir çalışma olarak, ITO/PCDTBT:PC₆₁BM/Ag güneş hücrelerinin yapılarında bulunan ITO/PCDTBT:PC₆₁BM ve PCDTBT:PC₆₁BM/Ag arayüzlerine boşluk ve elektron transfer katmanları eklenerek yapılacak değişimler ile bu hücrelerin verimlerdeki değişimlerin incelenmesi önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Stallinga, H. L. Gomes, M. Murgia, K. Müllen, "Interface state mapping in a Schottky barrier of the organic semiconductor terrylene," *Organic Electronics*, c. 43, sayı 3, ss. 43-51, 2002.
- [2] J. Lei, W. Liang, C. J. Brumlik, C. R. Martin, "A new interfacial polymerization method for forming metal/ conductive polymer Schottky barriers," *Synthetic Metals*, c. 47, ss. 351-359, 1992.
- [3] M. Willander, A. Assadi, C. Svensson, "Polymer based devices their function and characterization," *Synthetic Metals*, c. 55, ss. 4099-4104, 1993.
- [4] R. M. Metzger, "Unimolecular Electrical Rectifiers", *Chem. Rev.*, c. 103, sayı 9, ss. 3803-3834, 2003.
- [5] R. K. Gupta, R. A. Singh, "Metal/semiconductive polymer Schottky device," *Applied Physics Letters*, c. 16, ss. 253, 2005.
- [6] H. Noh, A. J. Diaz and S. D. Solares, "Analysis and modification of defective surface aggregates on PCDTBT: PCBM solar cell blends using combined Kelvin probe, conductive and bimodal atomic force microscopy," *Beilstein Journal of Nanotechnology*, c. 8, ss. 579-589, 2017
- [7] E. Klump, I. Constantinou, T.H. Lai and F. So, "Utilizing Forster resonance energy transfer to extend spectral response of PCDTBT:PCBM solar cells", *Organic Electronics*, c. 42 ss. 87-92, 2017.
- [8] W. Guo, K. Zheng and W. Xie, "Efficiency enhancement of inverted polymer solar cells by doping NaYF₄:Yb³⁺, Er³⁺ nanocomposites in PCDTBT:PCBM active layer," *Solar Energy Materials And Solar Cells*, c. 124, ss. 126-132, 2014.
- [9] T. Clarke, J. Peet, A. Nattestad, "Charge carrier mobility, bimolecular recombination and trapping in polycarbazole copolymer:fullerene (PCDTBT:PCBM) bulk heterojunction solar cells," *Organic Electronics*, c. 13, sayı 11, ss. 2639-2646, 2012.
- [10] P. A. Staniec, A. J. Parnell and A.D.F. Dunbar, "The Nanoscale Morphology of a PCDTBT: PCBM Photovoltaic Blend," *Advanced Energy Materials*, c. 1, sayı 4, ss. 499-504, 2011.
- [11] F. Etzold, I. A. Howard and R. Mauer, "Ultrafast Exciton Dissociation Followed by Nongeminate Charge Recombination in PCDTBT:PCBM Photovoltaic Blends," *Journal of The American Chemical Society*, c. 133, sayı 24, ss. 9469-9479, 2011.
- [12] F. Lombeckab, S. Müllers, H. KombercS, M. Menkea, A.J. P. Patrick, J.C. Christopher, R. Mc N. Richard H.F. M. Sommer. "Benzoyl side-chains push the open-circuit voltage of PCDTBT/PCBM solar cells beyond 1 V," *Organic Electronics*, c. 49 , ss. 142-151, 2017.
- [13] N. Blouin, A. Michaud and M. Leclerc, "A low-bandgap poly (2,7-carbazole) derivative for use in high-performance solar cell", *Advanced Materials*, c. 19, sayı 17, ss. 2295-2300, 2007.
- [14] C.H. Peters, I.T. Sachs-Quintana, J.P. Kastrop, S. Beaupré, M. Leclerc, M.D. McGehee "High efficiency polymer solar cells with long operating lifetimes," *Advanced Energy Materials*, c. 1, ss. 491-494, 2011.

- [15] H. Waters, N. Bristow, O. Moudam, Chang, C.-J. Su, W.-R. Wu, U. S. Jeng, M. Horie, J. Kettle, "Effect of processing additive 1,8-octanedithiol on the lifetime of PCPDTBT based organic photovoltaics," *Organic Electronics*, c.15, ss. 2433-2438, 2014.
- [16] M. A. R. Yusoff, H. P. Kim, J. Jang, "Inverted organic solar cells with TiO_x cathode and graphene oxide an, ode buffer layers," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c.109, ss. 63-69, 2013.
- [17] Z. Liu, H. Ju, E.-C. Lee, "Improvement of polycarbazole-based organic bulk-heterojunction solar cells using 1,8-diiodooctane," *Applied Physics Letters*, c. 103, ss. 133308-133312, 2013.
- [18] J. Liu, L. Chen, B. Gao, X. Cao, Y. Han, Z. Xie, L. Wang, "Constructing the nanointerpenetrating structure of PCDTBT: PC70BM bulk heterojunction solar cells induced by aggregation of PC70BM via mixed-solvent vapor annealing," *Journal of Materials Chemistry A*, c. 1, ss. 6216-6225, 2013.
- [19] D. H. Wang, K. H. Park, J. H. Seo, J. Seifert, J. H. Jeon, J. K. Kim, J. H. Park, O. O. Park, A. J. Heeger, "Enhanced power conversion efficiency in PCDTBT/PC70BM bulk heterojunction photovoltaic devices with embedded silver nanoparticle clusters," *Advanced Energy Materials*, c. 1, ss. 766-770, 2011.
- [20] Y. Zhu, X. Xu, L. Zhang, J. Chen, Y. Cao, "High efficiency inverted polymeric bulk-heterojunction solar cells with hydrophilic conjugated polymers as cathode interlayer on ITO," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 97, ss. 83-88, 2012.
- [21] J. Liu, S. Shao, G. Fang, B. Meng, Z. Xie, L. Wang, "High efficiency inverted polymer solar cells with transparent and work function tunable MoO₃-Al composite film as cathode buffer layer," *Advanced Materials*, c. 24, ss. 2774-2779, 2012.
- [22] G. Fang, J. Liu, Y. Fu, B. Meng, B. Zhang, Z. Xie, L. Wang, "Improving the nanoscale morphology and processibility for PCDTBT-based polymer solar cells via solvent mixtures," *Organic Electronics*, c.13, ss. 2733-2740, 2012.
- [23] Z. Lin, J. Chang, C. Jiang, J. Zhang, J. Wu, C. Zhu, "Enhanced inverted organic solar cell performance by post-treatments of solution-processed ZnO buffer layers," *RSC Adv.*, c. 4, ss. 6646-6651, 2014.
- [24] P. Kubis, L. Lucera, F. Machui, G. Spyropoulos, J. Cordero, A. Frey, J. Kaschta, M. M. Voigt, G. J. Matt, E. Zeira, C. J. Brabec, "High precision processing of flexible P3HT/PCBM modules with geometric fill factor over 95%," *Organic Electronics*, c. 15, ss. 2256, 2014.
- [25] Z. Hu, J. Zhang, Y. Zhu, "Effects of solvent-treated PEDOT: PSS on organic photovoltaic devices," *Renewable Energy*, c.62, ss. 100-105, 2014.
- [26] K.-C. Choi, E.-J. Lee, Y.-K. Baek, M.-J. Kim, Y.-D. Kim, P.-W. Shin, Y.-K. Kim, "Modifying hydrogen bonding interaction in solvent and dispersion of ZnO nanoparticles: impact on the photovoltaic performance of inverted organic solar cells," *RSC Advances*, c. 4, ss. 7160-7166, 2014.
- [27] B. Ananda Rao, M. Sasi Kumar, G. Sivakumar, S. P. Singh, K. Bhanuprakash, V. J. Rao, G. D. Sharma, "Effect of incorporation of squaraine dye on the photovoltaic response of bulk heterojunction solar cells based on P3HT:PC70BM blend," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, c. 2, sayı 7, ss. 1743-1751, 2014.

- [28] C. Jiang, R. R. Lunt, P. M. Duxbury, P. P. Zhang, "High-performance inverted solar cells with a controlled ZnO buffer layer," *RSC Adv.*, c. 4, ss. 3604-3610, 2014.
- [29] M.-F. Xu, L.-S. Cui, X.-Z. Zhu, C.-H. Gao, X.-B. Shi, Z.-M. Jin, Z.-K. Wang, L.-S. Liao, "Aqueous solution-processed MoO₃ as an effective interfacial layer in polymer/fullerene based organic solar cells," *Org. Electronics*, c. 14, sayı 2, ss. 657-664, 2013.
- [30] T. Xiao, W. Cui, M. Cai, W. Leung, J. W. Andereg, J. Shinar, R. Shinar, "Inverted polymer solar cells with a solution-processed cesium halide interlayer," *Org. Electronics*, c. 14, sayı 1, pp. 267-272, 2013.
- [31] H. Pan, L. Zuo, W. Fu, C. Fan, B. Andreasen, X. Jiang, K. Norrman, F. C. Krebs, H. Chen, "MoO₃-Au composite interfacial layer for high efficiency and air-stable organic solar cells," *Org. Electronics*, c. 14, sayı 3, ss. 797-803, 2013.
- [32] R. Betancur, A. Martínez-Otero, X. Elias, P. Romero-Gomez, S. Colodrero, H. Miguez, J. Martorell, "Optical interference for the matching of the external and internal quantum efficiencies in organic photovoltaic cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 104, ss. 87-91, 2012.
- [33] M. A. Ibrahim, H.-Y. Wei, M.-H. Tsai, K.-C. Ho, J.-J. Shyue, C. W. Chu, "Solution-processed zinc oxide nanoparticles as interlayer materials for inverted organic solar cells," *Solar Energy Materials Solar Cells*, vol. 108, ss. 156-163, 2013.
- [34] Z. Hu, J. Zhang, Y. Zhu, "Inverted polymer solar cells with a borondoped zinc oxide layer deposited by metal organic chemical vapor deposition," *Solar Energy Materials Solar Cells*, c. 117, ss. 610-616, 2013.
- [35] A. A. Y. Guilbert, J. M. Frost, T. Agostinelli, E. Pires, S. Lilliu, J. E. Macdonald, J. Nelson, "Influence of bridging atom and side chains on the structure and crystallinity of cyclopentadithiophenebenzothiadiazole polymers," *Chem. Mater.*, c. 26, sayı 2, ss. 1226-1233, 2014.
- [36] N. K. Elumalai, C. Vijila, R. Jose, K. Z. Ming, A. Saha, S. Ramakrishna, "Simultaneous improvements in power conversion efficiency and operational stability of polymer solar cells by interfacial engineering," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, c. 15, ss. 19057-19064, 2013.
- [37] N. K. Elumalai, A. Saha, C. Vijila, R. Jose, Z. Jie, S. Ramakrishna, "Enhancing the stability of polymer solar cells by improving the conductivity of the nanostructured MoO₃ hole-transport layer," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, c. 15, ss. 6831-6841, 2013.
- [38] S. Bertho, B. Campo, F. Piersimoni, D. Spoltore, J. D'Haen, L. Lutsen, W. Maes, D. Vanderzande, J. Manca, "Improved thermal stability of bulk heterojunctions based on side-chain functionalized poly(3-alkylthiophene) copolymers and PCBM," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 110, ss. 69-76, 2013.
- [39] S. Zheng, X. Deng, K. Y. Wong, "Enhancement of the power conversion efficiency of P3HT: PCBM based solar cells by an interfacial effect between P3HT and PEDOT," *Synthetic Met.*, c. 162, sayı 17-18, ss. 1490-1495, 2012.
- [40] S. M. Yoon, S. J. Lou, S. Loser, J. Smith, L. X. Chen, A. Facchetti, T. J. Marks, "Fluorinated copper phthalocyanine nanowires for enhancing interfacial electron transport in organic solar cells," *Nano Lett.*, c. 12, sayı 12, ss. 6315-6321, 2012.

- [41] Z.-Q. Xu, J.-P. Yang, F.-Z. Sun, S.-T. Lee, Y.-Q. Li, J.-X. Tang, "Efficient inverted polymer solar cells incorporating doped organic electron transporting layer," *Org. Electronics*, c. 13, sayı 4, ss. 697-704, 2012.
- [42] K. H. Wong, K. Ananthanarayanan, J. Luther, P. Balaya, "Origin of hole selectivity and the role of defects in low-temperature solutionprocessed molybdenum oxide interfacial layer for organic solar cells," *J. Phys. Chem. C.*, c. 116, sayı 31, ss. 16346-16351, 2012.
- [43] L. N. S. A. Thummalakunta, C. H. Yong, K. Ananthanarayanan, J. Luther, "P3HT based solution-processed pseudo bi-layer organic solar cell with enhanced performance," *Org. Electronics*, c. 13, sayı 10, ss. 2008-2016, 2012.
- [44] S. P. Singh, C. H. P. Kumar, G. D. Sharma, R. Kurchania, M. S. Roy, "Synthesis of a modified PC70BM and its application as an electron acceptor with poly(3-hexylthiophene) as an electron donor for efficient bulk heterojunction solar cells," *Adv. Funct. Mater.*, c. 22, sayı 19, ss. 4087-4095, 2012.
- [45] S. Murase, Y. Yang, "Solution processed MoO₃ interfacial layer for organic photovoltaics prepared by a facile synthesis method," *Adv. Mater.*, c. 24, sayı 18, ss. 2459-2462, 2012.
- [46] T. Wang, A. J. Pearson, D. G. Lidzey, R. A. L. Jones, "Evolution of structure, optoelectronic properties, and device performance of polythiophene:fullerene solar cells during thermal annealing," *Adv. Funct. Mater.*, c. 21, sayı 8, ss. 1383-1390, 2011.
- [47] B. Burkhart, P. P. Khlyabich, T. Cakir Canak, T. W. LaJoie, B. C. Thompson, "Semi-random multichromophoric rr-P3HT analogues for solar photon harvesting," *Macromolecules*, c. 44, sayı 6, ss. 1242-1246, 2011.
- [48] D. Chen, A. Nakahara, D. Wei, D. Nordlund, T. P. Russell, "P3HT/ PCBM bulk heterojunction organic photovoltaics: correlating efficiency and morphology," *Nano Lett.*, c. 11, sayı 2, ss. 561-567, 2011.
- [49] M. Dante, J. Peet, T.-Q. Nguyen, "Nanoscale charge transport and internal structure of bulk heterojunction conjugated polymer/ fullerene solar cells by scanning probe microscopy," *J. Phys. Chem. C.*, c. 112, sayı 18, ss. 7241-7249, 2008.
- [50] S. S. V. Bavel, E. Sourty, G. D. With, J. Loos, "Three-dimensional nanoscale organization of bulk heterojunction polymer solar cells," *Nano Letters*, c. 9, sayı 2, ss. 507-513, 2008.
- [51] J. K. Lee, N. E. Coates, S. Cho, N. S. Cho, D. Moses, G. C. Bazan, K. Lee, A. J. Heeger, "Efficacy of TiO_x optical spacer in bulk heterojunction solar cells processed with 1,8-octanedithiol," *Appl. Phys. Lett.*, c. 92, ss. 243308, 2008.
- [52] C. Waldauf, M. Morana, P. Denk, P. Schilinsky, K. Coakley, S. A. Choulis, C. J. Brabec, "Highly efficient inverted organic photovoltaics using solution based titanium oxide as electron selective contact," *Appl. Phys. Lett.*, c. 89, sayı 23, ss. 233517-233520, 2006.
- [53] Z. Q. Liang, Q. F. Zhang, O. Wiranwetchayan, J. T. Xi, Z. Yang, K. Park, C. D. Li, G. Z. Cao, "Effects of the morphology of a ZnO buffer layer on the photovoltaic performance of inverted polymer solar cells," *Adv. Funct. Mater.*, c. 22, ss. 2194-2201, 2012.

- [54] G. Cheng, W.-Y. Tong, K.-H. Low, C.-M. Che, "Thermal-annealingfree inverted polymer solar cells using ZnO/Cs₂CO₃ bilayer as electron-selective layer," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 103, ss. 164-170, 2012.
- [55] L. Chen, P. Wang, F. Li, S. Yu, Y. Chen, "Efficient bulk heterojunction polymer solar cells using PEDOT/PSS doped with solution-processed MoO₃ as anode buffer layer," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, c. 102, ss. 66-70, 2012.
- [56] G. Wang, T. Jiu, G. Tang, J. Li, P. Li, X. Song, F. Lu, J. Fang, "Interface modification of ZnO-based inverted PTB7:PC71BM organic solar cells by cesium stearate and simultaneous enhancement of device parameters," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, c. 2, sayı 5, ss. 1331-1337, 2014.
- [57] M. Ito, K. Palanisamy, A. Kumar, V. S. Murugesan, P.-K. Shin, N. Tsuda, J. Yamada, S. Ochiai, "Characterization of the organic thin film solar cells with active layers of PTB7/PC71BM prepared by using solvent mixtures with different additives," *Int. J. Photoenergy*, c. 54, sayı 1, ss. 181-187, 2015.
- [58] H. Zhou, Y. Zhang, J. Seifert, S. D. Collins, C. Luo, G. C. Bazan, T. Q. Nguyen, A. J. Heeger, "High-efficiency polymer solar cells enhanced by solvent treatment," *Adv. Mater.*, c. 25, sayı 11, ss. 1646-1652, 2013.
- [59] H. Liu, Z. Wu, J. Hu, Q. Song, B. Wu, H. Lam Tam, Q. Yang, Hong W. Choi, F. Zhu, "Efficient and ultraviolet durable inverted organic solar cells based on an aluminum-doped zinc oxide transparent cathode," *Appl. Phys. Lett.*, c. 103, sayı 4, ss. 043309-043314, 2013.
- [60] A. Foertig, J. Kniepert, M. Gluecker, T. Brenner, V. Dyakonov, D. Neher, C. Deibel, "Nongeminate and geminate recombination in PTB7:PCBM solar cells," *Adv. Funct. Mater.*, c. 24, sayı 9, ss.1306-1311, 2014.
- [61] B. A. Collins, Z. Li, J. R. Tumbleston, E. Gann, C. R. McNeill, H. Ade, "Absolute measurement of domain composition and nanoscale size distribution explains performance in PTB7:PC71BM solar cells," *Adv. Energy Mater.*, c. 3, sayı 1, ss. 65-74, 2013.
- [62] Z. He, C. Zhong, S. Su, M. Xu, H. Wu, Y. Cao, "Enhanced powerconversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure," *Nature Photonics*, c. 6, ss. 591-595, 2012.
- [63] The Official Web Site of Nobel Prize, Chemistry Nobel Prizes, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1996/ , 2013.
- [64] G.R. Strobl, (2007). *The Physics of Polymers Concepts for Understanding Their Structures and Behavior*, 3rd Edition, Springer Berlin Heidelberg, New York.
- [65] G. Pipeleers, B. Demeulenaere, J. Swevers, and L. Vandenberghe, "Extended LMI characterizations for stability and performance of linear systems," *Systems & Control Letters*, c. 58, sayı 7, ss. 510–518, 2009.
- [66] L. Kazmerski, (1980). *Introduction to Photovoltaics: Physics, Materials and Technology*, Photovoltaics Branch Solar Energy Research Institute Golden, Colorado.
- [67] J. You, L. Dou, Z. Hong, G. Li, ve Y. Yang, "Recent trends in polymer tandem solarcell research," *Progress in Polymer Science*, c. 38, sayı 12, ss. 1909-1928, 2013.

- [68] M. Brumbach, F. Veneman, M. Saneeha, T. Schulmeyer, A. Simmonds, W. Xia, P. Lee ve N.R. Armstrong, "Surface Compositions and Electrical and Electrochemical Properties of Freshly Deposited and Acid-Etched Indium Tin Oxide Electrodes," *Langmuir*, c. 23, ss. 11089-11099, 2007.
- [69] X. Lu, H. Hlaing, D. S.Germack, J. Peet, W. Ho Jo, D. Andrienko, K. Kremer ve B. M.Ocko, "Bilayer order in a polycarbazole-conjugated polymer," *Nature Communications*, ss.1-7, 2012.
- [70] S. Sariciftci, L. Smilowitz, A.J. Heeger ve F. Wudi, "Semiconducting polymers (as donor) and bulkminsterfullerene (as acceptor): Photoinduced electron transfer and heterojunction devices," *Applied Physics Letters*, c. 62, ss. 585-588, 1993.
- [71] H. Zhou, L. Yang ve W. You, "Rational design of High performance Conjugated Polymers for Organic Solar Cells," *Macromolecules*, c. 45, ss. 607-632, 2012.
- [72] N.S. Sariciftci, L. Smilowitz, A.J. Heeger ve F. Wudi, "Photoinduced Electron Transfer from a ConductingPolymer to Buckminsterfullerene," *Science*, c. 258, ss. 1474-1476, 1992.
- [73] A. Haugeneder, M. Neges, C. Kallinger, W. Spirk, U. Lemmer, J. Feldmann, U. Scherf, E. Harth, A. Gugel ve K. Mullen, "Exciton diffusion and dissociation in 43 conjugated polymer/fullerene blends and heterostructures," *Physical Review B*, c. 59, ss. 15346-15351, 1999.
- [74] K.A. Reinhardt, W. Kern, *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*, 2nd ed., New York USA: William Andrew Publishing, 2008.
- [75] E.H. Rhoderick, *Metal–Semiconductor Contacts*, Oxford University Press, Oxford, 1978. ss. 121–136.
- [76] C. Temirci, B. Bati, M. Saglam, A. Türüt, "High-barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodization process," *Applied Surface Science*, c.172, ss. 1–7, 2001.
- [77] M. Campos, L. O. C. Bulhoes, C. A. Lindino, "Gas-sensitive characteristics of metal/semiconductor polymer Schottky device," *Sensors and Actuators A: Physical*, c.87, sayı 1-2, ss. 67, 2000.
- [78] T.P. Nguyen, P. Le Rendu, P. Molinie, V.H. Tran, "Electrical characterization of phenylene-vinylene oligomer based diodes," *Synthetic Metals*, c. 85, sayı 1–3, ss. 1357-1358, 1997.
- [79] John Wiley & Sons, S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, second ed., New York, ss. 256, 1981.
- [80] F. Bogart Theodore, *Electronic devices and circui Jr*: Published by USA Merrill Publishing Company, ss. 40, 1986.
- [81] S. Chand, J. Kumar, "Current transport in Pd₂Si/n-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures," *Applied Physics A*, c. 63, sayı 2, ss. 171–178, 1996.
- [82] K. Shenai, R.W. Dutton, "Current transport mechanisms in atomically abrupt metal-semiconductor interfaces," *IEEE Transactions on Electron Devices*, c. 35, sayı 4 - 35, ss. 468, 1988.
- [83] A.S. Bhuiyan, A. Martinez, D. Esteve, "A new Richardson plot for non-ideal schottky diodes," *Thin Solid Films*, c. 161, ss. 93-100, 1988.

- [84] R. Hackam, P. Harrop, "Electrical properties of nickel-low-doped n-type gallium arsenide Schottky-barrier diodes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, c. 19, sayı 12, ss. 1231, 1972.
- [85] J.H. Werner, H. Guttler, "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts," *Journal of Applied Physics*, c. 69, ss.1522, 1991.
- [86] Zs.J. Horvath, " A New Approach to Temperature Dependent Ideality Factors in Schottky Contacts," *Materials Research Society*, c. 260, ss. 359, 1992.
- [87] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press. ISBN 978-1-86094-, 2003ch. 340-9, ss. 12.
- [88] Y.J. Noh, S. I. Na and S.S. Kim, "Inverted polymer solar cells including ZnO electron transport layer fabricated by facile spray pyrolysis," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 117, ss. 139-144, 2013.
- [89] X. Li, W.C.H. Choy, F. Xie, S. Zhang, J. Hou, " Low-temperature solution-processed hydrogen molybdenum and vanadium bronzes for an efficient hole-transport layer in organic electronics," *US National Library of Medicine National Institutes of Health*, c. 11, sayı 25(14), ss. 2051-2055, 2013.
- [90] X. Li, W.C.H. Choy, F. Xie, S. Zhang, J. Hou, "A Room-temperature solutionprocessed molybdenum oxide as a hole transport layer with Ag nanoparticles for highly efficient inverted organic solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, c.1, ss. 6614-6621, 2013.
- [91] I.D. Parker, "Carrier tunneling and device characterization in polymer light emitting diodes," *Journal of Applied Physics*, c. 75, ss. 1656-1667, 1994.
- [92] S. Gunes, H. Neugebauer ve N.S. Sariciftci, "Conjugated Polymer- Based Organic Solar Cells," *Chemical Reviews*, c. 107, ss. 1324-1338, 2007.
- [93] M.H., Yuen, *Electrical Installation Handbook, Electrical Devices*, ABB SACE, Bergamo, Italy, c. 2, 2004.
- [94] ASTM G173 - 03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : MERVE KURTAY
Doğum Tarihi ve Yeri :11.01.1990 / Bakırköy
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta :kurtaymerve.34@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Fizik	İstanbul Üniversitesi	2015
Pedagojik Formasyon	Eğitim	İstanbul Üniversitesi	2015
Lise	Sayısal	Mehmet Niyazi Altuğ Lisesi	2007

YAYINLAR

M. KURTAY, H.M. ŞAĞBAN, Ö. TÜZÜN ÖZMEN, K. GÖKŞEN, The Investigation Of Device Characteristics Of Ito/Pcdtbt:Pcbm/Ag Organic Solar Cells For Different Pcdtbt:Pcbm Percentage Mass Ratios, International Conference on Photovoltaic Science and Technologies, Ankara - Turkey 4-6 July 2018

K. GÖKŞEN, M. KURTAY, Ö. TÜZÜN ÖZMEN, M. ŞAĞBAN, O. KÖYSAL, PCDTBT:PCBM Tabanlı Organik Schottky Diyotlarının ve Heteroeklem Güneş Hücrelerinin Optoelektronik Karakterizasyonu, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Temmuz 2019