



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

**P3HT:PCBM TABANLI ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN KATMAN
KALINLIKLARINA BAĞLI İNCELENMESİ**

NAZAN ŞAĞAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. KADİR GÖKŞEN**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

P3HT:PCBM TABANLI ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN KATMAN
KALINLIKLARINA BAĞLI İNCELENMESİ

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

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ANUTGAN

Karabük Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 27/07/2020

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.

27 Temmuz 2020

Nazan ŞAĞAM



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana bilimsel çalışmalarda öncü olan, bilgisi ve tecrübesiyle daima ufkumu açarak beni akademik hayata hazırlayan, desteğini ve anlayışını hiçbir zaman esirgemeyen değerli bilim insanına, çok kıymetli danışmanım Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN' e en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bana çalışmak istediğim bilimsel alanda çalışma fırsatını sunan, tecrübelerini ve bilgisini esirgemeyen, desteğini daima hissettiğim değerli bölüm başkanımız Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL' a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Düzce Üniversitesi'nde yüksek lisansa başladığım günden itibaren desteklerini hiç esirgemeyen, motivasyonumu artırarak daha sağlam adımlar atmama yardımcı olan, çok kıymetli hocam, arkadaşım Dr. Gülnur ÖNSAL' a, tez çalışmam boyunca sıklıkla bilgisine danıştığım, benimle birlikte numunelere de gözü gibi bakan, ilgisi ve bilgisiyle daima yanımda olan değerli arkadaşım Arş. Gör. Gülsüm KOCAKÜLAH' a, üniversitenin ilk yılından itibaren daima yanımda olan, hem bilgisi hem de karakteriyle ufkumu açan canım arkadaşım Emine KARAGÖZ' e, bana olan inancı, özeni ve sonsuz desteği için çok kıymetli İbrahim Yağz BAYAZIT' a candan sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İlgilerini ve fedakarlıklarını esirgemeyerek konforlu bir çalışma ortamı sunan, tüm güçlüklerle rağmen hedeflerimden şaşmamam için bana sağduyu, cesaret ve güven aşılayan ve en önemlisi sevgi dolu ve mutlu bir ailede yetişmemi sağlayan biricik annem Hatice ŞAĞAM, babam Özhan ŞAĞAM, kardeşlerim Nazlı, Özkan ve Atakan' a sevgi, minnet ve teşekkürlerimle.. İyi ki varsınız.

27 Temmuz 2020

Nazan ŞAĞAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
SİMGELER	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK YAKLAŞIM.....	4
2.1. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR.....	4
2.1.1. Schottky Diyot (Kontak).....	4
2.1.1.1. Enerji-Band Diyagramı.....	5
2.1.1.2. Deplasyon Bölgesi Genişliği.....	10
2.1.1.3. Schottky Etkisi (Schottky Olayı).....	10
2.1.1.4. Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	13
2.1.1.5. Bir Schottky Diyotun Bir PN Eklemi ile Karşılaştırılması	18
2.1.2. Omik Kontak	19
2.2. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ	20
2.2.1. Güneş Hücrelerine Genel Bakış.....	20
2.2.1.1. İnorganik Güneş Hücreleri	21
2.2.1.2. Organik Güneş Hücreleri.....	22
2.2.2. Organik Güneş Hücresi Çeşitleri.....	26
2.2.2.1. Tek Katmanlı Organik Güneş Hücreleri	26
2.2.2.2. İki Katmanlı Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri	26
2.2.2.3. Hacim Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri.....	27
2.2.2.4. Çok Eklemli Organik Güneş Hücresi Yaklaşımı	29
2.2.3. Organik Güneş Hücrelerinin Karakteristiği	31
2.2.3.1. Karakterizasyonda Kullanılan Terimler	31
2.2.3.2. Çalışma Prensipleri	34
2.2.3.3. Eşdeğer Devre.....	35
2.3. KONJUGE POLİMERLER	38
2.3.1. İletken Polimerlerin Yapısı	39
2.3.2. Kullanılan Malzemeler	40
2.3.2.1. PEDOT:PSS.....	40
2.3.2.2. P3HT:PCBM.....	42
2.3.3. Katılarda Enerji Bantları ve Yapılarının Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi.....	43
2.3.3.1. Optik Geçirgenlik Spektroskopisi.....	48
3. MATERYAL VE METODLAR	62
3.1. ÜRETİM SÜRECİ	62
3.1.1. Organik İnce Film Üretimi.....	62
3.1.1.1. Hazırlık Aşaması	62
3.1.1.2. Spin Kaplama Aşaması	62
3.1.2. Organik Güneş Hücrelerinin Üretimi	62
3.1.2.1. Hazırlık Aşaması	62
3.1.2.2. Spin Kaplama Aşaması	63

3.1.2.3. <i>Termal Kaplama Aşaması</i>	66
3.2. KARAKTERİZASYON SÜRECİ	68
3.2.1. Güneş Hücrelerinin Elektriksel Karakterizasyonu	68
3.2.2. İnce Filmlerin Optik Karakterizasyonu.....	69
3.2.3. Güneş Hücrelerinin Optoelektronik Karakterizasyonu	69
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	71
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
6. KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	97



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Metal ve yarıiletkende kontak haline getirilmeden önceki enerji bandları [50].	5
Şekil 2.2. Metal ile n-tipi yarıiletkenden oluşan Schottky kontağın denge durumundaki enerji band diyagramı [50], [55].	7
Şekil 2.3. a) Düz beslem durumunda metal-yarıiletken kontakta enerji-bant diyagramı.	9
Şekil 2.4. Bir metaldeki görüntü(imaj) yükü.	11
Şekil 2.5. Potansiyel engelinin azalması.	12
Şekil 2.6. Düz beslem geriliminde beş temel akım iletim mekanizması:	14
Şekil 2.7. Arayüzey hallerinin var olması durumunda metal-yarıiletken kontaktaki enerji bandları: a) Metal ile yarıiletken kontak hale gelmeden önceki enerji bandları, b) Metal ile yarıiletken kontak haline getirildikten sonraki enerji bandları.	17
Şekil 2.8. Bir omik kontağın enerji bantları.	20
Şekil 2.9. Polimer ve C60 (buckminsterfulleren) arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi.	23
Şekil 2.10. Organik güneş hücrelerinde rekombinasyon ve jenerasyon ile akım oluşma süreci [83].	25
Şekil 2.11. Tek katmanlı organik güneş hücresi devre şeması.	26
Şekil 2.12. Verici ve alıcının enerji seviyeleri.	27
Şekil 2.13. Hacim heteroeklem yapıya sahip güneş hücresinin yapısı [84].	28
Şekil 2.14. Hacim heteroekleminin yapısının şematik gösterimi [85].	29
Şekil 2.15. Çok eklemli hücrelerin a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması b) Monolitik (series constrained) uygulaması.	30
Şekil 2.16. İki eklemli monolitik pillerde 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) Pilin J-V karakteristiği.	30
Şekil 2.17. Fotovoltaik aygıt ve diyot için I-V grafiği.	31
Şekil 2.18. Fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlık ortamdaki karakteristiği.	33
Şekil 2.19. Hava kütlelerinin bazı değerleri.	34
Şekil 2.20. Metal-organik yarıiletken-metal tabakalı sistemlerin farklı koşullarda çalışma prensipleri a) Kısa devre durumu b) Açık devre durumu c) Ters beslem gerilim durumu d) Düz beslem gerilim durumu (ITO: yüksek iş fonksiyonlu elektrot, Al: düşük iş fonksiyonlu elektrot).	35
Şekil 2.21. Organik hücresinin eşdeğer devresi.	36
Şekil 2.22. Literatürde sık rastlanan konjuge polimerler.	39
Şekil 2.23. Poliasetilenin konjugasyonu.	39
Şekil 2.24. PEDOT:PSS' in molekül yapısı.	41
Şekil 2.25. P3HT'nin kimyasal yapısı.	42
Şekil 2.26. PCBM' in kimyasal yapısı.	42
Şekil 2.27. Katı yapıların enerji bandı şeması.	44
Şekil 2.28. Yarıiletkende a) Direkt, b) İndirekt band geçişi.	45
Şekil 2.29. Bir boyutlu kristalde potansiyelin periyodikliği.	47
Şekil 2.30. Kronig-Penney modelinin bir boyutta periyodik potansiyeli.	48
Şekil 2.31. Elektrik alan E, manyetik alan H ve dalga boyu λ bileşenleri ile bir elektromanyetik dalganın gösterimi.	49

Şekil 2.32. Elektromanyetik spektrum.....	49
Şekil 2.33. a) Düzlem dalgalar ve dalga cepheleri, b) Küresel dalgalar ve dalga cepheleri.	52
Şekil 2.34. Elektromanyetik dalganın bileşenleri.	53
Şekil 2.35. Madde üzerine dik gelen elektromanyetik dalgalar ile yansıyan ve geçen elektromanyetik dalgalar.	54
Şekil2.36. a) İletken, b) Yalıtkan içerisinde net yük yoğunluğu ve serbest yük şeması.	56
Şekil 3.1. PEDOT:PSS kaplamasından önce yapılan maskeleme.	63
Şekil3.2. Spin kaplama süreci a) Dönen zemin, b) Kaplanacak yüzey, c) Kaplanacak çözelti.	64
Şekil 3.3. SCS marka G3P8 model Spin Coater cihazı.	64
Şekil 3.4. PEDOT:PSS kaplı numunelerin tavlama süreci.	65
Şekil 3.5. Numunelerin P3HT:PCBM kaplamasının ardından aldıkları görüntü.	66
Şekil 3.6. Nanovak NVBJ-300TH termal kaplama cihazı.....	66
Şekil 3.7. Termal kaplama öncesi numunelerin maskelenmesi.	67
Şekil 3.8. ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM/Al güneş pillerinin yapısının şematik gösterimi.	68
Şekil 3.9. ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM/Al aygıtın son hali.	68
Şekil 3.10. Keithley 2400 ölçüm sistemi.	69
Şekil 3.11. PG Instruments T70+UV/VIS model Spektrofotometre cihazı.....	69
Şekil 3.12. FY 7000 güneş simülatörü.....	70
Şekil 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin I-V karakteristikleri.....	71
Şekil 4.2. Diyot idealite faktörü değerlerinin P3HT:PCBM aktif tabaka kalınlığına bağlılığı.....	73
Şekil 4.3. Üretilen hücrelerin geçirgenlik spektrumlarının aktif tabaka kalınlığına bağlılığı.....	74
Şekil 4.4. Soğurma katsayısının üretilen tüm güneş hücreleri için gelen foton enerjisine bağlılığı.	75
Şekil4.5. Üretilen tüm güneş hücrelerinin aktif bölgesinin optik bant aralığı enerjisini ortaya çıkarmak için çizilen grafik.	76
Şekil 4.6. 140 nm kalınlığında P3HT: PCBM tabakasına sahip güneş hücresinin J-V karakteristiği.....	77
Şekil 4.7. 140 nm kalınlığında P3HT: PCBM tabakasına sahip güneş hücresinin P_{maks} eğrisi.	78
Şekil 4.8. a) 70, 110 ve 140nm, b) 140, 175 ve 190nm kalınlığında P3HT:PCBM katmanlarına sahip güneş pillerinin J-V karakteristiği.....	80
Şekil 4.9. Üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için idealite faktörlerinin ve dolgu faktörlerinin davranışları.	82
Şekil 4.10. Farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin verim değerleri.	83
Şekil 4.11. 100nm Al ve 50nm Al contağa sahip güneş hücrelerine ait J-V karakteristik eğrileri.	84

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Literatür özeti.	1
Çizelge 2.1. Farklı kontak türleri ve oluşum şartları.	4
Çizelge 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için karakteristik parametreleri.	81
Çizelge 4.2. Literatürde yakın zamanda üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin karakteristik parametreleri (Termal buharlaşma ve magnetron püskürtme yöntemleri TE ve MS kısaltmaları ile gösterildi.). ..	86

KISALTMALAR

AM	Hava kütlesi
CdS	Kadmiyumsülfür
CdTe	Kadmiyumtellür
CH_4	Metan
CuO	Bakıroksit
CuPc	Bakırftalosiyanın
GaAs	Galyumarsenik
HOMO	Highest occupied molecular orbital
Hz	Hertz
$I_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akım
$I_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akım
I-V	Akım-Gerilim
ITO	İndiyum kalay oksit
J-V	Akım yoğunluğu-Gerilim
kW	Kilowatt
LUMO	Lowest unoccupied molecular orbital
MW	Megawatt
mA	Miliamper
mV	Milivolt
P3HT	Poly(3-hexylthiophene)
PCBM	Phenyl-C61-butyric acid methyl ester
PEDOT	Poli(3,4-etilendioksitiyofen)
PSS	Poli polistiren sülfonat
ZnO	Çinko oksit

SİMGELER

α	Soğurma Katsayısı
Al	Alüminyum
Au	Altın
B	Bor
$\vec{B}, \mathbf{B}$	Manyetik Alan
c	Işık Hızı
C	Deplasyon Sığıması
$^{\circ}\text{C}$	Celsius Derece
d	Kalınlık
D	Deri Kalınlığı
$\vec{E}, \mathbf{E}$	Elektrik Alan
e	Elektron Yüğü
ε	Elektriksel Geçirgenlik
E	Toplam Enerji
E_C	İletkenlik Bandı Enerji Seviyesi
E_D	Verici Enerji Seviyesi
E_g	Yasak Bant Enerji Seviyesi
E_V	Valans (Değerlik) Bandı Enerji Seviyesi
eV	Elektronvolt
h	Planck Sabiti
I_0	Doyma Akımı
I_d	Diyot Akımı
I_L	Fotoakım
I_{SC}	Kısa Devre Akımı
I_{SH}	Kaçak Akım
I_{mpp}	Maksimum Akım Güç Noktası
J_{max}	Maksimum Akım Yoğunluğu
k	Dalga Yayılma Vektörü
k_B	Boltzman Sabiti
Li	Lityum
μ	Manyetik Geçirgenlik
n	Kırılma İndisi
N	Azot
N_o	Etkin Durum Yoğunluğu
N_{cs}	Modül Sayısı
nm	Nanometre
η	Diyot İdealite Faktörü
P_{mpp}	Maksimum Güç Çıkışı
R_s	Seri Direnç
R_{SH}	Paralel Direnç
Si	Silisyum
T	Sıcaklık
V_{max}	Maksimum Gerilim
V_{oc}	Açık Devre Voltajı
V_{mpp}	Maksimum Gerilim Güç Noktası
W	Watt
λ	Dalga Boyu

ν	Frekans
ψ	Dalga Fonksiyonu
σ	Öziletkenlik
ρ	Yük Yoğunluğu
ω	Açısal Frekans
ϕ	Faz Farkı
Φ	İş Fonksiyonu



ÖZET

P3HT:PCBM TABANLI ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİNİN OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN KATMAN KALINLIKLARINA BAĞLI İNCELENMESİ

Nazan ŞAĞAM

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN

Temmuz 2020, 96 sayfa

Bu çalışmada ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş hücrelerinin (OSC) üretimi ve optoelektronik karakterizasyon süreci üzerine yapılan araştırmanın sonuçlarını sunmaktadır. OSC' ler, 70, 110, 140, 175 ve 190 nm P3HT:PCBM aktif tabaka kalınlıklarına sahip olacak şekilde açık hava ortamında üretildi. Güneş hücrelerinin diyot özellikleri karanlıkta yapılan akım-gerilim (I-V) ölçümleri kullanılarak incelendi. Ölçümlerin sonuçları kullanılarak tüm hücreler için diyot idealite faktörleri sırasıyla 3,96; 3,89; 3,43; 3,31 ve 3,29 olarak hesaplandı. Soğurma karakteristikleri optik geçirgenlik spektroskopisi kullanılarak incelenmiş ve her numune için yasak enerji band aralığı (E_g) sırasıyla 1,71; 1,71; 1,70; 1,69 ve 1,67 eV olarak hesaplandı. Her bir güneş hücresi için hücre parametreleri, AM 1,5 güneş radyasyonu altında akım yoğunluğu-voltaj (J-V) ölçümleri kullanılarak incelendi ve buradan elde edilen veriler kullanılarak açık devre gerilimi (V_{OC}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), maksimum hücre gücü (P_{maks}), dolum faktörü (FF) ve GDV gibi önemli güneş hücresi parametreleri hesaplandı. Hesaplamalar sonucu, hücrelerin %GDV değerlerinin sırasıyla 0,39; 0,53; 0,59; 0,54 ve 0,51 olduğu görüldü. Bunun yanı sıra, güneş hücrelerinin FF değerinin 0,3239 ile 0,3409 arasında n düşükçe arttığı gözlemlendi. GDV' nin en yüksek değerinin 140 nm P3HT:PCBM kalınlığına sahip hücreye ait olan 0,59 olduğu bulunmuştur.

Anahtar sözcükler: Güneş hücresi, P3HT, PCBM, Elektriksel karakterizasyon, Optik karakterizasyon.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF DEPENDENCE OF OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF P3HT:PCBM BASED ORGANIC SOLAR CELLS ON LAYER THICKNESSES

Nazan ŞAĞAM

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kadir GÖKŞEN

July 2020, 96 pages

This paper presents the production and results of optoelectronic characterization process for ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organic solar cells (OSC). OSCs were produced in open air environment with various P3HT:PCBM active layer thicknesses of 70, 110, 140, 175 and 190 nm. The diode properties of the solar cells in the dark have been investigated by using current-voltage (I-V) measurements. Using the results of the measurements, diode ideality factors for all cells were calculated to be 3.96, 3.89, 3.43, 3.31 and 3.29, respectively. The absorption characteristics have been investigated by using transmission spectroscopy, and optical band gap energy (E_g) for each sample has been calculated to be 1.71; 1.71; 1.70; 1.69 and 1.67 eV, respectively. The cell parameters for each solar cell were analyzed by using current density-voltage (J-V) measurements under AM 1.5 solar radiation. Some important solar cell parameters such as open circuit voltage (V_{OC}), short circuit current density (J_{SC}), maximum cell power (P_{maks}), fill factor (FF) and power conversion efficiency (PCE) were calculated by using the data obtained from the measurements. As a result of the calculations, % PCE values of the cells were found to be 0.39; 0.53; 0.59; 0.54 and 0.51, respectively. It was observed that fill factor (FF) value of the solar cells increase between 0.3239 and 0.3409 with decreasing n value. The highest value of PCE was found to be 0.59, which belongs to the cell having 140 nm P3HT:PCBM thickness.

Keywords: Solar cell, P3HT, PCBM, Electrical characterization, Optical characterization.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, çözelti ile işlenebilen organik yarı iletkenlerin optoelektronik uygulamaları, düşük imalat maliyetleri, esneklikleri ve kolay ayarlanabilir optoelektronik özelliklerinden dolayı çok dikkat çekmiştir [1]–[5]. Bu uygulamalar arasında, kompozit polimer ve fulleren esaslı organik güneş hücreleri (OGH' ler) araştırmacılar tarafından özel bir ilgi görmüştür [6], [7].

Son on yılda, Poli (3-heksiltiyofen) (P3HT) ve fulleren [6,6], - fenil-C61-butirik asit metil ester (PCBM) karışımından oluşan bir aktif katmana sahip yığın heteroeklem (YHE) OGH' ler çeşitli araştırmalarla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [8]–[14]. Bu incelemeler yapılırken genellikle optik geçirgenlik spektroskopisi, optik mikroskopi, fotoluminesans spektroskopisi, X-ışını kırınımı, doğru akım (DC) ölçümleri ve alternatif akım (AC) empedans spektroskopisini içeren çeşitli teknikler kullanılmıştır [13], [15]–[22]. OGH' lerin güç dönüştürme verimleri (GDV) kontaklar ve hücreyi oluşturan tüm katmanların yapılarından etkilenmesine rağmen, temel olarak yük üretimi ve taşıma mekanizmaları üzerinde en önemli etkiye sahip olan YHE aktif katmanların yapısından etkilenir [23], [24].

YHE OGH' ler ilk keşiflerinden itibaren yüksek GDV' lerine sahip olabilmeleri amacı ile basitten karmaşığa birçok mimari türlerinde üretilmişlerdir. Basit mimar türlerinde kontaklara ek olarak sadece bir aktif katmanın hücre yapısında bulunması yeterli olurken, daha karmaşık mimari türlerinde, bir veya daha fazla aktif katmana ek olarak çeşitli deşik ve elektron transfer katmanlarının da hücre yapısında kullanıldığı görülmüştür. Bu çeşitli aygıt mimarisi türleri arasında, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al hücre yapısı, P3HT:PCBM tabanlı güneş hücreleri arasında en basit yapılardan birine sahiptir. Bu yapıda sadece tek bir aktif organik YHE katman kullanılırken, hücrenin özelliklerini geliştirmek ve GDV' sini artırmak amacıyla bir de PEDOT:PSS deşik transfer katmanı kullanılır. P3HT:PCBM tabanlı güneş hücreleri üzerine yapılan literatür incelemesinin bir özeti Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Literatür özeti.

Referans	Yıl	Cihazın Yapısı	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η
[25]	2020	ITO/ZnO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Al	0,73	14,0	0,57	%5,13
[26]	2019	FTO/TiO ₂ /P3HT:PCBM/MeOPhN-DBC/MoO ₃ /Al	0,63	12,44	47,0	%3,68
[27]	2019	ITO/ZnO&PEIE:RGO/P3HT:PCBM/MoO ₃ /Ag	0,61	9,82	63,9	%3,83
[28]	2018	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,57	11,62	0,58	%3,84
[29]	2018	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,59	10,7	0,58	%3,7
[30]	2014	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al	0,62	10,88	0,67	4,52
[31]	2014	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Au	0,57	10,99	0,58	%3,84
[32]	2013	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,57	11,62	0,58	%3,84
[33]	2012	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,60	4,61	0,21	%0,57
[34]	2011	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/ CrOx/Al	0,58	11,15	0,61	%3,90
[35]	2011	FTO/MoO ₃ /CuPc/P3HT:PCBM/Al	0,59	12,52	0,51	%3,76
[36]	2010	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al	0,61	11,10	0,58	%3,90
[37]	2010	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,63	7,45	0,48	%2,29
[38]	2010	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,59	7,70	0,58	%2,7
[39]	2009	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,60	11,09	0,63	%4,14
[40]	2009	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Au	0,69	8,00	0,65	%3,53
[41]	2007	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,61	7,92	0,68	%3,29
[42]	2006	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,61	8,35	0,55	%2,80
[43]	2005	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,61	10,60	0,67	%4,37
[44]	2005	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,61	10,63	0,62	%4,00
[45]	2005	ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al	0,63	9,50	0,68	%5,00

Literatürde bulunan çeşitli çalışmalar incelendiğinde ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al hücre yapısına sahip OGH'lerin GDV değerlerinin gerek aktif katman ve metal kontak kalınlıklarının değiştirilmesi ile, gerekse bu katmanların çeşitli süreler boyunca ve çeşitli sıcaklıklarda ısıtılmasına tabi tutulmasıyla %0,57 ile %5,00 arasında değiştiğinin ortaya koyulduğu görülmektedir [25]-[45]. Bu çalışmalar arasında üretim kolaylığı açısından en verimli olan hücrelerin, 10 dakikalık tavlama süresi ile 150°C tavlama

sıcaklığında tavlanan P3HT:PCBM aktif katmanına sahip OGH' ler olduğu görülmektedir. Bu hücrelerin sahip oldukları en yüksek GDV değerlerinin %3,84 olduğu bildirilmiştir [13]. Bunların yanı sıra, birdeşik transfer katmanına ek olarak bir elektron transfer katmanının da kullanıldığı hücrelerin daha yüksek GDV' lere sahip oldukları da görülmektedir [25]-[27]. Bunlara ek olarak, Al metal kontak yerine daha pahalı olan Au metal konta da kullanılarak yapılan denemelerde, Au kontakın GDV' ler üzerinde çok kayda değer bir etkisi olmadığı da gözlemlenmiştir [31], [40].

Yine literatür incelendiğinde, P3HT:PCBM OGH' lerinin genellikle ya vakum ortamında veya inert gaz ortamında kapalı bir sistemde üretildiği, kirliliğin önlenmesi amacıyla açık hava ortamında üretimin çok tercih edilmediği görülmektedir [31]-[33]. Buna ek olarak, P3HT:PCBM tabanlı OGH' leri karakterize etmek için çeşitli yöntemler kullanılmasına rağmen, karanlık ortamda ölçülen diyot karakteristiklerinin ve bu karakteristiklerin OGH karakteristikleri üzerine etkilerinin daha önceden yapılan çalışmalarda ayrıntılı olarak incelenmediği de görülmektedir.

Bu çalışmada, açık hava ortamında üretilen çeşitli P3HT:PCBM aktif tabaka kalınlıklarına sahip ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al OGH' ler üzerinde yapılan araştırmanın sonuçları incelenmiştir. Ayrıca, üretilen güneş hücrelerinin diyot karakteristikleri karanlık ortamda yapılan Akım-Gerilim (I - V) ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışma ile, nispeten daha az maliyetli olan açık hava koşullarında üretilen OGH' lerin GDV' lerinin, daha ideal olan vakum veya inert gaz ortamlarında üretilen hücreler ile karşılaştırılarak, literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır. Ayrıca, üretilen güneş hücrelerinin diyot karakteristikleri ile GDV' leri arasındaki ilişki de ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu amaçlarla yapılan ölçümlerin sonuçları kullanılarak en önemli diyot parametresi olarak kabul edilen idealite faktörü (n) hesaplanmıştır. Ayrıca, soğurma özellikleri geçirgenlik spektroskopisi kullanılarak incelenmiş ve her numune için yasak optik bant aralığı enerjisi (E_g) hesaplanmıştır. Son olarak, her bir güneş hücresi için güneş pili parametreleri, AM 1,5 güneş radyasyonu altında I - V ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), maksimum hücre gücü (P_{maks}), dolum faktörü (FF) ve GDV gibi önemli güneş hücresi parametreleri hesaplanmıştır. Hücrelerin optoelektronik özelliklerinin P3HT:PCBM aktif tabakasının kalınlığına bağımlılığı, ölçüm sonuçlarından elde edilen veriler ve hesaplamaların sonuçları üzerinde yapılan ayrıntılı analizlerle ortaya konulmuştur.

2. TEORİK YAKLAŞIM

2.1. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

Heteroeklem yapı, yasak enerji aralıkları birbirinden farklı olan iki tabaka veya kristal yapının atomik boyutta bir araya getirilmesiyle oluşan yapıdır. Metal-yarıiletken kontaklar da bu niteliktedir. Metal ile yarıiletkenin bir araya getirilmesiyle iki tip kontak oluşması mümkündür. Bu iki kontak, doğrultucu kontak ile omik kontak olarak isimlendirilmektedir [46]–[50]. Bu kontakların farklılıklarını belirleyen etmenler; kullanılan yarıiletkenin katkılanma tipi (n-tipi veya p-tipi) ve yapıyı oluşturan metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu “ Φ_s ” ve metalin iş fonksiyonu “ Φ_M ” olmak üzere heteroeklem yapıda doğrultucu kontak elde edilmesi için kullanılacak yarıiletkenin n-tipi veya p-tipi olmasına göre farklı iş fonksiyon değerleri seçilmelidir. n-tipi yarıiletken kullanıldığında $\Phi_M > \Phi_s$ şeklinde iş fonksiyonu seçilirken p-tipi yarıiletken kullanıldığında $\Phi_M < \Phi_s$ olmalıdır. Benzer şekilde bir omik kontak elde etmek için iş fonksiyon değerleri n-tipi yarıiletkende $\Phi_M < \Phi_s$, p-tipi yarıiletken tercih edildiğinde ise $\Phi_M > \Phi_s$ şeklinde olacaktır [50]. Bahsedilen özellik ve şartlar Çizelge 2.1’ de daha sistematik olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı kontak türleri ve oluşum şartları.

Kontak	Yarıiletken	İş Fonksiyonları
<i>Doğrultucu</i>	<i>n-tipi</i>	$\Phi_M > \Phi_s$
<i>Doğrultucu</i>	<i>p-tipi</i>	$\Phi_M < \Phi_s$
<i>Omik</i>	<i>n-tipi</i>	$\Phi_M < \Phi_s$
<i>Omik</i>	<i>p-tipi</i>	$\Phi_M > \Phi_s$

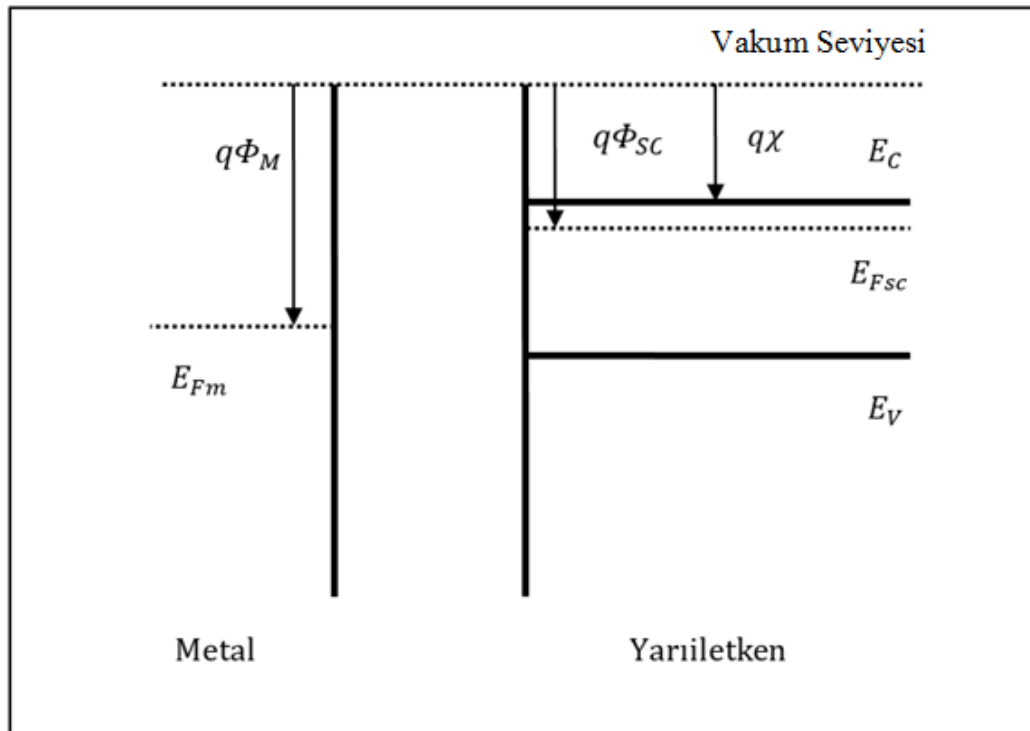
2.1.1. Schottky Diyot (Kontak)

Doğrusal olmayan doğrultucu akım-gerilim karakteristiğine sahip kontak türüdür. Bu doğrultucu özelliklerinden dolayı pn eklemle benzerlik göstermektedir. Kontakın doğrultucu özelliği 1874 yılında Ferdinand Braun tarafından keşfedildi ve açıklamaları Walter Hans Schottky ve Nevill Francis Mott tarafından 1938 yılında yapılabildi [50],

[51], [52].

2.1.1.1. Enerji-Band Diyagramı

Schottky diyotlarında gerçekleşen fiziksel olayı incelemek için bir metal ile bir n-tipi yarıiletken birbirine temas ettirilerek kontak haline getirildiğini düşünebiliriz. Metal ile n-tipi yarıiletken kontak haline getirildiğinde, ayrı ayrı enerji-band diyagramları Şekil 2.1’ deki gibi olmaktadır. Albert Einstein’ a 1921 yılında Nobel ödülünü getiren fotoelektrik olay açıklamasından bildiğimiz gibi, uygun dalga boyuna sahip bir ışık vakum ortamında bir metal üzerine düşürüldüğünde metal yüzeyinden elektron koparmaktadır [53]. Fotonların elektronları kopararak vakum ortamına itmesi ile fotoelektrik olayın gerçekleşmesi için gelen ışığın enerjisinin belirli bir enerji değerinden daha büyük olması gerekmektedir. Fotonun enerjisi ($E = h\nu$) en az metalin iş fonksiyonuna ($q\Phi_m$) eşit olmalıdır ki bu da elektronun serbestlik kazanması için yeterlidir. Bu nedenle iş fonksiyonu, E_{Fm} (metal Fermi seviyesi) enerjisine sahip bir elektronu metalden koparmak için elektrona verilmesi gereken asgari enerji olarak tanımlanabilir. Yarıiletkenlerde, elektronu yerleştiği E_{Fsc} Fermi seviyesinden koparmak için gerekli olan enerji de yarıiletkenin iş fonksiyonu şeklinde tanımlanır [54].

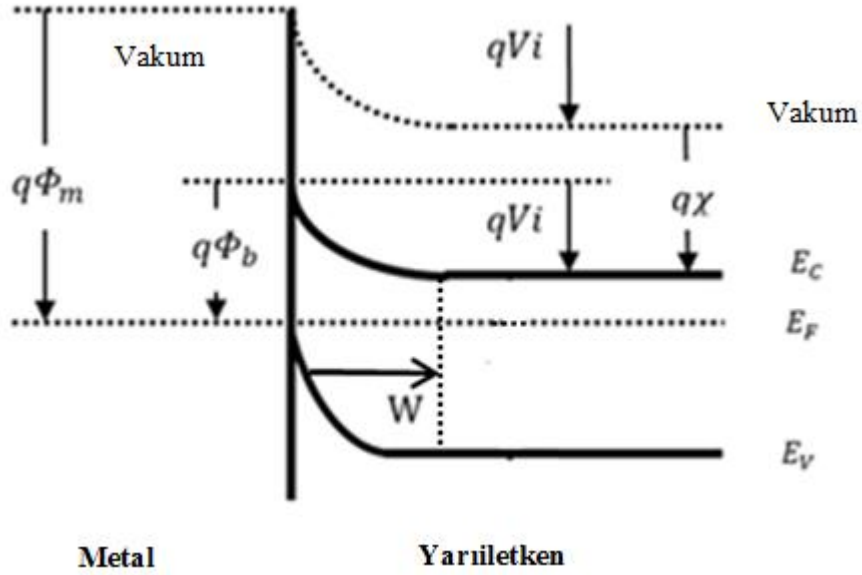


Şekil 2.1. Metal ve yarıiletkende kontak haline getirilmeden önceki enerji bandları [50].

Bir yarıiletkende elektronların bir kısmı yarıiletkenin Fermi seviyesi E_{Fsc} ' den daha fazla enerjiye sahiptir. Dolayısıyla bu elektronlar iletkenlik bandında bulunur ve enerjileri yaklaşık olarak iletim bandının enerji seviyesi E_c ' ye eşittir. Bir elektronu iletkenlik bandından vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji ise elektron ilgisi olarak isimlendirilir ve $q\chi$ şeklinde sembolize edilir.

Metal-yarıiletken kontak oluşturulduğunda metal ile yarıiletkenin arayüzeylerinde yük dengesini sağlamak üzere ayrışmalar meydana gelir. Bir süre sonra bu arayüzeyde hareketli yük kalmaz ve bu ayrışmanın sonucu olarak yüksek dirençli bir bölge yani bir potansiyel bariyer ortaya çıkar. Schottky-Mott teorisi, oluşan bu potansiyel bariyerin, kontak için kullanılan metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ifade eder.

Metal ile n-tipi bir yarıiletken kontak haline getirildiğinde yarıiletkenin iletkenlik bandındaki yüksek enerjili elektronlar metale doğru hareket etmeye başlar. Bu yük geçişi metal ve yarıiletkenin Fermi enerji düzeyleri eşitleninceye kadar devam eder ve termodinamik denge hali oluşur. Yarıiletkenin iletkenlik ve valans bandları Şekil 2.2' de görüldüğü gibi bükülmeye başlar ve sonrasında yarıiletkenin kontak bölgesindeki yük taşıyıcılarında (n-tipi yarıiletken ele alındığından çoğunluk yük taşıyıcısı elektrondur) azalma meydana gelir. Yarıiletkenin bu bölgesinde metale doğru gerçekleşen elektron hareketinden dolayı yarıiletkende pozitif yüklü safsızlık atomları kalır ve bu pozitif yükler metal ile yarıiletken arayüzeyinin yarıiletken yüzeyine yakın bölgesinde W genişliğine sahip yük bölgesi oluşturur. Bu bölge deplasyon bölgesi (boşaltılmış bölge) olarak isimlendirilmektedir. Yarıiletkenden metale geçmiş olan elektronlar da metalde, metal-yarıiletken arayüzeyinde deplasyon bölgesindeki yük miktarına eşit büyüklükte bir yük birikintisi oluşturur böylelikle negatif yüklü bir tabaka meydana gelmiş olur. Pratiklik bakımından bu tabaka sonsuz derece ince kabul edilebilir. Sonuç olarak yarıiletkenden metale doğru bir elektriksel alan ortaya çıkar.



Şekil 2.2. Metal ile n-tipi yarıiletken den oluşun Schottky kontağın denge durumundaki enerji band diyagramı [50], [55].

Termal denge durumu sağlandığında vakum bölgesinde süreklilik sağlanmış olur. Fermi seviyelerinin eşitlenmesi ve deplasyon bölgesinin varlığından dolayı yarıiletkenin iletim ve valans bandındaki bükülme qV_i , yarıiletken ile metalin iş fonksiyonları farkına eşit olacaktır bu denklik aşağıdaki gibi ifade edilir.

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

Buradaki V_i , yarıiletkenden metale geçen elektronların maruz kaldığı potansiyel bariyeridir. Metaldeki elektronlar ise bir Φ_b potansiyel bariyerine maruz kalırlar ve bu potansiyel bariyeri aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$q\Phi_b = q(\Phi_m - \chi) = qV_i + (E_c - E_F) \quad (2.2)$$

Bu potansiyel bariyerleri oda sıcaklığında termal enerji kT/q dan daha çok daha büyük olduğundan, oldukça az sayıda elektron bu engelleri aşabilecek enerjiye sahiptir. Yarıiletkendeki bariyeri aşarak metale doğru akım gerçekleştiren elektronlara zıt yönde bir pozitif akım meydana gelir. Sonuç olarak oluşun akım $I_{m \rightarrow sc}$ şeklinde ifade edilir.

Termodinamik dengede, dışarıdan bir gerilim uygulanmaması kaydıyla, yarıiletkenden metale doğru elektron geçişinden kaynaklanan $I_{m \rightarrow sc}$ akımı metalden yarıiletkene elektron geçişiyile oluşun akım $I_{sc \rightarrow m}$ ile dengededir. Dolayısıyla denge durumunda

birbirine zıt yönde fakat eşit şiddette negatif yük geçişi olur ve bu durum aşağıdaki gibi matematiksel olarak ifade edilebilir [56].

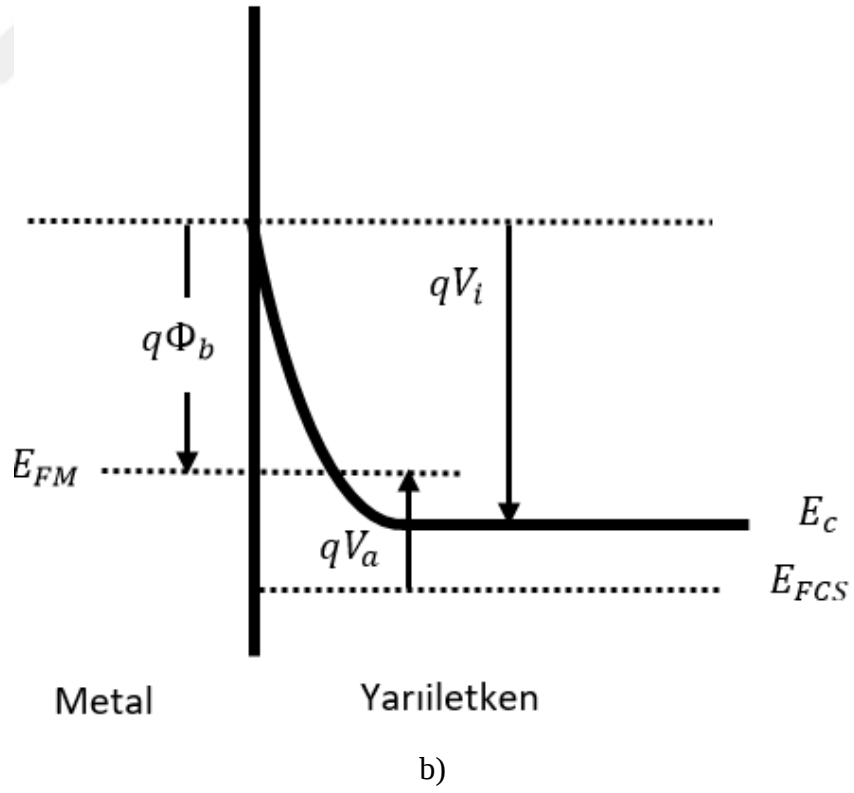
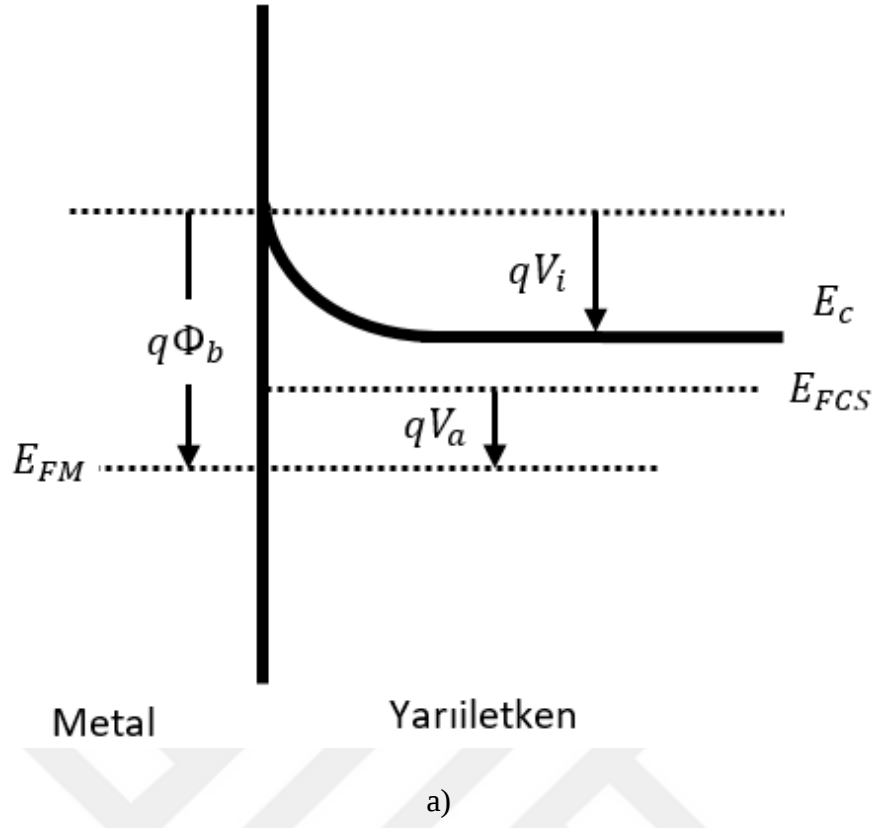
$$-I_{m \rightarrow sc} = I_{sc \rightarrow m} \quad (2.3)$$

Metal ve n-tipi yarıiletken kullanılarak oluşturulan yapıya gerilim uygulandığında, uygulama şekline bağlı olarak enerji band diyagramında, potansiyel bariyerinde ve yük geçişlerinde değişiklikler olur. $V_a > 0$ potansiyel farkı, metal-yarıiletken kontağın metal tarafına + yarıiletken tarafına – potansiyel gelecek şekilde uygulandığında bir düz beslem gerilimi sağlanmış olurken metal tarafa – yarıiletken tarafa + potansiyel gelecek şekilde potansiyel fark uygulandığında ters beslem gerilimi sağlanmış olur.

Kontağa düz beslem gerilimi uygulandığında bu gerilim kontağın ara yüzeyindeki elektrik alanın tersi bir etki oluşturur böylelikle yarıiletken tarafındaki potansiyel bariyeri V_i , azalarak $V_i - V_a$ ’ ya düşer. Potansiyel bariyerin azalmasıyla yarıiletkenden metale akan elektron sayısında artış olur. Metal tarafında görülen potansiyel bariyeri Φ_b ise belirgin biçimde değişmediğinden metalden yarıiletkene elektron akımı $I_{sc \rightarrow m}$ sabit kalır. Bunların sonucunda yarıiletkenden metale doğru net bir elektron akımı gözlenir.

Kontağa ters beslem gerilimi uygulandığında uygulanan gerilim kontağın arayüzeyindeki elektrik alanını destekleyecek bir etki yaratır ve yarıiletken tarafındaki potansiyel bariyeri artarak Şekil 2.3 (b)’ deki gibi V_i ’ den $V_i - V_a$ ’ ya yükselir. Bu durumda yarıiletkenden metale geçiş yapan elektron sayısında dış gerilimin olmadığı duruma göre azalma meydana gelir. Yine Φ_b potansiyel bariyerinde net bir değişim olmayacağından metalden yarıiletkene geçen elektron miktarında değişme olmaz. Bu durumda sızıntı akımı adı verilen ters yönlü ve küçük bir akım oluşur.

Düz ve ters akım mekanizmaları arasındaki asimetri lineer olmayan bir akım-gerilim karakteristiği oluşturduğundan bahsi geçen kontak doğrultucu kontak işlevi sağlar.



Şekil 2.3. a) Düz beslem durumunda metal-yarıiletken kontakta enerji-bant diyagramı
b) Ters beslem durumunda metal-yarıiletken kontakta enerji-bant diyagramı.

2.1.1.2. Deplasyon Bölgesi Genişliği

Bir doğrultucu kontakta yani Schottky diyotta deplasyon bölgesinin genişliği Poisson denklemi ve deplasyon yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_{sc}} = -\frac{qN_d}{\epsilon_{sc}} \quad (2.4)$$

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = \frac{qN_d}{\epsilon_{sc}}(W - x), \quad (0 \leq x \leq W) \quad (2.5)$$

V_a gerilimi uygulandığında oluşan deplasyon bölgesinin genişliği W yukarıdaki denklem ile elde edilebilir. Φ potansiyeli ve E elektriksel alanı yarıiletkenin sözde (quasi) nötral bölgesinde sifıra eşit olduğundan $x = W$ sınır şartlarında $\Phi(W) = 0$ ve $\frac{d\Phi(W)}{dx} = 0$ ’dır. Belirtilen sınır şartlarında (2.5) ifadesinin integrali alınarak aşağıdaki ifade elde edilir [50].

$$\Phi(x) = -\frac{qN_d}{2\epsilon_{sc}}\left(Wx - \frac{x^2}{2}\right) \quad (2.6)$$

$x = 0$ ’daki potansiyel, yarıiletken tarafındaki $(V_i - V_a)$ potansiyel bariyerine eşittir. Diyota düz beslem gerilimi uygulandığında $V_a > 0$ yani pozitif alınır. Deplasyon bölgesi, $\Phi(x = 0)$ ’da $(V_i - V_a)$ ’in potansiyel bariyeri yerine yazılmasıyla ile aşağıdaki denklemlerle elde edilir.

$$W = x \rightarrow W = (V_a) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{qN_d}}(V_i - V_a) \quad (2.7)$$

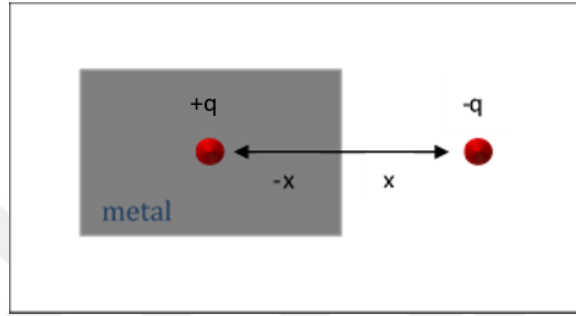
$x = 0$ ’daki elektriksel alan da (2.7) eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$E(0) = -\sqrt{\frac{2qN_d}{\epsilon_{sc}}}(V_i - V_a) = -\frac{qN_d W}{\epsilon_{sc}} \quad (2.8)$$

2.1.1.3. Schottky Etkisi (Schottky Olayı)

Diyota dış potansiyel uygulandığında metal tarafındaki Φ_b potansiyel bariyer yüksekliği tamamen sabit kalmaz. Yarıiletkendeki elektronlar tarafından metalde oluşturulan bir görüntü(imaj) yükü nedeniyle metaldeki potansiyel bariyeri Φ_b ’de küçük ölçüde de olsa bir azalma meydana gelir. Statik elektrikten bilindiği gibi mükemmel bir iletken

(metal) yakınındaki bir yük, iletken içinde metal yüzeyi ile başlangıç yükü arasındaki uzaklığa eşit bir derinlikte kendine eşit yük büyüklüğünde fakat zıt işaretli bir görüntü yükü oluşturur. Elektron ile metal yüzeyi arasındaki mesafeye x dersek, $+q$ yükü taşıyan görüntü yükü metalde yüzeyden $-x$ mesafesinde oluşacaktır. Bu iki yük arasında eşitlik (2.9)' deki gibi bir Coulomb kuvveti oluşacağı ve elektronun metal tarafından çekileceği açıkça söylenebilir. Bu durum elektron hareketini artıracığından sonuç olarak metal-yarıiletken kontakta potansiyel bariyeri azalır. Bu durum Şekil 2.4' de görsel olarak ifade edilmiştir [50].



Şekil 2.4. Bir metaldeki görüntü(imaj) yükü.

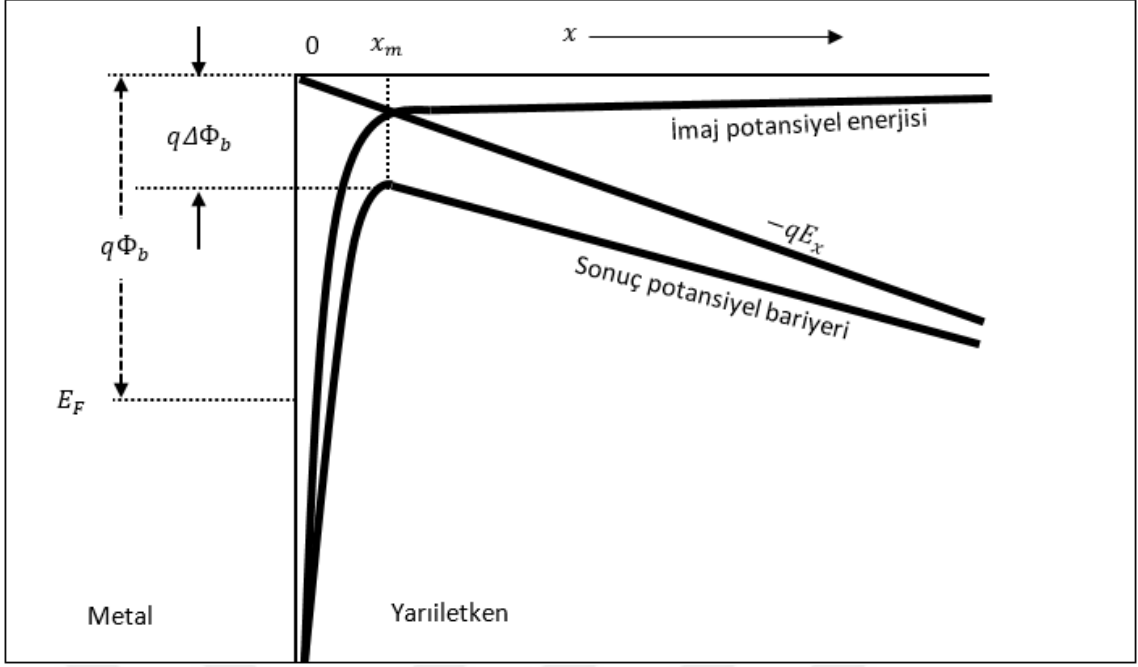
$$\frac{-q^2}{4\pi\epsilon_{sc}(2x)^2} = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_{sc}x^2} \quad (2.9)$$

Elektrona uygulanan Coulomb kuvveti, birim pozitif yüke etkiyen elektriksel kuvvet şeklinde tanımlanan elektriksel alan $E_m(x)$ ile aşağıda ifade edildiği gibi bağlantılıdır.

$$F = -qE_m(x) = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_{sc}x^2} \quad (2.10)$$

Elektronun bu kuvvetten dolayı sahip olduğu elektriksel potansiyel enerjisi (2.11)' deki gibi olur ve referans potansiyeli $P(x = \infty) = 0$ alınır.

$$P(x) = -qV(x) = \int_x^\infty \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_{sc}x^2} dx = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_{sc}x^2} \quad (2.11)$$



Şekil 2.5. Potansiyel engelinin azalması.

Elektronun toplam enerjisi hesaplanırken metal içindeki potansiyel enerjisi yarıiletken içindeki potansiyel enerjisine eklenir. Deplasyon bölgesindeki elektriksel alan;

$$E = - \frac{qN_d}{2\epsilon_{sc}} (W - x) \quad (2.12)$$

şeklinde ve potansiyel enerji hesaplanırken işlem kolaylığı bakımından sabit kabul edilebilir. Deplasyon bölgesinden kaynaklanan bu elektriksel alan iletkenlik bandındaki elektrona $-\frac{q^2 N_d}{2\epsilon_{sc}} (W - x)^2 + E_c$ 'ye eşit bir potansiyel enerji sağlar. Elektron, görüntü yükten kaynaklanan bir $-qEx$ potansiyel enerjisine de sahiptir ve elektronun sahip olduğu toplam potansiyel enerji $PE(x)$, bu iki potansiyel enerjinin toplanmasıyla (2.13)' teki gibi bulunabilir.

$$PE(x) = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_{sc}x} - qEx + E_c \quad (2.13)$$

Maksimum potansiyel enerjiyi bulmak için Enerjinin x' e göre birinci türevi sıfıra eşitlenmelidir.

$$\frac{dPE(x)}{dx} = 0 \quad (2.14)$$

(2.13)' ün yukarıda belirtildiği gibi türevi alındığında maksimum enerjiyi veren x değeri;

$$x = x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_{sc}E}} \quad (2.15)$$

olarak bulunur.

$x = x_m$ 'de potansiyel enerji;

$PE(x_m) = -q\sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_{sc}}} < 0$ şeklindedir ve bu eşitlik (2.16)'da verilen $\Delta\Phi_b$ potansiyel bariyer azalışına eşittir.

$$\Delta\Phi_b = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_{sc}}} = 2Ex_m \quad (2.16)$$

Yarıiletkenin yüzeyindeki elektriksel alan değeri $E(0) = -\sqrt{\frac{2qN_d}{\epsilon_{sc}}}(V_i - V_a)$ kullanılarak Schottky etkisini meydana getiren potansiyeldeki azalma miktarı bulunur.

$$\Delta\Phi_b = \sqrt[4]{\frac{q^3N_d}{8\pi^2\epsilon_{sc}^3}}(V_i - V_a) \quad (2.17)$$

Sonuç potansiyel engeli;

$$\Phi_b' = \Phi_b - \Delta\Phi_b \quad (2.18)$$

olur.

Engelin imaj kuvvet alçalması ve elektron tarafından alan üretilmesi sonucunda eğer yarıiletkenin iletim bandı yakınındaki engel tepesinde elektron yoksa engel alçalması olmayacaktır. Dolayısıyla engel yüksekliği engele doğru elektron hareketine neden olmayan bir metotla ölçüldüğünde Φ_0 ' nin gözlenen değeri imaj yükünün sebep olduğu Colomb kuvveti tarafından düşürülmez [50].

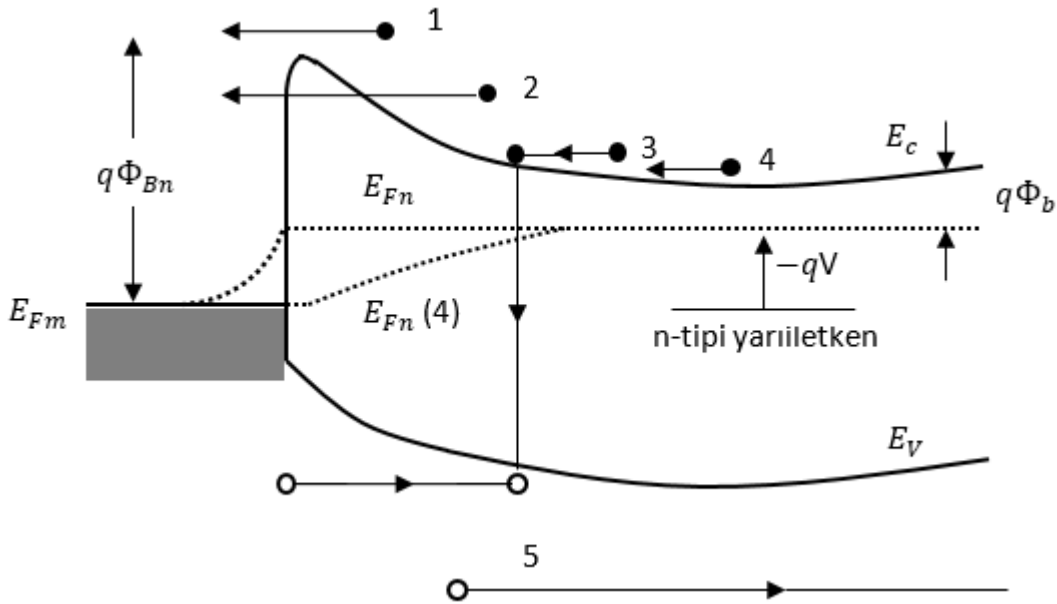
2.1.1.4. Akım-Gerilim Karakteristikleri

Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Bir dış gerilim uygulanmadığında, metal-yarıiletken kontakların termal denge

durumunda görülen net akım sıfırdır. Dış gerilim altında ise kontaklardan akım geçer ve bu akım sıcaklık, gerilimin yönü, yarıiletkenin tipi, metal ile yarıiletkenin arasına yerleştirilecek tabaka, kontak sonrası oluşacak seri direnç ve arayüzey durumları gibi faktörlerden belirgin biçimde etkilenmektedir. Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından sağlanmaktadır fakat yukarıdaki faktörlerden dolayı kontaklardan akım geçerken birden fazla mekanizmanın geçerli olduğunu söylemek mümkündür. Bu durumda baskın olan iletim mekanizması göz önüne alınıp diğer mekanizmalar ihmal edilerek daha doğru sonuçlara ulaşılabilir.

Şekil 2.6’ da düz beslem altındaki beş temel iletim mekanizması görülmektedir. Ters beslem altında ise bu mekanizma yani işlemlerin tersi gerçekleşir [57].



Şekil 2.6. Düz beslem geriliminde beş temel akım iletim mekanizması:

- (1) Termiyonik emisyon, (2) Tünelleme, (3) Rekombinasyon,
- (4) Elektron difüzyonu, (5) Hollerin difüzyon teorisi.

Yukarıda bahsedilen akım mekanizmaları kısaca ifade edilecek olursa;

Termiyonik emisyon, metal-yarıiletken kontaktaki elektronların termal enerji değerinin Φ_b potansiyel bariyerinden büyük olmasıyla elektronların bu potansiyel bariyeri aşmaları olarak ifade edilebilir. Termiyonik emisyon, orta seviyede katkılanmış yarıiletkenlerin kullanıldığı normal sıcaklıklardaki (oda sıcaklığı civarı) Schottky diyotlarda baskın bir mekanizmadır. Yüksek mobiliteli yarıiletkenler için iletim termiyonik emisyon teorisi ile açıklanabilir [58], [59], [52].

Metal-yarıiletken kontaklarda çok düşük sıcaklıklarda potansiyel bariyerinin küçülmesiyle yük taşıyıcıları kuantum mekaniksel tünelleme ile karşı tarafa geçebilirler. Dolayısıyla bu mekanizmanın düşük sıcaklıklarda baskın olduğunu söylemek mümkündür.

Schottky kontak düz beslem gerilimi altında yarıiletkenin cinsine bağlı olarak yarıiletken kısımda ve metal kısımda eksitonlar (elektron-hole çiftleri) oluşması ve bu yük taşıyıcılarının deplasyon bölgesinde yeniden birleşmesiyle rekombinasyon akımı oluşur. Bu mekanizma, termiyonik emisyonla karşılaştırıldığında potansiyel bariyerin büyük, sıcaklık ve katkılamanın düşük olduğu durumlarda baskındır.

Kullanılan yarıiletkenin düşük mobiliteli olduğu durumlarda, deplasyon bölgesindeki elektron difüzyonu baskın mekanizmadır ve iletim difüzyon teorisi ile açıklanabilir.

Elektron hareketinden dolayı metalden yarıiletkene difüzyonla enjekte olan holler nedeniyle de dolaylı olarak akım oluşabilir. Ayrıca kontaktaki elektriksel alan sebebiyle oluşan sızıntı akımları veya kontak ara yüzeyindeki tuzaklardan kaynaklanan arayüzey akımı da mümkündür.

Termiyonik emisyon yukarıda ifade edildiği gibi elektronların termal enerjileri ile gerçekleşir. Elektronların termal enerjisi kT/q , oda sıcaklığında potansiyel bariyerinden belirgin biçimde küçüktür. Fakat V_a , büyüklüğündeki bir düz beslem gerilimi altında yarıiletkenden metale geçen elektronlar için bu potansiyel bariyeri $\Phi_b' - V_a$ şeklinde azalır. Potansiyel bariyerindeki bu azalmayla birlikte oluşan termiyonik emisyon akımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [50], [60].

$$I_{m \rightarrow s} = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q(\Phi_b' - V_a)}{kT} \right] \quad (2.19)$$

Burada A, diyot yüzey alanını, R ise Richardson sabitini temsil etmektedir. Richardson sabitinin değeri

$$R^* = \frac{4\pi m_e q k^2}{h^3} \quad (2.20)$$

kullanılarak hesaplanılabilir.

Daha önce belirtildiği gibi dış gerilimin 0 olması durumunda $I_{m \rightarrow sc} = -I_{sc \rightarrow m}$ olur. $I_{sc \rightarrow m}$ dış gerilimden etkilenmediğinden dolayı sabittir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I = -AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b'}{kT} \right] \quad (2.21)$$

Diyottaki net akım metalden yarıiletken ve yarıiletkenden metale olan elektron akışının toplamı olduğundan gerilime bağlı akım fonksiyonu şöyle olur:

$$I = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b'}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

Diyottaki net akım yukarıdaki matematiksel ifadeden de görüldüğü gibi hem sıcaklığa hem metal-yarıiletken kontaktaki potansiyel bariyerine hem de uygulanan dış gerilime bağlıdır. Ayrıca bu akım-gerilim karakteristiği PN eklemlerdekine benzer bir durumdadır. Yalnız PN eklemlerde akım iletiminin, metal-yarıiletken kontaklardakinin aksine, azınlık yük taşıyıcıları tarafından sağlandığı unutulmamalıdır [50], [58], [59], [61].

Ara yüzey Hallerinin Etkisi

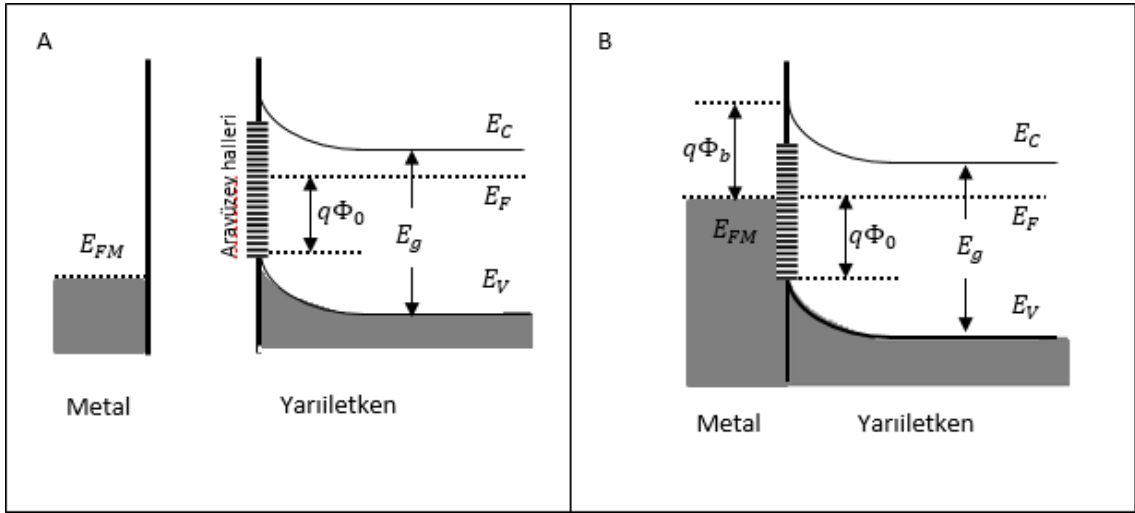
Schottky diyottaki net akım denkleminde de görüldüğü gibi ideal bir metal-yarıiletken kontakta yarıiletken, dolayısıyla da kontak ara yüzeyi, metalin varlığından etkilenmez. Bu ideal bir kontak için teorik bir yorumdur ve pratikte biraz daha farklıdır. Bir metal-yarıiletken kontak yani akım doğrultucu bir aygıtta yarıiletken kristalin düzenli yapısı ara yüzeyde bozulur. Bunun sonucu olarak yarıiletkenin yasak enerji aralığında, yüzey yakınlarında müsaadeli hallerin sayısı artar. Bu haller valans bandından iletim bandına kadar değişen enerji değerlerine sahip olabilirler ve ara yüzey halleri (ara yüzey tuzakları) ismini alırlar. Ara yüzey halleri, Fermi enerji seviyesinin altında olmaları durumunda tamamen elektronla doludurlar.

Metal ile yarıiletken kontak haline getirilmeden önce kristal (yarıiletken) tarafından tuzaklanan elektronlar yarıiletkende bir deplasyon bölgesi meydana getirirler böylece Şekil 2.7' deki gibi bir yüzey yükü oluştururlar. Oluşan bu yüzey yükü ve deplasyon bölgesinden dolayı yarıiletken yüzeyinde $q\Phi_0 = E_F - E_V$ kadar band bükülmesi meydana gelir.

Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde ara yüzey hallerinin etkisiyle yarıiletkenden metale elektron geçişi gerçekleşir böylece Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelerek eşitlenir. Bu sırada deplasyon bölgesi oluşur ve yarıiletkenin enerji bantlarında bükülme meydana gelir [56], [50]. Ara yüzey hal yoğunluğunun sayıca çok olduğu durumda, sonsuz küçük bir bant bükülmesinin artışı δE Fermi seviyesinin üzerine,

δE ve $E_F - \delta E$ arasında, çok sayıda arayüzey hali hareket eder. Bu durumda Fermi seviyelerinin eşitlenmesi, elektronların yarıiletken metale geçişi yerine, ara yüzey halleri tarafından tuzaklanan elektronların tuzaklardan metale geçişleri ile gerçekleşir. Bu nedenle Fermi seviyelerinin eşitlenmesinin sonucunda bant bükülmesi ihmal edilir ve potansiyel bariyer yüksekliği $q\Phi_b = E_g - q\Phi_0$ şeklinde olur.

Pratikte (ideal olmayan, gerçek aygıtlarda) arayüzey hal yoğunluğunun yeri yani karşılık geleceği enerji seviyesi, potansiyel bariyer yüksekliğinin $q\Phi_b = E_g - q\Phi_0$ ile $q\Phi_b = q\Phi_m - q\chi$ arasında olacağı şekilde ortaldadır.



Şekil 2.7. Arayüzey hallerinin var olması durumunda metal-yarıiletken kontaktaki enerji bandları: a) Metal ile yarıiletken kontak hale gelmeden önceki enerji bandları, b) Metal ile yarıiletken kontak haline getirildikten sonraki enerji bandları.

Metal-yarıiletken kontağın detaylı analiziyle deplasyon bölgesinde oluşan jenerasyon/rekombinasyon akımlarının var olduğu sonucuna varılabilir. Deplasyon bölgesindeki jenerasyon/rekombinasyondan ve potansiyel bariyer yüksekliğinin dış gerilime bağlı olmasından dolayı düz beslem gerilim altındaki akım ifadesi aşağıdaki gibidir [62].

$$I = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b'}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV_a}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.23)$$

Denklemden kullanılan n , diyot idealite faktörüdür ve ideal bir diyotta $n=1$ değerini alır. Diyot idealite faktörü aşağıdaki gibi formüle edilmiştir [63], [64], [65], [66], [67].

$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V)}{d(\ln(I))} \quad (2.24)$$

2.1.1.5. Bir Schottky Diyotun Bir PN Eklemi ile Karşılaştırılması

PN eklemi ve Schottky diyotlar için akım-gerilim denklemleri aşağıdaki şekildedir.

PN eklem diyodu için;

$$I = Aqn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) \left[\exp\left(\frac{qV_a}{nkT}\right) - 1 \right] = I_s \left(\exp\left[\frac{qV_a}{kT}\right] - 1 \right) \quad (2.25)$$

Schottky diyot için;

$$I = AR^*T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_b'}{kT}\right] \left[\exp\left(\frac{qV_a}{nkT}\right) - 1 \right] = I_s \left(\exp\left[\frac{qV_a}{kT}\right] - 1 \right) \quad (2.26)$$

PN eklem ve Schottky diyot için yukarıda verilen denklemlerde uygun değerler kullanıldığı takdirde, Schottky diyottaki ters beslem akımının bir PN eklemdeki sızıntı akımının 100-1000 katı olduğu görülür [50]. Bu da oldukça büyük bir sızıntı akımına karşılık gelir. Performans ve güvenilirlik açısından kaliteli bir Schottky engel diyotunun en önemli özellikleri geniş engel yüksekliğine, düşük sızıntı akımına ve iyi bir doğrultma oranına sahip olmasıdır. Schottky diyotlarda istenen bu özelliklerin metalin iş fonksiyonuna bağlı olduğu bilinmektedir. p-tipi yarıiletken kullanılan Schottky engel diyotlarda en iyi aygıt performansını sağlamak için düşük iş fonksiyonlu metal kullanılması beklenmektedir [68], [69]. Düz beslem gerilimi altında bir Silisyum Schottky diyot 0,2-0,3 V gerilim değerlerinde yüksek bir iletkenliğe sahip olurken Silisyum PN eklem diyotu aynı iletkenliği yani aynı akım değerini, 0,7 V gibi daha yüksek gerilim değerlerinde sağlar [50].

Schottky diyotlar PN eklemlerinin aksine çoğunluk yük taşıyıcılarıyla çalıştığından çok yüksek anahtarlama hızına sahiptirler. Çünkü Schottky diyotta genellikle n-tipi yarıiletken kullanılır ve düz beslem gerilimi yani ileri yönde polarma altında valans bandı iletimi sadece n-tipi yarıiletkende ve metalin iletim bandında oluşur. Schottky diyotlar hızlı anahtarlama özelliklerinden dolayı, bataryaların hızlı boşalmasını engelleme yetisindedir ve bu nedenle güneş pillerinde, kurşun-asitli bataryalarda ve anahtar modlu güç kaynaklarında kullanılırlar [69].

Schottky diyotların çalışmasının çoğunluk yük taşıyıcıları ile sağlandığından yukarıda

bahsedilmiştir. Bu durumun diyot performansına etkisi belirgindir. Çoğunluk yük taşıyıcıları 10 pikosaniye mertebesinde bir relaksasyon süresine sahiptirler bu da aygıtın çalışma frekansını 10 gigahertze kadar çıkarır. Bir Schottky diyotun performansı (2.26)'da verilen kesim frekansı ile belirlenir [50].

$$f_{co} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.27)$$

R, Schottky diyotun dinamik direncidir.

$$R = \left. \frac{dV_a}{dI} \right|_{V_a=0} \quad (2.28)$$

C, Schottky diyotun deplasyon kapasitesidir (deplasyon sığası).

$$C = \frac{A\epsilon_{sc}}{W(V_a)} \quad (2.29)$$

Bir PN eklemde ise kesim frekansı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$f_{co} = \frac{1}{2\pi R(C_D + C_T)} \quad (2.30)$$

C_D , difüzyon kapasitesidir ve azınlık yük taşıyıcıların ömürleri ile orantılıdır. Bu ömür yaklaşık nanosaniye mertebesinde (100 pikosaniyeden birkaç mikrosaniye mertebesine kadar değer alabilir). Difüzyon kapasitesi PN eklem diyotlarda frekansı kısıtlar. C_T geçiş kapasitesidir ve deplasyon yük değişimine karşılık gelir [50].

$$C_D = \frac{dQ_p}{dV_a} + \frac{dQ_n}{dV_a} = C_{Dp} + C_{Dn} = \frac{q}{kT} (\tau_p J_p(I_n) + \tau_n J_n(-I_p)) \quad (2.31)$$

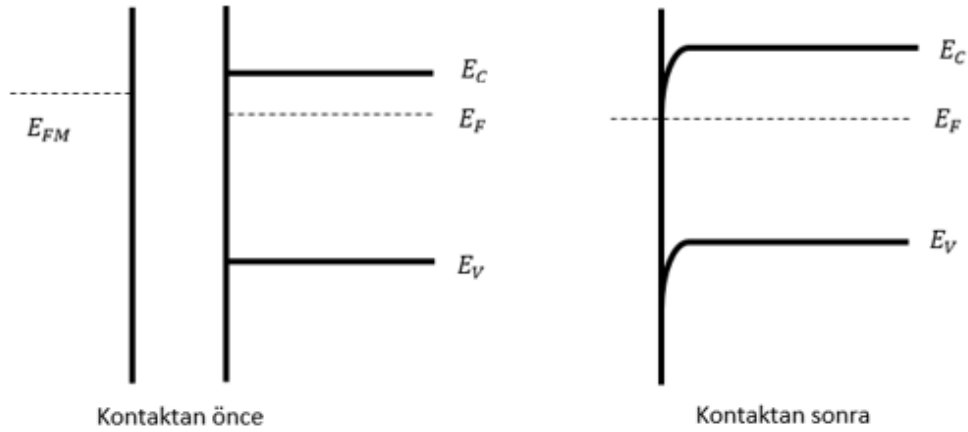
$$C_T = A \frac{\epsilon_s}{I_n + I_p} \quad (2.32)$$

2.1.2. Omik Kontak

Omik kontak, Ohm yasasına uyan ve doğrultucu olmayan kontak türüdür. Bu nedenle doğrultucu kontakta kontak direnci oldukça küçük olmalıdır ve omik kontak oluşturma şartı yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olmasıdır. Metal-yarıiletken kontak oluşturulduğunda termal denge sağlanana kadar negatif yük taşıyıcılar metalden yarıiletkenine doğru hareket ederler. Bu negatif yük taşıyıcıları geride

pozitif yük taşıyıcıları olan holler bırakır ancak metaldeki yük taşıyıcı miktarı fazla sayıda olduğundan pozitif yükler metalde yarım angström civarı kısıtlı bir bölgede kalırlar. Elektronlar yani negatif yük taşıyıcıları bu incelikteki bir engelden rahatlıkla tünelleme ile geçebilirler. Bu durumda yarıiletken, Schottky kontakta olduğunun aksine deplasyon bölgesi oluşmaz. Böylelikle elektronlar kontak boyunca serbestçe ilerleyebilirler. Taşıyıcıların bu geçişler esnasında maruz kaldığı direnç ise yarıiletkenin iç direncidir. Tüm bunların sonucunda kontaktaki akım yönünü belirleyen faktör dış gerilimin yönü olmaktadır [50].

Omik kontak oluşturulurken, metalin Fermi seviyesi kontakın Fermi seviyesinden büyükse Şekil 2.8.' deki gibi n-tipi yarıiletkenin enerji bantları kontak yakınında oldukça küçük bir bükülmeye uğrar. Metalin Fermi seviyesi kontakın Fermi seviyesinden küçük seçilirse yine omik kontak elde etmek mümkündür.



Şekil 2.8. Bir omik kontakın enerji bantları.

2.2. ORGANİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

2.2.1. Güneş Hücrelerine Genel Bakış

Çoğunlukla güneş ışığı veya benzeri bir ışık kaynağından aldığı enerjiyle, yük taşıyıcıların jenerasyonunu sağlayarak elektrik enerjisi oluşturan pn eklemlerine, kullanmış oldukları enerji girdisinden dolayı ‘güneş hücresi’ denir. Genellikle yarıiletken tabakalardan oluşan bu aygıtlar fotovoltaik ilkeye dayalı çalışır yani yarıiletken yüzeye düşen fotonlar nedeniyle güneş hücresinin uçları (elektrotları) arasında potansiyel farkı oluşur ve bu potansiyel fark bir dış devreye bağlandığında devreden akım geçmesi sağlanır. Güneş hücresinin bu süreci gerçekleştirebilmesi için

güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile çalışabilecek yapıda ve elektrik yüklerinin birbirinden ayrılabilmesine izin verebilecek genişlikte yasak bant aralığına sahip bir yarıiletken olmalıdır [70]–[72].

Güneş hücrelerinde kullanılan malzemeler ve üretim şekilleri, diyotların çalışma ilkeleriyle temel olarak birbirlerine benzemektedir. Aralarındaki fark güneş hücrelerinin fotovoltaiik olay sonucunda elektrik enerjisi üretebiliyor olması fakat diyotların önceki bölümde de bahsedildiği gibi yalnızca dış gerilim altındaki akım geçişini kontrol edebiliyor olmasıdır. Bu benzerlik ve farklardan dolayı güneş hücreleri ‘fotodiyot’ şeklinde de isimlendirilmektedir.

Fotovoltaiik olay 1839 yılından beri biliniyor olmasına rağmen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme fikri ilk olarak 1954 yılında Bell laboratuvarında yarıiletken safsızlaştırma çalışmalarında uygulamaya geçirilmiştir [73]. Bu ilk modern güneş hücresinin, güneş enerjisini %6 verimle elektrik enerjisine dönüştürdüğü bilinmektedir. Bu dönüm noktasından sonraki araştırmalarla üç nesil güneş hücresi geliştirilmiştir. Bu ilk çalışmalardaki pn ekleminde, CdS (Kadmiyum sülfür) ve Si (Silisyum) kullanılmıştır. Daha sonra Silisyum pn eklemlili pili kullanılarak %15 verim elde edilmiştir. Si temelli güneş hücrelerinin avantajı daha az iletken malzeme ile nazaran yüksek verim eldesidir fakat asıl ihtiyaç duyulan alanlarda yani uzay çalışmalarında gerekli olan enerji gereksinimlerini istenen düzeyde karşılayamaması ve hassas yapıları gibi bazı eksiklikler barındırmaktadır. Bu nedenlerle Si temelli güneş hücrelerine alternatif olarak ‘ince film güneş hücreleri’ geliştirilmiştir. İnce film güneş hücreleri, düşük üretim maliyet ve esnek yapısı nedeniyle hem ekonomik hem de uygulama kolaylığı bakımından oldukça rahatlatıcıdır. Fakat bu hücreler üretim sürecinin daha zorlu olması ve daha düşük verim sağlaması gibi dezavantajlara sahiptir. Sonrasında ilerleyen çalışmalarla iletken polimer bazlı ve boya ile duyarlılaştırılmış üçüncü nesil güneş hücreleri elde edilmiştir. Güneş hücreleri aktif tabakasında kullanılan malzeme türüne göre iki ana sınıfta incelenmektedir. Bunlardan ilki inorganik güneş hücreleri, ikincisi bu tez çalışmasının konusu olan organik güneş hücreleridir [74].

2.2.1.1. *Inorganik Güneş Hücreleri*

İnorganik güneş hücreleri, fotovoltaiik olaya dayalı olarak voltajın üretildiği pn eklemi oluşturmak üzere katkılı yarıiletken içerip üzerlerine güneş ışığı geldiğinde atomların

valans elektronlarının iletim bandına geçmesiyle elektrik akımını doğrudan oluşturan yapılardır. Başka bir ifadeyle inorganik yarıiletkenler kullanılarak hazırlanmış olan bu inorganik güneş hücrelerinde ağıta düşen fotonlar direkt olarak yük taşıyıcılarına dönüştürölür. Hücresin üst kısmında hücrede üretilen akımı toplamak üzere genellikle bakırdan yapılmış negatif kontak bulunur. Kontakın altında tabaka halinde, soğurma özelliğı iyi olan pn eklemi eklemi yer alır [75].

İnorganik güneş hücrelerinin üretiminde büyük çoğunlukla Si kristali kullanılmakla birlikte Ge kristali de tercih edilmektedir.

Günümüzde üretilen inorganik güneş hücreleri aşağıdaki gibidir [75];

1. Si güneş hücreleri
2. Monokristal güneş hücreleri
3. Semikristal güneş hücreleri
4. Ribbon Si güneş hücreleri
5. İnce film güneş hücreleri
6. Amorf Si güneş hücreleri
7. CIS (bakır indiyum diselenoid) güneş hücreleri

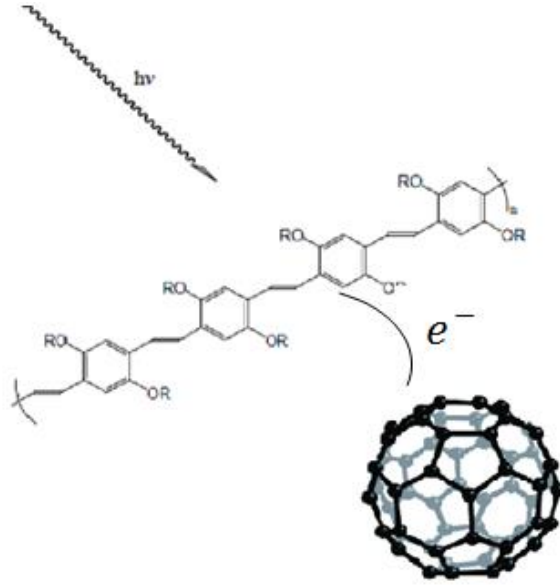
Güneş hücresinin enerji dönüşüm verimliliğini artırmak için kullanılan yarıiletkenin iletkenliğı artırılmalıdır. Bu işlem, yarıiletken malzeme içine 3A ve 5A grubu elementlerin katkılanmasıyla sağlanabilir.

p ve n tipi yarıiletkenlerin birbiriyle bağlandığı ve yük taşıyıcılarının akışının sağlandığı bölgeye eklem bölgesi denir. İnorganik güneş hücreleri, üzerlerine düşen güneş ışığı nedeniyle elektron-deşik çiftlerinin oluşması ve bu çiftlerin elektriksel alan nedeniyle ayrışması şeklinde çalışır. Güneş hücreleri, üzerine düşen ışığın tamamını elektrik enerjisine çeviremez. Hücre içerisinde kullanılan malzemeye bağlı olarak hücresinin band aralığı ve dolayısıyla çalıştığı dalga boyu farklılık göstermektedir [74].

2.2.1.2. Organik Güneş Hücreleri

Organik güneş hücreleri yapılarında Si, Ge gibi inorganik malzemeler yerine karbon tabanlı organik yarıiletken moleküller veya konjuge(iletken) polimer bulunduran güneş hücreleridir. Yapı içerisindeki moleküllerin fotouyarılması sonucu ‘eksiton’ adı verilen elektron-deşik çiftleri oluşur. Bu eksitonlardaki pozitif yük taşıyıcısı olan holler ve

negatif yük taşıyıcısı olan elektronlar birbirlerine 0.05 eV ile 1 eV arasında kulombik (Coulomb kuvveti etkisi) bağlanma enerjileriyle bağlıdırlar. Organik güneş hücresinin işlevini yerine getirebilmesi için eksitonların serbest yüklere bölünmesi yani jenerasyon gerçekleşmesi gerekir. Alıcı molekül kullanma bu sürecin gerçekleşmesi için uygulanabilecek yöntemlerden biridir. Bu durumda iletim ve valans bandı arasındaki yasak enerji band aralığından daha büyük bir enerji ile gelen fotonun soğurulması üzerine, aktif malzemenin dolu olan en yüksek enerjili orbitalinden (HOMO) boş olan en düşük enerjili orbitaline (LUMO) negatif yük taşıyıcısı olan elektron geçişi gerçekleşir. Organik güneş hücrelerinde polimer ve karbon temelli yarıiletken molekül örneği arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi Şekil 2.9' deki gibidir [74]-[76].



Şekil 2.9. Polimer ve C_{60} (buckminsterfulleren) arasındaki fotoindüklenmiş yük transferi.

Organik elektronik, temiz enerjiyi düşük maliyetli üretim ve kolay entegrasyon gibi avantajlarla sağlamaktadır. Ayrıca hafif yapıları ve plastik malzemeler üzerinde de üretilibilmeleri sayesinde tıbbi teknolojiler bakımından oldukça önemli olan, insan vücuduna uyumlu elektronik aygıt üretiminde kullanılabilmektedir.

Organik güneş hücreleri; baskı teknikleri, vakum altında buharlaştırma ve roll to roll teknikleriyle üretilabiliyor olması bakımından inorganik aygıtlardan farklılaşmaktadır. Bu üretim teknikleri sayesinde nano-mikro alınlıklarda esnek organik filmler ucuz maliyetle geniş yüzeylere uygulanabilmektedir [77].

Organik malzemelerin kimyasal yapısının kolayca değiştirilebiliyor olması, uygun band

aralıkları göz önünde bulundurularak malzemelerin soğurma aralığının uygun hale getirilebilmesini sağlar ve bu şekilde daha fazla foton enerjisi soğurulması sağlanabilir [78].

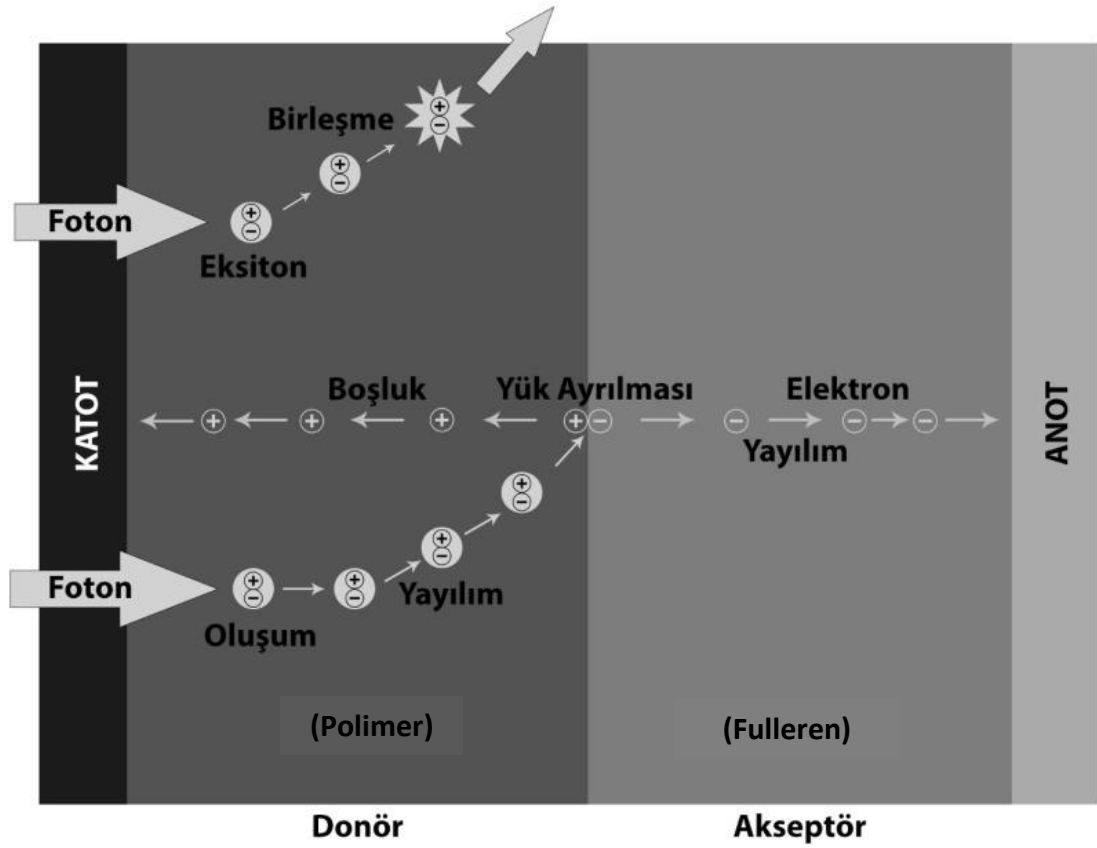
Fakat organik aygıtların tüm bu avantajlarına rağmen inorganik güneş hücreleri daha çok rağbet görmektedir. Bunun sebebi olarak öncelikle organik hücrelerdeki enerji dönüşüm verimliliğinin inorganiklere göre yetersiz olmasıdır. Verimi artırma çalışmalarının en önemlisi ‘tandem’ yani çok eklemli hücrelerdir. Farklı band aralığına sahip hücrelerin birbirine seri bağlanmasıyla oluşturulan tandem hücreler sayesinde, tek bir hücrenin verimine kıyasla daha fazla verim elde edildiği literatür incelendiğinde görülmektedir. Verim, organik güneş hücresi çalışmalarında, geliştirilmesine en çok önem verilen ve en çok üzerinde durulan nokta olmasına rağmen henüz bu durum, organik hücrelerin inorganiklere göre tercih edilebilmesi bakımından yeterli düzeye ulaşamamıştır. Fakat inorganik malzemelerde çeşitliliğin sınırlı olması ve organik malzemelerde oldukça fazla alternatifin mevcut olması bu konuda umut verici bir etken niteliğindedir [75], [78]–[81].

Organik güneş hücreleriyle ilgili aşılması gereken bir diğer durum da hücrelerin kullanım ömürleridir. Organik hücreler ı ışık, nem ve oksijene fazla dayanıklı değildir. Organik malzemelerin uzun ömürlü olması ve uzun süre kullanılabilmesi için nemli ortamlardan sakınılması gerekmektedir. Ayrıca enkapsulasyon (kaplama) ve devre geometrisinin tersine çevrilerek kullanılması da pil ömrünü artırmaktadır. Anot/aktif tabaka/katot şeklinde bir devre geometrisi yerine katot/aktif tabaka/anot şeklindeki bir devre geometrisi oluşturulması ve devreye kompakt tabaka eklenmesi gibi bir yöntem kullanılarak durum iyileştirilebilir. Hava ortamında oksijene dayanıksız ve düşük iş fonksiyonlu malzemelerin kullanılması malzemelerin kararlılığını azaltacağından oksijene dayanıklı, yüksek iş fonksiyonlu malzemeler tercih edilmelidir. Bu şekilde güneş hücresinin daha kararlı, dayanıklı ve uzun ömürlü olması sağlanabilir [76].

Organik güneş hücrelerinin çalışma prensipleri dört adımda açıklanabilir [57], [82];

1. güneş ışığı soğurularak uyarılma gerçekleşir ve eksiton oluşumu sağlanır,
2. eksitonun, yük ayrımının olacağı bölgeye geçişi,
3. bu bölgede yük ayrımının oluşması (jenerasyon),
4. yüklerin elektrotlara iletilmesi (hollerin anota ve elektronların katota iletilmesi).

Yukarıda bahsedilen süreç Şekil 2.10' da modellenmiştir.



Şekil 2.10. Organik güneş hücrelerinde rekombinasyon ve jenerasyon ile akım oluşma süreci [83].

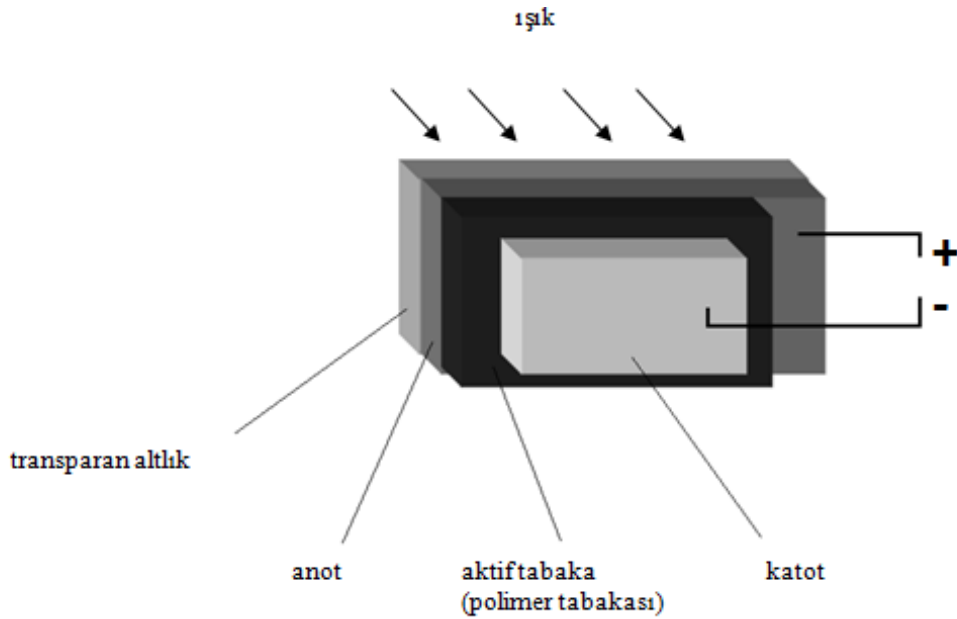
Malzemenin band aralığının, gelen foton enerjisinin hemen üstünde bir enerji değerine sahip olması durumunda kristal saydam durumdadır. Bu durumda foton, bağlı bir elektron-deşik çifti (eksiton) oluşturur. Oluşan eksiton 1 pozitif ve 1 negatif yük taşıyıcısı barındırdığından nötrdür. Eksiton oluşumunun sağlanmasıyla yansıma ile soğurma spektrumları gözlemlenir [75], [76], [83].

Soğurulan fotonun enerjisinin yasak enerji band aralığından daha büyük olması durumunda bu elektron-deşik çifti kristal içerisinde serbesttir ve kristal içinde bağımsız hareket edebilirler. Bir elektron-deşik bağlı çifti oluşturmak için yasak enerji band aralığından daha küçük bir enerjide, dolu değerlik (valans) bandının enerji değerinden büyük foton enerjisi gereklidir. Enerji bandının üstündeki frekanslarda fotonun soğurulması ve bu fotonun bir elektronun değerlik bandından iletim bandına, ardında bir holü bırakacak şekilde uyarır. Bu yük ayrımının gerçekleşmesiyle yani jenerasyon olayıyla da akım sağlanmış olur [75], [76], [79], [80], [82].

2.2.2. Organik Güneş Hücresi Çeşitleri

2.2.2.1. Tek Katmanlı Organik Güneş Hücreleri

Polimer bazlı tek katmanlı organik güneş hücreleri, iş fonksiyonları birbirinden farklı iki metal elektrot arasına konjuge polimer kaplanmasıyla oluşturulmaktadır. Yalnızca organik malzeme (polimer) içeren aygıtlarda, rejenerasyon sağlamanın en önemli yolu elektrik alan kullanmaktır. Işığın bu polimer tabakasına düşmesiyle elektron-deşik çiftleri oluşur, elektron-hol çiftleri iş fonksiyonu farklı olan elektrotlar üzerinde toplanır ve böylelikle elektrik akımı oluşur. Daha önce de bahsedildiği gibi tek katmanlı hücrelerin verimi, kısıtlı bölgede fotoakım oluşturabiliyor olmaları nedeniyle düşüktür [76].



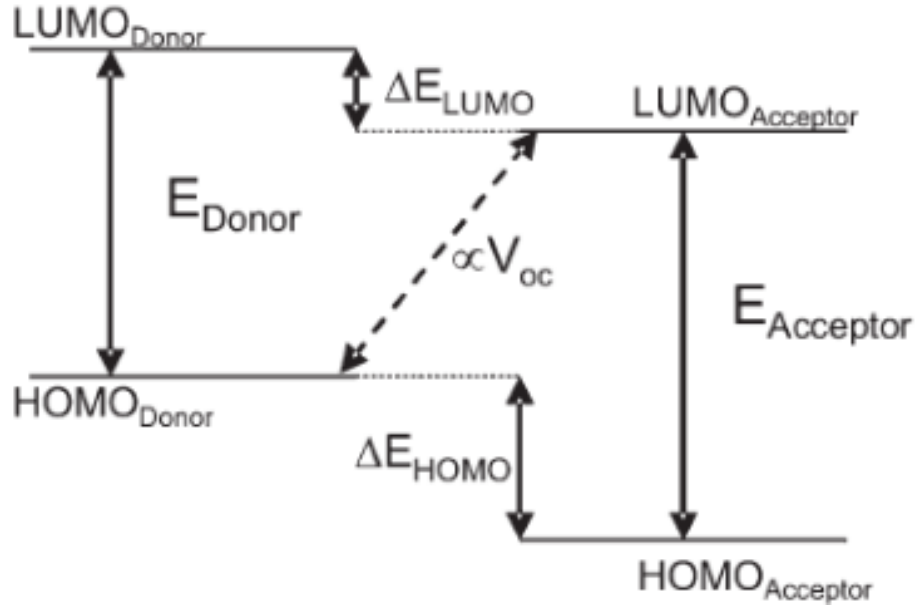
Şekil 2.11. Tek katmanlı organik güneş hücresi devre şeması.

2.2.2.2. İki Katmanlı Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri

Heteroeklem hücreler verici-alıcı yaklaşımıyla oluşturulmaktadır. Verici malzeme ve alıcı malzemenin temas halinde olduğu geometrik ara yüzeyde etkileşim gerçekleşir. Hücreye gelen fotonun soğurulmasının ardından, arayüzeye gelip uyarılan eksitonlar yüksek LUMO seviyesine sahip polimerin(verici) LUMO seviyesinden, daha düşük LUMO seviyesinde sahip olan fullerenin (alıcı) LUMO seviyesinde sıçrar. Elektronlar alıcı yani fullerene, holler ise verici olan polimerin içine doğru hareket ederler [75], [82].

Organik heteroeklem hücrelerde bu eksiton ayrımının sağlanması bazı koşullara bağlıdır.

Öncelikle serbest yüklerin oluşturulabilmesi için vericinin HOMO seviyesi alıcınınkinden büyük olmalıdır ki bu sayede vericinin HOMO seviyesinin üzerinde holler kalır. Alıcının HOMO' sunun daha büyük olması durumunda hem hol hem de elektron alıcı tarafına geçer ve bu durum serbest yük oluşumunu azaltarak verimde düşüğe neden olur. Serbest yük oluşumunda sağlanması gereken koşullardan bir diğeri kalınlıktır. Malzeme, difüzyon uzunluğu da göz önünde bulundurularak, ışığın aktif katmanda soğrulabileceği kalınlıkla kaplanmalıdır. Bu kalınlık 50-200 nm arasında değer almaktadır [83].



Şekil 2.12. Verici ve alıcının enerji seviyeleri.

Organik malzemelerde oluşan eksitonların difüzyon uzunluğu 5-15 nm civarında oldukça küçük değere sahiptir. Difüzyon uzunluğu, ara yüzeye ne kadar uzaklıktaki eksitonların ayrışmaya uğrayacağını ifade eden bir değerdir yani ara yüzeye bu mesafeden daha uzak bir konumda bulunan eksitonların ayrışmıyor olması anlamına gelir ve bu da verimde kısıtlılığa neden olur. Bu durumu iyileştirmek adına konjuge polimerler ve fullerenler üzerine çalışmalar sayesinde polimerden fullerene yüksek hızlı yük transferi sağlanmaktadır [76], [83].

2.2.2.3. Hacim Heteroeklem Organik Güneş Hücreleri

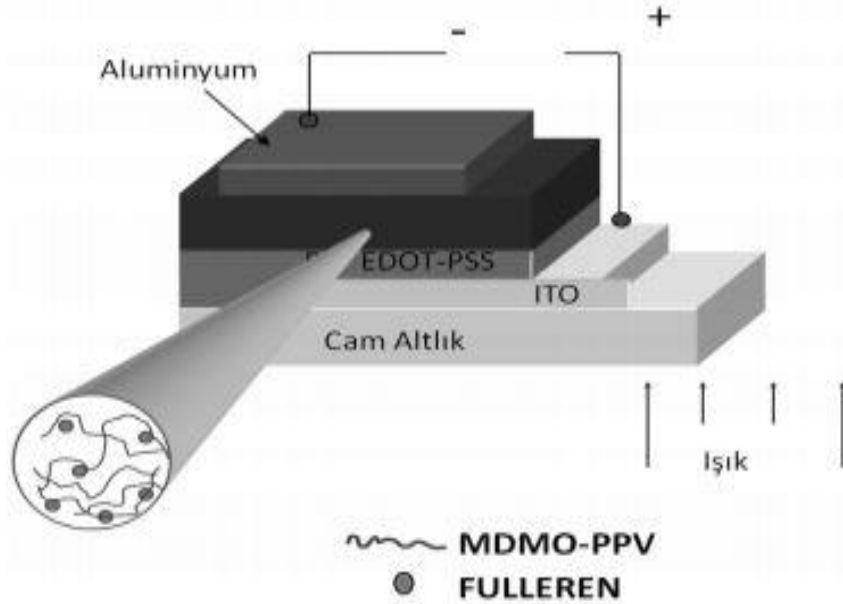
Ana prensip olarak verici ve alıcının, eksiton difüzyon uzunluğundan daha kısa bir mesafe içinde hacim boyutunda karışmış haliyle oluşturulan hücrelerdir. Dolayısıyla bu yapıda oluşan elektron hol çiftinin tekrar birleşmelerinden (rekombinasyon) önce donör alıcı ara yüzeyine ulaşma olasılığı artmaktadır ve sayesinde eksitonun küçük difüzyon

uzunluğuna bağlı olarak oluşacak olan kayıplar engellenmektedir. Hacim heteroeklem yapılar çift katmanlı hücrelere benzer yapıdadır fakat yük ayrımının gerçekteştiği bölge hacim heteroeklem yapılarda daha büyüktür [75], [76], [83].

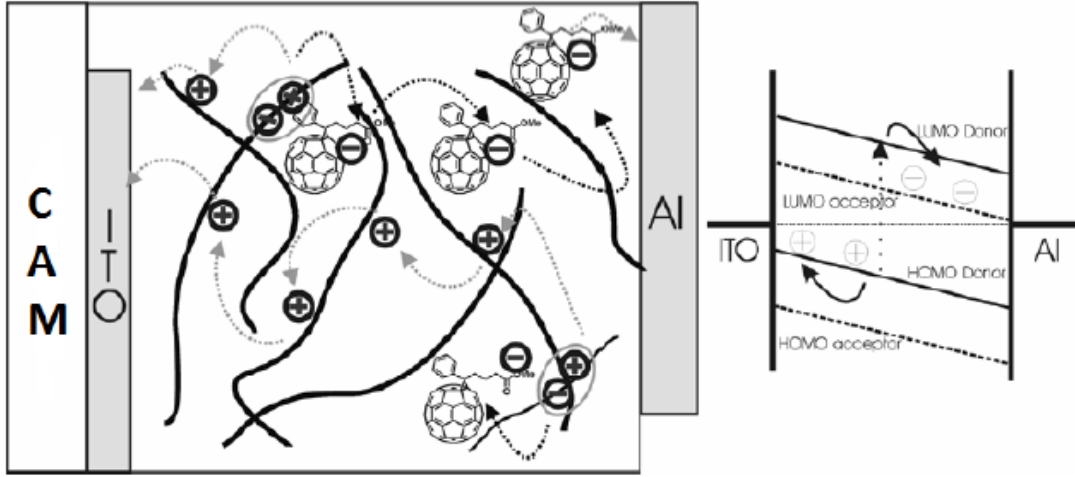
Elektron verici özellik taşıyan konjuge polimerin LUMO'undan elektron alıcı olan fullerenin LUMO'una elektronların fotoindüklenmesi sonucu yük taşıyıcılarının hareketi gözlemlenir. Yukarıda da belirtildiği gibi yük üretimi yani eksiton ayrımının verimli bir şekilde gerçekteşebilmesi için eksitonların, yaşam süreleri içerisinde alıcıya varmaları gerekmektedir. Bu süreçte eksitonların sayısı kadar mobiliteleri de önem taşımaktadır [57].

Yük ayrışmasından sonra verici ve alıcıya iletilen yük taşıyıcılarının, bu malzemelerin bulunduğu bölgenin iki tarafında bulunan negatif ve pozitif kontaklara ilerlemesiyle fotoindüklenmiş akım sağlanmış olur [83].

Hacim heteroeklem yapılarda, güçlü bir elektron alıcısı olması sebebiyle genellikle C_{60} fullereni kullanılmaktadır. C_{60} , fitalosiyenin gibi organik moleküller önceleri, organik çözücülerde çözünemeyip yalnızca süblimleştirilerek film oluşturabilirlerdi fakat günümüz teknolojisinde bu malzemelerin de fonksiyonlaştırılmasıyla çözünebilir hale getirildikleri görölmektedir.



şekil 2.13. Hacim heteroeklem yapıya sahip güneş hücresinin yapısı [84].



Şekil 2.14. Hacim heteroekleminin yapısının şematik gösterimi [85].

2.2.2.4. Çok Eklemlili Organik Güneş Hücresi Yaklaşımı

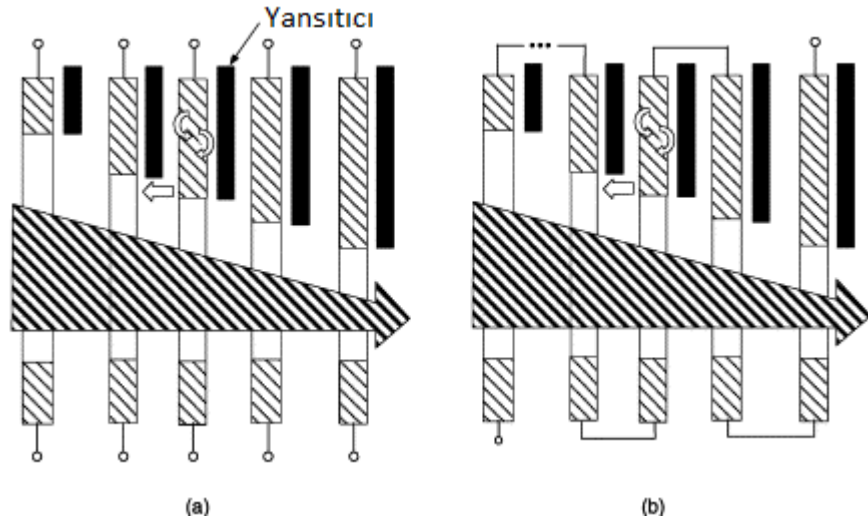
Güneş hücresi, içerdiği malzemenin band aralığına bağlı olarak elektromanyetik spektrumun belli frekans değerlerinde aktif göstermektedir. Dolayısıyla tek katmanlı hücre yapılarında kısıtlı bir frekans aralığında enerji elde ediliyor olacağından güneş spektrumun farklı enerji aralıklarına denk gelen farklı band yapılarına sahip pn eklemler birlikte kullanılarak daha yüksek verim elde edilebilmektedir. Çok eklemlili hücrelerin, gelen yüksek enerjili fotonlardan kaynaklanan ısı ve bundan dolayı artan iç direnç etkilerini azalttığı ve düşük enerjili fotonların da kullanımını sağlayarak verime katkıda bulunduğu bilinmektedir [86].

Çok eklemlili organik hücreler hazırlanış biçimine göre yığın hücreler ve tandem hücreler olarak ikiye ayrılır. Yığın hücrelerin yapısındaki her bir hücre için aynı malzemeler kullanılırken tandem hücrelerde farklı malzemeler kullanılmaktadır.

a. Yığın Hücreler (Stacked Cells)

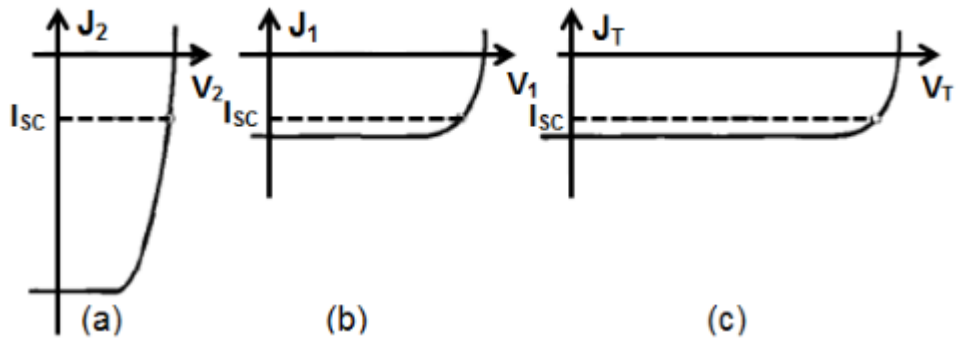
Verimi artırmak amacıyla aynı malzemeden yapılmış tek heteroeklemlerin, optik filtreler yardımıyla birbirinden izole olacak biçimde sıralanmasıyla oluşturulan yapılardır.

Yığılmış hücreler de alt hücrelerin bağlanma şekline göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi teorik olarak en yüksek verimin elde edildiği **mekanik olarak bağımsız hücreler**dir. Bu yapılarda her pn ekleminden ayrı ayrı çıkış alınmakta ve bu da pratiklik bakımından dezavantaj oluşturduğundan mekanik olarak bağımsız hücreler pek tercih edilmemektedir [76], [85], [86].



Şekil 2.15. Çok eklemlili hücrelerin a) Mekanik olarak bağımsız (unconstrained) uygulaması b) Monolitik (series constrained) uygulaması.

Bir diğer tür ise eklemlerin birbirine seri olarak bağlandığı **monolitik hücreler**dir. Seri bağlı hücrelerden elde edilen akım yoğunluğu en küçük akım yoğunluğuna sahip alt hücreninkine ile sınırlıdır. Bu durumun, mekanik olarak bağımsız hücrelere göre daha az akım çıkışına neden olarak bir dezavantaj barındırıyor olmasına rağmen toplam gerilim, seri bağlı hücrelerden alınan gerilimler toplamına eşit olduğundan toplam güç artmaktadır (Şekil 2.16) [86], [76].



Şekil 2.16. İki eklemlili monolitik pillerde a) E_g 'si küçük olan p-n eklemının J-V karakteristiği, b) E_g 'si büyük olan p-n eklemının J-V karakteristiği, c) Pilin J-V karakteristiği.

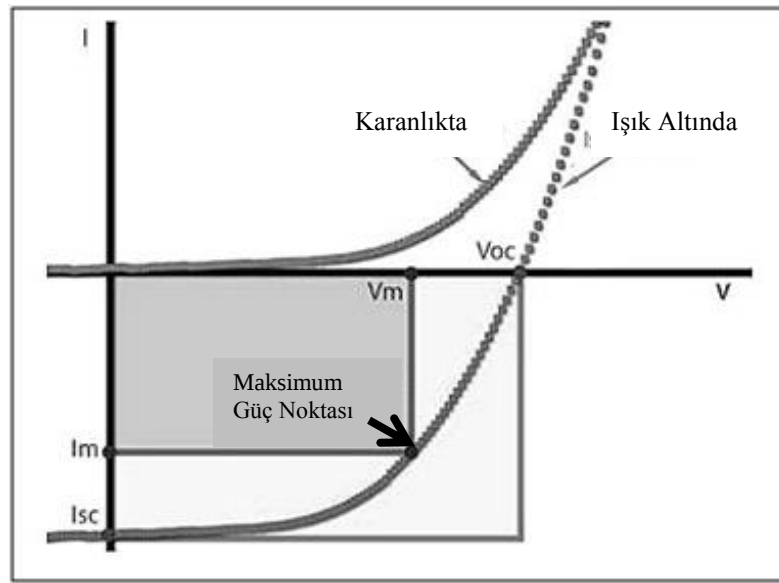
b. Tandem Hücreler

Farklı soğurma aralıklarına sahip malzemelerle hazırlanmış alt hücrelerin kullanılmasıyla elde edilen hücrelerdir. Alt hücreler en üstte yasak band aralığı en büyük olan hücre, en altta ise yasak band aralığı en küçük olan hücre bulunacak şekilde yerleştirilir. Bu sayede üstte bulunan hücre, band aralığından küçük enerjiyle gelen

fotonlar için transparan bir hal alarak alt hücrelere foton geçişine izin vermiş olup band aralığına eşit veya büyük enerjiyle gelen fotonları soğurarak eksiton oluşumunu gerçekleştirecektir [76], [80].

2.2.3. Organik Güneş Hücrelerinin Karakteristiği

Organik fotovoltaiik hücrelerin karakterizasyonunu sağlamanın en iyi yolu I-V grafiğinin incelenmesidir. Aygıt ışıksız ortamdayken Schottky diyot özelliği gösterir ve grafik eğrisi Şekil 2.17’ deki gibi orijinden geçer. Bu durumda herhangi bir eksiton oluşumu ve hücreden enerji eldesi söz konusu olmaz. Ancak aygıt güneş radyasyonu altında iken I-V grafiği negatif yönde ötelenecektir.



Şekil 2.17. Fotovoltaiik aygıt ve diyot için I-V grafiği.

2.2.3.1. Karakterizasyonda Kullanılan Terimler

Açık Devre Gerilimi (V_{oc})

Bir güneş hücresinden elde edilebilecek en büyük gerilim değeridir ve I-V grafiğinde, grafiğin gerilim eksenini kestiği değere eşittir. Dolayısıyla bu gerilim değerinde akım sıfırdır. Aygıtta, alıcının LUMO seviyesi ile vericinin HOMO’ su arasındaki fark açık devre gerilimini yani teorik maksimum gerilim değerini verir fakat ara yüzeyde eksiton oluşumu sırasında gelen düşük enerjili fotonlardan dolayı meydana gelen rekombinasyon kayıplarından dolayı gerçek ölçümlerde maksimum gerilim eldesi bu değer altındadır [83].

Açık devre geriliminin LUMO ve HOMO enerji seviyeleri farkıyla ilişkisi matematiksel

olarak

$$V_{OC} \approx \frac{1}{e} (|E_{HOMO}^{Donör}| - |E_{LUMO}^{Akseptör}|) \quad (2.33)$$

şeklinde ifade edilir. Burada e , temel yük birimini, $E_{HOMO}^{Donör}$, konjuge polimerin HOMO enerji seviyesini ve $E_{LUMO}^{Akseptör}$, fullerenin LUMO enerji seviyesini temsil etmektedir.

Kısa Devre Akımı (I_{SC})

Işık altındaki aygıtta herhangi bir dış potansiyelin uygulanmadığı durumda yani elektrotlar bağlantılı ve kısa devre halindeyken aygıttan sağlanan ve hücrenin üretebileceği maksimum değerdeki akımdır. Bu değer I-V grafiğinin akım eksenini kestiği noktadaki büyüklüğe eşittir. I_{SC} , güneş hücresinin yapısına, aktif tabaka malzemelerine, tabaka kalınlıklarına, kontak kaplama biçimlerine, hücreye düşen güneş radyasyonuna ve gelen ışın ile aygıtın yüzey normali arasındaki açığa bağlıdır. Güneş hücresinin veriminden bahsederken akımdan ziyade güneşin düştüğü birim yüzey başına düşen akım yoğunluğu (I_{SC}) kullanılır. Akım yoğunluğu;


$$I_{SC} = \frac{I_{SC}}{A} \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilir. Burada A güneş hücresinin yüzey alanını temsil eder.

Maksimum Güç Noktası (P_{maks})

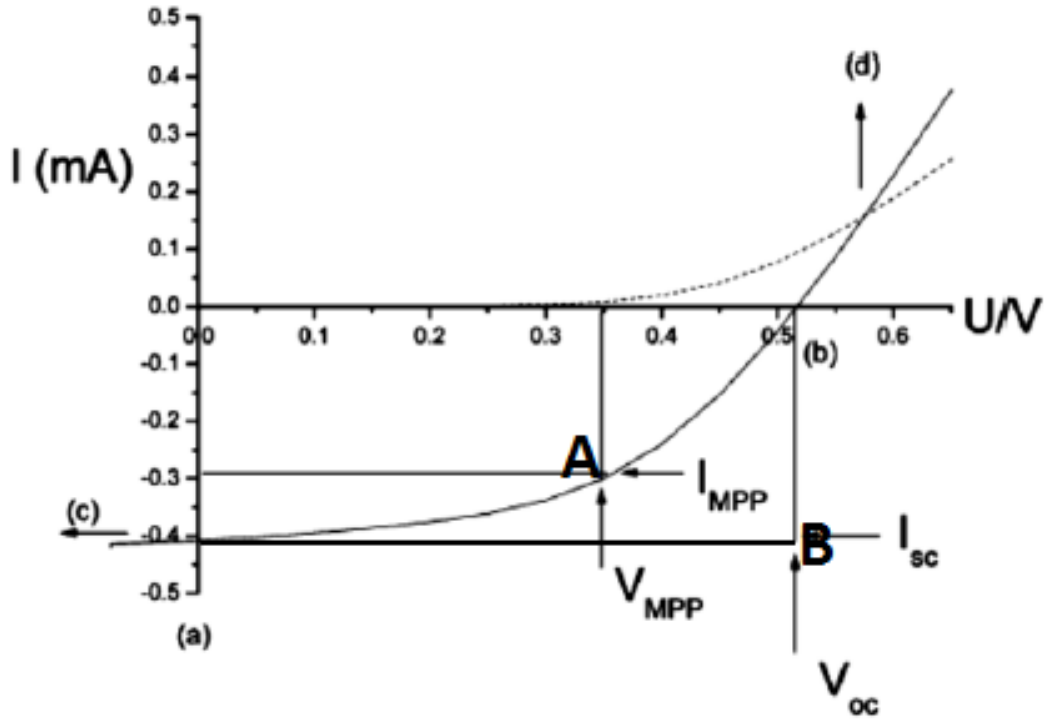
I-V grafiğinde teorik olarak maksimum gücün elde edildiği noktadır. Maksimum güç noktasının eksenlerdeki izdüşümüne denk gelen akım ve gerilim değerleri I_m , V_m şeklinde ifade edilir ve bunlar aygıtın karakteristik akım ve gerilim değerleridir.

$$MPP = I_{maks} \cdot V_{maks} \quad (2.35)$$

Dolum Faktörü (FF)

Aygıtın maksimum gücünün, kısa devre akımı ve açık devre geriliminin çarpımına oranıdır yani Şekil 2.18' de A noktasındaki akım ve gerilim değerleri çarpımının, B noktasındaki akım ve gerilim değerleri çarpımına (teorik güce) oranı şeklindedir. Dolum faktörü aynı zamanda A bölgesindeki virajın keskinliğinin (squarness) ölçüsüdür. Bu değer, güneş hücresinin ideal diyot niteliğine ne kadar sahip olduğunun bir göstergesidir.

$$FF = \frac{I_{maks} \cdot V_{maks}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2.36)$$



Şekil 2.18. Fotovoltaik hücrenin karanlık ve aydınlık ortamdaki karakteristiği.

Güç Dönüşüm Verimi (η)

Güneş hücresinin, 1,5AM spektrumu altında maksimum çıkış gücünün (P_{maks}) maksimum giriş gücüne (P_{in}) oranıdır. Diğer bir deyişle güneş hücresinin verimi, gelen radyasyon gücünün elektrik gücüne çevrilme yüzdesidir. Güç dönüşüm verimliliğinin de diğer parametreler gibi ortam sıcaklığı, gelen ışının dalga boyu ve şiddeti gibi faktörlerden etkileniyor olmasından dolayı, verim ifade edilirken ölçüm şartları belirtilmelidir.

$$\eta = \frac{P_{maks}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.37)$$

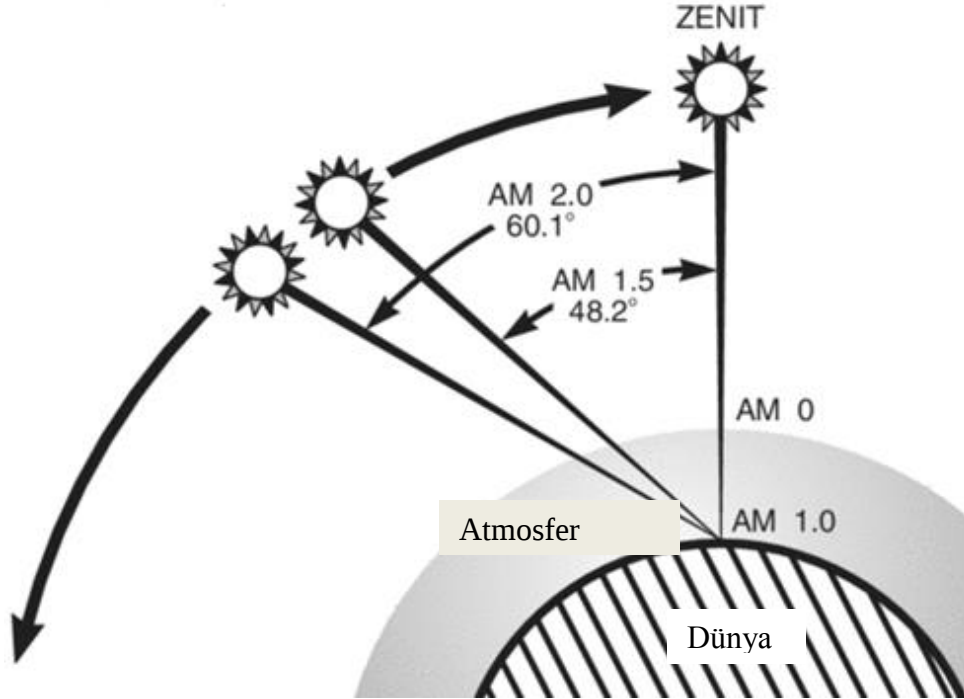
Burada P_{in} AM 1,5 güneş radyasyonu şiddetine karşılık gelen $1000W/m^2$ 'lik ışık gücüdür.

Hava Kütlesi (Air Mass)(AM)

Güneş ışığı yeryüzüne ulaşmadan önce atmosferde aldığı yolla doğru orantılı biçimde

hava ve toza maruz kalır bu nedenle de ışığın gücünde azalma meydana gelir ki bu azalma aynı zamanda güneş ışığının geliş açısına da bağlıdır. Dolayısıyla hava kütlesi, ışığın yeryüzüne varmadan önce atmosferde aldığı yoldur. Atmosferde ilerlerken ışığın gücünde meydana gelen azalma aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2.38)$$



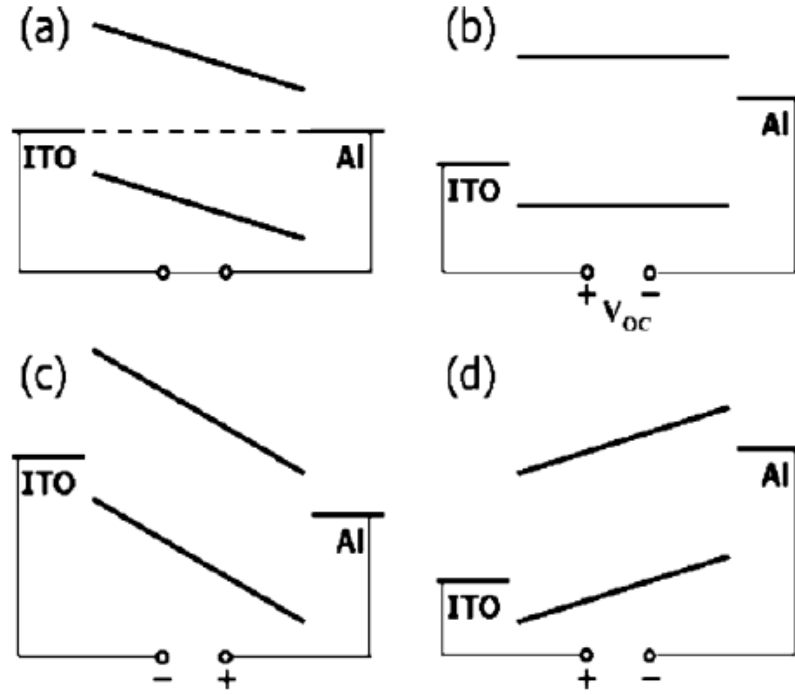
Şekil 2.19. Hava kütlesinin bazı değerleri.

Güneş hücresinin verimiyle ilgili yapılan ölçümlerde, güneşin yer normaliyle yaptığı açının 48° olduğu duruma karşılık gelen AM 1,5 kullanılmaktadır. Işığın gelme açısı arttıkça atmosferde aldığı yol ve dolayısıyla enerjisinin soğurulma miktarı da değişir ki bu spektrumda değişime neden olur.

2.2.3.2. Çalışma Prensipleri

Işık altında kısa devre durumunda (Şekil 2.20 a), elektrotların Fermi seviyeleri eşitlenir ve aktif tabaka içerisinde bir elektrik alan oluşur. Ardından elektronlar düşük iş fonksiyonlu elektroda, holler ise yüksek iş fonksiyonlu elektroda taşınır. Açık devre durumunda (Şekil 2.20 b), devre içerisinde herhangi bir alan oluşmayacağından yüklerin elektrotları taşınması da gerçekleşmez. Yüksek iş fonksiyonuna sahip elektrot pozitif kontağa, düşük iş fonksiyonuna sahip elektrot negatif kontağa bağlandığında sistem düz

beslem gerilim altındadır yani ileri yönde kutuplanmıştır (Şekil 2.20 c).



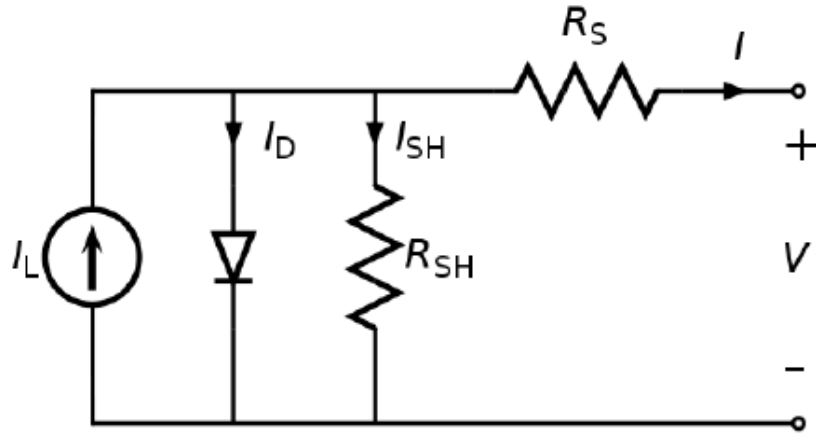
Şekil 2.20. Metal-organik yarıiletken-metal tabakalı sistemlerin farklı koşullarda çalışma prensipleri a) Kısa devre durumu b) Açık devre durumu c) Ters beslem gerilim durumu d) Düz beslem gerilim durumu (ITO: yüksek iş fonksiyonlu elektrot, Al: düşük iş fonksiyonlu elektrot).

Düz beslem gerilim altında elektronlar düşük iş fonksiyonlu elektrottan fullerenin LUMO' suna, holler yüksek iş fonksiyonlu elektrottan konjuge polimerin HOMO' suna taşınır. Aktif tabakadaki elektriksel alan sayesinde elektronlar yüksek iş fonksiyonlu elektrodada, holler ise düşük iş fonksiyonlu elektrodada geçer. Elektronların anottan katoda geçerken hollerle, hollerin katottan anoda geçerken elektronlarla birleşmesi durumunda foton yayılımı sağlanır bu da aygıtın LED olarak çalıştığını gösterir. Aygıt ters beslem gerilim altındayken yani, yüksek iş fonksiyonlu elektrot negatif kontakta ve düşük iş fonksiyonlu elektrot pozitif kontakta bağlandığında (Şekil 2.20 d), yük akışı içeride oluşan ters yönlü elektriksel alan nedeniyle engellenir. Aydınlatma ortamında yapı içerisinde oluşan yüksek elektriksel alan sayesinde yük taşıyıcılar elektrotlara ulaşır ve diyot, fotodedektör işlevi görür.

2.2.3.3. Eşdeğer Devre

Güneş hücrelerinin karakteristiklerini tanımlayan matematiksel ifadeler, bazı ihmallere yapılarak elde edilen ideal durumda eşdeğer devre modeli ile temsil edilerek basit ve

anlaşılır bir hale gelirler. Bu modelde ışık altındaki hücre tarafından üretilen ve aygıt içerisindeki gerilime bağlı olan fotoakım (I_L), fotoakım ile ters yönlü diyot akımı (I_D), aydınlık ortamda herhangi bir dış gerilim olmaksızın ideal devreden geçen akım ve diğer bir deyişle kaçak akım (I_{SH}), devreden geçen akım (I), devrenin iç direnci olan seri bir direnç (R_S), hücre içerisindeki olası kaçak akımı temsil eden paralel bir direnç (R_{SH}) ve bir gerilim kaynağı (V) yer alır (Şekil 2.21). Kısa devre akımının değeri (I_{SH}) gelen ışığın karakteristiği ile ilgilidir ve fotoakımın değeri (I_L)'ye oldukça yakındır. Seri direnç, elektrotların ve eklemenin omik katkıları ve malzemenin öz direncini kapsar [6], [87]–[89]. Verimi artırmak için bu direnç minimum seviyede tutulmalıdır. Hücre kalınlığını artırma, sıcaklığı azaltma ve ışık şiddetini optimize etme prosesleri sağlanarak seri direncin değeri azaltılabilir. Yine maksimum verim elde etmek için paralel direncin değerinin büyük olması sağlanmalıdır. Tabaka kalınlığını uygun düzeyde artırıp ışık şiddetini azaltarak paralel akımın artması sağlanabilir. İdeal bir fotovoltaiik hücrede seri direncin sıfır, paralel direncin sonsuz olması beklenir [86].



Şekil 2.21. Organik hücresinin eşdeğer devresi.

Devreden geçen akım I ; I_L , I_0 (karanlık doyum akımı), R_S , R_{SH} ve düzeltilmiş idealite faktörü a ' ya bağlıdır. Düzeltilmiş idealite faktörü,

$$a = \frac{N_{CS} \cdot n \cdot k_B \cdot T_C}{e} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_{CS} , seri bağlı göze sayısını, n , diyot idealite faktörünü, k_B , Boltzmann sabitini ve T_C , pilin mutlak sıcaklığını temsil etmektedir.

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.40)$$

Diyot akımı (I_D), soğurulan fotonlar yardımıyla hareket halinde olan elektron ve holler tarafından oluşturulan akımların toplamıdır. İletim bandına doğru olan elektron akımı ve valans bandına doğru olan hol akımının Boltzmann dağılımına göre matematiksel olarak

$$I_e = I_{eo} \left(e^{\frac{qV_D}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.41)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada I_{eo} , potansiyel bariyerini aşabilecek enerjiye sahip olan elektronların n tipi malzemeden p tipi malzemeye doğru oluşturduğu akımın büyüklüğüdür. Diyot özelliği taşıyan bir aygıtın, elektrik alan mevcut olmadığı durumda net akımının sıfır olması gerektiğinden bir karşı-akım oluşacağından daha önce bahsedilmiştir. Bu akım ve karşı-akımlardan n' den p' ye doğru gerçekleşen elektron akımı I_{eo} ' nin hesaplanması daha basit olduğundan, net elektron akımı bulunurken I_{eo} ' a bağlı (2.41) kullanılır. Benzer şekilde hol akımı da

$$I_h = I_{ho} \left(e^{\frac{qV_D}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.42)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda diyot akımı,

$$I_D = I_e + I_h = I_o \left(e^{\frac{qV_D}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.43)$$

olur.

Karanlık doyma akımı olan I_o , yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı malzemelerin bant yapısına ve sıcaklığa büyük ölçüde bağlıdır.

Güneş hücresinin eşdeğer devresinde Kirchhoff akımlar yasası kullanılarak, n diyot idealite faktörü olmak üzere, kısa devre akımı (2.45)' deki gibi elde edilebilir.

$$I_D = I_o \left(e^{\frac{qV_D}{n k_B T}} - 1 \right) = I_o \left(e^{\frac{q(V + I.R_s)}{n k_B T}} - 1 \right) \quad (2.44)$$

$$I_{SH} = \frac{V_D}{R_{SH}} = \frac{(V + I.R_s)}{R_{SH}} \quad (2.45)$$

(2.40) kullanılarak devreden geçen akım (2.46) ve (2.47)' de elde edilir.

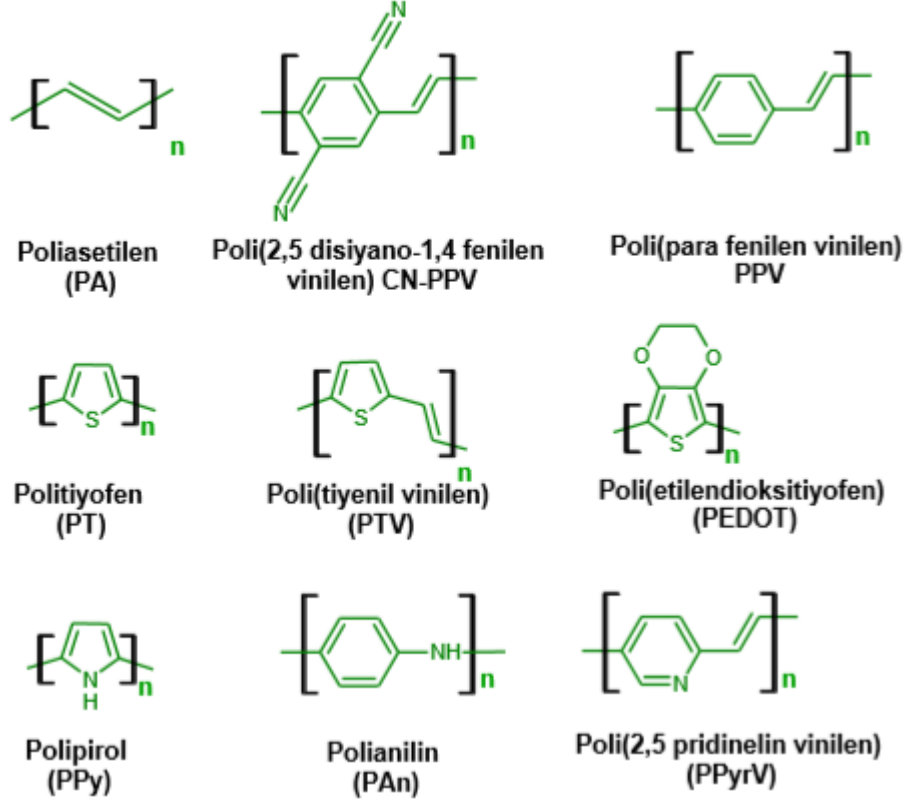
$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I.R_S)}{mk_B T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad (2.46)$$

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I.R_S)}{a}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{SH}} \quad (2.47)$$

2.3. KONJUGE POLİMERLER

Konjuge polimerler kolay işlenebilmeleri, esneklikleri, estetik görüntüleri, hafiflikleri ve inert (son orbitallerinin tamamıyla elektronla dolu olmasından dolayı reaksiyona girmeyen madde) olması sebebiyle oldukça avantajlı malzemelerdir. Ayrıca metallere göre daha hafif, ucuz ve şekillendirilebilir olmaları ve korozyona dayanıklı olmaları da oldukça önemli ve olumlu özelliklerdir. Bu özelliklerinden dolayı konjuge polimerler, elektriksel iletkenlik ve mekanik özellikleri bakımından avantajlı olan metallerle birlikte kullanılarak aygıt teknolojilerinde organik ışık yayan diyot (OLED), organik fotovoltailer (OPV), organik güneş hücreleri (OSC), elektrokromik camlar (ECD), biosensörler, organik fotodedektörler (OPD), organik ince film transistörler (OTFT) gibi nice çalışma alanının oluşmasını sağlamıştır. Polimerler iyi yalıtkanlar olarak bilindiğinden bu alanda yapılan ilk çalışmalar, polimerlerin içine metal tozları gibi yapılar katılarak iletkenliğin bu metal yapılar üzerinden sağlanmasıyla oluşturulmuştur. Polimer içerisinde uygun tuzların çözülmesiyle iletkenliği iyonlarla sağlamak da ilk yapılan çalışmalar arasında yer almıştır. Bu iki yöntemle, kısıtlı bir düzeyde iletkenlik sağlanmaktadır çünkü burada polimerler iletken görevinde değil iletken malzemeleri (metal tozları veya iyonlar gibi) bağlayıcı bir yalıtkan niteliğindedir. Polimerin elektron iletiminde yardımcı değil aktif rol oynayabileceği ilk kez poliasetilenin metalik özelliklerinin keşfedilmesi ile ortaya çıkmıştır. İletken polimerlerle ilgili ilk çalışmalar 1950' lerde başlamış ve 1977 yılında Shirakawa yöntemiyle üretilen poliasetilenin iyot, flor veya klor buharına tutularak yükseltgendiğinde polimerin iletkenliğinin tera (10^9) mertebesinde arttığı görülmüş ayrıca bu çalışma Heeger, MacDiarmid ve Shirakawa' ya 2000 yılında kimya dalında Nobel ödülü getirmiştir [90]. Polimerlerin iletkenliği üzerine yapılan çalışmalar sonucunda atılan en büyük adım pirolün elektrokimyasal prosesle yükseltgenmesi sonucunda 100S/cm iletkenliğe sahip polipirol üretimi olmuştur [91]. Polipirol, hem kimyasal hem de elektrokimyasal yolla kolaylıkla sentezlenebilir iletkenlik bakımından

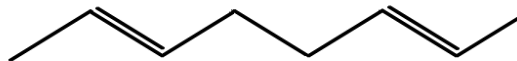
oldukça niteliklidir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta kararlılığını koruması nedeniyle de diğer polimerlere üstünlük sağlamaktadır. Günümüzde polipirol temelli lifler, polipirol karbon tozları ve polipirol kaplı lifler ticari olarak mevcuttur. Ayrıca polianilin, politiyofen, poli(N-vinil karbazol) gibi çok sayıda iletken polimer de aygıt teknolojisinde kullanılmak üzere geliştirilen ticari ürünlerdir [92].



Şekil 2.22. Literatürde sık rastlanan konjuge polimerler.

2.3.1. İletken Polimerlerin Yapısı

Polimerlerin elektriksel iletken olması, ana zincirinde konjuge çift bağ bulunduran polimerlerde elektronların polimer zinciri boyunca iletilmesinin sağlandığı durumda gerçekleşir. İletken polimerlerin art arda tek çift bağlardan (T-Ç-T-Ç..) oluşan zincir yapısına konjugasyon adı verilir ve bu nedenle iletken polimerler konjuge polimer olarak da ifade edilebilir.



Şekil 2.23. Poliasetilenin konjugasyonu.

Her tek bağ, sp^2 hibrit orbitallerinden meydana gelen oldukça kuvvetli bir bağ olan sigma(σ) bağından oluşurken çift bağlı kısımlarda sigmaya ek olarak, birer elektron tarafından işgal edilmiş p_z orbitallerinin bir araya gelmesiyle oluşan ve daha zayıf bir bağ olan pi(π) bağı bulunur. Bir malzemenin elektriksel ve optik özellikleri, bağlayıcı π -orbitali ve antibağlayıcı π^* -orbitali arasındaki farka bağlıdır. Bu bağlayıcı ve anti bağlayıcı orbitaller diğer iletken yapılardakine benzer biçimde sırasıyla valans ve iletkenlik bantlarına eşit olduğundan bu bağlayıcı π -orbitali ve antibağlayıcı π^* -orbitali arasındaki enerji farkına band aralığı da denmektedir. Üst üste binen iki p_z orbitalinden oluşan bağlayıcı π -orbitali daha düşük enerjiye sahip olduğundan valans bandı ve daha yüksek enerji seviyesine sahip olan antibağlayıcı π^* -orbitali iletim bandı özelliğindedir. Konjuge polimerlerdeki band aralığı 2 eV civarındadır. Si band aralığının 1eV Ge band aralığının 0,7 eV olduğu göz önünde bulundurulduğunda organik sınıftaki konjuge polimerlerin inorganik Si ve Ge'ye göre dezavantajlı olduğu görülmektedir. Bu dezavantajın nedeni band aralığının büyük olmasının soğurma spektrumunda kısıtlılığa neden olmasıdır [76].

Yukarıda konjugasyonun, polimerin iletkenliğini sağlamadaki önemli etki ve işlevinden bahsedilmişti fakat polimerin konjugasyonu iyi iletkenlik için tek başına yeterli değildir. Polimere katkılama (dopant) yapılarak içerisindeki elektron ve hol sayısının artırılmasıyla iletkenlik artırılabilir.

Polimerlerin valans bandlarında genellikle hol çoğunluğu olduğundan birçok polimer hol iletkenidir yani p tipi (alıcı) malzemedir.

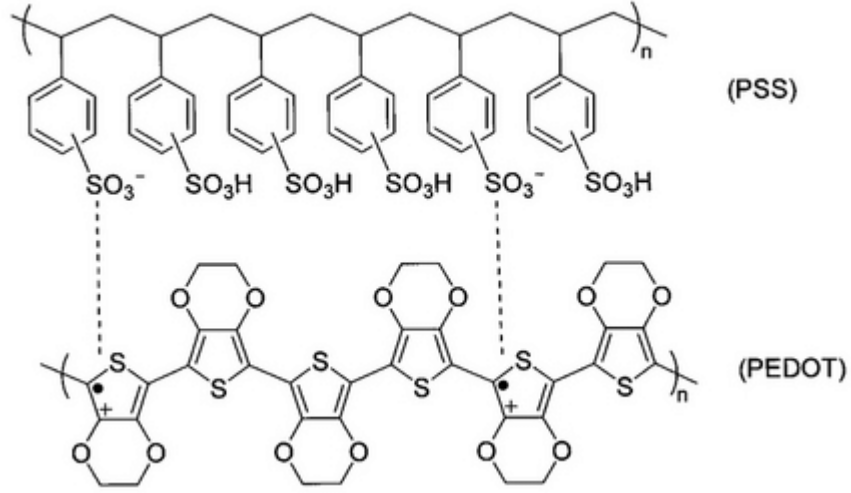
2.3.2. Kullanılan Malzemeler

2.3.2.1. PEDOT:PSS

Oksidasyona karşı dayanıklı olması ve nazaran düşük band aralına sahip olması bakımından diğer polimerlerden sağlanamayacak nitelikte optik ve elektrokimyasal özelliklere sahip olmasından dolayı literatürde adına sıkça rastlanan bir polimerdir. Çok yüksek iletkenliğe (yaklaşık 200S/cm) ek olarak PEDOT' un ince, oksitlenmiş durumda neredeyse transparan bir görünümde olduğu bulunmuştur.

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) kombinasyonu ise iyi bir film oluşturma özellikleri, yüksek iletkenlik (yaklaşık 10 S/cm), geniş spektrum geçirgenliği ve mükemmel stabiliteye sahip suda çözünür bir yük taşıma

katmanı özelliğindedir. PEDOT:PSS filmleri, iletkenlikte sadece minimum bir değişiklikle 100°C’de 1000 saat boyunca ısıtılabilir. PEDOT’ un band aralığı, spektrumun görünür ve kızılötesine yakın bölgeleri arasındaki geçişte bulunduğu için, PEDOT oksijenle temasında geniş geçirgenliğe sahip olup transparan görünüme yakın ve mavi renktedir.



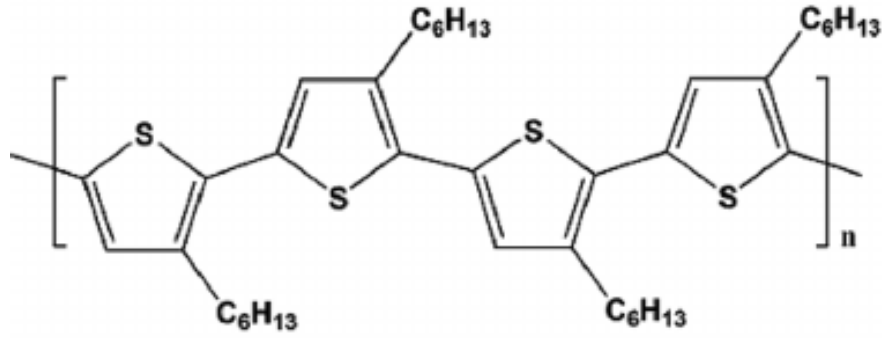
Şekil 2.24. PEDOT:PSS’ in molekül yapısı.

PEDOT’ un sulu ortamdaki çözünmez doğası nedeniyle filmlere dökülme olasılığı düşük olsa da, PSS ile sentezlenmesi iyi dağılmış sulu çözelti oluşturur bu da uygulama bakımından kolaylık sağlamaktadır. PEDOT:PSS özellikle anodun ITO olduğu aygıtlarda hol taşıyıcı katman olarak kullanılmaktadır ve oldukça yaygın kaplama yöntemlerinden damlatma, spin coating (döndürerek kaplama), sputtering (püskürtme), screen printing (film baskı), inkjet printing (inkjet baskı) ve elektrospinning gibi yöntemlerle istenilen yüzeye kaplanılabilmektedir. Aygıt üretiminde kullanılan camın ITO kaplı yüzeyinde, kaplama yöntemlerinden ve sürecinden kaynaklı olarak meydana gelen yüzey kusurları da PEDOT:PSS tabakası sayesinde uygun hale getirilmektedir. Kusurların boyutu ve konumu aygıt performansını büyük ölçüde etkileyebileceğinden PEDOT:PSS katmanının bu işlevi de hafife alınmayacak niteliktedir. Fakat PEDOT:PSS’ in asidik yapısı ITO’ yu aşındırıp kimyasal yapısında istenmeyen durumlara yol açabildiği bilinmektedir. PEDOT:PSS’ in bir diğer dezavantajı ise elektriksel düzensizliği nedeniyle pozitif elektrotta yani anotta elektron sızıntısı oluşturabilmesidir. Bu durum elektron engelleme yeteneğini sınırlayabilmekte ve böylece anotta elektron sızıntısına yol açabilmektedir. Diğer polimer yapılarına göre daha iletken olduğu bilinen bu kombinasyon bile henüz istenen elektriksel iletkenliği

gösteremediğinden, organik çözücüler veya dopand kullanılarak günümüzde ITO/PEDOT:PSS ara yüzeyinin iletkenlik ve morfolojik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine bir çok çalışma sürdürülmektedir [93].

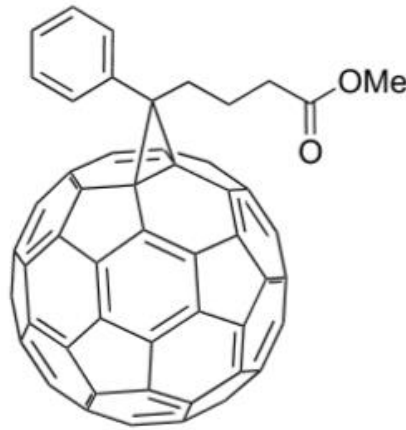
2.3.2.2. P3HT:PCBM

P3HT, organik güneş hücrelerinde iyi bir elektron verici ve bilinen en yüksek hol mobilitesine sahip polimerlerden biridir.



Şekil 2.25. P3HT'nin kimyasal yapısı.

PCBM ise çözücü uygulanarak hazırlanan organik fotovoltaiik hücrelerde kullanılan Buckminsterfulleren' in (C_{60}) çözülebilen bir türevi olup en başarılı elektron alıcı malzemelerden biridir.



Şekil 2.26. PCBM' in kimyasal yapısı.

P3HT:PCBM' in aktif tabaka olarak kullanıldığı hücrelerde güç dönüşüm verimliliğinin iyi düzeyde olduğu bilinmektedir. Organik güneş hücresi teknolojisinde çok tercih edilir bir kombinasyon olmasının nedenlerinden bazıları yüksek hol mobilitesi, kristal

özelliklerinin düzgün olması, yüksek kararlılık ve absorbands spektrumunun geniş olması olarak ifade edilebilir.

P3HT ile PCBM ilk olarak 2003 yılında J.C. Hummelen vd. , tarafından karıştırılarak %0,2 güç dönüşüm verimliliğine (η) sahip fotovoltaiik hücre elde etmişlerdir [94]. η , fotovoltaiik hücreden çıkan enerjinin, fotovoltaiik hücreye giren enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır. P3HT ve PCBM' in ilk karıştırıldığı dönemde, genellikle PPV [poli (p-fenilenvinilen)] esaslı verici (donör) malzemeler ile PCBM, 1:4 oranında karıştırılarak kullanılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar sonucu, P3HT:PCBM karışımının daha gelişmiş bir absorbsiyon sağladığı belirlenmiştir. Bu nedenle verici (donor) malzeme olarak P3HT' nin kullanımı daha yaygınlaşmıştır. Aynı yıl F. Padingger vd. , P3HT:PCBM karışım oranını 1:1 oranında değiştirerek ve fotoaktif tabakayı 4 dakika süreyle 75°C' de tavlایarak verimi %3,5 olarak geliştirmişlerdir. İzleyen süreçte C. J. Brabec, D. A. Carroll, Y. Yang, D. D. C. Bradley, G. C. Bazan, ve A. J. Heeger gibi çeşitli araştırmacılar ısıt işlemler veya çözücü buharlaştırma yöntemleri ile aygıt verimini arttırmayı sürdürmüşlerdir. 2008 yılında Konarka Teknolojileri A.Ş. tarafından P3HT:PCBM esaslı fotovoltaiik hücrelerin verimi %5' in üzerine çıkarılmıştır [95].

2.3.3. Katılarda Enerji Bantları ve Yapılarının Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi

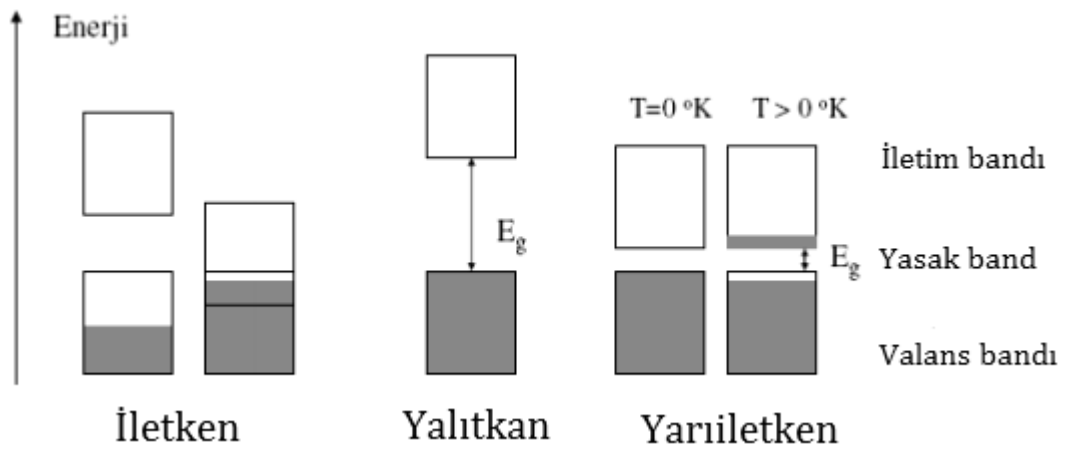
Birbirinden sonsuz uzaklıkta bulunan izole edilmiş atomlar birbirinden bağımsızdır ve atomik enerji seviyeleri bağımsız olarak incelenir. Ayrıca uzaydaki, yani herhangi bir alan etkisinde bulunmayan bir elektronun (serbest elektron) enerji seviyeleri serbest elektron modeli kullanılarak araştırılır. Schrödinger denklemi, serbest elektron için çözüldüğünde elektronun mümkün enerji düzeylerinin kesikli değil sürekli olduğu görülür ki bu da elektronun herhangi bir enerji seviyesinde bulunabileceği anlamına gelmektedir [50].

Atomik bir orbitalde bulunan elektron içinse durum farklıdır. Yörünge elektronu ile atom çekirdeği arasında Coulomb etkisi vardır ve bu etki dolayısıyla elektron, bulunduğu yörünge'nin çekirdeğe olan uzaklığıyla eksponansiyel olarak azalan bir elektriksel potansiyel altında kalır. Bu olası ve kuantize yörüngeler, Schrödinger denkleminin çözümüyle bulunur [96].

Atomların birbirine yeterince yaklaşmasıyla bahsedilen yörüngeler üst üste gelmeye başlar. Pauli dışarlama ilkesi gereği aynı orbitalde aynı kuantum sayılarına sahip birden fazla elektron bulunamayacağından sözü geçen enerji düzeylerinde yarılmalarda meydana

gelir. Atomların ayrı ayrı izole haldeyken sahip oldukları enerji seviyeleri, yarılmalara sonucunda birbirine yakın mesafede çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Kısıtlı bir genişlikte süreklilik sağlayan bu enerji seviyeleri ‘enerji bandı’ adını alır.

İzinli enerji bantları arasında elektronların işgal edemeyeceği enerji seviyelerini içeren aralıklar da ‘yasak enerji bandı’ olarak isimlendirilir. Katıların band yapılarında, atomik seviyede olduğu gibi elektronlar, düşük enerji seviyelerinden başlayarak üst enerji seviyelerine doğru dolarlar. Temel (uyarılmamış) halde bulunan katının elektron içeren son bandına ‘valans(değerlik) bandı’, bu bandın hemen üzerindeki banda ise ‘iletkenlik bandı’ ismi verilir. Bu iki band katı malzemenin. Bir katı için temel halde elektron içeren en son bant valans veya değerlik bandı olarak adlandırılır. Valans bandının bir üstünde yer alan bant ise ‘iletkenlik bandı’ adını alır. Katıların elektronik ve optik özellikleri veya iletkenli türleri (iletkeni yarıiletken, yalıtkan) atomlarının son yörünge elektronları veya enerji bandı bakımından söylenecek olursa valans ve iletim bantları tarafından belirlenir. İletken malzemelerde kısmen dolu bir valans bandı ve tamamen boş bir iletim bandı bulunur. Bu durumda valans bandında bulunan elektronlar malzeme boyunca rahatlıkla hareket edebilirler. Ayrıca iletkenlerde valans ve iletim bandının örtüştüğü durumlar da söz konusudur, bu durumda valans bandının üst kısmındaki elektronlar iletkenlik bandının alt kısımlarına geçerek malzeme boyunca iletkenlik bandı üzerinden hareket edebilirler (Şekil 2.1) [97].



Şekil 2.27. Katı yapıların enerji bandı şeması.

Yalıtkanlarda valans bandı tamamen dolu, iletkenlik bandı ise tamamen boştur. Bu durumda elektronların serbest hareket etmesi için valans ve iletkenlik bantları arasındaki yasak enerji bandını aşarak iletkenlik bandına geçmesi gerekir. Fakat yalıtkan malzemelerin yasak enerji bant aralıkları çok geniş olduğundan elektronun band geçişi

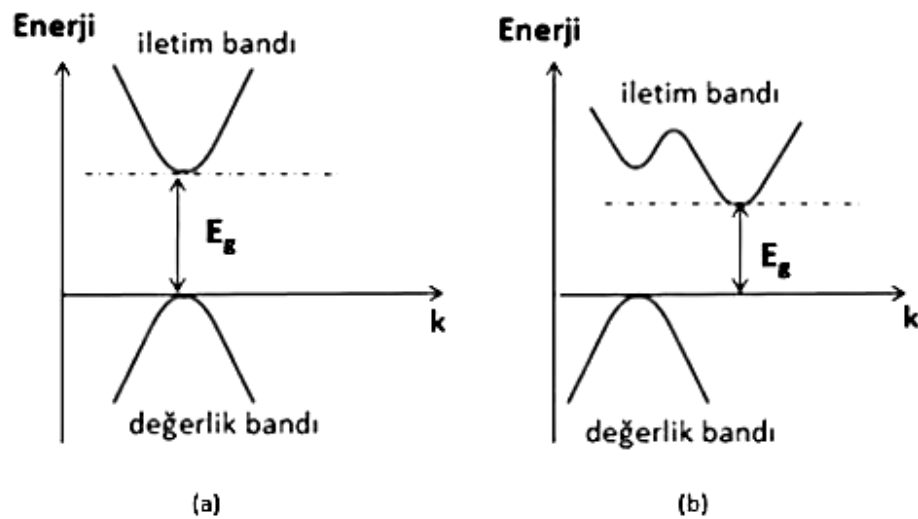
söz konusu değildir. Bu nedenle yalıtkanlarda elektriksel iletim sağlanamamaktadır [98].

Yarıiletkenlerin bant yapısı da mutlak sıcaklıkta, yalıtkanlarına benzer biçimde, valans bandı tam dolu iletim bandı ise boş olacak şekilde elektronlar tarafından işgal edilir. Fakat yarıiletken malzemelerin yasak enerji bant aralığı yalıtkanlarına göre küçük olduğundan enerji bantları arasında elektron geçişleri fotouyarılma, malzemeye ısı aktarımı yapılması veya elektrik alan uygulanması gibi dış uyarmalarla sağlanabilir.

Elektronlar uyarılma sonucu alt veya üst enerji seviyelerine geçerken; elektronların dalga vektörü k , hem valans bandının maksimumu hem de iletim bandının minimumunda aynı değere denk gelmediğinde momentumun korunması için fononlara (kristal titreşimleri) ihtiyaç duyulabilir. Bu durumda elektronların fononlar ile momentum alışverişleri söz konusu olur.

Bant geçişleri sırasında elektron-fonon momentum alışverişinin gerçekleşmediği bantlara ‘direkt(doğrudan) geçişli bant’ ismi verilir ve bu bant yapısına sahip yarıiletkenler direkt yasak enerji aralıklı yarıiletkenler olarak isimlendirilir. Direkt geçişlerde optik verim yüksektir bu nedenle bu yapıdaki yarıiletkenler ışık üreten aygıt teknolojilerinde sıkça tercih edilirler [98], [99].

Elektron-fonon momentum alışverişinin gerçekleştiği bant yapılarına ise ‘indirekt (doğrudan olmayan) geçişli bant’ ve bu bant yapısına sahip yarıiletkenlere indirekt yasak enerji aralıklı yarıiletkenler denir. İndirekt geçişler verimli olmadığından bu tip malzemeler ışık üretiminde pek tercih edilmezler.



Şekil 2.28. Yarıiletkende a) Direkt, b) İndirekt band geçişi.

Endüstriyel sahada sık tercih edilen Si ve Ge yarıiletkenleri saf hallerinde kullanılmak yerine katkılanarak valans bandı enerji seviyesi yukarıya veya iletkenlik bandı enerji seviyesi aşağıya çekilir. Valans bandı yukarı çekildiğinde kristalde yük taşınımı holler tarafından gerçekleştirilir ve kristal, elektron alıcı özellik kazanır bu şekilde oluşan yapı p-tipi yarıiletken adını alır. İletkenlik bandının aşağıya çekilmesiyle ise kristalin valans bandının üst kısmındaki elektronların iletim bandına geçmesi kolaylaşarak serbest elektron sayısı artar ve kristal elektron verici özellik kazanır, oluşan yapı n-tipi yarıiletken ismini alır. Yapılan tez çalışmasında Si, Ge veya bu yarıiletkenlerin katkılanmış halleri yerine organik yarıiletken malzemeler kullanılmış ve bu yapılarla ilgili detaylı bilgi 2.3’ de verilmiştir.

Katı yapılarda diğer fazlardaki yapılara göre kinetik enerji oldukça küçüktür ve bu nedenle moleküller birbirine daha yakın ve daha bağlıdırlar. Bu durumun istikrarından dolayı moleküllerin dağılımı daha periyodik, homojen ve tahmin edilebilir üç boyutlu bir dizilime sahip olabilir. Atom dizilişlerinin düzensiz olduğu amorf malzemeler (cam, teflon, polietilen vb.), elektronik aygıtları elektromanyetik alandan kaynaklı bozulmalara karşı koruma amacıyla tercih edilirken elektronik aygıt üretiminde, periyodik elektrik potansiyeline sahip olmalarından dolayı kristaller kullanılır. Kristal malzemeler atom veya moleküllerin düzenli dizilimiyle oluşur ve tüm yapı boyunca düzenli atom dizilişi görüldüğünden dolayı özellikle tek kristaller elektronik endüstrisinde oldukça tercih edilmektedir. Diğer kristal türü olan polikristaller ise cm mertebesinde düzgün sıralanmış ve birbirinden ayrı geometrik kristal bölgelerin bir araya gelmesiyle oluşur. Kristallerdeki her atom elektronları çekmek üzere birer lokal potansiyel kuyusu oluşturur ve kristalin sahip olduğu periyodik atom diziliminden dolayı atomlar elektronlar periyodik bir potansiyele maruz kalır. Bu periyodik potansiyelin değeri ve elektronun bu sahip olacağı potansiyel enerji, elektronun atom çekirdeğine olan uzaklığına (2.48)’ deki gibi bağlıdır [50].

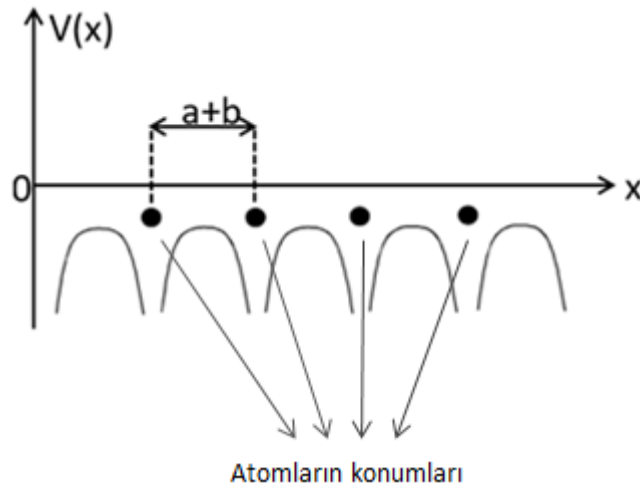
$$V_x = \frac{-Zq^2}{4\pi\epsilon|x|} \quad (2.48)$$

Elektronun elektriksel potansiyel enerjisi, etkisi altında bulunduğu çekirdeğe ait atom numarasıyla (Z) doğru orantılı olup x değeri ile yani elektronun çekirdekten uzaklaşmasıyla azalır fakat bir çekirdekten uzaklaştıkça diğer bir çekirdeğin etkisi altına gireceğinden periyodiklik korunur. Ayrıca malzemenin elektriksel geçirgenliğindeki (ϵ)

artış, elektronun sahip olacağı potansiyel enerji değerini azaltır.

Tüm bu faktörlere bağlı olarak elektronun maruz kaldığı periyodik potansiyel (2.49) eşitliği ile verilir ve kristalin üç boyutlu yapısı içerisindeki potansiyel kavramı tek boyutta incelenerek Şekil 2.29’ deki gibi bir grafik ile daha sade bir çözüm sağlanıp sonrasında üç boyutlu denklemlere geçiş yapılabilir.

$$V(x + a + b) = V(x) \quad (2.49)$$



Şekil 2.29. Bir boyutlu kristalde potansiyelin periyodikliği.

Elektronun kristaldeki enerji durumları tek boyutta Schrödinger denklemi çözülerek detaylı biçimde incelenebilir.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) + V\psi - E\psi = 0 \quad (2.50)$$

Potansiyelin periyodikliği, elektrona periyodik bir potansiyel enerji kazandırır. $a+b$, iki atom arasındaki mesafe olmak üzere dalga fonksiyonu ve potansiyel enerji arasında aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

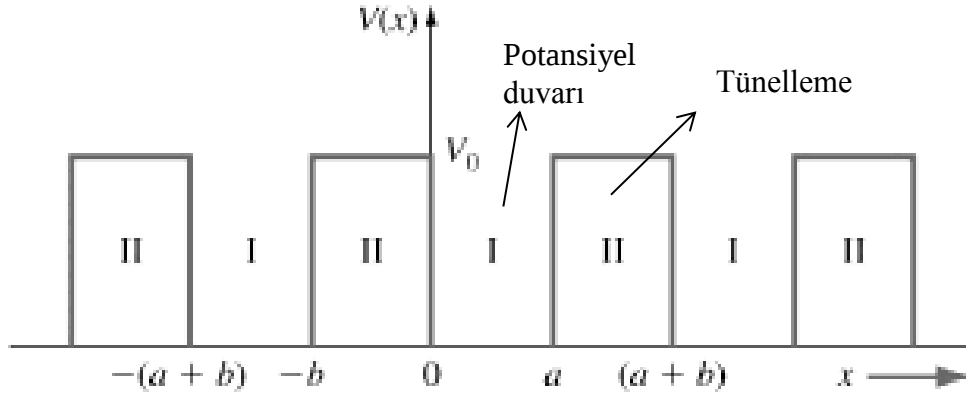
$$\psi(x) = u(x)e^{ikx} \quad (\text{Bloch Fonksiyonu}) \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} \psi(x + a + b) &= u(x + a + b)e^{ik(x+a+b)} = u(x)e^{ikx}e^{ik(a+b)} \\ &= \psi(x)e^{ik(a+b)} \end{aligned} \quad (2.52)$$

Bloch fonksiyonu, Schrödinger denkleminde dalga fonksiyonunun periyodik potansiyel için periyodik değer alması gerektiğini ifade eder. Kristalin periyodik yapısının çözülmesi

için Schrödinger denkleminin kullanması gerektiğini öngören teori de Bloch teorisi ismini alır.

Schrödinger dalga denkleminin kristaldeki $V(x)$ potansiyel fonksiyonu kullanılarak çözümü nazaran karmaşık olduğundan, kristalin izinli ve yasak band aralıklarını bulmada Kronig-Penney yaklaşımı kullanılır. $V(x)$ potansiyeli yerine periyodik dizilmiş potansiyel kuyu modelinin kullanıldığı bu yaklaşım ile Schrödinger dalga denklemini çözüldüğünde hangi enerji seviyelerinin izinli band aralığında yer alacağı ortaya çıkar, denklem çözümünü sağlayan enerji seviyeleri izinlidir.

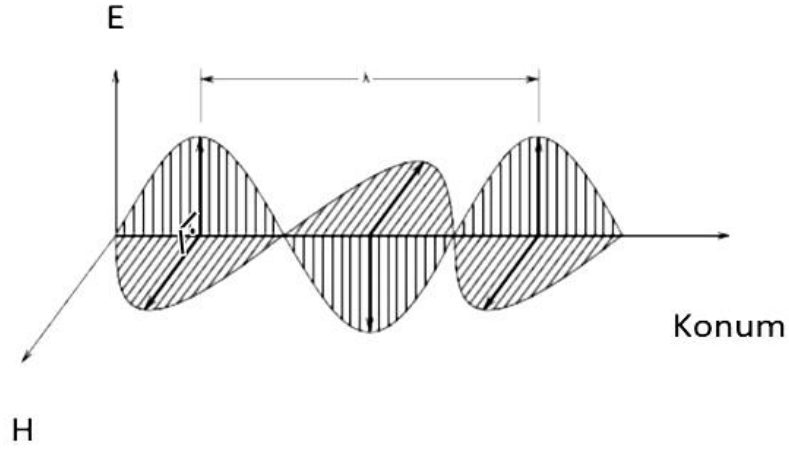


Şekil 2.30. Kronig-Penney modelinin bir boyutta periyodik potansiyeli.

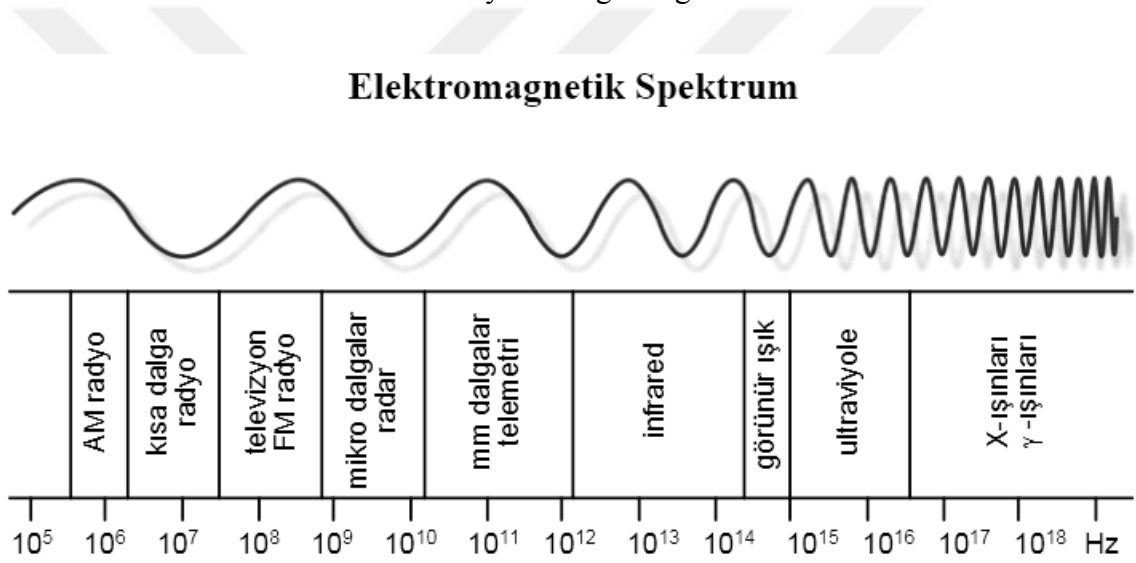
2.3.3.1. Optik Geçirgenlik Spektroskopisi

Elektromanyetik Dalgalar

Uzayda birbirine dik elektrik ve manyetik alanların kombinasyonu şeklinde ilerleyen enerjiye elektromanyetik radyasyon diğer bir deyişle elektromanyetik dalga denir (Şekil 2.31). Elektromanyetik dalgalar oldukça aşına olduğumuz görünür bölge (7×10^{14} ile 4×10^{14} Hz arası), gama ışınlarına kadar uzanan daha yüksek frekanslı dalgalar ve radyo dalgalarına kadar uzanan daha küçük frekanslı elektromanyetik dalgalardan oluşan bir spektrum oluşturur (Şekil 2.32.)



Şekil 2.31. Elektrik alan E, manyetik alan H ve dalga boyu λ bileşenleri ile bir elektromanyetik dalganın gösterimi.



Şekil 2.32. Elektromanyetik spektrum.

Şekil 2.32' den anlaşıldığı gibi görünür ışık, spektrumun $0,4 \mu m$ ile $0,7 \mu m$ arasındaki dalgalırlarını kapsayan çok dar bir bölgede bulunur. Görünür bölgedeki ışının rengi dalgalırlarına bağılıdır. Tüm elektromanyetik dalgalar boşlukta aynı hıza ($3 \times 10^8 m/s$) sahip olduğundan ışının dalgalırları arttıkça hızın korunması gereğı frekansı azalacağından daha büyük dalgalırlarına sahip ışınların daha düşük enerjili olduğu (2.53) ve (2.54)' ten çıkarılabilir. Dolayısıyla daha büyük dalgalırlarına sahip kırmızı ışınım, daha küçük dalgalırlı ışınım olan mor ışınımına göre daha az enerji taşımaktadır. Spektrumun tamamı ele alınacak olursa en yüksek frekanslı ve en yüksek enerjili elektromanyetik dalga γ (gama) ışınması, en düşük enerjili olan ise radyo dalgalarıdır. Beyaz ışık ise tüm bu görünür bölge spektrumunu kapsayan ışınımır. Görünür bölge

dışındaki yani kırmızıötesi (kızılötesi) ve morötesi ışımlar isimden de anlaşılacağı üzere insan gözü tarafından algılanamamaktadır. Işık hızı,

$$c = \lambda \nu \quad (2.53)$$

şeklinde ve enerjisi,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.54)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada h Planck sabitini temsil etmektedir.

c değerinin tüm elektromanyetik dalgalar için aynı değere sahip olduğunu biliyoruz. Bu değer matematiksel açılımı (2.55)' deki gibidir. ϵ_0 , boşluğun elektriksel geçirgenliği; μ_0 , boşluğun manyetik geçirgenliğidir.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.55)$$

Elektromanyetik Dalgaların Vakum Altındaki Davranışı

Elektromanyetik dalgaların madde içerisindeki ilerleyişine geçmeden önce vakum ortamındaki davranış kavranmalıdır.

Aşağıdaki işlemler sırasıyla takip edildiğinde uzayda yani vakum ortamında elektromanyetik dalgaların yukarıda ifade edilen hız büyüklüğüne nasıl ulaşıldığı görülmektedir. Vakum şartları için Maxwell denklemleri yazıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2.56)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.57)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.58)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.59)$$

Burada (2.58) ' nin rotasyoneli alınır ise

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (2.60)$$

elde edilir. Manyetik alanın rotasyoneli (2.59) , (2.60)' da yerine konulursa

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right] \quad (2.61)$$

elde edilir. (2.61) eşitliğinin sol kısmı açılacak olursa

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla \cdot (\nabla \mathbf{E}) \quad (2.62)$$

eşitliğinden,

$$-\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla \cdot (\nabla \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right] \quad (2.63)$$

olur. Boş uzaydaki yük yoğunluğu $\rho=0$ olduğundan $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ dır.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.64)$$

$\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}$ 'ye bağlı genel dalga denklemi

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.65)$$

şekline dönüşür. Buradan (2.64)' nin üç boyutta dalga denklemi formunda olduğu görülür. c , ışığın boşlukta ilerleme hızı v ' de yerine konacak olursa;

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.66)$$

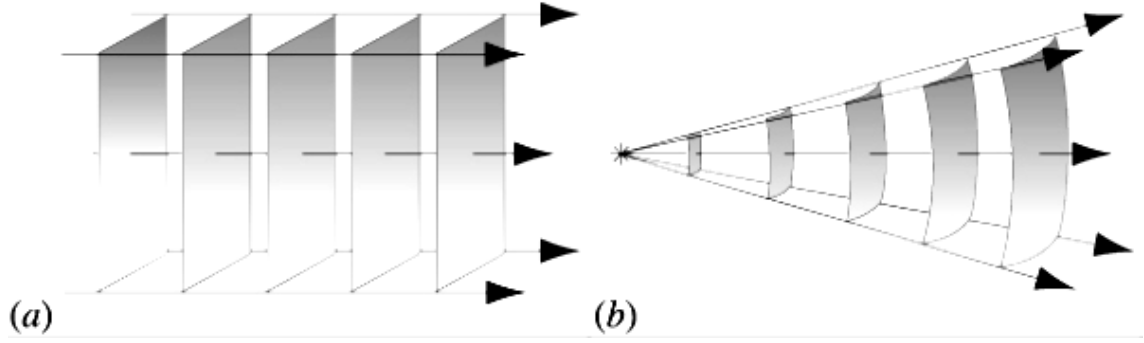
olur ve buradan

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(8,85 \times 10^{-13})}} = 2,99 \times 10^8 m/s \quad (2.67)$$

ışık hızının vakum ortamındaki yani boş uzaydaki hızı elde edilmiş olur. Bu sonuç aynı zamanda ışığın elektromanyetik karaktere sahip bir dalga olduğunun da ispatı niteliğindedir.

Kartezyen koordinat sisteminde ışığın yalnızca bir doğrultuda yayılması ve diğer iki

doğrultunun oluşturduğu düzleme dik olması durumundaki dalgalara düzlem dalgalar denir. Benzer şekilde noktasal ya da küresel bir kaynak tarafından oluşturulan küresel dalgalar da küresel koordinat sisteminde incelenir ve ilerleme yönü $r^2 d\theta d\phi$ birim yüzeylerine dik olacak şekilde ilerlediği görülür.



Şekil 2.33. a) Düzlem dalgalar ve dalga cepheleri, b) Küresel dalgalar ve dalga cepheleri.

E ve B' nin Maxwell denklemlerinden türetilmiş dalga denklemleri (2.68) ve (2.69)'deki gibidir. Özellikle $\nabla \cdot E = 0$ ve $\nabla \cdot B = 0$ olduğundan dolayı elektromanyetik dalgaların enine dalgalar olduğu ve elektrik ve manyetik alanların birbirine dik olduğu görülür.

$$E(z, t) = E_0 \cdot e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.68)$$

$$B(z, t) = B_0 \cdot e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.69)$$

Faraday yasası kullanıldığında elektrik ve manyetik dalgaların genlikleri arasında kutuplanma (p) ve dalganın yayılma vektörünü (k) içeren bir bağıntı olduğu görülür. Bu bağıntı

$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.70)$$

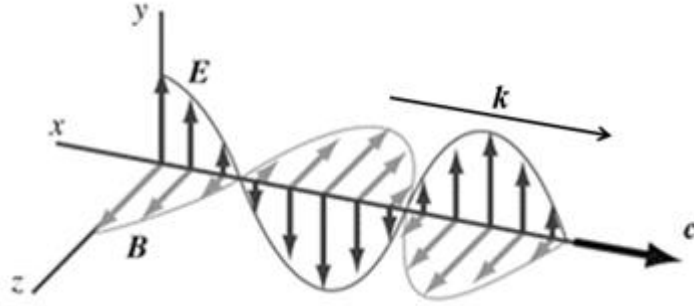
$$E(r, t) = E_0 e^{i(kr - \omega t)p} \quad (2.71)$$

$$B(r, t) = \frac{1}{c} E_0 e^{i(kr - \omega t)p} (k \times n) = \frac{1}{c} k \times E \quad (2.72)$$

şeklinde ifade edilir. Dalganın yayılma vektörü k ve kutuplanması n olan tek renkli bir düzlem dalgada asıl (gerçek) elektrik ve manyetik alanlar aşağıdaki gibi olur.

$$E(r, t) = E_0 \cdot \cos(k \cdot r - \omega t + \delta) p \quad (2.73)$$

$$B(r, t) = \frac{1}{c} E_0 \cdot \cos(k \cdot r - \omega t + \delta) (k \times p) \quad (2.74)$$



Şekil 2.34. Elektromanyetik dalganın bileşenleri.

Elektromanyetik Dalgaların Yansıma ve Geçme Davranışları

E_I ve B_I gelen, E_R ve B_R yansıyan ve E_T ve B_T geçen dalgaların sahip olduğu elektrik alan ve manyetik alan vektörleridir. Manyetik alan vektörü B ve H birbirinden ile ortamın manyetik geçirgenliğine bağlı olarak farklılaştığından, eşitliklerin daha basit ifadesi için H yerine B kullanılabilir. Bu durumda, gelen dalganın elektriksel ve manyetik alanları;

$$E_I(z, t) = E_{0I} e^{i(k_1 z - \omega t)} \quad (2.75)$$

$$B_L(z, t) = \frac{1}{v_1} E_{0I} e^{i(k_1 z - \omega t)} \quad (2.76)$$

Yansıyan dalganın elektriksel ve manyetik alanları;

$$E_R(z, t) = E_{0R} e^{i(-k_1 z - \omega t)} \quad (2.77)$$

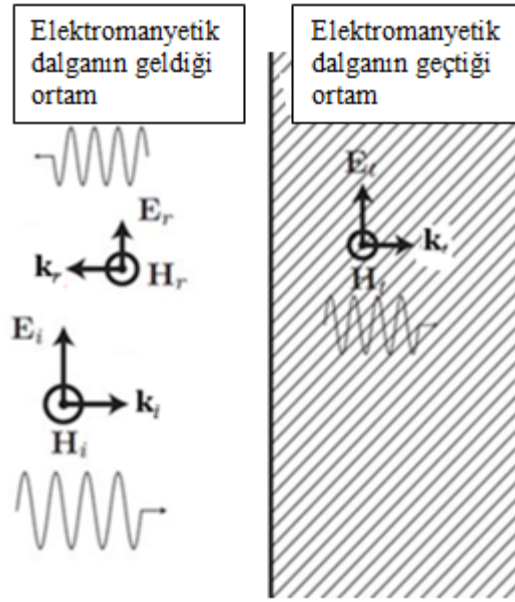
$$B_R(z, t) = -\frac{1}{v_1} E_{0R} e^{i(-k_1 z - \omega t)} \quad (2.78)$$

Geçen dalganın elektriksel ve manyetik alanları;

$$E_T(z, t) = E_{0T} e^{i(k_2 z - \omega t)} \quad (2.79)$$

$$B_T(z, t) = \frac{1}{v_2} E_{0T} e^{i(k_2 z - \omega t)} \quad (2.80)$$

şeklinde olur.



Şekil 2.35. Madde üzerine dik gelen elektromanyetik dalgalar ile yansıyan ve geçen elektromanyetik dalgalar.

Gelen, yansıyan ve geçen elektromanyetik dalgalar birbirine paralel olduğundan (2.81) eşitliği yazılabilir.

$$E_{0I} = E_{0R} + E_{0T} \quad (2.81)$$

μ_1 , ışığın geldiği ortamın manyetik geçirgenliği ve μ_2 , ışığın geçtiği ortamın manyetik geçirgenliği olmak üzere:

$$\frac{1}{\mu_1} \left(\frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0I} - \frac{1}{v_1} \tilde{E}_{0R} \right) = \frac{1}{\mu_2} \left(\frac{1}{v_2} \tilde{E}_{0T} \right) \quad (2.82)$$

İşlemleri sadeleştirmek için yeni bir sabit olan β değişkeni (2.83)' deki gibi tanımlanır.

$$\beta \equiv \frac{\mu_1 v_1}{\mu_2 v_2} = \frac{\mu_1 n_2}{\mu_2 n_1} \quad (2.83)$$

Bu durumda yeni sınır koşulu aşağıdaki gibi olur.

$$E_{0I} - E_{0R} = \beta E_{0T} \quad (2.84)$$

(2.81) ve (2.84) eşitlikleri kullanılarak yansıyan ve geçen dalga genlikleri, gelen dalganın genliği cinsinden (2.85)' deki gibi bulunur.

$$E_{0R} = \left(\frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right) E_{0I}, \quad E_{0T} = \left(\frac{2}{1 + \beta} \right) E_{0I} \quad (2.85)$$

Gelen ışığın birim başına ortalama güç değeri aşağıdaki gibidir.

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 v E^2 \quad (2.86)$$

Işığın geldiği ve geçtiği ortamların manyetik geçirgenliklerinin, boşluğun manyetik geçirgenliğine eşit olması durumunda ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) yansıyan ışığın şiddetinin gelen ışığın şiddetine oranı, diğer bir deyişle yansıtma katsayısı R:

$$R \equiv \frac{I_R}{I_I} = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}} \right)^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.87)$$

Aynı durumda geçen ışığın şiddetinin gelen ışığın şiddetine oranı, geçirme katsayısı T:

$$T \equiv \frac{I_T}{I_I} = \frac{\epsilon_2 v_2}{\epsilon_1 v_1} \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}} \right)^2 = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.88)$$

Soğurma faktörünün olmadığı durumlarda enerji korunumundan dolayı bu katsayılar toplamının $R + T = 1$ eşitliğini sağlaması gerekir. Örneğin ışık için cam oldukça transparan bir özellikte olduğundan, ışık havadan ($n_1 = 1$) cama ($n_2 = 1,5$) geçtiğinde, $R=0,04$ ve $T=0,96$ ' dır. Bu durumda R ve T katsayılar toplamının 1' e eşit olduğu görülmektedir.

İletkenlerde Elektromanyetik Dalgalar ve Soğurma

Elektromanyetik dalgaların iletken içerisindeki davranışı ve soğurulmasına geçmeden önce madde içerisindeki davranışa genel olarak bakmak uygun olacaktır. Maxwell denklemlerinin ρ yük yoğunluklu madde içerisindeki ifadesi aşağıdaki eşitliklerde görülmektedir.

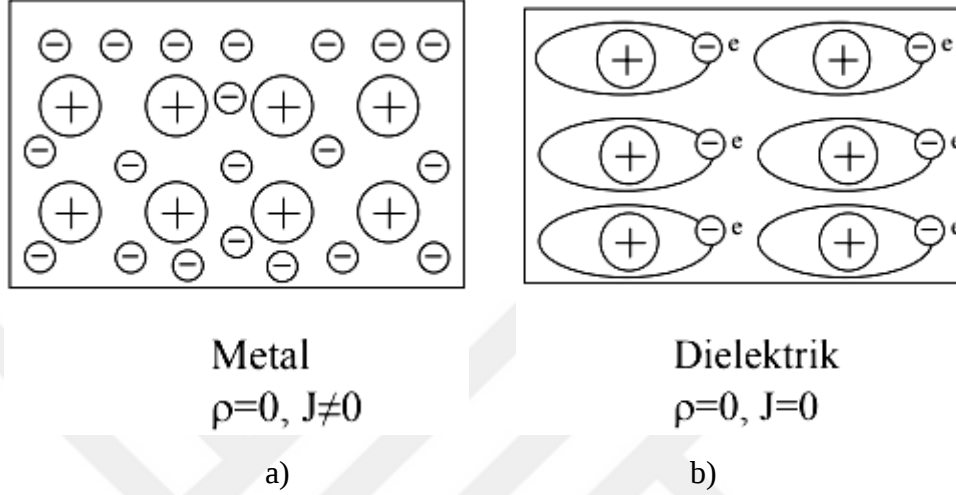
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.89)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.90)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.91)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left[\epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \right] \quad (2.92)$$

Dielektrik (yalıtkan) ortamda madde içerisinde net yük sıfır olup serbest yük hareketi yoktur. Metalik (iletken) ortamda ise net yük yoğunluğu sıfır olsa bile serbest yük hareketi vardır bu nedenle akım yoğunluğu sıfırdan farklıdır.



Şekil 2.36. a) İletken, b) Yalıtkan içerisinde net yük yoğunluğu ve serbest yük şeması.

Vakum ortamında veya dielektrik madde içerisinde akım yoğunluğu ve net yük yoğunluğunun sıfır olduğu görülmektedir. Fakat iletken içerisinde bir yük akışı mevcuttur ve bu akışı ifade eden akım yoğunluğu Ohm yasası gereğince elektriksel alanla orantılıdır.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.93)$$

(2.93), (2.92)' de yerine konulursa:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left[\epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \right] \quad (2.94)$$

olur. Serbest yük için süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.95)$$

Türdeş ve doğrusal bir ortam için Ohm yasası, Gauss yasası ve (2.95) birlikte kullanıldığında (2.96) ortaya çıkar.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\sigma(\nabla \cdot \mathbf{E}) = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \rho \quad (2.96)$$

Buna göre yük yoğunluğunun, zamanın fonksiyonu olarak ifadesi;

$$\rho(t) = e^{-\left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)t} \rho(0) \quad (2.97)$$

şeklindedir. Sonuçlara bakıldığında serbest yükün relaksasyon süresinin (ortalama serbest zaman) $\tau \equiv \varepsilon/\sigma$ şeklinde olduğu görülür. Relaksasyon süresi malzemenin ne kadar iyi bir iletken olduğunun göstergesidir. Mükemmel bir iletken için yüzeysel yük yoğunluğu $\sigma = \infty$ ve relaksasyon süresi $\tau = 0$ ' dır.

Bu durumda dalgaya ait elektrik ve manyetik alanla ilgili ifadeler şu şekilde olur:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.98)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu\sigma \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.99)$$

Denklemlerin içeriğindeki dalga vektörü k biraz daha detaylı bir çözüme sahiptir (2.100).

$$k^2 = \mu\varepsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega \quad (2.100)$$

Yukarıdaki eşitliğin karekökü alındığında dalga vektörü gerçel ve sanal kısımlarıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tilde{k} = k + iK \quad (2.101)$$

$$k \equiv \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.102)$$

$$K \equiv \omega \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon\omega}\right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.103)$$

$\tilde{k}$ dalga vektörünün sanal kısmı dalganın sönümüne neden olur, yani z' nin artışı ile genlik azalacaktır. Bu durumda elektrik alan ve manyetik alan vektörleri aşağıdaki gibi bir hal alır.

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{-kz} \cdot e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.104)$$

$$\tilde{B}(z, t) = \tilde{B}_0 e^{-kz} \cdot e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.105)$$

Deri kalınlığı, dalganın iletken içine ne kadar girdiğini belirtir. Diğer bir deyişle dalganın genliğini $1/e$ ' ye eşit (yaklaşık 1/3) bir çarpan kadar azaltmak için gerekli uzaklıktır. Deri kalınlığı matematiksel olarak (2.106)' te gösterilmiştir.

$$d \equiv \frac{1}{K} \quad (2.106)$$

Deri kalınlığına bağılı olarak, elektromanyetik dalganın madde içerisindeki davranışında önem taşıyan bir diğer parametre de soğurma katsayısıdır. Soğurma katsayısı,

$$\alpha = \frac{2}{d} \quad (2.107)$$

şeklinde ifade edilir.

Elektromanyetik dalganın madde içerisindeki dalga boyu, yayılma hızı ve kırılma indisi $\tilde{k}$ ' nin gerçel kısmı ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (2.108)$$

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (2.109)$$

$$n = \frac{ck}{\omega} \quad (2.110)$$

Madde içerisinde zayıflatılan elektromanyetik dalgaların elektrik ve manyetik alan denklemleri yeni bir hal alır. Bu yeni halin sebebi $\tilde{E}_0$ ve $\tilde{B}_0$ denklemlerin değişmesidir.

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{-kz} \cdot e^{i(kz - \omega t)} \cdot x \quad (2.111)$$

$$\tilde{B}(z, t) = \tilde{B}_0 e^{-kz} \cdot e^{i(kz - \omega t)} \cdot y \quad (2.112)$$

$\tilde{k}$ dalga vektörünün kutupsal formdaki ifadesi (2.101)' den;

$$\tilde{k} = K \cdot e^{i\phi} \quad (2.113)$$

$$K \equiv |k| = \sqrt{k^2 + K^2} = \omega \sqrt{\epsilon\mu \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2}} \quad (2.114)$$

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{K}{k}\right) \quad (2.115)$$

Elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan genlikleri aşağıda belirtildiği gibi birbirine bağlıdır.

$$\tilde{E}_0 = E_0 e^{i\delta_E} \quad (2.116)$$

$$\tilde{B}_0 = B_0 e^{i\delta_B} \quad (2.117)$$

$$B_0 e^{i\delta_B} = \frac{K e^{i\delta_E}}{\omega} \cdot E_0 e^{i\delta_E} \quad (2.118)$$

Yukarıdaki eşitliklere bakıldığında δ_E ve δ_B değerlerinden dolayı elektrik ve manyetik alanların artık aynı fazda olamadığı görülür. Bu faz farkı:

$$\delta_B - \delta_E = \Phi \quad (2.119)$$

şeklinde dir. Pratikte manyetik alan, elektriksel alandan geri fazdadır. E ve B genliklerinin bağılıklarının ampirik hali aşağıdaki gibidir.

$$\frac{B_0}{E_0} = \frac{K}{\omega} = \sqrt{\epsilon\mu \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2}} \quad (2.120)$$

Sonuç olarak faz ifadeleri de göz önünde bulundurulduğunda alanların genlik değerleri aşağıdaki gibi olur.

$$\mathbf{E}_{(z,t)} = \tilde{E}_0 e^{-kz} \cos(kz - \omega t + \delta_E) \cdot x \quad (2.121)$$

$$\mathbf{B}_{(z,t)} = \tilde{B}_0 e^{-kz} \cos(kz - \omega t + \delta_E + \Phi) \cdot y \quad (2.122)$$

Optik Geçirgenlik Deneyleri İle Enerji Bandlarının İncelenmesi

İnce filmlerin ve dolayısıyla bu tez çalışmasında üretilen hücrelere ait aktif tabakalarının yasak enerji band aralığı hesaplamaları optik geçirgenlik deneylerinden elde edilen geçirgenlik spektrumları kullanılarak ampirik yolla bulunabilir. Bahsedilen

hesaplamalarda Beer Lambert Yasası kullanılır. Bu yasa malzeme içerisinde ilerleyen ışığın şiddetinin, ilerlediği yolun uzunluğuna bağlı olarak ne miktarda azaldığını ifade eder. Bu aynı zamanda ışığın madde içerisinde ne miktarda soğurulduğunun da ölçüsüdür.

Beer Lambert Yasası' nın matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$I = \frac{I_0}{e^{\alpha d}} \quad (2.123)$$

Görüldüğü gibi filmin içinden geçen ışığın şiddeti I , filme düşen ışık şiddeti I_0 ile doğru orantılı olup malzemenin soğurma katsayısı α ve filmin kalınlığı d ile eksponansiyel olarak ters orantılıdır. Aslında d ifadesi ışığın film içerisinde yüzey normali doğrultusunda aldığı toplam yolu belirtir fakat bu deneyler sırasında ışık, filmin tamamını geçerek detektöre ulaştığından bu yolu filmin kalınlığı olarak ifade etmekte sakınca yoktur. Deneylerin amacı malzemenin ışığı ne derece soğurduğunu bulmak olduğundan α katsayısı büyük önem taşımaktadır. α , Beer Lambert denkleminde [50]

$$e^{\alpha d} = \frac{I_0}{I} \quad (2.124)$$

şeklinde çekilebilir. Buradan

$$\ln(e^{\alpha d}) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.125)$$

$$\alpha d = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.126)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.127)$$

elde edilir. Malzemeye gelen ışık şiddetinin malzeme içinden geçerek çıkan ışık şiddetine oranı $\frac{I_0}{I}$ malzemenin yüzde geçirgenliğini verir.

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{100}{\%T}\right) \quad (2.128)$$

(2.128)' de kullanılan d , daha önce de bahsedildiği gibi ışığın numune içerisinde aldığı yolu, $\%T$ ise geçirgenlik deneyleri sonucunda elde edilen geçirgenliğin yüzde değerini ifade eder.

Güneş hücrelerinde kullanılan malzemelerin yasak enerji band aralıklarının direkt

geçişli veya indirekt geçişli olarak sınıflandırılmasının ardından Tauc Yasası kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılabilir. Tauc yasası (2.129)' da gösterildiği gibidir.

$$(h\nu - E_g)^b = C(\alpha h\nu) \quad (2.129)$$

şeklinde gösterilir. Bilindiği gibi $h\nu$ gelen ışığın enerjisi, α soğurma katsayısıdır. C , geçiş olasılığına bağlı bir sabittir ve E_g ise optik band aralığını ifade eder. Üstel kısımda yer alan b parametresi ise numunenin optik yasak band enerjisinin direkt mi indirekt mi olduğunu gösterir. b direkt geçişler için $\frac{1}{2}$ değerini alırken indirekt geçişler için 2 değerindedir. İndirekt geçişler için inceleme yapılacak olursa;

$$(h\nu - E_g)^2 = C(\alpha h\nu) \quad (2.130)$$

Tauc denkleminden soğurma katsayısı çekilip incelendiğinde gelen ışığın enerjisine göre parabolik fonksiyon çıkar ve parabolik bir grafik davranışı göstermesi beklenir.

3. MATERYAL VE METODLAR

3.1. ÜRETİM SÜRECİ

3.1.1. Organik İnce Film Üretimi

3.1.1.1. Hazırlık Aşaması

Bu tez çalışmasında üretilen organik güneş hücrelerinin aktif tabakasını oluşturan PCBM ve P3HT organik polimer malzemeleri Sigma Aldrich Ltd. Şirketi tarafından ticari olarak sağlanmıştır. P3HT:PCBM aktif tabakasının hazırlanması için, toz formunda satın alınmış olan P3HT ve PCBM' nin sıvı çözeltilere dönüştürülmesi gerektiğinden uygun çözücü olan diklorobenzen (DCB) çözücüsü kullanılarak elde edilen 25 mg/mL çözünen-çözücü bileşimi her iki malzeme için ayrı ayrı oluşturulup 6 saat boyunca 45°C'de farklı tüplerde manyetik balıklar tarafından karıştırıldı. Ayrı olarak hazırlanan çözeltiler daha sonra aynı kaba, 0.45 µm' lik bir filtreden 1:1 oranında aktarıldı ve 24 saat karıştırıldı.

3.1.1.2. Spin Kaplama Aşaması

Cam alttaşlar üzerine, her alttaş için 50 µL P3HT:PCBM çözeltisi kullanılarak kaplama gerçekleştirildi. Numunelerin kaplama kalınlığının belirleyici parametresi, spin kaplamanın rpm değeri olduğundan bu değerler, organik güneş hücreleri ile uyumlu biçimde tez çalışmasında 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm olarak seçilmiştir.

3.1.2. Organik Güneş Hücrelerinin Üretimi

3.1.2.1. Hazırlık Aşaması

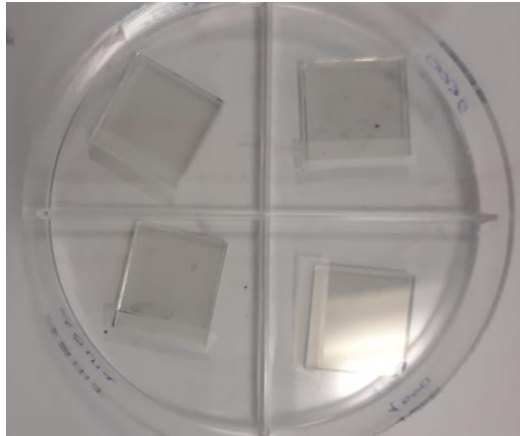
Deşik taşıyıcı katman olan PEDOT:PSS Heraeus Deutschland GmbH Company' den satın alınmıştır. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş hücreleri, bir organik ara yüz tabakası oluşturmak üzere bir karışım hazırlanarak üretildi. Deşik taşıyıcı tabaka olan PEDOT:PSS, spin kaplama ünitesi ile daha verimli kaplama yapılabilmesi için dimetil sülfoksit (DMSO) ile hacim oranı %3 olacak şekilde manyetik balıklar yardımıyla oda sıcaklığında 24 saat karıştırılarak seyreltilti.

3.1.1.1’de olduğu gibi P3HT:PCBM aktif tabakasının hazırlanması için, DCB çözücüsü kullanılarak elde edilen 25 mg/mL çözünen-çözücü bileşimi her iki malzeme için ayrı ayrı oluşturulup 6 saat boyunca 45°C’ de farklı tüplerde manyetik balıklar tarafından karıştırıldı. Ayrı olarak hazırlanan çözeltiler daha sonra aynı kaba, 0,45 µm’ lik bir filtreden 1:1 oranında aktarıldı ve 24 saat karıştırıldı.

Organik malzemelerle ilgili bu ön hazırlıklardan sonra, deneysel prosedürlere başlamadan önce, ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al organik güneş hücrelerinin pozitif elektrodu görevindeki alttaşın yani ITO kaplı camın temizlenmesi gerekmektedir. ITO kaplı bu cam alttaşlar, 15x15 mm ebadında ve bir tarafında yaklaşık 150 nm kalınlığında ITO ile kaplı biçimde ticari olarak temin edilmiştir. Sterilizasyon işlemlerinin ilk aşamasında alttaşlar bir ultrasonik banyoda oda sıcaklığında 10 dakika saf su, 10 dakika aseton ve 10 dakika izopropil alkol içinde temizlendi. İkinci aşamada, ITO kaplı yüzeydeki oksit tabakalarını önlemek için N_2 gazı ile kurutma gerçekleştirildi.

3.1.2.2. *Spin Kaplama Aşaması*

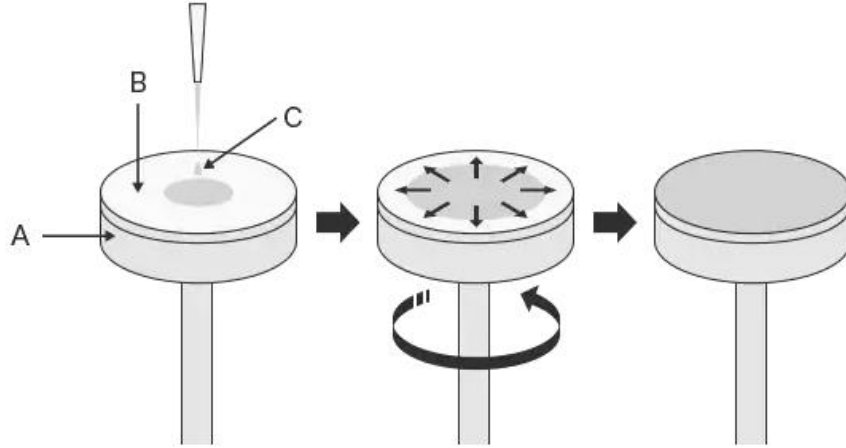
Kaplama aşamalarına geçmeden önce her hücrenin ITO kaplı yüzünün bir kenarı, iz bırakmayan bant kullanılarak 2-3mm genişliğinde maskelenmiştir (Şekil 3.1). Bu sayede + ve – elektrotlar arasındaki bağlantının uygun biçimde sağlandığı ilerleyen aşamalarda görülmüştür.



Şekil 3.1. PEDOT:PSS kaplamasından önce yapılan maskeleme.

Bu ön aşamalardan sonraki işlem tüm alttaşların hol taşıyıcı katmanı oluşturacak olan PEDOT:PSS ile kaplanmasıdır. Bu işlemde her alttaş için 50µL PEDOT:PSS kullanılmış ve spin (dönel) kaplama yöntemi (Şekil 3.2) ile SCS marka G3P8 model

Spin Coater cihazıyla kaplanmıştır (Şekil 3.3). Uygun biçimde bantlanmış olan alttaşlar cihaz içine yerleştirildikten sonra hazırlanan çözelti yavaş yavaş damlatılır ve aygıtın dönme hızı ayarlanarak alttaşların döndürme işlemine geçilir. Cihazın döndürme etkisiyle alttaşların üstüne damlatılan çözelti homojen olarak dağılmıştır. Bu işlem sonunda tüm altlıklar kaplanmış olur. Spin kaplama süreci (Şekil 3.2)' de görülmektedir.



Şekil 3.2. Spin kaplama süreci a) Dönen zemin, b) Kaplanacak yüzey, c) Kaplanacak çözelti.



Şekil 3.3. SCS marka G3P8 model Spin Coater cihazı.

İlk kaplamanın ardından numuneler 150°C' de 10 dakika boyunca HEIDOLPH marka

MR Hei-Tec model ısıtıcıda ITO kaplı yüzey üst tarafta kalacak biçimde Şekil 3.4' te görüldüğü gibi tavllanmış ve ardından soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.4. PEDOT:PSS kaplı numunelerin tavlama süreci.

İkinci aşamada aktif katman P3HT: PCBM kaplanmadan önce numunelerin bu defa 4 yanı iz bırakmayan bant ile maskelenmiş ve her numunede 50 μ L çözelti kullanılarak kaplama gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kaplama kalınlığının belirleyici parametresi, spin kaplamanın rpm değeridir. Bu değerler tez çalışmasında 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm, 4000 rpm olarak seçilmiştir. Aktif tabakanın spin kaplama süreci PEDOT:PSS kaplama süreciyle benzerdir. Numunelerin P3HT:PCBM kaplamasının ardından aldıkları görüntü Şekil 3.5' te verilmiştir. Teorik kısımda bahsedildiği gibi PEDOT:PSS kaplı cam hafif mavi bir renk kazanırken (kaplama kalınlığına bağlı olarak renk doygunluğu değişmektedir) P3HT:PCBM çözeltisiyle kaplanmış olan numunelerde kırmızı görüntü elde edilmektedir. P3HT:PCBM, kaplanmasının hemen ardından eflatun tonlarında olup kurumanın ardından kırmızı renge ulaşmaktadır.



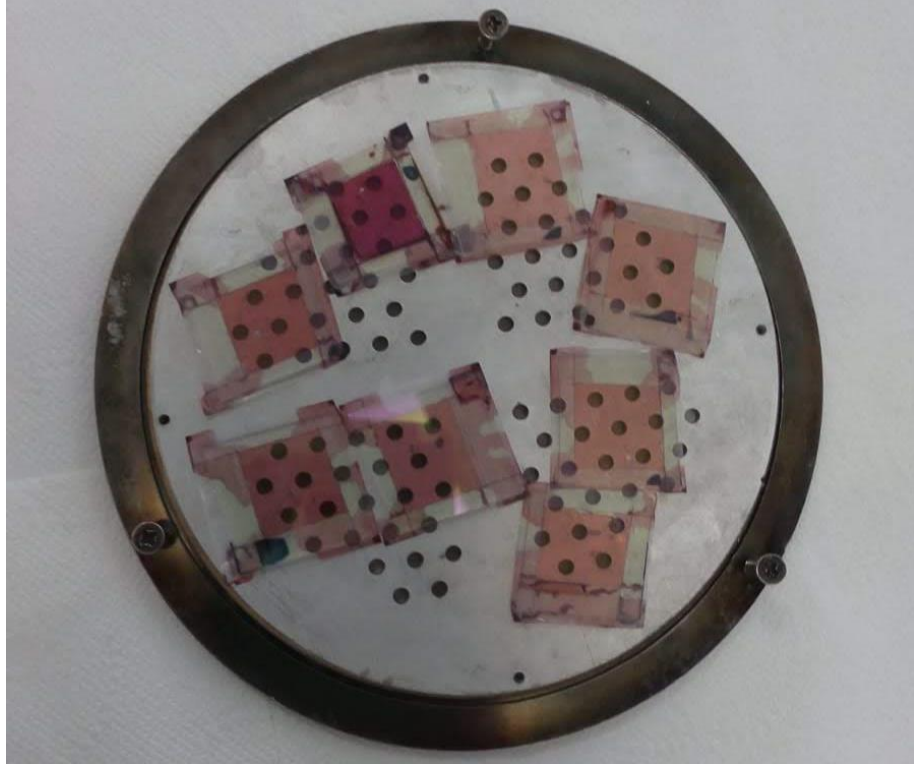
Şekil 3.5. Numunelerin P3HT:PCBM kaplamasının ardından aldıkları görüntü.

3.1.2.3. Termal Kaplama Aşaması

Aktif katmanın kurummasının ardından numuneler Al kontak kaplamasına hazır hale getirilmek üzere, kullanılacak olan Nanovak NVBJ-300TH termal kaplama aygıtının metal maske aparatı üzerine konumlandırılmıştır (Şekil 3.7).

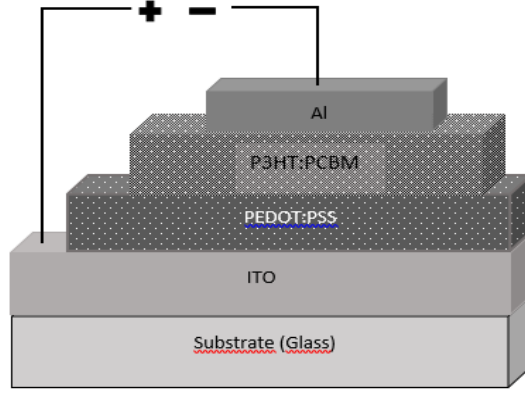


Şekil 3.6. Nanovak NVBJ-300TH termal kaplama cihazı.

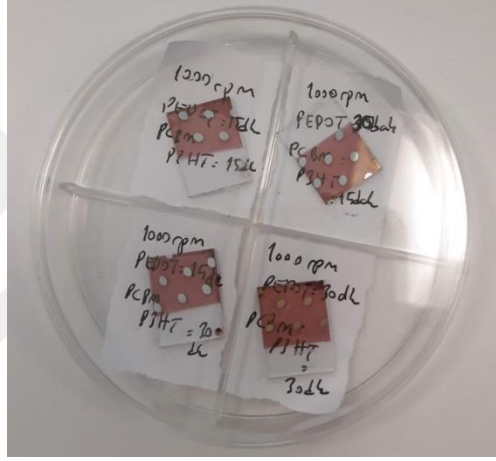


Şekil 3.7. Termal kaplama öncesi numunelerin maskelenmesi.

Termal kaplama işlemi, bir başka deyişle evaporasyon, 4×10^{-4} Pa vakum altında yüksek erime noktasına sahip malzemedan yapılmış bir pota içerisine kaplanacak olan Al' nin yerleştirilip numune üzerine buharlaştırılmasıyla sağlanır. Yarıçapı 1 mm olan dairesel kontaklar, yukarıda bahsedilen metal maske yardımıyla her numune üzerinde en az 4 kontak bulunacak şekilde oluşturulmuştur. Yüksek vakum altında çalışılıyor olma sebebi Al metalinin oksidasyonuna ve numuneye yapışacak olan toz veya moleküllere karşı zafiyet vermemektir. Üzerinden geçen akım artırılarak 30A değerine ulaştığında pota, sahip olduğu elektrik enerjisini Al' yi buharlaştırmak için gerekli olan ısıya dönüştürür ve kaplama süreci gerçekleştirilir. Tez hazırlık sürecinde yapılan çalışmalarda yukarıda belirtilen şartlarda 0,01 gram Al ile yaklaşık 40 nm kaplama yapıldığı belirlenmiştir. Termal kaplama cihazının kalınlık paneli, kullanılacak olan malzemenin özelliklerine bağlı olarak uygun programın seçilmesiyle ~%80 doğrulukla tahmini bir ölçüm yapmaktadır.



Şekil 3.8. ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM/Al güneş pillerinin yapısının şematik gösterimi.

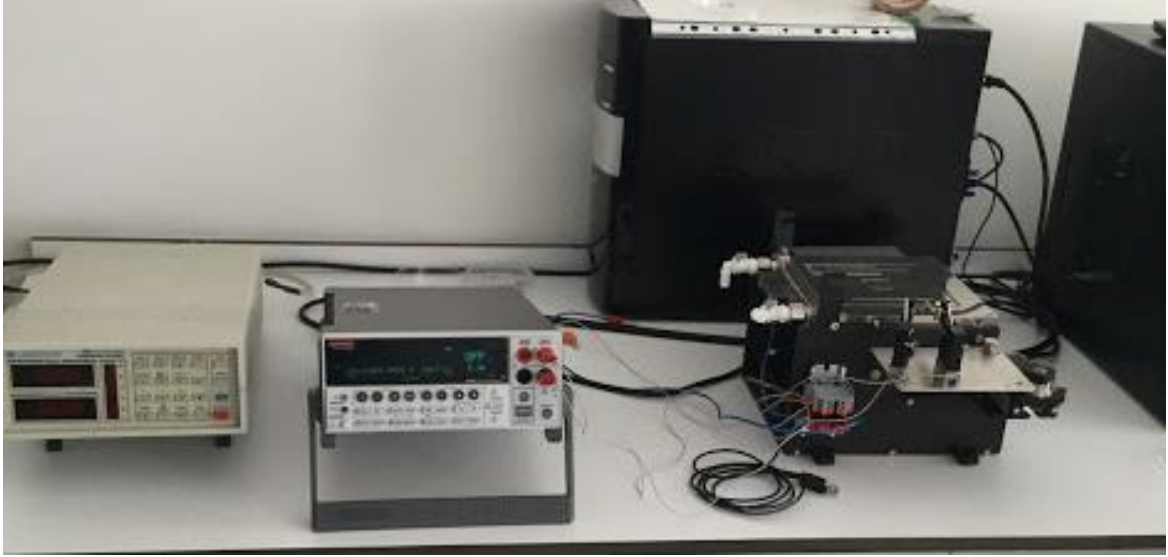


Şekil 3.9. ITO/PEDOT: PSS/P3HT:PCBM/Al aygıtın son hali.

3.2. KARAKTERİZASYON SÜRECİ

3.2.1. Güneş Hücrelerinin Elektriksel Karakterizasyonu

Üretilen aygıtların elektriksel karakterizasyonu diyot parametrelerinin açığa çıkarılması için kullanılmıştır. Bu amaçla, dahili bir güç kaynağı ve bir ampermetreye sahip Keithley 2400 ölçüm sistemi (Şekil 3.10) ile Akım (I) - Voltaj (V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Keithley 2400 ölçüm sistemi.

3.2.2. İnce Filmlerin Optik Karakterizasyonu

P3HT:PCBM ince filmlerin optik karakterizasyonu, optik geçirgenlik spektroskopisi kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla, 0,5 nm spektral bant genişliğine sahip bir PG Instruments T70 + model tek kanallı spektrofotometre kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. PG Instruments T70+UV/VIS model Spektrofotometre cihazı.

3.2.3. Güneş Hücrelerinin Optoelektronik Karakterizasyonu

Güneş hücrelerinin optoelektronik karakterizasyonu, bir FY 7000 güneş simülatörü (Şekil 3.12) kullanılarak AM 1,5 güneş radyasyonu altında ve Keithley 2400 ölçüm sistemi kullanılarak I-V ölçümleri aracılığıyla yapılmıştır.



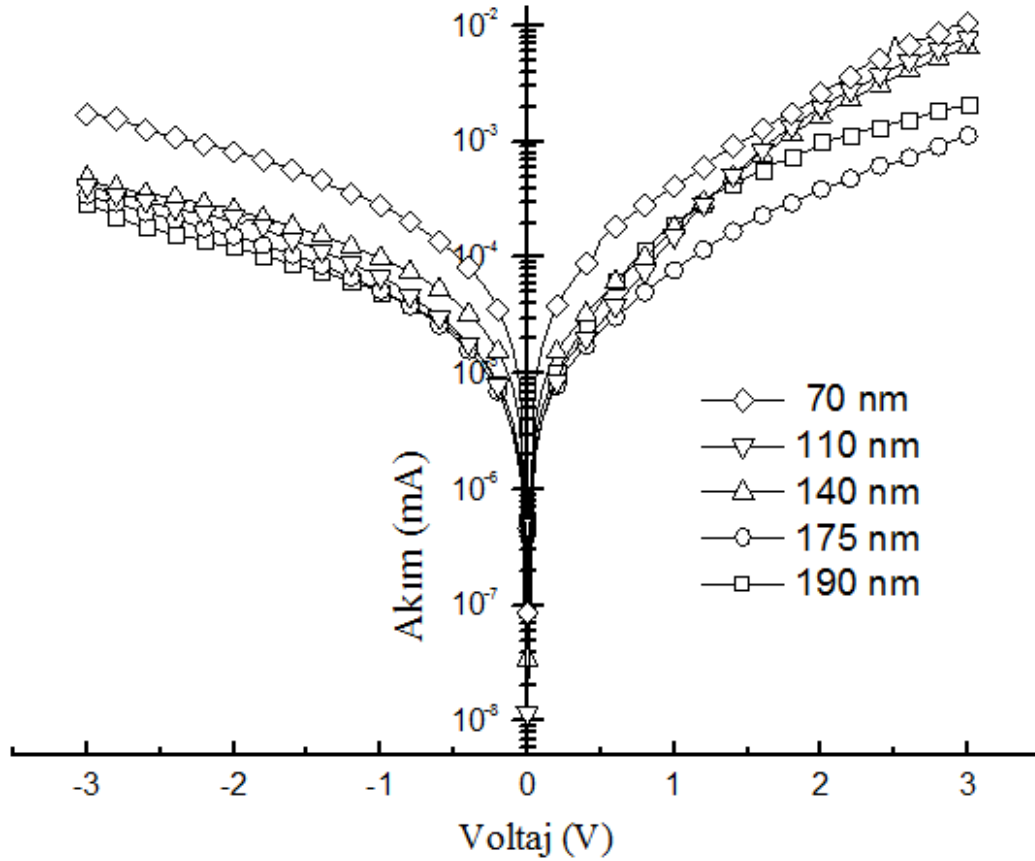
Şekil 3.12. FY 7000 güneş simülatörü

PEDOT:PSS ve P3HT:PCBM katmanlarının kalınlıkları, hücrelerin enine kesitinin görüntüsü alınarak bir FEI Quanta FEG 250 tarama elektron mikroskobu (SEM) ile ölçülmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin SEM görüntüleri ve ölçümleri sonucunda PEDOT:PSS tabakalarının kalınlığının tüm hücreler için yaklaşık 50 nm olduğu bulunmuştur. P3HT:PCBM aktif katmanlarının kalınlıklarının 500 rpm, 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm ve 4000 rpm’ de üretilen katmanlar için sırasıyla 190 nm, 175 nm, 140 nm, 110 nm ve 70 nm olduğu görülmüştür.

Üretilen güneş pillerinin elektriksel özelliklerini ortaya çıkarmak için I-V ölçümleri -3V ve 3V arasındaki voltaj aralığında gerçekleştirildi. Ölçümlerin sonuçları Şekil 4.1’ de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde güneş hücrelerinin I-V karakteristiklerinin üstel bir davranış gösterdiği görülmektedir. Bu üstel davranışın daha rahat incelenmesi amacıyla şekil, yarılogaritmik ölçekte çizilmiştir.



Şekil 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin I-V karakteristikleri.

Şekilde, tüm hücrelerin elektriksel karakteristiğinin beklendiği gibi bir doğrultucu

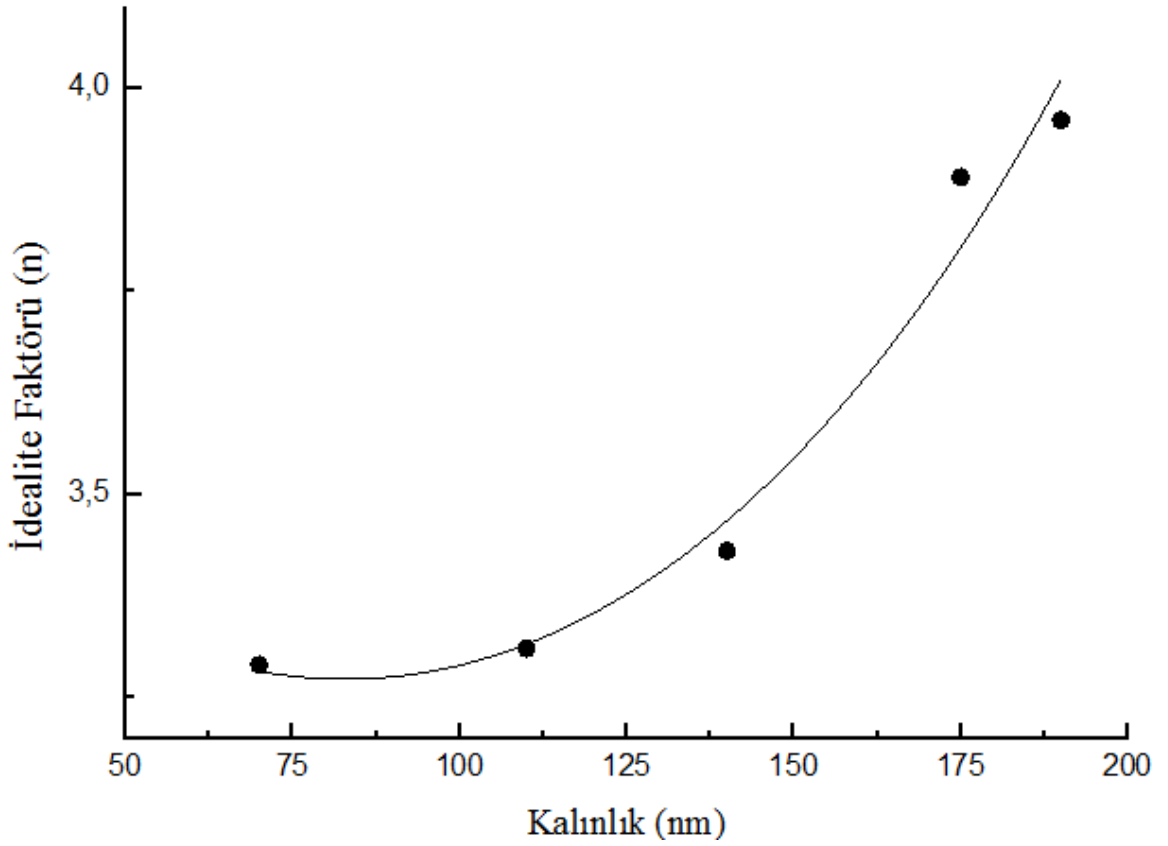
davranış gösterdiği görülmektedir. Bu, ileri beslem akımların ters beslem akımlarına göre voltaj ile çok daha hızlı bir artış gösterdiği anlamına gelmektedir.

Hücrelerin elektriksel özellikleri hakkında daha ayrıntılı bir analiz için bazı önemli diyot parametreleri hesaplanabilir [100]. Bu amaçla denklem (2.23) ve (2.24) kullanılabilir. Bu eşitliklerde, daha önce de bahsedildiği gibi n , diyotun idealite faktörünü temsil etmektedir ve bir diyotun özelliklerinin ideale ne kadar yakın olduğunun ölçüsü olması sebebiyle çok önemli bir parametredir.

Üretilen hücrelerin alanı $3,14 \times 10^{-6} m^2$ olarak ölçülmüştür. Şekil 4.1 ve denklem (2.24) kullanılarak üretilen hücrelerin idealite faktörleri hesaplanabilir. İdealite faktörlerinin değerleri Şekil 4.1’ de gösterilen eğrilerin ileri beslem bölgesindeki doğrusal kısımların eğimleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler, Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.

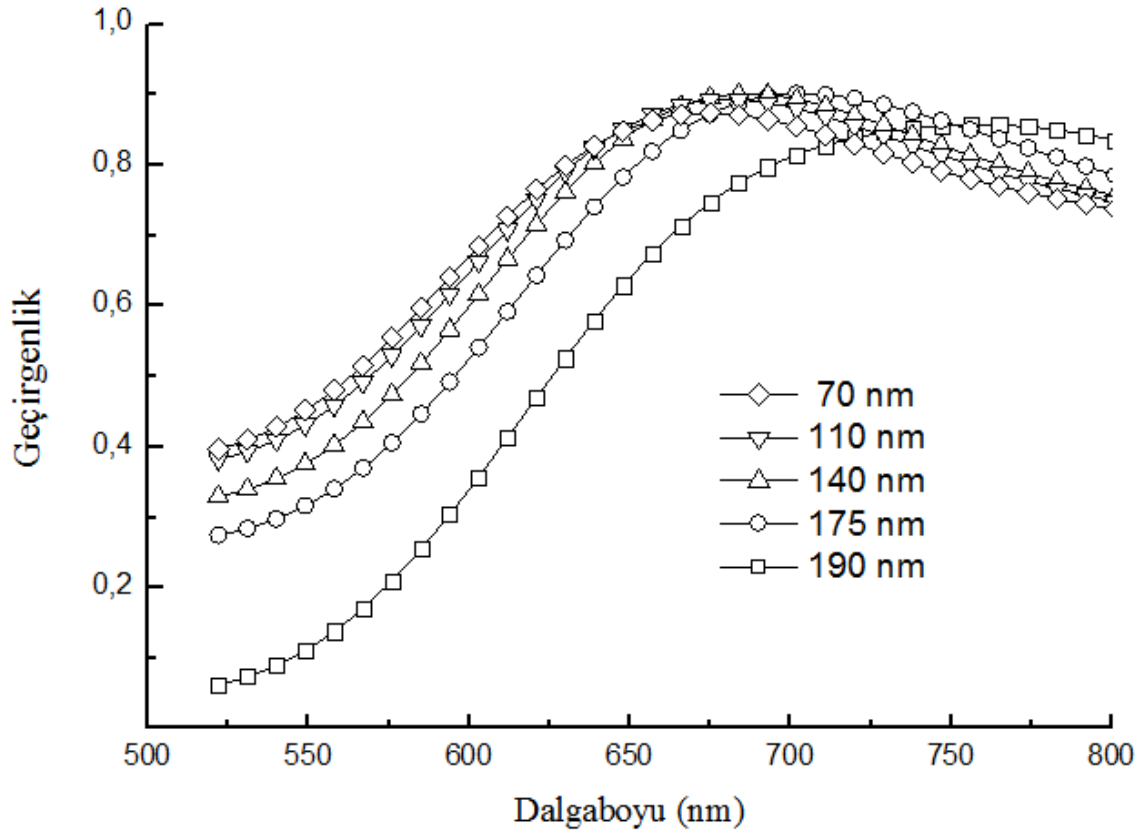
Şekilde görüldüğü gibi, idealite faktörünün değeri 3,29 ve 3,96 arasında değişmekte ve aktif tabaka kalınlığı arttıkça artmaktadır. İdealite faktörü, bir diyotun saf termo-iyonik emisyon davranışını ne kadar takip ettiğinin bir ölçüsüdür ve değerinin ideal durumda 1, ideal olmayan durumlarda ise 1’ e yakın olması beklenir [101].

Genel olarak, yük taşıyıcıların rekombinasyonunun idealite faktörünün değerinin yaklaşık 1 olduğu bölgelerdeki aygıtın nötr alanlarında meydana geldiği düşünülmektedir. Oysaki idealite faktörünün değerinin 2 veya daha yüksek olduğu durumlarda ise rekombinasyon, deplasyon bölgesinde görülür [102]. İdealite faktörünün değerleri de güneş pilinin dolum faktörünü (FF) etkiler. Üretilen hücrelerin idealite faktöründeki artışın, güneş hücresi dolgu faktörü değerinde bir azalmaya yol açması ve bunun güç dönüşüm verimliliğini (PCE) azaltması beklenmektedir.



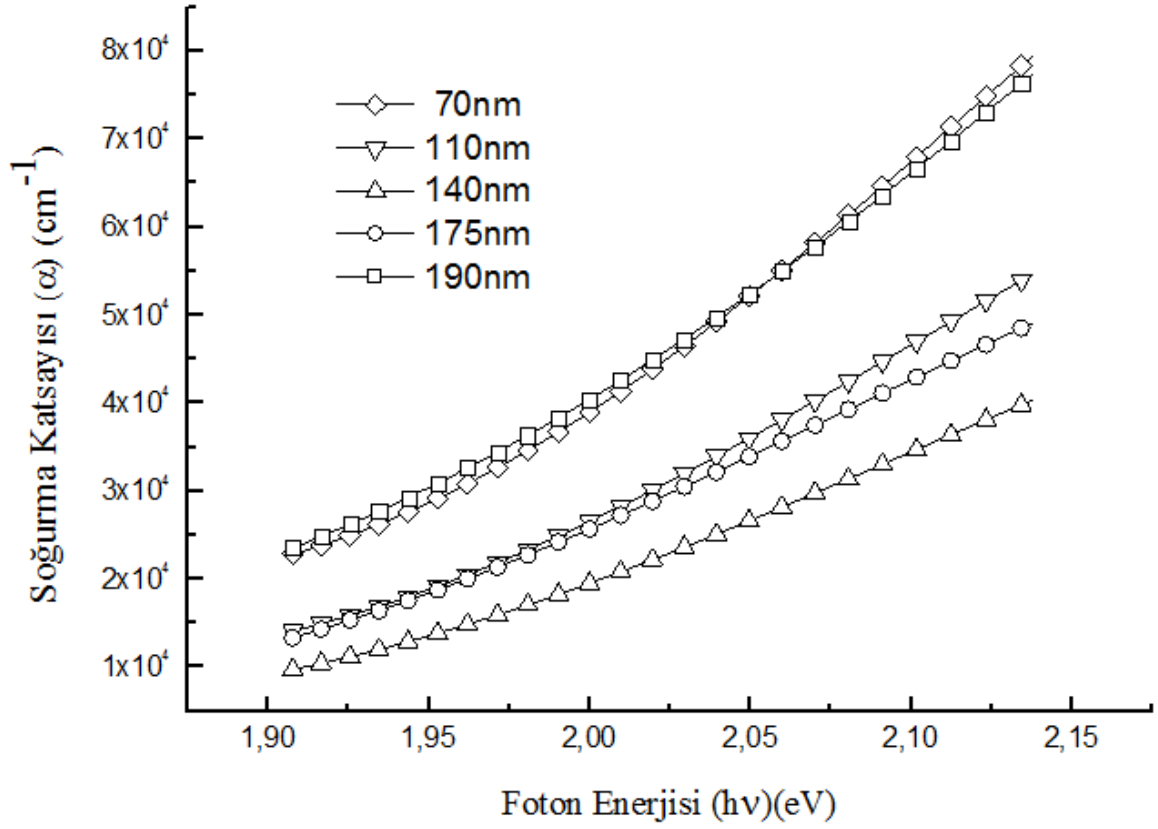
Şekil 4.2. Diyot idealite faktörü değerlerinin P3HT:PCBM aktif tabaka kalınlığına bağlılığı.

ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin optik özelliklerini ortaya çıkarmak için optik geçirgenlik spektroskopisi kullanılmıştır. Geçirgenlik deneylerinden sonra, deneyden elde edilen veriler hem dedektör verimliliği hem de altaş etkileri dikkate alınarak düzeltilmiştir. Şekil 4.3' te, tüm hücreler için 525 nm ile 800 nm dalga boyu aralığı arasında kaydedilen düzeltilmiş geçirgenlik eğrileri gösterilmiştir. Şekilden, aktif tabaka kalınlığı arttıkça gelen ışığın geçirilme miktarının azaldığı ve soğurulma miktarının arttığı açıkça görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü aktif tabaka kalınlığı arttıkça, ışığın tabaka içerisinde aldığı yol ve fotonların yük taşıyıcıları tarafından yakalanma olasılığı da artar. Diğer tüm parametreler dikkate alınmazsa, en yüksek soğurma oranına sahip hücrelerin en yüksek güç dönüştürme verimi değerine sahip olması beklenir. Ayrıca, tüm hücrelerin görece keskin olmayan bir soğurma eğrisine sahip olduğu görülmektedir. Yani, yüksek soğurma bölgesi kabaca 150 nm' lik bir bölgeyi kapsamaktadır ve bu nispeten geniş bir aralıktır. Genel olarak, kristal yapılar keskin bir soğurma sınırına sahipken, yapı amorflaştıkça soğurma sınırının yumuşak olduğu gözlemlenir.



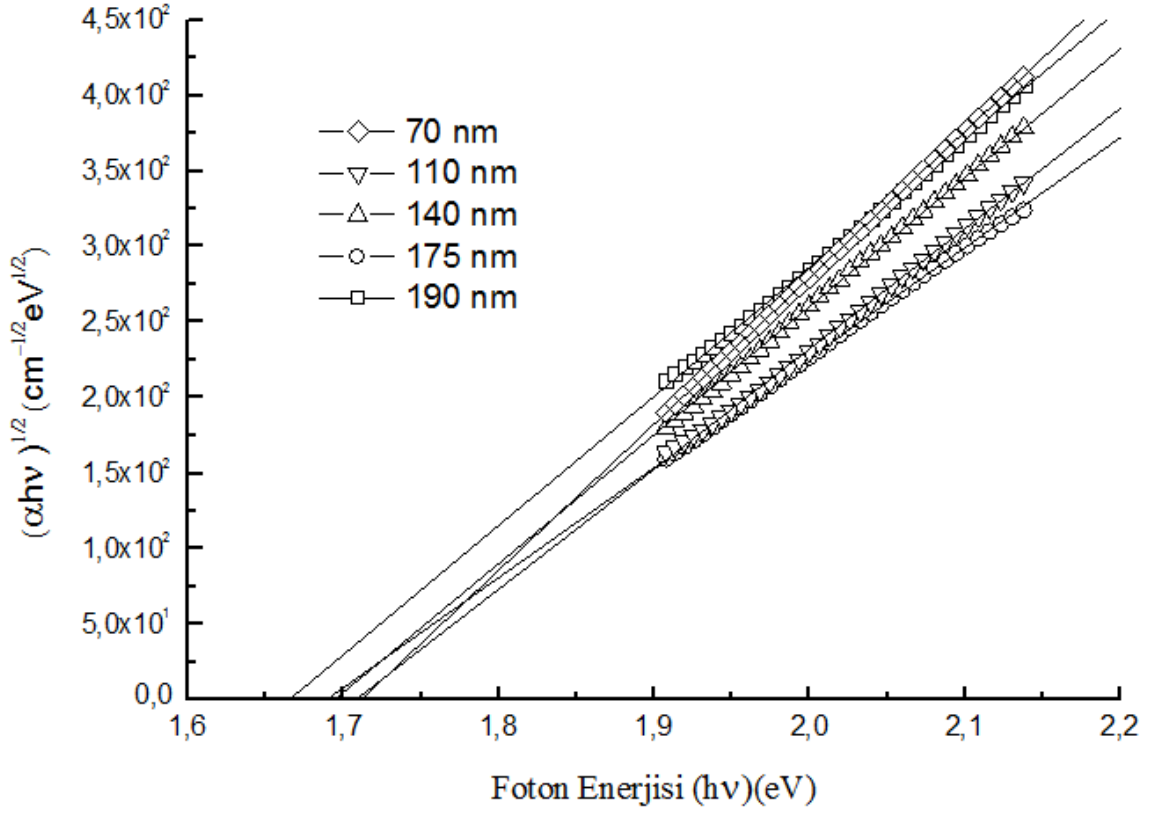
Şekil 4.3. Üretilen hücrelerin geçirgenlik spektrumlarının aktif tabaka kalınlığına bağlılığı.

Hücrelerin optik özelliklerinin ayrıntılı bir analizi için, (2.13)' te verilen Beer Lambert Yasası kullanılabilir [103]. Beer Lambert Yasası' ndan ve Tauc Yasası' ndan teorik kısımda ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Beer Lambert Yasası aracılığıyla farklı dalgaboylarına denk gelen soğurma katsayısı kolaylıkla hesaplanabilir. Bu şekilde, üretilen tüm hücreler için hesaplanan soğurma katsayılarının değerleri Şekil 4.4' te verilmiştir.



Şekil 4.4. Soğurma katsayısının üretilen tüm güneş hücreleri için gelen foton enerjisine bağlılığı.

Şekilde verilen soğurma katsayılarının analizi için (2.129)' da verilen Tauc Yasası kullanılabilir. Bu yasa sadece yüksek soğurma bölgesinde geçerli olduğu için tüm şekiller ve hesaplamalar bu bölgede yapılmıştır. Tauc Yasası'ndan sabiti direkt geçişler için 0,5 değerini alırken indirekt geçişler için 2 değerini almaktadır. Şekil 4.4 incelendiğinde soğurma katsayısının değerinin foton enerjisine bağlı davranışının parabolik olduğu açıkça görülmektedir. Bu da bize üretilen hücrelerin tüm aktif katmanları için b değerinin 2 olduğunu göstermektedir. Bu durumda (2.129)' un her iki tarafının da karekökü alınırsa doğrusal bir davranış ortaya çıkar. Şekil 4.5, bu doğrusal davranışı göstermektedir.



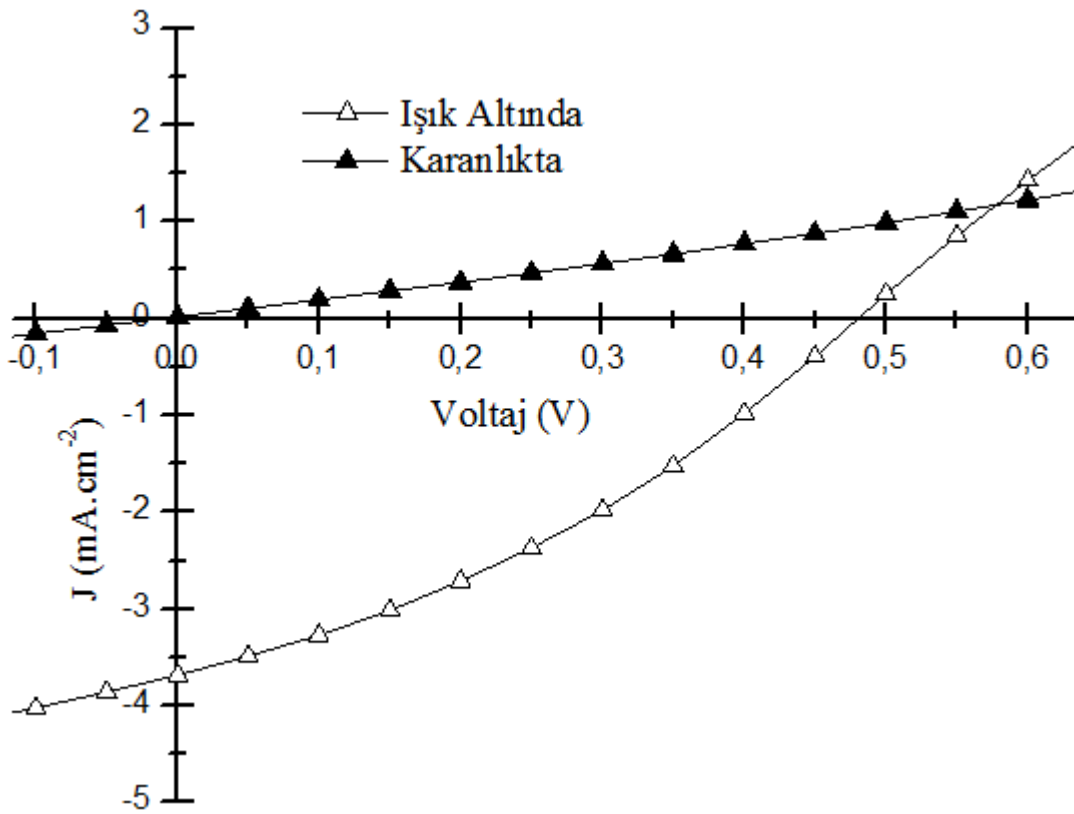
Şekil 4.5. Üretilen tüm güneş hücrelerinin aktif bölgesinin optik bant aralığı enerjisini ortaya çıkarmak için çizilen grafik.

Şekilden görüldüğü üzere, çizilen doğruların foton enerjisi eksenini kestiği noktalar bize üretilen hücrelerin aktif katmanlarının yasak enerji bant aralıkları değerlerini verecektir. Katılarda hesaplanan yasak enerji band aralığı polimer malzemeler için HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki boşluğa karşılık gelmektedir. Bu nedenle bu metnin ilerleyen aşamalarında yasak enerji aralığından bahsedildiğinde HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki boşluktan bahsedildiği anlaşılmalıdır.

Yapılan analizler sonucu, 70 nm, 110 nm, 140 nm, 175 nm ve 190 nm aktif katman kalınlıklarına sahip hücrelerin yasak enerji band aralıkları sırasıyla 1,67 eV, 1,69 eV, 1,70 eV, 1,71 eV ve 1,71 eV olarak bulunmuştur. Bu değerler incelendiğinde aktif katman kalınlığı arttıkça yasak enerji band aralığının da çok cüzi miktarda arttığı gözlemlenmektedir. Ancak bu artış ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu nedenle üretilen hücrelerin aktif katman kalınlıklarının değişiminin yasak enerji bant aralığı değerine etkisinin olmadığı sonucu çıkartılabilir. Bu sonuç aktif katman olarak kullanılan P3HT:PCBM karışımının oranının tüm hücrelerde sabit olması sebebi ile aynı yapıya sahip olmalarından dolayı beklenen bir sonuçtur. P3HT:PCBM oranının sabit

tutulmadığı durumlarda yasak enerji band aralığının değerinin bu orana göre değişmesi beklenmektedir.

Genel itibariyle, yasak enerji band aralığının boyutu bir güneş hücresi için çok önemlidir, çünkü fotonlardan soğurulabilen enerjiyi doğrudan etkiler. Gelen foton enerjisi E_g ’ den yüksekse, foton elektron tarafından soğurulur ve elektronun LUMO seviyesine uyarılmasından sonra band minimumuna relaksasyonu nedeni ile fazlalık olan enerji kaybedilir ve bu da bir enerji kaybına neden olur. Bununla birlikte, gelen foton enerjisi E_g ’ den daha düşükse foton soğurulmaz, bu da yine enerji kaybına neden olur. Fakat ürettiğimiz hücrelerdeki E_g değerleri birbirinden çok farklılık göstermediği için bu durum bizde bir kaygı oluşturmamıştır.



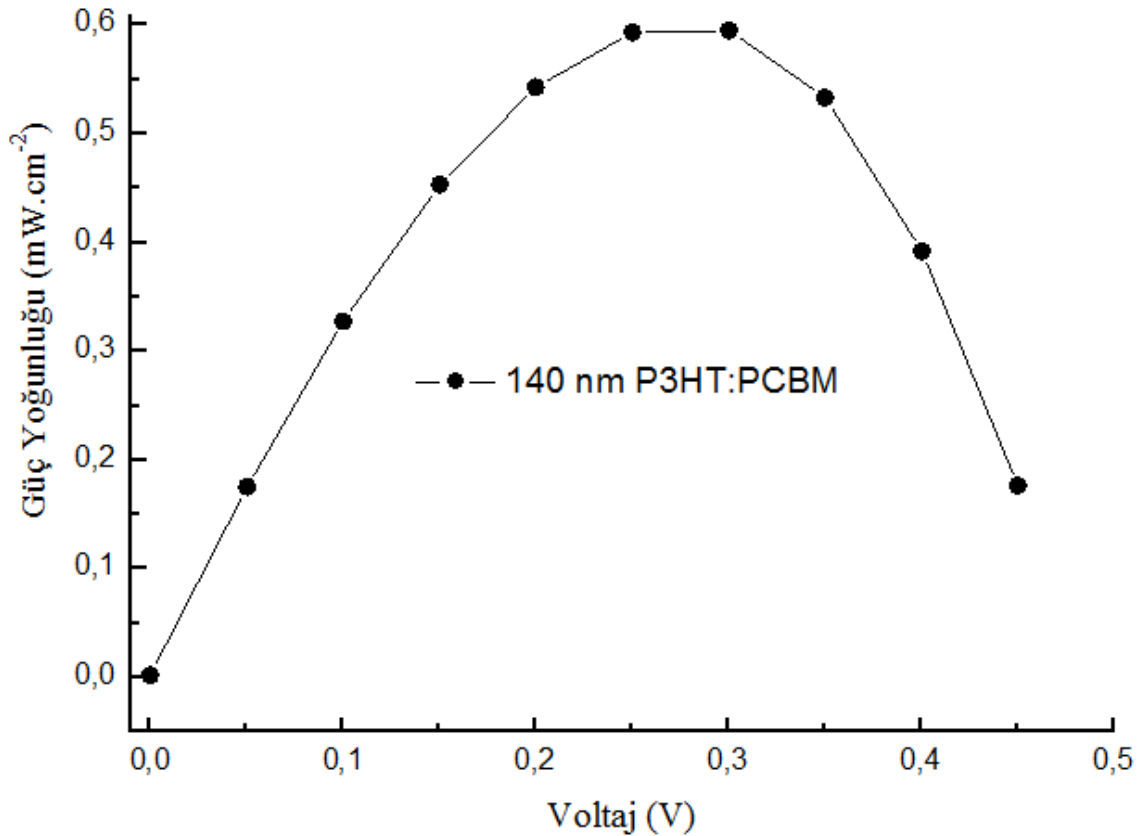
Şekil 4.6. 140 nm kalınlığında P3HT:PCBM tabakasına sahip güneş hücresinin J-V karakteristiği.

Üretilen güneş hücrelerinin karakteristik özelliklerini ortaya çıkarmak için akım yoğunluğu (J) - gerilim (V) deneyleri kullanılmıştır. Güneş hücresinin işlevsel olduğunu test edebilmek için 140 nm kalınlığında P3HT:PCBM aktif tabakasına sahip bir hücrenin karanlıkta ve AM 1,5 güneş radyasyonu koşulları altında kaydedilen J-V karakteristikleri Şekil 4.6’ da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, karanlıkta alınan J-V

eğrisinin güneş radyasyonu uygulandığında negatif akım yoğunluğu eksenine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu davranış, güneş hücresinin işlevsel olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Güneş hücrelerinin karakteristik parametrelerini hesaplamak ve analiz etmek için AM 1,5 radyasyon altında ölçülen J-V karakteristiklerini gösteren grafikler Şekil 4.8’ de çizilmiştir. Şekil kullanılarak, kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}), açık devre voltajı (V_{OC}), maksimum güç noktası (P_{maks}), dolum faktörü (FF) ve güç dönüşüm verimi (η) gibi önemli güneş pili parametreleri analiz edilmiştir. Burada, J_{SC} ve V_{OC} eğrilerin J eksenine ve V eksenine kesişimleri kullanılarak doğrudan şekilden belirlenebilirken, diğer parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. P_{maks} değeri her bir voltaj değerinde güneş hücresi tarafından üretilen gücün hesaplanması ve maksimum değerin alınmasıyla kolayca bulunabilir.

Şekil 4.7, 140 nm kalınlığında P3HT:PCBM aktif katman kalınlığına sahip güneş hücresi için çizilen P_{maks} eğrisini göstermektedir.



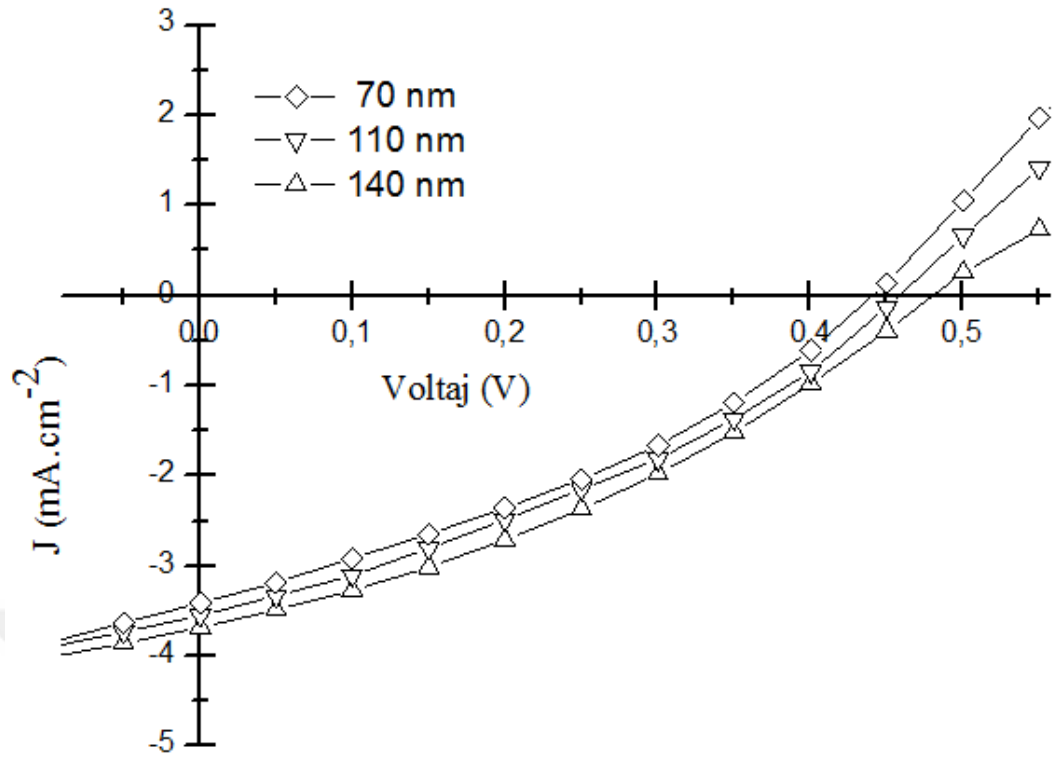
Şekil 4.7. 140 nm kalınlığında P3HT: PCBM tabakasına sahip güneş hücresinin P_{maks} eğrisi.

Üretilen güneş hücreleri için bir diğer önemli parametre olan dolum faktörü (FF) ise, (2.36) kullanılarak hesaplanabilir. [104]. (2.36), akım yoğunluğu cinsinden

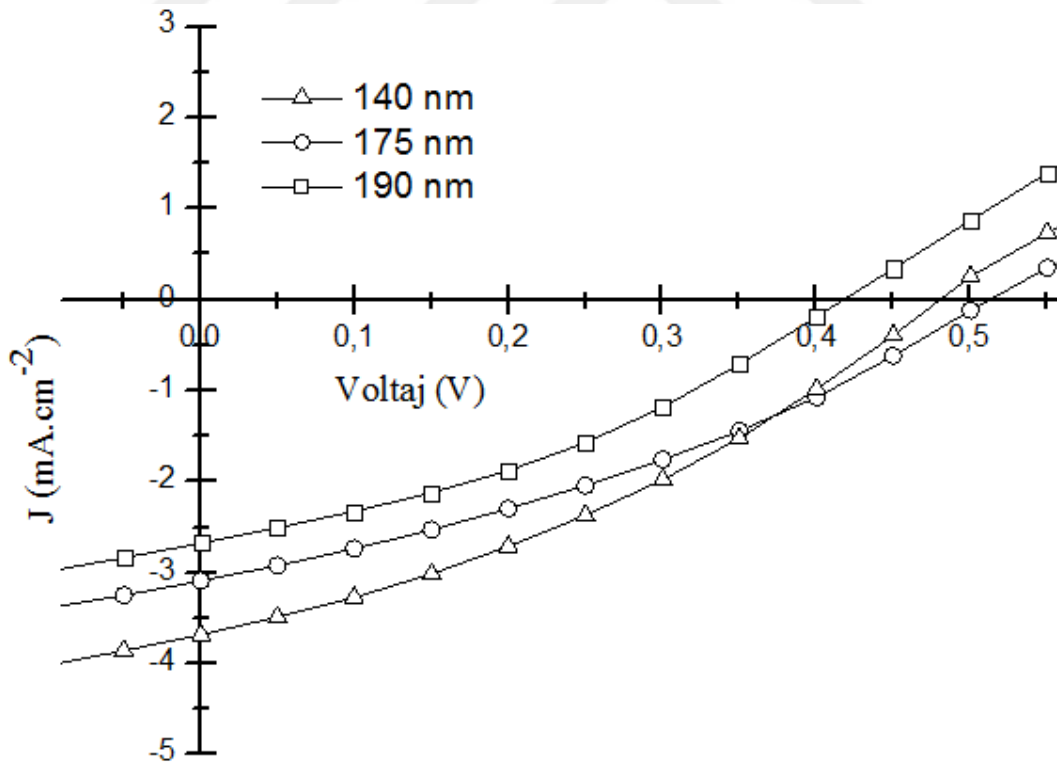
$$FF = \frac{P_{maks}}{J_{SC} \times V_{OC}} = \frac{J_{maks} \times V_{maks}}{J_{SC} \times V_{OC}} \quad (4.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada P_{maks} akım yoğunluğunun ve V_{maks} voltajın maksimum güç noktasındaki değerleridir.

Üretilen tüm güneş hücrelerine ait güneş radyasyonu altında kaydedilen J-V karakteristikleri yukarıda bahsedilen parametreleri hesaplamak için Şekil 4.8' de çizilmiştir. Şekil 4.8, güneş hücrelerinin karakteristiklerinin aktif katman kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğinin daha kolay anlaşılabilmesi için iki farklı grafik olarak çizilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.8. a) 70, 110 ve 140 nm, b) 140, 175 ve 190 nm kalınlığında P3HT:PCBM katmanlarına sahip güneş pillerinin J-V karakteristiği.

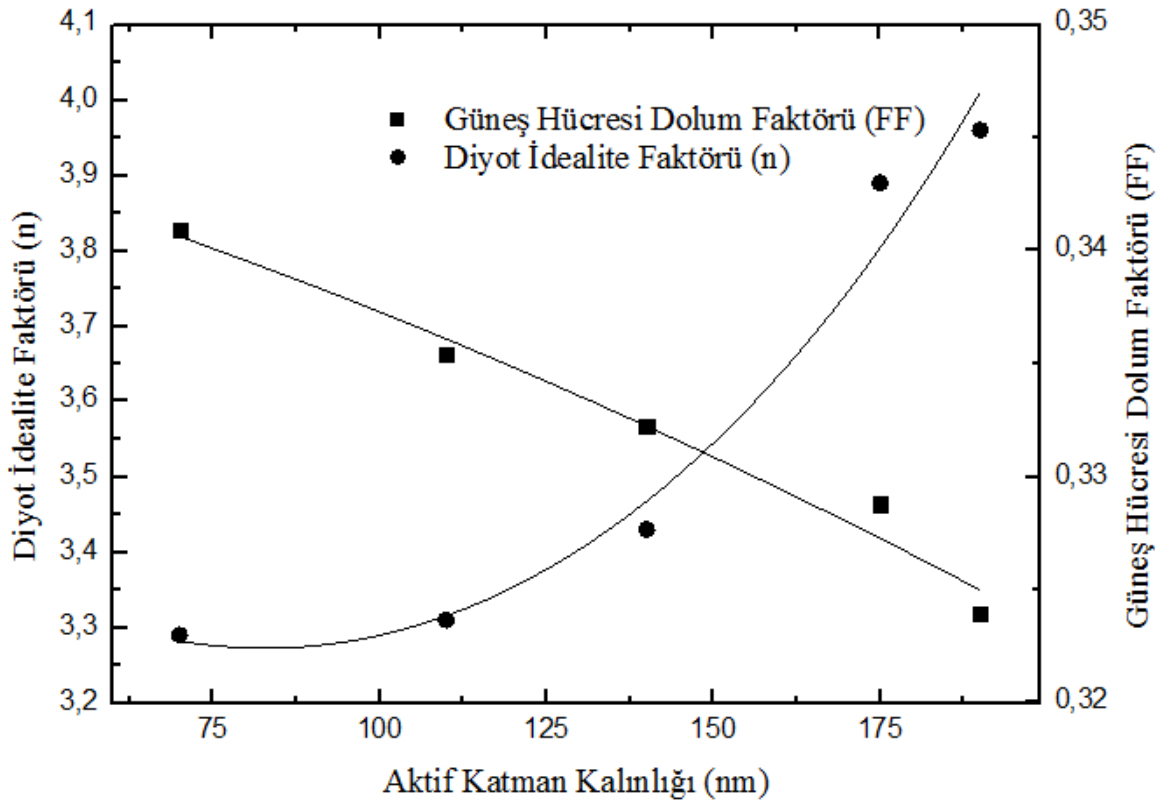
Ayrıca, güneş hücresi tarafından ışık enerjisinin ne oranda elektrik enerjisine dönüştürülebildiğini gösteren η ise (2.37)' deki gibi hesaplanabilir [104]. Burada P_{in} , güneş hücresi üzerine gelen radyasyon gücünü temsil etmektedir. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için karakteristik parametreleri hesaplanarak bu parametrelerin tümü Çizelge 4.1' te verilmiştir. Bu parametreler arasında hücre performansını belirleyen en önemli parametre güç dönüşüm verimidir. Çizelgeden görüldüğü üzere en yüksek güç dönüşüm verimine sahip olan güneş hücresi 140 nm kalınlığında P3HT:PCBM aktif katmanına sahip olan hücredir. Daha küçük aktif katman kalınlıklarına sahip güneş hücrelerine bakıldığında aktif katman kalınlığı azaldıkça hücre veriminin de azaldığı, daha büyük aktif katman kalınlıklarına sahip güneş hücrelerinde ise aktif katman kalınlığı arttıkça verimin azaldığı görülmektedir. Bu nedenle güneş hücrelerinin üretiminde difüzyon uzunluğu, soğurma miktarı, soğurma katsayısı gibi bazı özellikler göz önünde bulundurularak en iyi verimi elde etmek için uygun olan aktif katman kalınlığının tespit edilmesi de önem taşımaktadır.

Çizelge 4.1. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için karakteristik parametreleri.

Kalınlık (nm)	J_{sc} (mA.cm ⁻²)	V_{oc} (V)	P_{max} (mW.cm ⁻²)	% FF	% PCE
70	3,4	0,44	0,51	34,09	0,51
110	3,5	0,46	0,54	33,54	0,54
140	3,7	0,48	0,59	33,22	0,59
175	3,1	0,52	0,53	32,88	0,53
190	2,8	0,43	0,39	32,39	0,39

Güneş hücresinin verimi çeşitli parametrelere bağlıdır. İlk aşamada, foton, E_g ' den, soğurma katsayısından ve malzemenin kalınlığından etkilenebilecek aktif hücre tabakası

tarafından yakalanmalıdır. Önceki bölümlerde söz edildiği gibi organik maddeler için, E_g ' in genellikle en yüksek işgal edilen moleküler orbital (HOMO) seviyesi ile en düşük işgal edilmemiş moleküler orbital (LUMO) enerji seviyesi arasındaki enerji farkını temsil ettiği düşünülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, hücrelerin E_g ' si birbirinden önemli ölçüde farklı olmadığından (Şekil 4.5), ışık 190 nm kalınlığında P3HT:PCBM katmanına sahip hücre tarafından en yüksek oranda soğurulur (Şekil 4.3). Sonrasında, soğurulan ışık minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürülmelidir. Hücrelerin elektriksel özellikleri incelendiğinde, 70 nm kalınlığında P3HT:PCBM tabakasına sahip hücrelerin, ideal bir diyota en yakın hücre olduğu görülmektedir (Şekil 4.2). Bir hücre için idealite faktörü, bir güneş hücresinin güç dönüşüm verimini doğrudan etkilemez, ancak idealite faktörü değerindeki bir artışın, güneş hücresi dolum faktörünün değerinde bir azalmaya ve bundan dolayı verimde azalmaya neden olması beklenir. Bu davranışı görmek için Şekil 4.9 çizilmiştir.

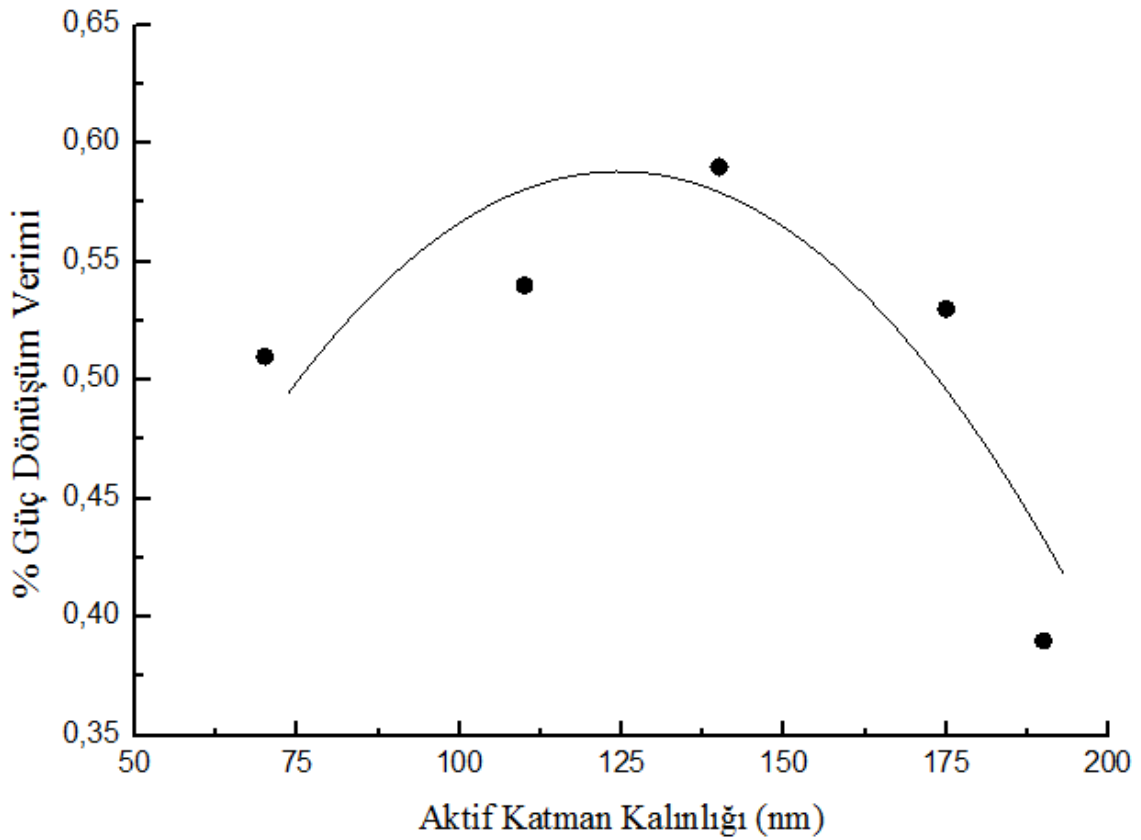


Şekil 4.9. Üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için idealite faktörlerinin ve dolum faktörlerinin davranışları.

Şekilde görüldüğü üzere, güneş hücrelerinin n ve FF değerleri beklendiği gibi birbiriyle

ters orantılıdır. Buradan daha düşük n ve daha yüksek bir FF' ye sahip güneş hücresinin soğurma özellikleri diğer hücelere kıyasla daha zayıf olsa bile daha yüksek bir güç dönüşüm verimine sahip olabileceği anlaşılmaktadır.

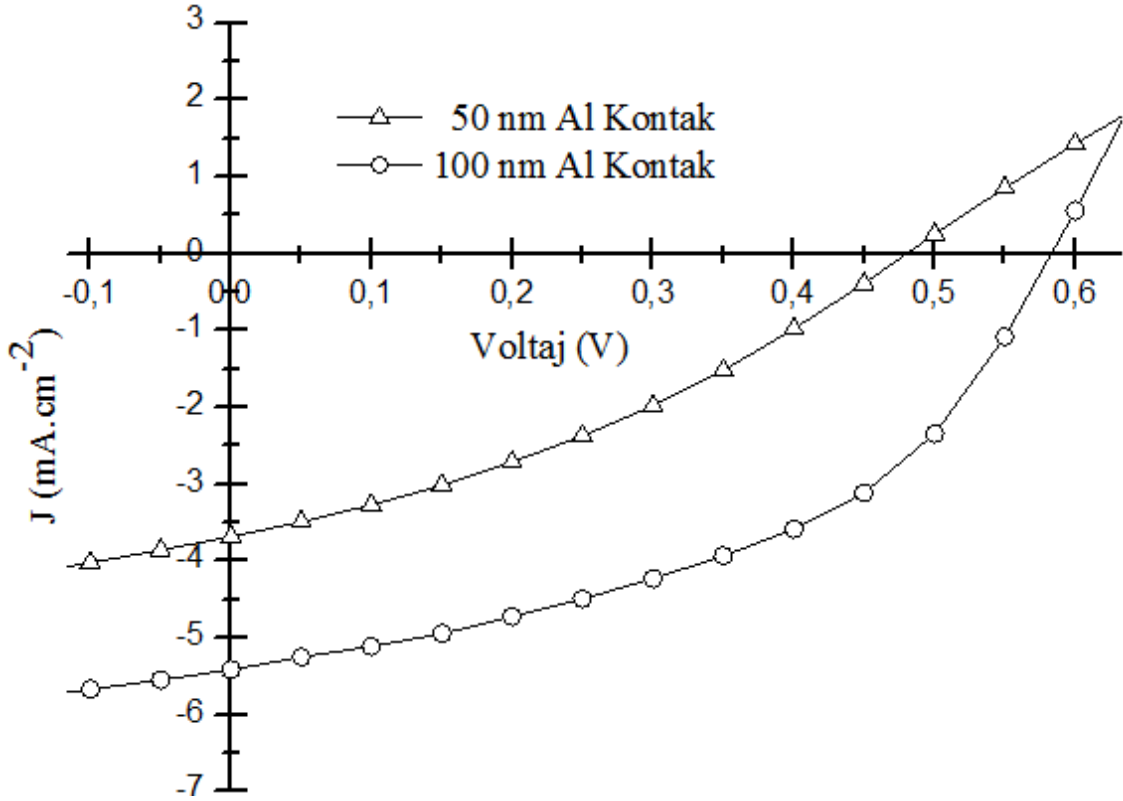
Güneş hücrelerinin güç dönüşüm veriminin P3HT:PCBM aktif katman kalınlığına bağlılığını göstermek için Şekil 4.10 çizilmiştir. Şekilden, en yüksek verime sahip güneş hücresinin 140 nm kalınlığında P3HT:PCBM katmanına sahip olduğu görülmektedir. Bu hücrenin verimi %0,59 olarak hesaplanmıştır. Mevcut tüm verilerin sonuçları kullanılarak bu hücrenin üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin sahip olduğu optik ve elektriksel özellikleri arasında optimum özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.10. Farklı P3HT:PCBM katman kalınlıkları için ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin verim değerleri.

Literatür incelendiğinde aynı aktif katman kalınlığına sahip ancak farklı Al kontak kalınlığına sahip güneş hücrelerinin farklı verime sahip olduğu görülmektedir [47]. Vakum koşulları altında üretilen P3HT:PCBM aktif katmanına sahip güneş hücrelerinin 50 nm kalınlığında Al kontakla kaplandığındaki güç dönüşüm verimleri 14×10^{-5} olarak bulunurken aynı koşullarda üretilen ve 100 nm kontak kalınlığına sahip

hücrelerin verimi %0,57 olarak bulunmuştur [47]. Bu nedenle, kontak kalınlığının artırılmasının güç dönüşüm verimini artıracığı sonucuna varılmıştır. Bu sonucu, ürettiğimiz numuneler üzerinde test etmek için son olarak, en yüksek verim elde ettiğimiz güneş hücresine 50 nm yerine 100 nm Al kontak kaplayarak yeni bir güneş hücresi üretimi gerçekleştirilmiştir. Yeni üretilen 100 nm Al kontağa sahip güneş hücresinin J-V karakteristiği daha önceden üretilen 50 nm Al kontağa sahip güneş hücresinin J-V karakteristiği ile karşılaştırma amaçlı Şekil 4.11’ de verilmiştir.



Şekil 4.11. 100nm Al ve 50nm Al kontağa sahip güneş hücrelerine ait J-V karakteristik eğrileri.

Şekil incelendiğinde Al kontak kalınlığının artırılmasının, güneş hücresinin V_{OC} değerini 0,48 V’ tan 0,58 V’ a ve J_{SC} değerini $3,70 \text{ mA.cm}^{-2}$ ’ den $5,52 \text{ mA.cm}^{-2}$ ’ ye ve FF değerini ise 0,33’ den 0,45’ e yükselttiği görülmektedir. Buna bağlı olarak hücre verimi ise %0,59’ dan %1,44’ e yükselmiştir. Bu sonuç literatürdeki çalışmalarla uyumlu ve kayda değer bir sonuçtur. 100 nm Al kontak ile üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin verim değerlerinin, daha önceden üretilen güneş pillerine ait verim değerlerinin bir kısmından daha düşük olmasına rağmen bunlarla kıyaslanabilecek düzeyde olduğu görülmüştür.

Sonuçların detaylı bir analizi yapıldığında, ürettiğimiz hücrelerin V_{OC} değerlerinin literatürde yapılmış olan çalışmalar sonucu elde edilen 0,57 V ile 0,63 V arasındaki değerlerle kıyaslanabilecek kadar yüksek olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, çalışmamız sonucu elde edilen FF değerlerinin ise yine literatürdeki 0,21 ile 0,68 arasında değişen FF değerleri ile kıyaslanabilecek kadar yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, güç dönüşüm verimi değerlerinde oluşan asıl farkın, elde edilen J_{SC} değerlerinin literatürdeki $4,61 \text{ mA.cm}^{-2}$ ile $11,62 \text{ mA.cm}^{-2}$ arasında değişen değerlere göre nispeten düşük olmasından kaynaklandığı da yine verilerden açıkça görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinden elde edilen en yüksek güç dönüşüm değerlerinin, aktif katmanları vakum ortamında üretilen hücrelere ait olduğu görülmektedir. Bu nedenle, çalışmamızda üretilen güneş hücrelerinin nispeten düşük J_{SC} ve GDV' ye sahip olmalarının nedeninin hücre üretiminin açık hava koşullarında yapılmasının aktif katman üretimi aşamasında belirli oranda kirliliğe yol açması olduğu düşünülmüştür. Ancak, elde edilen düşük GDV değerlerine rağmen açık hava koşullarında üretim yapmanın kolaylık ve maliyet açısından sağladığı avantajlar hesaba katıldığında, belirli uygulamalar için daha avantajlı olabileceği de hatırdan çıkarılmamalıdır.

Organik güneş hücrelerinin verimini artırmak için metal kontak malzeme türü, kontak kalınlığı, kontak tavlama sıcaklığı, kontak tavlama süresi, hücreye eklenen deşik ve elektron taşıyıcı katmanları gibi parametrelerin malzeme türlerinin ve kalınlıklarının değiştirilmesi sonucunda daha yüksek verimler elde edilebileceği daha önceden yapılan çeşitli çalışmalar incelendiğine açıkça görülmektedir [17]-[19], [23], [32], [33], [36], [37], [41], [42], [44]-[47].

Çalışmanın devamı niteliğinde gerçekleştirilecek bir ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücresi üretim çalışmasında, hücrelerin verimlerini artırmak için Al kontakın çeşitli süreler ve sıcaklıklarda tavlama ile beraber kontak aktif katman arasına çeşitli elektron taşıyıcı katmanlar eklenerek ve aktif katmanın enerji yapısını çeşitli katkılar kullanarak modifiye ederek daha yüksek verime sahip ve ticari hücrelerle rekabete daha yakın güneş hücreleri üretilmesi planlanmaktadır.

Literatürde yakın zamanda üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin karakteristik parametreleri Çizelge 4.2' de verilmiştir. Çizelge 4.2' de ayrıca bu güneş hücrelerinin Al kontaklarının kaplanma termal buharlaştırma veya magnetron püskürtme yöntemlerinden hangisi ile gerçekleştirildiği, güneş hücrelerinin

üretim şartları belirtilmiştir. Bilindiği gibi açık hava ortamında üretilen güneş hücrelerinin toz ve kirlilikten etkilenmesi ile güç dönüşüm verimi düşmektedir. Bu konuyla ilgili olarak detaylı inceleme yapılmak istenirse de Çizelge 1.1’ de verilmiş olan, son 15 yıl içerisinde üretilmiş çok sayıdaki P3HT:PCBM tabanlı güneş hücrelerine ait bilgiler ve kaynak numaralarından faydalanılması önerilmektedir.

Çizelge 4.2. Literatürde yakın zamanda üretilen ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücrelerinin karakteristik parametreleri.

Aktif Katman Kalınlığı (nm)	Al Kontak Kalınlığı (nm)	J_{sc} (mA.cm⁻²)	V_{oc} (V)	FF	% PCE	Üretim Ortamı	Ref. No
140	50 (TE)	3,70	0,48	0,33	0,59	Hava	Bu Çalışma
150	100 (TE)	11,62	0,57	0,58	3,84	Vakum	[35]
100-250	100 (TE)	4,61	0,60	0,21	0,57	Vakum	[36]
100-250	50 (MS)	2,16	0,34	0,19	14×10 ⁻⁵	Vakum	[36]
160	-	8,74	0,62	0,51	2,77	Vakum	[37]
160	-	8,51	0,63	0,52	2,76	N ₂	[37]
160	-	7,86	0,62	0,54	2,64	Ar ₂	[37]
160	-	7,45	0,63	0,48	2,29	Hava	[37]

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, açık hava ortamında üretilen çeşitli P3HT:PCBM aktif tabaka kalınlıklarına sahip ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al OGH' leri üzerinde yapılan araştırmaların sonuçları paylaşılmıştır. Üretilen hücrelerin aktif tabaka kalınlıkları, Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleme metodu ile 190 nm, 175 nm, 140 nm, 110 nm ve 70 nm olarak ölçülmüştür. Üretilen güneş hücrelerinin elektriksel ve optik özelliklerini ortaya çıkarmak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Güneş hücrelerinin diyot özellikleri karanlık ortamda I-V ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Ölçümlerin sonuçları kullanılarak, en önemli diyot parametresi olarak kabul edilen n tüm hücreler için sırasıyla 3,96; 3,89; 3,43; 3,31 ve 3,29 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, soğurma özellikleri de optik geçirgenlik spektroskopisi kullanılarak araştırılmıştır. Aktif katmanı oluşturan malzemenin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki farka tekabül eden E_g değerleri optik geçirgenlik ölçümlerinin sonuçları kullanılarak her bir numune için sırasıyla 1,71; 1,71; 1,70; 1,69 ve 1,67 eV olarak hesaplanmıştır. Aktif katmanın kompozisyonu ve dolayısıyla yapısı değiştirilmeden elde edilen E_g değerlerinin birbirine yakın çıkmasının beklenen bir sonuç olduğu kanaatine varılmıştır. Bu nedenle, aktif katman kalınlığının E_g parametresi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı düşünülmüştür. Ayrıca, her bir güneş hücresi için güneş pili parametreleri AM 1.5 güneş radyasyonu altında J-V ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al hücreleri için, bu ölçüm sonuçları kullanılarak açık devre gerilimi (V_{OC}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}), maksimum hücre gücü (P_{maks}), dolum faktörü (FF) ve GDV gibi önemli güneş hücresi parametreleri de hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu %GDV değerlerinin sırasıyla 0,39; 0,53; 0,59; 0,54 ve 0,51 olduğu bulunmuştur. Güneş hücrelerinin %FF değerlerinin n değerleri düştükçe 32,39 ile 34,09 arasında arttığı da gözlenmiştir. Bu durumda hücre GDV' sini etkileyen parametrelerden birinin de diyot idealite faktörü n olduğu sonucuna varılmıştır. Verilerin incelenmesi sonucu, en yüksek GDV' ye sahip hücrenin 140 nm P3HT:PCBM kalınlığına sahip hücre olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, kontak kalınlığının hücre verimine etkisini incelemek için, en yüksek verime sahip ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücreleri, 100 nm kalınlığa sahip Al kontak

ile üretilmiştir. Al kontak kalınlığının artırılmasının, güneş hücresinin V_{OC} değerini 0,48 V' tan 0,58 V' a ve J_{sc} değerini $3,70 \text{ mA.cm}^{-2}$ 'den $5,52 \text{ mA.cm}^{-2}$ ' ye ve FF değerini 0,33' den 0,45' e, hücre verimini ise %0,59' dan %1,44' e yükselttiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre, üretilen hücrelerin GDV' lerinin literatürdekilerle kıyaslanabilir değerlerde olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, üretilen hücrelerin nispeten düşük J_{sc} ve GDV'ye sahip olmalarının nedeninin ise hücre üretiminin açık hava koşullarında yapılmasının aktif katman üretimi aşamasında belirli oranda kirliliğe yol açması olduğu düşünülmüştür. Ancak, elde edilen nispeten düşük GDV değerlerine rağmen açık hava koşullarında üretim yapmanın kolaylık ve maliyet açısından sağladığı avantajlar hesaba katıldığında, belirli uygulamalar için daha avantajlı olabileceği de vurgulanmıştır. Literatür ve deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında, ticari rakipleri ile rekabet potansiyeli olacak yüksek GDV değerlerine sahip ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al güneş hücreleri üretilmesi için bu çalışmanın devamı niteliği taşıyacak bir çalışma önerisi sunulmuştur.

6. KAYNAKLAR

- [1] J. Nelson, "Polymer: Fullerene bulk heterojunction solar cells," *Materials Today*, c. 14, s. 10, ss. 462–470, 2011.
- [2] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 93, s. 4, ss. 394–412, 2009.
- [3] J. Poortmans, T. Aernouts vd., "Organic solar cell strategy and developments in Flanders," *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresden, Almanya, 2006, ss. 23–28.
- [4] L. Blankenburg, K. Schultheis, H. Schache, S. Sensfuss, ve M. Schrödner, "Reel-to-reel wet coating as an efficient up-scaling technique for the production of bulk-heterojunction polymer solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 93, s. 4, ss. 476–483, 2009.
- [5] P. Heremans, D. Cheyons, ve B. P. Rand, "Strategies for increasing the efficiency of heterojunction organic solar cells: Material selection and device architecture," *Accounts of Chemical Research*, c. 42, s. 11, ss. 1740–1747, 2009.
- [6] R. Hegde vd., "The impact of controlled solvent exposure on the morphology, structure and function of bulk heterojunction solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 107, ss. 112–124, 2012.
- [7] P. P. Khlyabich, B. Burkhart, A. E. Rudenko ve B. C. Thompson, "Optimization and simplification of polymer-fullerene solar cells through polymer and active layer design," *Polymer*, c. 54, s. 20, ss. 5267–5298, 2013.
- [8] G. Li, R. Zhu, ve Y. Yang, "Polymer solar cells," *Nature Photonics*, c. 6, s. 3, ss. 153–161, 2012.
- [9] B. C. Thompson ve J. M. J. Fréchet, "Polymer-fullerene composite solar cells," *Angewandte Chemie - International Edition*, c. 47, s. 1, ss. 58–77, 2008.
- [10] M. T. Dang, L. Hirsch, ve G. Wantz, "P3HT:PCBM, best seller in polymer photovoltaic research," *Advanced Materials*, c. 23, s. 31, ss. 3597–3602, 2011.
- [11] K. Kawano, J. Sakai, M. Yahiro, ve C. Adachi, "Effect of solvent on fabrication of active layers in organic solar cells based on poly(3-hexylthiophene) and fullerene derivatives," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 93, s. 4, ss. 514–518, 2009.
- [12] A. M. Ballantyne vd., "Understanding the influence of morphology on poly(3-hexylselenothiophene):PCBM solar cells," *Macromolecules*, c. 43, s. 3, ss. 1169–1174, 2010.
- [13] O. Oklobia ve T. S. Shafai, "A quantitative study of the formation of PCBM clusters upon thermal annealing of P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cell," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 117, ss. 1–8, 2013.
- [14] M. Campoy-Quiles vd., "Understanding the influence of morphology on

- Poly(3-hexylselenothiophene):PCBM solar cells,” *Macromolecules*, c. 7, s. 2, ss. 158–164, 2008.
- [15] F. C. Jamieson, E. B. Domingo, T. McCarthy-Ward, M. Heeney, N. Stingelin, ve J. R. Durrant, “Fullerene crystallisation as a key driver of charge separation in polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells,” *Chemical Science*, c. 3, s. 2, ss. 485–492, 2012.
 - [16] P. Müller-Buschbaum, “The active layer morphology of organic solar cells probed with grazing incidence scattering techniques,” *Advanced Materials*, c. 26, s. 46, ss. 7692–7709, 2014.
 - [17] T. Erb, U. Zhokhavets, H. Hoppe, G. Gobsch, M. Al-Ibrahim, ve O. Ambacher, “Absorption and crystallinity of poly(3-hexylthiophene)/fullerene blends in dependence on annealing temperature,” *Thin Solid Films*, c. 511–512, ss. 483–485, 2006.
 - [18] G. Li, V. Shrotriya, Y. Yao, ve Y. Yang, “Investigation of annealing effects and film thickness dependence of polymer solar cells based on poly(3-hexylthiophene),” *Journal of Applied Physics*, c. 98, s. 4, ss. 1–5, 2005.
 - [19] D. Chirvase, J. Parisi, J. C. Hummelen, ve V. Dyakonov, “Influence of nanomorphology on the photovoltaic action of polymer-fullerene composites,” *Nanotechnology*, c. 15, s. 9, ss. 1317–1323, 2004.
 - [20] T. Kuwabara, Y. Kawahara, T. Yamaguchi, ve K. Takahashi, “Characterization of inverted-type organic solar cells with a ZnO layer as the electron collection electrode by ac impedance spectroscopy,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, c. 1, s. 10, ss. 2107–2110, 2009.
 - [21] F. Fabregat-Santiago vd., “Correlation between photovoltaic performance and impedance spectroscopy of dye-sensitized solar cells based on ionic liquids,” *The Journal of Physical Chemistry C*, c. 111, s. 17, ss. 6550–6560, 2007.
 - [22] Q. Wang, J. E. Moser, ve M. Grätzel, “Electrochemical impedance spectroscopic analysis of dye-sensitized solar cells,” *The Journal of Physical Chemistry C, B*, c. 109, s. 31, ss. 14945–14953, 2005.
 - [23] V. D. Mihailetschi, H. Xie, B. De Boer, L. J. A. Koster, ve P. W. M. Blom, “Charge transport and photocurrent generation in poly(3-hexylthiophene): Methanofullerene bulk-heterojunction solar cells,” *Advanced Functional Materials*, c. 16, s. 5, ss. 699–708, 2006.
 - [24] T. M. Clarke ve J. R. Durrant, “Charge photogeneration in organic solar cells,” *Chemical Reviews*, c. 110, s. 11, ss. 6736–6767, 2010.
 - [25] P. Mahajan, A. Singh, ve S. Arya, “Improved performance of solution processed organic solar cells with an additive layer of sol-gel synthesized ZnO/CuO core/shell nanoparticles,” *Journal of Alloys and Compounds*, c. 814, s. 152292, 2020.
 - [26] S. Wang vd., “A new dibenzo[g,p]chrysene derivative as an efficient anode buffer for inverted polymer solar cells,” *Organic Electronics*, c. 74, ss. 269–275, 2019.
 - [27] X. Huang, H. Yu, S. Shi, ve C. Huang, “Improving the performance of inverted polymer solar cells by the efficiently doping and modification of electron transport layer-ZnO,” *Organic Electronics*, c. 65, ss. 311–320, 2019.

- [28] O. Oklobia, S. Komilian, ve T. Sadat-Shafai, "Impedance spectroscopy and capacitance – voltage measurements analysis: Impact of charge carrier lifetimes and mapping vertical segregation in bulk heterojunction P3HT: PCBM solar cells," *Organic Electronics*, c. 61, ss. 276–281, 2018.
- [29] W. Wang vd., "Influence of solvent additive 1,8-octanedithiol on P3HT:PCBM solar cells," *Advanced Functional Materials*, c. 28, s. 20, ss. 1–9, 2018.
- [30] Z. Hu, J. Zhang, ve Y. Zhu, "Effects of solvent-treated PEDOT: PSS on organic photovoltaic devices," *Renewable Energy*, c. 62, ss. 100–105, 2014.
- [31] O. Oklobia ve T. S. Shafai, "Correlation between charge carriers mobility and nanomorphology in a blend of P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cell: Impact on recombination mechanisms," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 122, ss. 158–163, 2014.
- [32] O. Oklobia ve T. S. Shafai, "A quantitative study of the formation of PCBM clusters upon thermal annealing of P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cell," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 117, ss. 1–8, 2013.
- [33] A. Iwan, M. Palewicz, M. Ozimek, A. Chuchmala, ve G. Pasciak, "Influence of aluminium electrode preparation on PCE values of polymeric solar cells based on P3HT and PCBM," *Organic Electronics*, c. 13, s. 11, ss. 2525–2531, 2012.
- [34] M. Wang vd., "Degradation mechanism of organic solar cells with aluminum cathode," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 95, s. 12, ss. 3303–3310, 2011.
- [35] F. Cheng vd., "Enhancing the short-circuit current and efficiency of organic solar cells using MoO₃ and CuPc as buffer layers," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 95, s. 10, ss. 2914–2919, 2011.
- [36] J. W. Jung ve W. H. Jo, "Annealing-free high efficiency and large area polymer solar cells fabricated by a roller painting process," *Advanced Functional Materials*, c. 20, s. 14, ss. 2355–2363, 2010.
- [37] J. W. Jeong, J. W. Huh, J. I. Lee, H. Y. Chu, I. K. Han, ve B. K. Ju, "Effects of thermal annealing on the efficiency of bulk-heterojunction organic photovoltaic devices," *Current Applied Physics*, c. 10, s. 3, ss. S520–S524, 2010.
- [38] A. Orimo vd., "Surface segregation at the aluminum interface of poly(3-hexylthiophene)/ fullerene solar cells," *Applied Physics Letters*, c. 96, s. 4, 2010.
- [39] J. Jo, S. S. Kim, S. I. Na, B. K. Yu, ve D. Y. Kim, "Time-dependent morphology evolution by annealing processes on polymer:Fullerene blend solar cells," *Advanced Functional Materials*, c. 19, s. 6, ss. 866–874, 2009.
- [40] C. Y. Nam, D. Su, ve C. T. Black, "High-performance air-processed polymer-fullerene bulk heterojunction solar cells," *Advanced Functional Materials*, c. 19, s. 22, ss. 3552–3559, 2009.
- [41] G. Li, Y. Yao, H. Yang, V. Shrotriya, G. Yang, ve Y. Yang, "'Solvent annealing' effect in polymer solar cells based on poly(3-hexylthiophene) and methanofullerenes," *Advanced Functional Materials*, c. 17, s. 10, ss. 1636–1644, 2007.
- [42] H. Kim, W. W. So, ve S. J. Moon, "Effect of thermal annealing on the performance of P3HT/PCBM polymer photovoltaic cells," *Journal of the Korean*

Physical Society, c. 48, s. 3, ss. 441–445, 2006.

- [43] G. Li vd., “High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends,” *Nature Materials*, c. 4, s. 11, ss. 864–868, 2005.
- [44] G. Li, V. Shrotriya, Y. Yao, ve Y. Yang, “Investigation of annealing effects and film thickness dependence of polymer solar cells based on poly(3-hexylthiophene),” *Journal of Applied Physics*, c. 98, s. 4, 2005.
- [45] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, ve A. J. Heeger, “Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology,” *Advanced Functional Materials*, c. 15, s. 10, ss. 1617–1622, 2005.
- [46] J. G. Simmons, “Electric tunnel effect between dissimilar electrodes separated by a thin insulating film,” *Journal of Applied Physics*, c. 34, s. 9, ss. 2581–2590, 1963.
- [47] A. M. Cowley ve S. M. Sze, “Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems,” *Journal of Applied Physics*, c. 36, s. 10, ss. 3212–3220, 1965.
- [48] M. Pepper, “Metal-semiconductor contacts,” *Physics in Technology*, c. 5, s. 4, s. 223, 1974.
- [49] J. Szatkowski ve K. Sierański, “Simple interface-layer model for the nonideal characteristics of the Schottky-barrier diode,” *Solid State Electronics*, c. 35, s. 7, ss. 1013–1015, 1992.
- [50] Ş. Aydoğan, *Katıhal Fiziği*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık, 2014, ss. 1-463.
- [51] M. A. Rahman, “A review on semiconductors including applications and temperature effects in semiconductors,” *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology ve Sciences*, c. 7, s. 1, ss. 50–70, 2014.
- [52] E. Karagöz, “Farklı fonksiyonel grup bulunduran naftalimit bileşiği ile Schottky diyot yapımı ve diyotun elektriksel özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2018.
- [53] T. K. Todorov vd., “Ultrathin high band gap solar cells with improved efficiencies from the world’s oldest photovoltaic material,” *Nature Communications*, c. 8, s. 1, 2017.
- [54] N. D. Lang ve W. Kohn, “Theory of metal surfaces: Work function,” *Physical Review B*, c. 3, s. 4, ss. 1215–1223, 1971.
- [55] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8. baskı, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2005, ss. 105-617.
- [56] E. Özerden, “Metal/Organik/İnorganik yarıiletken yapıların sıcaklığa bağlı olarak elektriksel ve optik parametrelerinin belirlenmesi,” Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye, 2014.
- [57] M. Şağban, “PTB7:PCBM heteroeklem diyot ve güneş hücresi: Üretimi ve karakterizasyonu,” Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.

- [58] S. K. Streetman, B. G. Banerjee, *Katıhal Elektronik Devre Elemanları*, 6. baskı. Ankara, Türkiye: Palme Yayınevi, 2014, ss. 1-513.
- [59] R. H. Rhoderick, E. H. and Williams, *Metal-Semiconductor Contacts*, 2. baskı. Oxford, United Kingdom: Clarendon Press, 1988.
- [60] A. Türüt vd., “Interpreting the nonideal reverse bias C-V chracteristics and importance of the dependence of Schottky barrier height on applied voltage,” *Physica B*, s. 205, ss. 41–50, 1995.
- [61] H. Norde, “A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance,” *Journal of Applied Physics*, c. 50, s. 7, ss. 5052–5053, 1979.
- [62] A. A. M. Farag ve I. S. Yahia, “Rectification and barrier height inhomogeneous in Rhodamine B based organic Schottky diode,” *Synthetic Metals*, c. 161, s. 1–2, ss. 32–39, 2011.
- [63] H. G. Çetinkaya, “Aynı şartlarda hazırlanmış Al/ Bi₃Ti₄O₁₂/n-Si (MFS) diyotların engel yükseklikleri ile idealite faktörlerindeki dağılım,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 5, s.1, ss. 89–96, 2017.
- [64] Ö. Güllü, Ş. Aydoğan, ve A. Türüt, “Fabrication and electrical characteristics of Schottky diode based on organic material,” *Microelectronic Engineering*, c. 85, s. 7, ss. 1647–1651, 2008.
- [65] Ş. Karataş, Ş. Altındal, A. Türüt, ve A. Özmen, “Temperature dependence of characteristic parameters of the H-terminated Sn/p-Si(1 0 0) Schottky contacts,” *Applied Surface Science*, c. 217, s. 1–4, ss. 250–260, 2003.
- [66] C. X. Wang vd., “Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors in ZnO/diamond p-n junction diode,” *Applied Physics Letters*, c. 84, s. 13, ss. 2427–2429, 2004.
- [67] M. F. Karabat ve İ. Arsel, “Al/CuO/p-Si/Al diyot yapısının elektriksel özellikleri,” *Batman Yaşam Bilimleri Dergisi*, c. 5, s. 1, ss. 40–53, 2015.
- [68] G. Çankaya ve N. Uçar, “Schottky barrier height dependence on the metal work function for p-type Si schottky diodes,” *Zeitschrift für Naturforschung A*, c. 59, s. 11, ss. 795–798, 2004.
- [69] H. E. Lapa, A. Kökce, ve A. F. Özdemir, “Yb/p-Si Schottky diyotlarının elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 9, s. 3, ss. 1385–1394, 2019.
- [70] F. Ç. Kılıç, “Güneş enerjisi, Türkiye’deki son durumu ve üretim teknolojileri,” *Mühendis ve Makina*, c. 56, s. 671, ss. 28–40, 2015.
- [71] E. C. Durmaz, “Photovoltaic structures for solar cell applications,” Yüksek lisans tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Enstitüsü, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [72] O. Yıldırım ve C. Akay. (2020, Mart 24). *Organik tabanlı güneş hücrelerinin yapısal ve fotovoltaiik özelliklerinin tanımlanması* [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/112167101-Organik-tabanlı-gunes-hucrelerinin-yapısal-ve-fotovoltaiik-ozelliklerinin-tanimlanmasi.html>.
- [73] A. Fıratoğlu ve B. Yeşilata, “Maksimum güç nokta izleyicili fotovoltaiik sistemlerin optimum dizayn ve çalışma koşullarının araştırılması,” *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, c. 5, s. 1, ss. 147–158, 2003.

- [74] T. Teker, K. B. Varınca, M. Karakurt, ve M. Engineering. (2020, Mart 26). *Electric power generation in the solar systems ; comparisons of the inorganic and organic solar cells* [Online]. Akademik Platform. Erişim: <https://www.isites.info/PastConferences/ISITES2015/ISITES2015/papers/A13-ISITES2015ID279.pdf>.
- [75] O. H. Boz, “Günümüzün alternatif enerji kaynağı: fotovoltaik güneş pilleri,” Yüksek lisans tezi, Kimya Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2011.
- [76] A. Yazmacıyan, “Yarıiletken polimerler kullanılarak çift eklemli organik güneş pillerinin hazırlanması,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [77] M. C. Scharber ve N. S. Sarıçiftçi, “Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells,” *Progress in Polymer Science*, c. 38, s. 12, ss. 1929–1940, 2013.
- [78] G. Günday, “Polifenilenvinilen (PPV) bazlı konjuge polimerlerle hazırlanan organik fotovoltaik hücreler,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [79] F. Yan, J. Noble, J. Peltola, S. Wicks, ve S. Balasubramanian, “Semitransparent OPV modules pass environmental chamber test requirements,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 114, ss. 214–218, 2013.
- [80] G. Bayram, “Esnek nitelikli organik güneş hücresi yapımı ve karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2014.
- [81] İ. Candan ve Y. Özen, “P3HT:PCBM Fotoaktif tabanlı tersine çevrilmiş polimer güneş hücrelerinin üretimi ve karakterizasyonu,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, c. 7, s. 4, ss. 916–926, 2019.
- [82] M. Ekmekçi, “Nanomateriyaller kullanımıyla organik güneş hücrelerinin üretimi, karakterizasyonları ve güneş enerjisi santrallerinin kurulumu,” Doktora tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2018.
- [83] O. Ürper, “Tek duvarlı karbon nanotüplerin organik güneş pillerinde elektrot malzemesi olarak kullanılması,” Yüksek lisans tezi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [84] S. Güneş ve N. S. Sarıçiftçi, “An overview of organic solar cells,” *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, c. 25, s. 212, ss. 1–16, 2007.
- [85] M. Kurtay, “PCDTBT tabanlı organik diyot ve güneş hücrelerinin üretimi ve karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [86] G. Şenay, “Çok eklemli güneş pillerinde detaylı denge modeli ile verim optimizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [87] H. R. Özçalık, Ş. Yılmaz, ve E. Kılıç, “Güneş pilinin bir diyotlu eşdeğer devre yardımıyla matematiksel modelinin çıkartılması ve parametrelerinin incelenmesi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri*

Dergisi, c. 16, s. 1, ss. 23–29, 2013.

- [88] Ş. Yılmaz, E. Kılıç, R. Özçalık, ve A. Gani. (2020, 20 Nisan). *Fotovoltaik (PV) güneş pilinin iki diyotlu modellenmesi* [Online]. Akademik Platform. Erişim: <https://www.isites.info/PastConferences/ISITES2013/ISITES2013/papers/A13-ISITES13151.pdf>.
- [89] M. Ünlü, S. Çamur ve B. Arifoğlu. (2020, 24 Mayıs). *Fotovoltaik hücrenin tek diyot eşdeğer devre parametrelerinin çıkarılması ve MATLAB/ SIMULINK modeli* [Online]. Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/110496344-Fotovoltaik-hucrenin-tek-diyot-esdeger-devre-parametrelerinin-cikarilmasi-ve-matlab-simulink-modeli.html>.
- [90] C. R. Chiang vd., “Electrical conductivity in doped polyacetylene,” *Physical Review Letters*, c. 39, s. 17, 1977.
- [91] A. F. Diaz, K. K. Kanazawa, ve G. P. Gardini, “Electrochemical polymerization of pyrrole,” *Journal of the Chemical Society Chemical Communications.*, s. 14, ss. 635–636, 1979.
- [92] G. Kurtulmuş, “Ketonic resin-polypyrrole copolymers,” Yüksek lisans tezi, Polimer Bilim ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [93] M. Girtan ve M. Rusu, “Role of ITO and PEDOT:PSS in stability/degradation of polymer:fullerene bulk heterojunctions solar cells,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 94, s. 3, ss. 446–450, 2010.
- [94] V. D. Mihailetschi, P. W. M. Blom, J. C. Hummelen, ve M. T. Rispens, “Cathode dependence of the open-circuit voltage of polymer:fullerene bulk heterojunction solar cells,” *Journal of Applied Physics*, c. 94, s. 10, ss. 6849–6854, 2003.
- [95] J. A. Hauch, P. Schilinsky, S. A. Choulis, R. Childers, M. Biele, ve C. J. Brabec, “Flexible organic P3HT:PCBM bulk-heterojunction modules with more than 1 year outdoor lifetime,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, c. 92, s. 7, ss. 727–731, 2008.
- [96] H. Kızılcıaoğlu, “Tekli RF plazma metodu ile üretilmiş amorf hidrojenlenmiş karbon ince filmlerin (a-C:H) optik bant aralıklarının karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.
- [97] Ç. Aksoy, “(In₁₀Ga₉₀)Se yarıiletken kristalinin ve amorf ince filmlerinin doğrusal olmayan optik soğurma özellikleri,” Yüksek lisans tezi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [98] M. Dönmez, “V₂O₅ ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optiksel karakterizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [99] A. Akgöz, “Polianilin-pomza kompozitinin elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2010.
- [100] E. H. Rhoderick, “Metal–semiconductor contacts”, *Oxford University Press*, ss. 121–136, 1978.

- [101] C. Temirci, B. Bati, M. Sağlam, ve A. Türüt, “High-barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodization process,” *Applied Surface Science*, c. 172, s. 1–2, ss. 1–7, 2001.
- [102] M. Campos, L. O. S. Bulhões, ve C. A. Lindino, “Gas-sensitive characteristics of metal/semiconductor polymer Schottky device,” *Sensors and Actuators A: Physical*, c. 87, s. 1–2, ss. 67–71, 2000.
- [103] J. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, 2. baskı, New Jersey, ABD: Prencite-Hall Press, 1971, ss. 1-366.
- [104] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, Londra, Birleşik Krallık: Imperial College Press, 2003, ss. 1-363.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nazan ŞAĞAM
Doğum Tarihi ve Yeri : 24.10.1993 DÜZCE
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : nazan.shaghumi@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik Anabilim Dalı	Düzce Üniversitesi	2020
Lisans	Fizik Eğitimi Anabilim Dalı	Gazi Üniversitesi	2016
Lise	MF	Arsal Anadolu Lisesi	2011

YAYINLAR

N.Şağam, E.Elibol, K.Gökşen, "Investigation of Dependence of Optoelectronic Properties of P3HT:PCBM Based Organic Solar Cells on Active Layer Thickness," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Basımda.