

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK YARIİLETKEN FOTODİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE OPTOELEKTRONİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bayram GÜNDÜZ

Tez Yöneticisi
Doç. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK YARIİLETKEN FOTODİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE OPTOELEKTRONİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bayram GÜNDÜZ

Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU

Üye: Prof. Dr. Mahmut DOĞRU

Üye: Doç. Dr. Raşit ZENGİN

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

“Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması” konulu yüksek lisans tezimin hazırlanmasında maddi ve manevi her türlü yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer Hocam Doç. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU’na saygı ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca metal buharlaştırma işleminde yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Tahsin KILIÇOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. M. Enver AYDIN’a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarına FÜBAP-1365 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu’na teşekkür ederim. Son olarak da, her zaman ve her konuda olduğu gibi tez çalışmamda da maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.

Bayram GÜNDÜZ

İÇİNDEKİLER

SayfaNo

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	II
TABLolar LİSTESİ.....	VI
SİMGELER LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR.....	4
2.1 Schottky Kontaklar.....	4
2.1.1 p-Tipi Yarıiletken/Metal Kontaklar.....	4
2.1.2 n-Tipi Yarıiletken/Metal Kontaklar.....	7
2.2 Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Voltaj Karakteristikleri.....	11
2.3 Metal-Yarıiletken Fotodiyotlar.....	13
2.3.1 Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği.....	17
2.3.2 Fotovoltaik Etkiler.....	19
2.3.2.1 Hacimsel Fotovoltaik Etkiler.....	20
2.3.2.2 Yüzeysel Fotovoltaik Etkiler.....	21
2.3.3 Organik Yarıiletken-Metal Kontaklarda Fotovoltaik Etkiler.....	22
2.3.4 Fotovoltaik Parametreler.....	23
2.3.4.1 Açık-Devre Voltajı.....	23
2.3.4.2 Kısa-Devre Akımı.....	23
2.3.4.3 Spektral Cevap.....	23
2.3.4.4 Seri Direnç.....	24
2.3.4.5 Şönt Direnci.....	25
2.3.4.6 Kuantum Verimi.....	25
2.3.4.7 Doldurma Faktörü.....	25
2.3.4.8 Fotoduyarlılık.....	28
3. DENEYSEL İŞLEMLER VE ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	29
3.1 Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al, Al/p-Si/PCBM:MEH-PPV/Al ve Al/p-Si/PANI/Al Organik Yarıiletken Fotodiyotları.....	29
3.1.1 Silisyum İnce Tabakalarının Temizlenmesi.....	29
3.1.2 Silisyum Altlığı Üzerine Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması.....	30
3.2 ITO/MEH-PPV/Al, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al ve ITO/PEDOT-PSS/MEH- PPV:PCBM Organik Yarıiletken Fotodiyotları.....	33
3.2.1 ITO Camlarını Temizleme İşlemi.....	33
3.3 Hazırlanan Diyotların Akım-Voltaj Karakteristikleri.....	37
3.4 Fotovoltaik Özellikleri.....	48
3.4.1 Fotovoltaik Parametreler.....	48
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	64
KAYNAKLAR.....	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

- Şekil 2.1** p-tipi yarıiletken-metal doğrultucu ve omik kontak enerji-band diyagramları: **(a)** ve **(c)** ayrı iken nötür durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, **(b)** $\phi_s > \phi_m$ olması durumunda p-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve **(d)** $\phi_m > \phi_s$ olması durumunda p-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmaya sahip olmayan kontakların oluşumu.....6
- Şekil 2.2** p-tipi yarıiletken/metal doğrultucu kontağın elektron enerji band diyagramları: **(a)** düz besleme, **(b)** ters besleme durumunda.....7
- Şekil 2.3** n-tipi yarıiletken/metal doğrultucu ve omik kontak enerji-band diyagramları: **(a)** ve **(c)** ayrı iken nötür durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, **(b)** $\phi_m > \phi_s$ olması durumunda n-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve **(d)** $\phi_s > \phi_m$ olması durumunda n-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmaya sahip olmayan kontakların oluşumu.....8
- Şekil 2.4** n-tipi yarıiletken/metal doğrultucu kontağın elektron enerji band diyagramları. **(a)** düz besleme, **(b)** ters besleme durumunda.....10
- Şekil 2.5** Bir Schottky diyodunun akım-gerilim karakteristiği.....12
- Şekil 2.6** Aydınlatılan bir Schottky eklemine şematik diyagramı.....14
- Şekil 2.7 a)** Metalden yarıiletkenine uyarılmış elektronların fotoelektrik yayılımı ($E_g > h\nu > q\phi_b$). **b)** Boşluk-elektron çiftinin banttan-banda uyarımı ($h\nu > E_g$). **c)** Boşluk-elektron çifti üretimi ve büyük ters gerilim uygulaması altında çıkış oluşumu ($h\nu > E_g$ ve $V \cong V_B$).....15
- Şekil 2.8** Bir fotodiyotun yapısı.....16
- Şekil 2.9** Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-gerilim karakteristikleri18
- Şekil 2.10 (a)** Fotodiyodun $V=f(E)$, $I=f(E)$ ve **(b)** $I_K=f(V)$ eğrileri20
- Şekil 2.11 (a)** Seri ve şönt dirençleri kapsayan bir fotodiyodun eşdeğer devresi, **(b)** Bir fotodiyodun tipik aydınlatma ve karanlık I-V karakteristikleri, **(c)** ışık şiddetinin fonksiyonu olarak V_{oc} ve J_{sc} 'leri.26
- Şekil 2.12** qV_{oc}/nkT 'nin fonksiyonu olarak V_m/V_{oc} , I_m/I_{sc} ve FF'nin değişimi.....27
- Şekil 3.1** MEH-PPV ve C₆₀ organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları.....31

Şekil 3.2	Silisyum altlığı üzerine yapılan organik fotodiyotların şematik yapısı.....	32
Şekil 3.3	[6,6]-fenil C ₆₁ bütirik asit metilester (PCBM)'nin kimyasal yapısı.....	32
Şekil 3.4	Polianilin'in (PANI)'nin kimyasal yapısı.....	33
Şekil 3.5	ITO/organik yarıiletken fotodiyotların şematik yapısı.....	35
Şekil 3.6	ITO/PEDOT:PSS/organik yarıiletken fotodiyotların şematik yapısı.....	36
Şekil 3.7	I-V ve C-V ölçümleri için deney düzeneği.....	37
Şekil 3.8	Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	38
Şekil 3.9	Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	38
Şekil 3.10	Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	39
Şekil 3.11	Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	39
Şekil 3.12	Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	40
Şekil 3.13	Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	40
Şekil 3.14	Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	41
Şekil 3.15	Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	41
Şekil 3.16	Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	42
Şekil 3.17	Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	43
Şekil 3.18	Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	43
Şekil 3.19	Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, Al/p-Si/PANI/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	44
Şekil 3.20	Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	44

Şekil 3.21 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	45
Şekil 3.22 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	45
Şekil 3.23 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	46
Şekil 3.24 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	46
Şekil 3.25 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.....	47
Şekil 3.26 Hazırlanan Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	54
Şekil 3.27 Hazırlanan Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	54
Şekil 3.28 Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	55
Şekil 3.29 Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	55
Şekil 3.30 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	56
Şekil 3.31 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	56
Şekil 3.32 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	57
Şekil 3.33 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	57
Şekil 3.34 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun ışık yoğunluğuna karşı fotoakım değişimi.....	58
Şekil 3.35 Hazırlanan Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.....	59
Şekil 3.36 Hazırlanan Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	59
Şekil 3.37 Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	60

Şekil 3.38 Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	60
Şekil 3.39 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	61
Şekil 3.40 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	61
Şekil 3.41 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	62
Şekil 3.42 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	62
Şekil 3.43 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi	63

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, doyma akımı ve idealite faktörü değerleri.....	48
Tablo 3.2 Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	49
Tablo 3.3 Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	49
Tablo 3.4 Al/p-Si/PANI/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	49
Tablo 3.5 ITO/MEH-PPV/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	50
Tablo 3.6 ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	50
Tablo 3.7 ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	50
Tablo 3.8 ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	51
Tablo 3.9 ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	51
Tablo 3.10 ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.....	52
Tablo 3.11 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, seri direnç ve şönt direnci değerleri.....	52
Tablo 3.12 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, P_m , V_m , I_m ve FF değerleri.....	53
Tablo 3.13 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, m sabiti, fotoakım (I-t ölçümüyle), fotoduyarlılık ve fotoiletkenlik hassasiyet değerleri.....	63

SİMGELER LİSTESİ

<u>Simge</u>		<u>Birim</u>
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu	(eV)
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu	(eV)
I	: Akım	(A)
J	: Akım yoğunluğu	(A/ cm ²)
μ	: Mobilite	(cm ² / V.s)
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi	(eV)
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi	(eV)
E_F	: Fermi enerjisi	(eV)
E_g	: Yasak enerji aralığı	(eV)
p	: Boşluk konsantrasyonu	(cm ⁻³)
n	: Elektron konsantrasyonu	(cm ⁻³)
N_d	: Verici atomların konsantrasyonu	(cm ⁻³)
N_a	: Alıcı atomların konsantrasyonu	(cm ⁻³)
T	: Mutlak sıcaklık	(K)
I_0	: Ters doyma akımı	(A)
n	: İdealite faktörü	
$h\nu$	: Foton enerjisi	(eV)
R	: Direnç	(Ω)
R_s	: Seri direnç	(Ω)
R_{sh}	: Şönt direnci	(Ω)
W	: Tükenim tabakasının genişliği	(Å)
P	: Güç	(Watt)
FF	: Doldurma faktörü	(%)
V_{oc}	: Açık devre voltajı	(V)
I_{sc}	: Kısa devre akımı	(A)
ϕ_b	: Engel yüksekliği	(eV)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ORGANİK YARIİLETKEN FOTODİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bayram GÜNDÜZ

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

2007, Sayfa : 81

Bu çalışmada, farklı organik yarıiletken fotodiyotları hazırlandı. Hazırlanan diyotların karanlık ve aydınlatma şartları altında akım-voltaj ölçümleri yapıldı. Akım-voltaj karakteristiklerinden, idealite faktörü, açık devre voltajı, doldurma faktörü, seri direnç ve şönt direnci gibi elektronik parametreler hesaplandı. ITO camı üzerine yapılan organik yarıiletken fotodiyotların idealite faktörü değerleri, silisyum altlığın üzerine yapılan organik yarıiletken diyotlarınkinden büyük bulundu. Diyotların ters besleme akımı aydınlanma şiddeti ile önemli ölçüde arttı. Bu da diyotların bir fotovoltaiik davranış sergilediğini gösterir. Hazırlanan diyotların elektronik parametreleri temizleme işlemi, farklı çözücüler ve organik malzemeler kullanılarak geliştirildi.

Anahtar Kelimeler: Organik yarıiletkenler, metal/yarıiletken kontaklar, fotodiyot, fotovoltaiik etki.

ABSTRACT

Thesis of Master

FABRICATING OF ORGANIC SEMICONDUCTOR PHOTODIODES and INVESTIGATING OF THEIR OPTOELECTRONIC PROPERTIES

Bayram GÜNDÜZ

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

2007, Page : 81

In this study, the various organic semiconductor photodiodes were fabricated. The current-voltage measurements of the prepared diodes were performed under dark and illumination conditions. From current-voltage characteristics, the electronic parameters such as ideality factor, open-circuit voltage, fill-factor, series resistance and shunt resistance were calculated. The ideality factor values of the organic semiconductor photodiodes deposited on ITO glass are higher than ideality factors of photodiodes deposited on silicon substrate. Since, the current under reverse bias significantly increased with illumination intensity, the prepared diodes exhibit a photovoltaic behaviour. The electrical parameters of the prepared diodes were developed using cleaning procedure, different solvents and organic materials.

Keywords: Organic semiconductors, metal/semiconductor contacts, photodiode, photovoltaic effect.

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar, çeşitli elektronik ve optoelektronik teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Metal-yarıiletken diyotun elektriksel karakteristikleri, diyotun ara yüzey özellikleriyle kontrol edildiği iyi bilinmekte [1, 2] ve diyotun elektronik özellikleri, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi parametreler ile karakterize edilir. Metal-yarıiletken arasındaki ara yüzey durumları, Schottky engel yüksekliğinin ve diğer parametrelerin belirlenmesinde önemli bir rol oynar ve bunlar malzemenin performansını ve kararlılığını etkiler [3, 4]. Schottky kontakların ara yüzey durumları, kapasitans-voltaj ve iletkenlik-frekans teknikleri ile belirlenmektedir [5].

Son yıllarda, yüzey ve ara yüzey tekniklerinin uygulaması, metaller ve yarıiletkenler arasında oluşan ara yüzeylerin kompleks bölgeler olduğunu ve fiziksel özelliklerinin yüzeyin hazırlama şartlarına bağlı olduğunu açıkça göstermekte ve birçok durumda, bilinmeyen kirliliklerle kaplı olan yüzeyler üzerine yerleştirilen kontaklar ara yüzey durumlarına sebep olduğu ve bu durumların diyotların performansını, kararlılığını, verimini, mekanik ve elektriksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir [6]. Eğer diyot, hassas bir şekilde hazırlanmaz ise, metal ve yarıiletken arasında bir oksit tabakası oluşur. Böyle bir tabakanın varlığı, metal-yarıiletken Schottky diyotunu, metal-yalıtkan-yarıiletken diyotuna dönüştürür. Böylelikle, Schottky engel diyotlarının elektriksel özelliklerinin anlaşılması için, ara yüzey durumlarının çalışılması son derece önemlidir [7, 8]. Son zamanlarda, organik bileşikler, kararlılıklarından dolayı, elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılmaktadırlar [9]. Polimerik [10] ve polimerik olmayan organik bileşiklerin [9] elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri yaygın olarak araştırılmaktadır.

Çakar ve arkadaşları [9], Si altlığın üzerine piron-B (pyronine-B)'yi ilave ederek MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) kontaklarını elde ederek idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) gibi parametreleri hesapladılar. Sağlam ve arkadaşları, anodik oksidasyon metodu ile p-Si altlık üzerine bir ince metalik polipirol (MPP) film oluşturarak, bir diyot hazırladılar ve engel yüksekliği (ϕ_b) ve idealite faktörünü (n) hesapladılar [11]. Polimerik olmayan ve polimerik organik bileşik ince filmlerle hazırlanan diyotların, doğrultucu özelliklere sahip oldukları bulundu [12]. Organik yarıiletkenler ve iletkenler alışılmadık birçok elektriksel, optik ve manyetik özellikler gösterirler ve moleküler elektronik malzemelerin üretimi için kullanılabilirler. Schottky diyotların birçoğu metaller ve inorganik yarıiletkenler ile organik iletken polimerler kullanılarak hazırlanıp karakterize edilmektedirler.

Bir fotodiyot, temel olarak ışığa duyarlı bir yarıiletken diyottur. Diyodun yapısı ya bir p-n eklemi ya da bir metal-yarıiletken kontağıyla oluşturulur [13]. Bir fotodiyot, anot ve katot olmak üzere iki elektriksel kontak ile bir yarıiletkenden oluşur. Fotodiyotlar, ışık şiddetini elektriksel işarete en etkili şekilde çevirmektedirler. Çevirme işleminin etkinliği fotodiyodun karakteristiğine bağlıdır [14].

Yarıiletken polimerler, büyük alanlı, düşük maliyetli güneş pillerinin yapımı için uygun olan malzemelerdir. Malzemelerin geliştirilmesi ve üretim metodları %25'lik, fotovoltaiik dönüşümlere sebep olurlar. Bu malzemelerdeki yük taşıyıcıları düşük mobilitelerinden dolayı, aktif tabaka ince olmalı ve tipik olarak 100 nm'den daha az olmalıdır. Daha ince tabakalar daha verimli bir yük iletimini sağlar, ancak soğrulan ışığın miktarını düşürürler. Bu çelişkinin çözümü, aktif tabakaya gelen ışık şiddeti ile ilgilidir. Aktif tabakadaki mükemmel yapı, ışık yayan diyotlardan (LED) ışık çıkışını artırmaya yardım eder [15].

Fotodiyotlar, ters yönde kutuplandıkları zaman üzerlerine düşen ışıkla orantılı olarak ters akımları değışir. Bilindiğı gibi diyotlar ters yönde kutuplandıklarında μA veya nA seviyesinde ters akımlar oluşur. Dolayısıyla fotodiyotlar, üzerlerine düşen ışık miktarı arttıkça ters akımların artması prensibine dayanarak yapılmışlardır [16].

Organik yarıiletkenler, elektronik özelliklerinden ve üretimin kolay olmasından dolayı, son yıllarda büyük ilgi çekmektedirler. Heteroeklemler ve Schottky diyotları, farklı yarıiletken organik ve inorganik bileşiklerin kullanılmasıyla üretilip ve analiz edilmektedirler [17].

Organik yarıiletken malzemeler, ince film elektroniğinde geniş bir uygulama alanına sahiptirler [18]. Son zamanlarda, organik yarıiletkenler ve onların türevleri kullanılarak, Schottky diyotlar hazırlanmakta ve elektronik karakterizasyonu yapılmaktadır. Organik yarıiletkenler, elektronik malzemelerde aktif bileşenler olarak kullanılabilir ve bu malzemeler, kolay üretilebilirliği, düşük maliyet ve geniş alan malzeme karakterizasyonundan dolayı olası avantajlara sahiptir. Bu durum, organik malzemeler ile inorganik malzemelerin yer değıştirmesine yeni bir olanak sağlar. Schottky diyotunun performansı, bir metal-organik yarıiletken eklemının elektriksel ve elektronik karakteristiklerine bağlıdır. Sonuçta, metal ve organik yarıiletkenler arasındaki ara yüzey elektronik özelliklerinin anlaşılması, malzeme uygulamaları için önemlidir. Çoğu organik malzemeler, p-tipi elektriksel iletkenliğine sahiptirler. Metal-yarıiletken eklemlerin ara yüzey özellikleri, malzemenin verimliliğı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [19].

Polimer elektroniğı, iletken polimerlerin 1977'de keşfedilmesinden beri çok hızlı bir şekilde gelişmektedir. İletken polimerler, ışık yayan diyotlar (LED), alan etkili transistörler (FET) ve fotodiyotlar gibi birkaç optoelektronik malzemelerde aktif bir malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Polimer ışık yayan diyotlarda (PLED) geniş ölçüde kullanılan yüksek

moleküler ağırlıklı poli [2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil] (MEH-PPV) polimeri fotodiyotlarda da kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada, MEH-PPV ve fulleren türevi olan [6,6]-fenil-C₆₁-bütrik asit metilester (PCBM)'den yapılan iki-tabakalı fotodiyotların iyi verime sahip oldukları gösterilmiştir [20]. Konjuge MEH-PPV polimer filmlerinin fotoakımları, özellikle fulleren molekülleriyle geliştirilir [21].

Poli (2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil (MEH-PPV) ve fulleren türevi olan [6,6]-fenil-C₆₁-bütrik asit metilester (PCBM) ile farklı fotovoltaiik piller hazırlanabilmektedirler. Organik fotovoltaiikler, inorganik yarıiletken fotovoltaiiklere göre düşük bir maliyet alternatifi olarak umut vermektedirler [22].

Bazı araştırmacılar, organik fotovoltaiik malzemelerin elektronik özelliklerinin organik malzemelerin iletim mekanizması ve optik soğurma karakteristiklerinden kaynaklandığını düşünmektedirler. Yapılan bazı çalışmalar, çözümün organik filmler arasındaki ara yüzey özellikleriyle ilgili olduğunu, bazıları da önemli bir çözümün metal elektrotların iş fonksiyonlarıyla alakalı olduğunu göstermiştir. Böylelikle, organik fotovoltaiik diyetotların performansını geliştirmek için, malzeme seçimi ve üretim tekniği son derece önemlidir [23].

Bu çalışmada, farklı çözücülerden ve malzemelerden oluşturulan farklı organik yarıiletken fotodiyotlar hazırlandı. Hazırlanan bu organik yarıiletken fotodiyotların optoelektronik özelliklerini araştırmak amacıyla, farklı aydınlatmalar altında akım-voltaj ölçümleri ve fotoiletkenlik (I-t) ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden diyetotun elektronik parametreleri belirlendi ve bu parametreler literatürde mevcut olan organik yarıiletken fotodiyotların elektronik parametreleri ile karşılaştırıldı.

2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

2.1 Schottky Kontaklar

Yarıiletken ve yalıtkan kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılmasının bir yolu kristale uygun kontakların yapılmasıdır. Bir yarıiletken ile bir metalin, kontak durumuna getirilmesi halinde oluşan yapı metal-yarıiletken kontağı adını alır. Oluşturulan kontağın ideal olması, kontak maddelerinin yüzeylerinin pürüzsüz ve temiz olmasıyla doğrudan ilişkilidir [24]. Kontak haline getirilen malzemeler arasında Fermi enerji seviyeleri aynı düzeye gelinceye kadar bir yük alış-verişi olur [25]. Bu durum, her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile ilgilidir. Metal-yarıiletken kontaklar her iki maddenin iş fonksiyonuna göre omik ve doğrultucu kontak olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Akım taşıyıcılarını bir yönde diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontaklar denir [26]. Doğrultucu kontakta elektronlar bir yönde serbest hareket ederken ters yöndeki geçişleri potansiyel engelinden dolayı zorlaşacaktır.

Yarıiletken ile kontak yapılan metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) önemli bir parametre olup, kristalde metalin yüzeyinden kinetik enerjisi sıfır olacak şekilde bir elektronu koparmak için gerekli olan enerji veya bir elektronu enerji bandındaki Fermi enerji seviyesinden (E_F) vakum seviyesine çıkarmak için elektrona verilmesi gerekli olan enerji olarak tanımlanır. Bu tanım yarıiletkenin iş fonksiyonu olan ϕ_s için de geçerlidir. Yarıiletkenlerde, bir diğer parametre ise elektron çekme eğilimi olarak tanımlanan χ_s parametresidir ve iletkenlik bandının en alt kısmı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı veya iletkenlik bandının genişliği olarak tanımlanır [27]. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliğine bağlı olarak, p-tipi yarıiletken/metal ve n-tipi yarıiletken/metal şeklinde hazırlanmaktadır.

2.1.1 p-Tipi Yarıiletken/Metal Kontaklar

Metal ile p-tipi yarıiletkenin kontak yapılması durumunda $\phi_m > \phi_s$ ve $\phi_m < \phi_s$ olacak şekilde iki farklı durum Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Kontak öncesi yarıiletkenlerin yüzeylerinde herhangi bir yük olmamasından dolayı tüm yüzey aynı kalır ve band bükülmez. Bir p-tipi yarıiletken ile metalin kontaklanması sonucu oluşan p-tipi yarıiletken-metal kontağı için, metalin iş fonksiyonu ϕ_m 'nin yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s 'den daha küçük $\phi_m < \phi_s$

olduğu durumdaki enerji band yapısı Şekil 2.1(a-b)'de gösterilmektedir. p-tipi yarıiletkende iletkenliği sağlayan, pozitif yüklü boşluklardır. p-tipi yarıiletken, metal ile kontak yapıldığında E_F seviyeleri aynı enerji seviyesinde olacak şekilde hareketlenirler. E_F seviyelerindeki bu hareketliliğin sebebi, metaldeki enerjisi yüksek olan elektronların yarıiletkenin içerisine doğru hareket etmeleridir. Böylece, metalin E_F seviyesi de düşmeye başlar. Metal içerisindeki elektronların, enerji seviyelerindeki yerlerini boşaltıp yarıiletkene geçerek yarıiletkendeki boşlukların olduğu enerji seviyelerine yerleşmelerinden dolayı, yarıiletkendeki boşluklar sanki metal içerisine doğru hareket ediyorlarmış gibi görünür. Böyle bir ekleme doğrultmanın olduğu gözlemlenmektedir, yani oluşan kontak doğrultucu özelliğini göstermekte olup Schottky kontağı olarak adlandırılır [28]. Şekil 2.1b'de gösterildiği gibi band bükülmesinin değeri,

$$qV_i = \phi_s - \phi_m \quad (2.1)$$

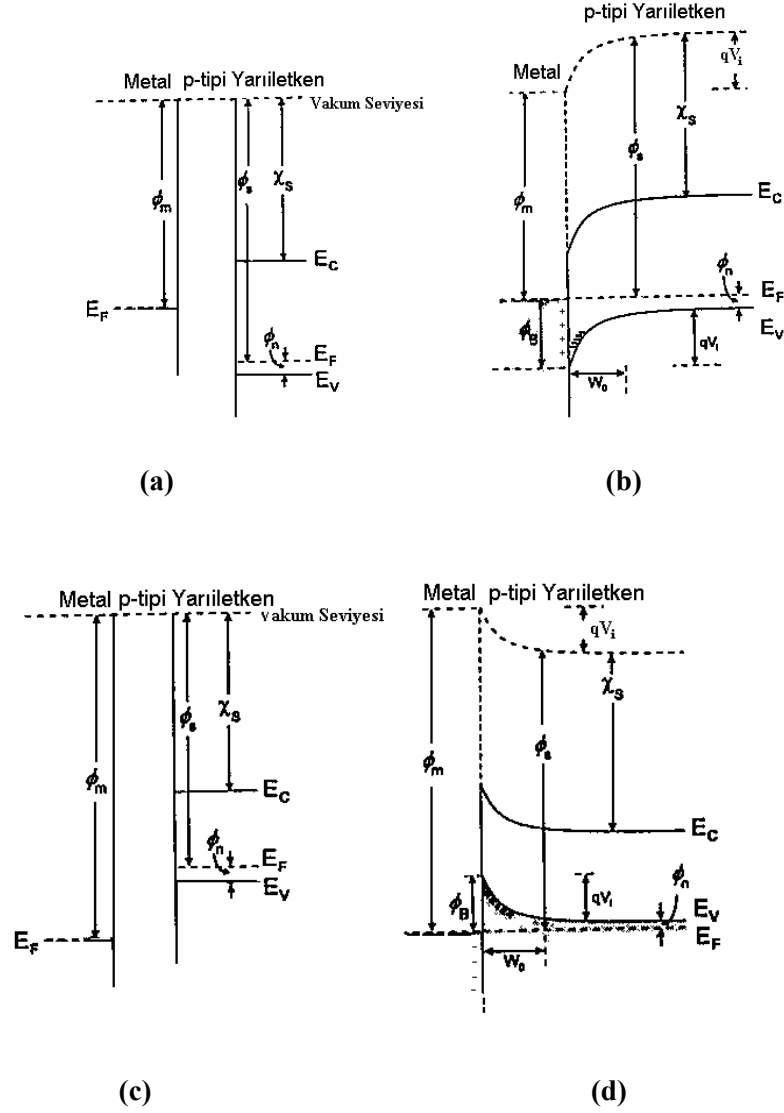
şeklinde olacaktır. Burada, V_i , kontak potansiyel farkı veya eklemin potansiyel birikmesi ve qV_i ise elektronların meydana getirdiği potansiyel engelidir.

p-tipi yarıiletken-metal kontağında, metalin iş fonksiyonu ϕ_m 'nin yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s 'den daha büyük ($\phi_m > \phi_s$) olduğu durumdaki enerji band yapısı Şekil 2.1(c-d)'de gösterilmektedir. Bu şartta kontağın yapılması durumunda, p-tipi yüksek enerjili elektronlar metale geçecek ve metal tarafında kontak bölgesine yakın bölgede negatif yük fazlalığından dolayı bir tabaka ve yarıiletken tarafında ise pozitif yük fazlalığından dolayı bir W_0 tükenim bölgesi oluşur. Sonuçta, yarıiletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artarken direnci azalmaktadır. Yarıiletkenin E_F seviyesi, elektronların metale geçmesinden dolayı aşağıya doğru hareket ederken, metalin E_F seviyesi metalin içerisine giren elektronların sayısının artmasından dolayı yukarıya doğru hareket edecektir. Böylece, metal/p-tipi yarıiletken yapısı ohmik kontak özelliği gösterecektir. Şekil 2.1d'de gösterildiği gibi band bükülmesinin değeri,

$$qV_i = \phi_m - \phi_s \quad (2.2)$$

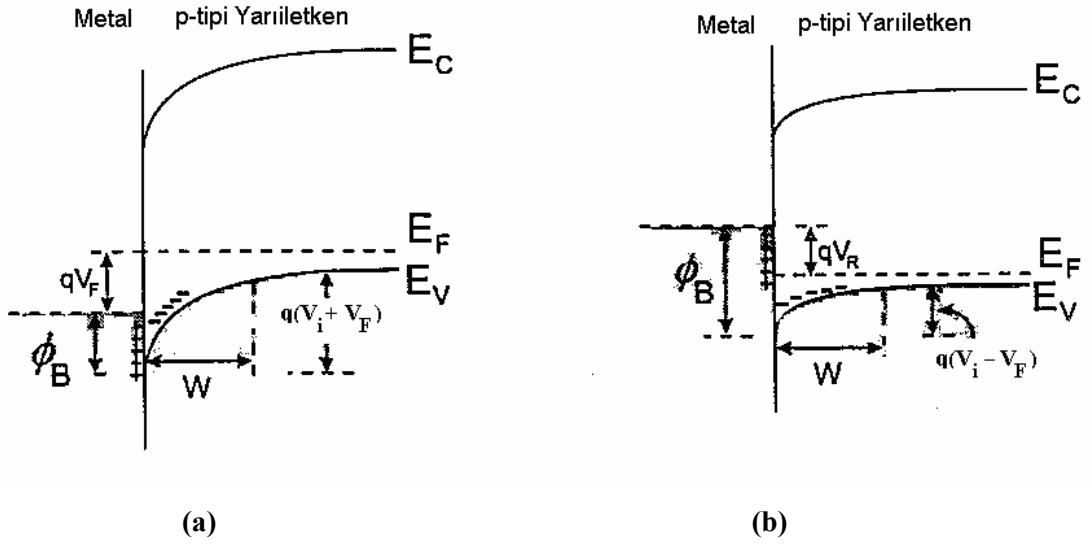
şeklinde olacaktır.

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarının termal denge durumları Şekil 2.1'e göre açıklanmıştır.



Şekil 2.1 p-tipi yarıiletken/metal doğrultucu ve omik kontak enerji-band diyagramları: **(a)** ve **(c)** ayrı iken nötr durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, **(b)** $\phi_s > \phi_m$ olması durumunda p-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve **(d)** $\phi_m > \phi_s$ olması durumunda p-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmaya sahip olmayan kontakların oluşumu [27].

Şekil 2.2a ve Şekil 2.2b’de ise metal/p-tipi yarıiletken kontak için sırasıyla düz ver ters besleme durumlarındaki enerji band diyagramları gösterilmiştir. Yarıiletkenlerdeki tükenim bölgesinin az miktarda taşıyıcılara sahip olmasından dolayı tükenim bölgesinin direnci, nötr yarıiletkenin ve metalin direncine göre daha yüksektir. Tükenim bölgesine düşen V_i potansiyeli ve tükenim tabakası W_0 değişimi uygulanan düz ve ters beslemeye göre Şekil 2.2a ve 2b’de görüldüğü gibi değişmektedir.



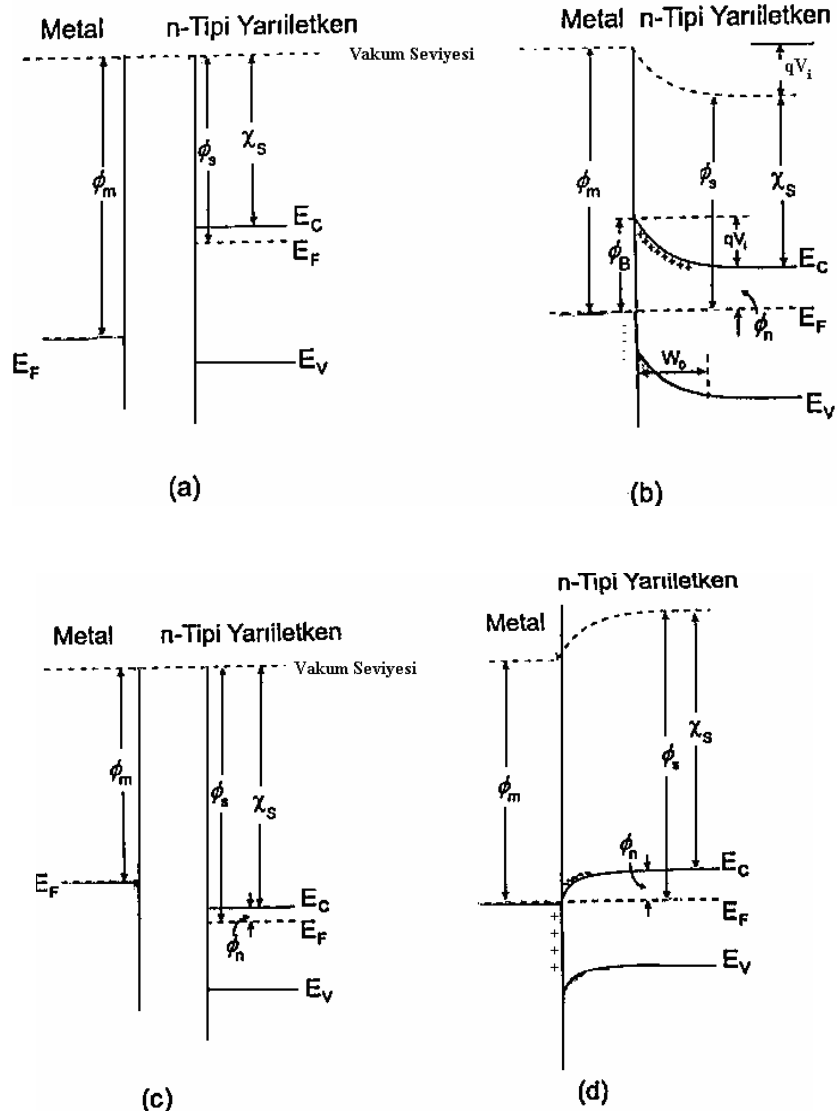
Şekil 2.2 p-tipi yarıiletken/metal doğrultucu kontağın elektron enerji band diyagramları: (a) düz besleme, (b) ters besleme durumunda.

2.1.2 n-Tipi Yarıiletken/Metal Kontaklar

Metal ile n-tipi yarıiletkenin kontak yapılması durumları Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s 'den büyük ($\phi_m > \phi_s$) ise metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağı oluşur. Şekil 2.3a'da görüldüğü gibi, kontak öncesi yarıiletken Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontak sonrası, yarıiletkenin iletkenlik bandından metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip elektronlar kontak bölgesi içerisine girerler. Bu olay, elektronların metal içerisinde yerleştikleri enerji seviyesi E_F ile yarıiletkenin E_F seviyeleri birbirine eşit oluncaya kadar devam eder. Yarıiletkendeki elektron yoğunluğunun azalması ile birlikte iletkenlik bandı E_C ile Fermi enerji seviyesi E_F arasındaki mesafe giderek artar ve termal dengeye ulaştığında ise sabit kalacaktır. Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonunun azalması E_F seviyesinin daha aşağıdaki bir enerji seviyesine doğru hareketine neden olur. İletkenlik bandı elektronları geride pozitif yüklü iyonize boşlukları bırakacaklardır. Yarıiletken metale yakın bölgedeki hareketli elektronlarını boşaltarak, yarıiletken kenarında pozitif yüklü ara yüzeyin oluşmasına sebep olur. Bu durumda, metal içerisindeki elektronlarda yarıiletkenin ara yüzeyine yakın bir bölgede negatif bir ara yüzey oluşturur ($\approx 0,5 \text{ Å}$). Bu yüzden elektriksel alan yarıiletkenden metale doğru olacak şekilde meydana gelir [29].

Metal ile kontaklandıktan sonra yarıiletkenin yasak enerji aralığı değişmeyeceği için E_V , E_C ile vakum seviyesi birlikte aynı biçimde aşağıya doğru bükülür. Şekil 2.3b’de de gösterildiği gibi band bükülmelerinin miktarı iki iş fonksiyonu arasındaki farka eşit olup,

$$qV_i = (\phi_m - \phi_s) \quad (2.3)$$



Şekil 2.3 n-tipi yarıiletken/metal doğrultucu ve omik kontak enerji-band diyagramları: (a) ve (c) ayrı iken nötr durumdadırlar ve kontak sonrası termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\phi_m > \phi_s$ olması durumunda n-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmanın olduğu ve (d) $\phi_s > \phi_m$ olması durumunda n-tipi yarıiletkenlerin eklenmesiyle meydana gelen doğrultmaya sahip olmayan kontakların oluşumu.

ifadesiyle verilir. Metalden yarıiletken doğru bakıldığında engel farkı oluşur ve engel yüksekliği,

$$\phi_b = (\phi_m - \chi_s) \quad (2.4)$$

şeklinde olup,

$$\phi_s = \chi_s + \phi_n \quad (2.5)$$

eşitliği yardımıyla,

$$\phi_b = (qV_i + \phi_n) \quad (2.6)$$

ifadesine dönüşür [30, 31] ve bu denklem Schottky sınırı olarak tanımlanır.

Aralarında mesafe bulunan yük tabakalarının yük dağılımı yardımıyla potansiyel engelin tam şekli hesaplanabilir. Engelin şekli yarıiletkendeki verici dağılımıyla belirlenir. Elektrik alanın büyüklüğü sabit bölge yükü için, yük bölgesi kuyısından mesafe ile doğrusaldır ve bundan dolayı parabolik bir engel oluşur. Bu engele Schottky engeli denir [27].

Termal uyarılmadan dolayı, yeterli enerjiye sahip olan metalin bazı elektronları, potansiyel engelini aşarak yarıiletkenin içine geçerler. Benzer şekilde yarıiletkenin bazı elektronları da potansiyel engelini aşarak metalin içine girerler. Denge durumunda eşit ve zıt yönlü I_0 akımları oluşacaktır. Yarıiletken bir (-V) voltajı uygulanırsa soldan sağa (metalden yarıiletken) giden elektronlar için engel değişmez ve bundan dolayı sağdan sola karşılık gelen akım da değişmeyecektir.

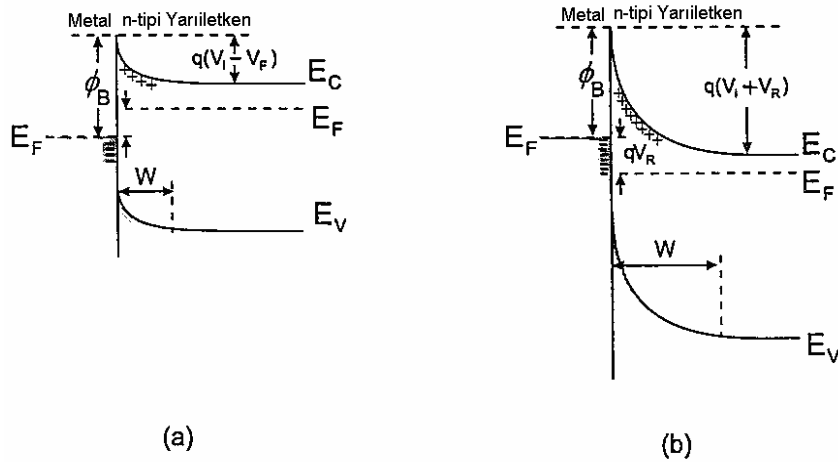
Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s 'den daha küçük olması durumunda $\phi_m < \phi_s$, metal/n-tipi yarıiletken omik kontak oluşur. Kontakten önceki ve sonraki enerji-band diyagramları Şekil 2.3 (c-d)'de gösterilmektedir. Şekil 2.3c'de görüldüğü gibi, kontak öncesi yarıiletken Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_s - \phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontakten sonra, metaldeki elektron konsantrasyonu yarıiletkendeki elektron konsantrasyonundan daha büyük olmasından dolayı metalden yarıiletken doğru elektronlar akmaya başlayacaktır. Bu durum, metal ile yarıiletkenin E_C seviyeleri birbirine eşitleninceye kadar devam eder. Elektronlar, geride negatif kütleli pozitif yüklü boşluklar oluşturacaklardır. Sonuçta E_C , E_V ve vakum seviyesi yukarı doğru bükülecektir. Böylelikle, bu kontak omik kontak olarak davranır.

Metal/n-tipi yarıiletken kontağının düz ve ters besleme durumlarındaki enerji band diyagramları Şekil 2.4a ve 4b’de gösterilmektedir. Düz besleme yapıldığında bandların toplam eğilmesi değişecektir. Bu durumda tükenim bölgesi üzerine düşen potansiyel V_i yerine, $(V_i - V_F)$ şeklinde değişecek ve tükenim bölgesinin genişliği de azalacaktır. Potansiyelin uygulanması durumunda, yarıiletken termal dengede iken, elektronların metale doğru akışından dolayı yarıiletkenin tükenim bölgesi kıyısındaki elektronların yoğunluğu azalsa bile, metalden yarıiletkenine doğru elektron akışı yarıiletkenin denge durumunu değiştirmeyecektir. Şekil 2.4b’de ters beslemeli kontak için enerji band diyagramı gösterilmiştir. Burada yarıiletken $V = -V_R$ voltajı nedeniyle metal kadar pozitif olacaktır ve tükenim bölgesi üzerinde düşen potansiyel $(V_i + V_R)$ kadar artacaktır. Termal denge durumunda kontaktaki E_F seviyesi tek iken, hem düz hem de ters besleme durumunda metal ve yarıiletken tarafında iki ayrı E_F seviyesi ortaya çıkacaktır.

İdeal bir diyot, ters yönde beslendiğinde sonsuz direnç gösterirken; düz yönde beslendiğinde sıfır direnç gösterir. Diyotun akım-gerilim ilişkisi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

şeklinde verilir. Burada I_0 , ters doyma akımı; q , taşıyıcı yükü; k , Boltzman sabiti; T , Kelvin cinsinden sıcaklık ve V uygulanan gerilimdir. n ise idealite faktörü olup, ideal bir diyot için $n=1$ değerini alır [3].



Şekil 2.4 n-tipi yarıiletken/metal doğrultucu kontağın elektron enerji band diyagramları. (a) Düz besleme, (b) ters besleme durumunda.

2.2 Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Voltaj Karakteristikleri

Yüksek mobiliteli yarıiletkenlerle oluşturulan Schottky diyotlar, termiyonik emisyon teorisine uyan I-V karakteristiğine sahiptirler. Bu teoriye göre akım-voltaj bağıntısı,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

ifadesi ile verilir. Burada I, diyottan geçen akım ve I_0 ,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left[-q\left(\frac{\phi_b - \Delta\phi_{bi}}{kT}\right)\right] \quad (2.9)$$

ifadesiyle verilen ters doyma akımıdır. Burada, A diyot kontak alanı; A^* ise Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{m_n e k^2}{2\pi^2 h^3} \quad (2.10)$$

ifadesi ile verilir [28].

Bir Schottky diyotu için, engel yüksekliği,

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (2.11)$$

ifadesi ile verilir.

Termiyonik emisyon teorisine göre, $n=1$ olan ideal durumun pratikte elde edilmesine literatürde hemen hemen hiç karşılaşılmamıştır. Bu durum, engel yüksekliğinin uygulanan gerilimle değişmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bunun nedeni, metal-yarıiletken arasında, ideale en yakın Schottky yapılarda bile en azında 5–20 Å kalınlık mertebesinde ince bir oksit tabakasını doğal olarak oluşmasıdır [32-37]. Dolayısıyla diyotlar, denklem (2.8)'i uygulamalarda tam olarak sağlamazlar ve bu denklem aşağıdaki gibi düzeltilir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.12)$$

Buradaki n idealite faktörüdür ve

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.13)$$

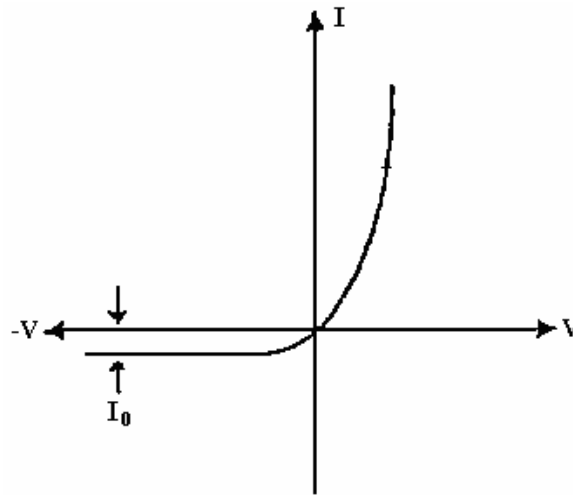
denklemleri ile verilir. Denklemlerde n sıcaklığa bağlı olabilir ve yaklaşık olarak voltajdan bağımsız olup 1'den büyüktür. $V > 3kT/q$ için denklem 2.8,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.14)$$

şeklini alır.

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, Schottky diyodu doğrultucu özelliğine sahiptir, yani düz besleme durumunda akım geçer ve ters yönde ise hemen hemen akım geçmemektedir. Schottky diyoduna doğru yönde gerilim uygulandığında, yarıiletken den metale geçen elektronlar için potansiyel engel yüksekliği, gerilimle azalmakta ve akım-gerilim karakteristiği düz besleme tarafı üssel bir değişim göstermektedir (Şekil 2.5) [28].

Bir Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiğinin ters besleme kısmında ($V < 0$), uygulanan gerilimin büyük değerleri için, diyottan geçen akım sabittir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Bir Schottky diyodunun akım-gerilim karakteristiği.

Bir Schottky diyot için doğrultma katsayısı,

$$r = \frac{I_d}{I_t} \quad (2.15)$$

ifadesi ile verilir. Denklemden, I_d sabit bir gerilim değeriindeki düz besleme akımı ve I_t ise ters besleme yönündeki akımdır. Kaliteli diyodlar için doğrultma katsayısı $10^5 - 10^6$ mertebesinde [28].

2.3 Metal-Yarıiletken Fotodiyotlar

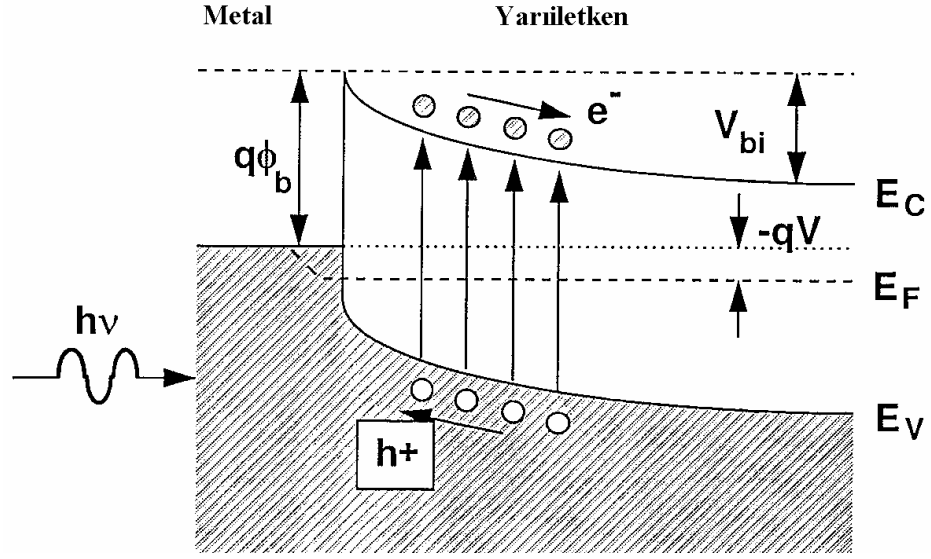
Bir fotodiyot, elektronik işlemler esnasında optik sinyaller oluşturan bir sensördür ve yüksek bir elektrik alanı ile boşaltılmış yarıiletken bölgesinde serbest yük taşıyıcılarına sahiptir. Tükenim bölgesinde oluşan foto taşıyıcılar, yüksek alanın varlığından dolayı malzemenin uç kısmında toplanırlar. Şekil 2.6, bir metal-yarıiletken (Schottky) ekleminin tipik enerji-band diyagramını göstermektedir.

Bir metal-yarıiletken diyot, yüksek verimli fotodedektörler için kullanılabilir. Foton enerjisine ve potansiyel farkı eğimine bağlı olarak değişik diyot çeşitleri düşünülebilir. Diyotun üç çalışma modu vardır ve bunlar,

1) $E_g > h\nu > q\phi_b$ ve $V < V_B$ için Şekil 2.7a, burada V_B engeli aşma (çığ bozulma) voltajıdır, metal içinde fotouyarımlı elektronlar engel potansiyelini aşabilir ve yarıiletken içinde toplanırlar. Bu işlem, Schottky engel yüksekliğini belirlemede ve metal filmde sıcak-elektron geçişinde kullanılır.

2) $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için, Şekil 2.7b, radyasyon yarıiletkende boşluk-elektron çiftini üretir ve diyotun genel karakteristiği p-i-n fotodiyotuna benzerdir.

3) $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ için, yani yüksek ters besleme voltajı için, Şekil 2.7c diyot, fotodiyot olarak çalışabilir [38]. Yani bu şartlarda, diyot çığ bozulma bölgesinde çalışabilir.



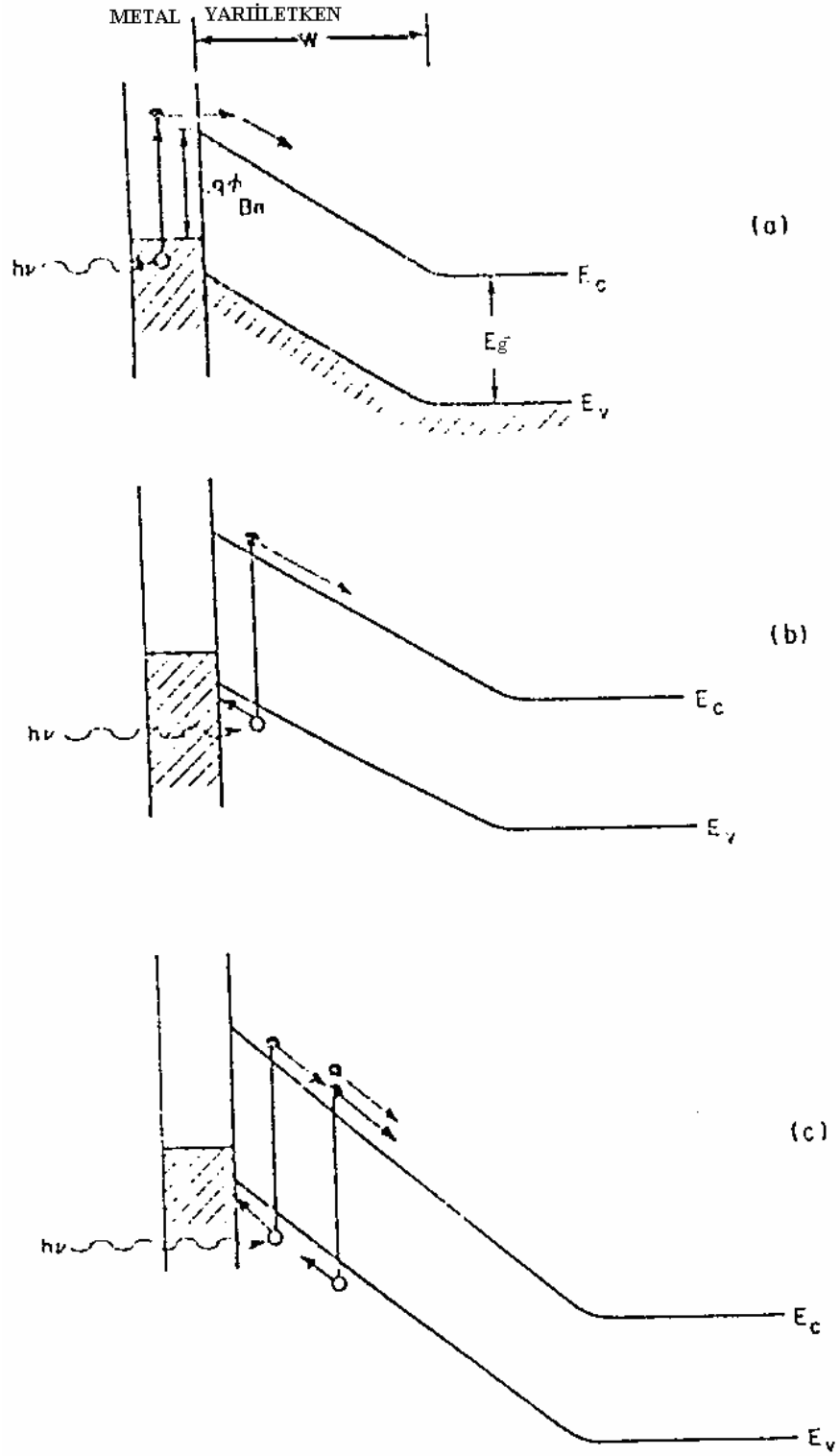
Şekil 2.6 Aydınlatılan bir Schottky eklemine şematik diyagramı.

Temel olarak, fotodiyotun çalışması diyot eklemi içinde foto taşıyıcıların yer değiştirmesine dayanır. Doğrultucu eklem ışık geldiği zaman, yeterli enerjiye ($h\nu > E_g$) sahip olan fotonlar soğrulur. Oluşan fazlalık elektronlar ve boşluklar difüzyon eklem alanı ile yayılır ve diyodun farklı taraflarında toplanırlar. Eğer diyot, dış yüke bağlanırsa soğrulan fotonların ve oluşan taşıyıcıların sayısı ile orantılı olarak bir akım oluşur [39].

Fotodiyotlar, diyodun yapısına ve kontakların tipine bağlı olarak p-n eklem diyotları, Schottky diyotları, p-i-n diyotları ve heteroeklem diyotları olarak sınıflandırılır.

Schottky fotodiyotları, görünür ışık UV'nin dedeksiyonu için mükemmeldir ve mevcut yarıiletken foto dedektörlerin en hızlı olanıdır. Fakat bu diyotlar ince soğurma bölgelerinden ve yüksek katkılmalı metal tabakasından dolayı düşük verim göstermektedirler. Böyle bir diyot, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi fotodedeksiyon için kullanılabilir. Yeterince yüksek besleme voltajları uygulanarak, bütün n-bölgesi, boşaltılabilir, yani bu bölge karşısında sürekli bir elektrik alanı oluşur. Yeterli enerjiye sahip fotonlar tükenim bölgesinde soğrulur ve elektron-boşluk çiftleri oluşur.

Bir fotodiyot, anot ve katot olmak üzere iki elektriksel kontak ile bir yarıiletken oluşur. Şekil 2.8, bir fotodiyodun yapısını göstermektedir. Bir yarıiletkenin bant aralığından daha yüksek enerji ile gelen fotonlar, yarıiletken tabakanın içinde soğrulamaları için belirli bir olasılığa sahiptirler. Böyle başarılı bir soğurma işlemi, serbest elektron-boşluk çiftinin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Eğer kontaklara bir ters besleme voltajı uygulanırsa, yani anot, katottan daha düşük potansiyele sahip olursa, yarıiletken karşısında elektrik alanı oluşur.



Şekil. 2.7 a) Metalden yarıiletken'e uyarılmış elektronların fotoelektrik yayılımı ($E_g > h\nu > q\phi_b$), b) boşluk-elektron çiftinin banttan-banda uyarımı ($h\nu > E_g$), c) boşluk-elektron çifti üretimi ve büyük ters gerilim uygulaması altında çıkış oluşumu ($h\nu > E_g$ ve $V \cong V_B$).

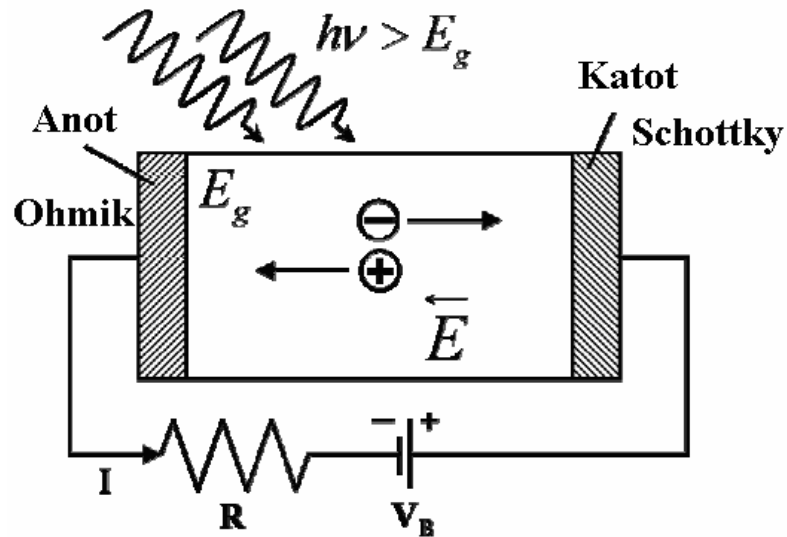
Elektronlar ve boşluklar zıt yönlerde sürüklenirler, yani elektronlar katoda doğru, boşluklarda anoda doğru sürüklenir. Böyle bir taşıma işlemi dış devrede elektrik akımı meydana getirir, bu akıma foto akım denilmektedir. Sonuçta, fotodedeksiyon olayı,

- 1) Yarıiletkende fotonların soğrulması ve taşıyıcıların oluşumu,
- 2) Yerel elektrik alanı altında taşıyıcıların sürüklenmesi,
- 3) Malzeme kontaklarında taşıyıcıların toplanması olarak özetlenebilir.

Fotodiyodun üzerine düşen fotonların yarıiletken malzemenin içinde ilerlemesi, ışığın dalga boyuna bağlıdır. Dalga boyu düşük olan ışınlar (ultraviyole) yüzeyde emilirken, kızılötesi ışınlar ise yarıiletkenin derinliklerine kadar ilerler.

Diyodun yapısına ve kontakların tipine bağlı olarak, Schottky fotodiyodu, metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodiyodu, p-i-n fotodiyodu, çığ fotodiyodu ve foto transistörler gibi fotodiyotların birkaç tipi vardır [40].

Schottky fotodiyotları, çoğunluk taşıyıcı malzemeleri olarak bilinir. Bu özellik, yüksek hız deteksiyonunun ihtiyaç duyulduğu uygulamalar için Schottky fotodiyotlarına olan ilgiyi artırır. Foto cevap bakımından Schottky fotodiyotları, yüksek emici ve yansıtıcı metal Schottky tabakası yüzünden düşük verimden yoksundur. Bu durum, saydam kontak malzemelerin kullanılması veya daha karmaşık arka-aydınlatmalı heteroyapı dizaynının kullanılmasıyla çözülebilir. Tek kutuplu Schottky ve MSM (metal-yarıiletken-metal) fotodiyotları kolayca katkılamanın bir tipi ile geliştirilir.



Şekil 2.8 Bir fotodiyotun yapısı.

Foto cevap veya malzeme verimi bakımından, dikey olarak aydınlatılan MSM ve Schottky fotodiyotlar, metalik Schottky kontaklardaki optik kayıptan yoksundurlar. Bu kayıp, çok ince ($<100 \text{ \AA}$) yarıiletken metalik kontaklar kullanılarak azaltılabilir. Bu kaybın tamamen kaldırılması, metalik olmayan, yüksekçe saydam iletken malzemelerin kullanımı ile mümkün olabilir. Bir diğer alternatif çözüm, aydınlatma planını değiştirmektir. Arkadan-aydınlatılan (altlık tarafında) Schottky ve MSM fotodiyotları, üst yüzeyleri üzerinde kalın Schottky metallerine sahip olabilir, fakat altlık ve orta malzeme tabakaları, çalışma dalga boyunda saydam olmalıdır. Arkadan-aydınlatılan heteroeklem yapıları, Schottky ve MSM fotodiyotları için düşük verimli problemin üstesinden gelebilir. p-i-n fotodiyotlarına göre, Schottky ve MSM fotodiyotlarının daha yüksek-hız karakteristiklerine sahip olması beklenen bir durumdur. Schottky eklemelerinin niteliği, güçlü bir şekilde yarıiletken yüzeyinin özelliklerine bağlıdır. Yüzey durumları, yüzey kusurları ve ince oksit tabakalarına benzer dış etkiler, Schottky kontaklarının niteliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptirler. Schottky ve MSM fotodiyotlarının malzeme performansı, doğrudan yüzey özelliklerinden etkilenir. Sonuçta bu malzemeler ile değişmez verimliliği elde etmek güçtür [41].

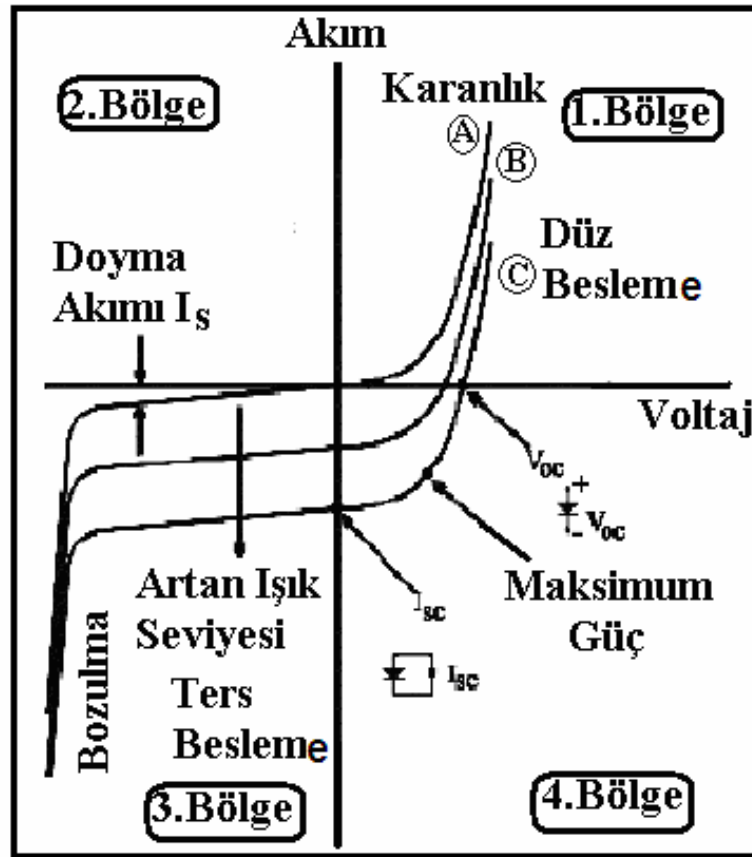
2.3.1 Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Bir fotodiyotun akım-voltaj (I-V) karakteristiği diyot eklemesindeki akım taşıma işlemleri ile belirlenir. Farklı akım taşıma mekanizmaları, metal-yarıiletken eklemeleri (Schottky ve MSM fotodiyotları) ve p-n eklemelerine bağlı fotodiyotlarda meydana gelebilir [41]. Fotodiyodun akım-gerilim karakteristiği şekil olarak normal bir diyodunkine benzemektedir. Şekil 2.9, fotodiyodun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-gerilim karakteristiğini göstermektedir. Fotodiyodun duyarlı yüzeyine ışık düşmüyorsa fotodiyot üzerinden akan akım, termal yoldan azınlık taşıyıcılarıyla oluşan akımdır. Bu akıma karanlık akımı denir. Şekil 2.9’da A eğrisi fotodiyodun karanlık durumdaki, B ve C eğrileri de fotodiyodun ışıklandırılmış durumdaki akım-gerilim karakteristiklerini gösterir. Şekilden de görüldüğü gibi, karakteristikler dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci (1) bölgede, akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölgede fotodiyoda doğru polaritede gerilim uygulanmıştır, yani bu bölge fotodiyodun doğru besleme bölgesidir. Ayrıca bu bölge, fotodiyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede fotodiyot normal bir diyot gibi davranmaktadır. İkinci (2) bölgede, fotodiyodun cevabı yoktur. Üçüncü (3) bölgede, sadece çok küçük bir akım I_s akar. Fotodiyodun aktif alanı üzerine gelen ışığın şiddeti artırıldığı zaman, bu bölgedeki eğriler bütünüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişecektir. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımı

I_{sc} 'yi verir. Sıfır akım noktalarında, eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık-devre voltajı V_{oc} 'yi verir.

Çok yüksek ters besleme voltajlarında, akım hızla artar ve diyotun bozulması söz konusu olabilir. Bu, ters bozulma bölgesidir. Dolayısıyla, üçüncü (3) bölge, ters polariteli gerilimin uygulandığı bölge olup, ışığı algılamak için uygun olan bölgedir [42]. Dördüncü (4) bölgede ise, fotodiyodun fotovoltajik bölgesidir.

Fotodiyotlar üç ana karakteristiğe sahiptirler. Bunlar akım-voltaj, kuantum verimi ve bant genişliği (çalışma hızı)'dır. Bir fotodiyodun performansı bu üç karakterizasyon ile ölçülür. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı, diyot eklem niteliğinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akımı, daha yüksek duyarlılık anlamına gelir ve aydınlatılmaksızın ve ters besleme altında diyot içinde akan akımdır.



Şekil 2.9 Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-gerilim karakteristikleri [42].

Bir fotodiyoda, yeterince yüksek ters besleme uygulandığı zaman, ış bozulma bölgesinde çalışır. Bu ters besleme voltaj değeri, bozulma voltajına karşılık gelir ve fotodiyodun çalışması için uygulanabilen ters besleme voltaj sınırını belirler. Bu değerdn sonra, kazanç ve çarpma mekanizmaları diyodun çalışmasını gerçekleştirmeye başlar [43].

Fotodiyot prensipte bir akım kaynağıdır ve yeterli miktarda ışık aldığında çalışmaya başlar. Işık, fotodiyodun içinde zayıf bir akımın oluşmasına neden olmaktadır. Fotodiyota, bir gerilimin uygulanması sonucunda ve devrede bir yük direncinin bulunması nedeniyle, fotoakım meydana gelir. Bu yük, dış devre direncinin toplamıdır. Fotoakımın etkinliğı, küçük bir kısmı iç direnci üzerinde oluşurken, büyük bir kısmı da dış devre direnci üzerinde oluşmaktadır. Dolayısıyla, fotodiyot, bir gerilim kaynağı (fotovoltaik) veya bir akım kaynağı (iletkenlik bölgesi) olarak kullanılabilir.

Bir Schottky fotodiyotunun doğru akımı analiz edilerek, ters doyma akımı, engel yüksekliğı, idealite faktörü ve seri direnci gibi diyot parametreleri belirlenebilir. I_0 ve ϕ_b $V=0$ 'da düz besleme akımı fit edilerek bulunabilir. İdealite faktörü n , düz I-V eğrisinin (dV / dI) eğimi ile belirlenir.

2.3.2 Fotovoltaik Etkiler

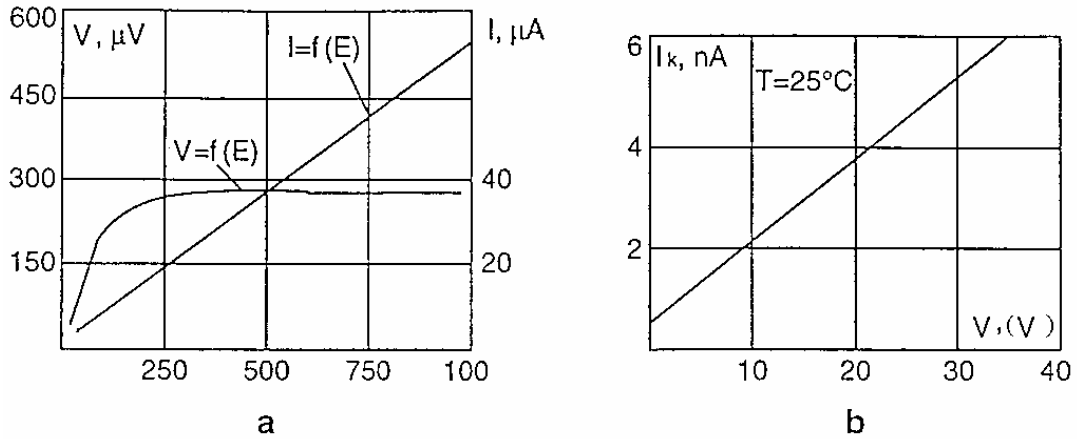
Fotodiyot, bir gerilim kaynağı veya bir akım kaynağı olarak kullanılabilir. Yani akım ve gerilim kaynağı olarak iki çeşit çalışma şekli vardır. Şekil 2.10a'da görüldüğü gibi, fotovoltaik durumda, yani gerilim kaynağı çalışma şeklinde fotodiyotun üzerinde elde edilen gerilim önce ışık şiddetiyle doğrusal ve daha sonra ise logaritmik olarak değışmektedir. Burada fotodiyota paralel bağılı yük direnci çok yüksek değerde seçilmiştir, oysa yük direnci değerdn yaklaşık olarak diyodun dinamik iç değerdne eşit olacak kadar çok küçük değerde bir yük direnci seçildiğinde gerilimin değışimi doğrusal olur. Normalde, bir fotodiyot için ne tam logaritmik ne de tam doğrusal çalışabilir demek doğru bir yaklaşım olmasına rağmen, burada fotodiyoda düşen ışıkla elde edilen gerilim tam doğrusal olarak değışmektedir. Fotodiyot üzerinde elde edilen akım ise, ışık şiddetine göre doğrusal bir şekilde değışmektedir. Benzer bir şekilde, Şekil 2.10b'de görüldüğü gibi uygulanan gerilimin artmasıyla, diyodun akımı doğrusal bir değışim göstermektedir.

Çok küçük bir direncin bağlanmasıyla elde edilen fotodiyot eğrisi oldukça doğrusal bir karakteristik göstermesine rağmen, hassasiyet çok küçük değerdnde olabilir. Bunun içinde yük direncinin değerdn artırmak gerekmektedir. Gerilim kaynağı olarak kullanılmasında çıkış gerilimi ile ışık şiddeti aşağı yukarı logaritmik değışir. Ancak bu durum, yük direnci değerdn

10 M Ω veya daha fazla olduğunda geçerlidir. 10 M Ω 'un altında artık logaritmik değişimden söz edilemez. Böylece, eğer fotodiyot gerilim kaynağı olarak devreye alınmışsa ve yüksek değerde bir yük direnci üzerinde çalışıyorsa, ışık şiddetine göre gerilimin değişimi logaritmik olacaktır. Bu durumda yük direncinin, fotodiyodun anot ve katot bağlandığını belirtmek gerekir [13].

Katılardaki fotovoltaj etkiler,

- (a) Hacim fotovoltaj etkileri ile Dember foto voltajı, katının hacminde farklı elektron ve boşluk mobiliteleri ile kararlı olmayan foto taşıyıcıların difüzyonundan dolayı oluşur.
- (b) Yüzey fotovoltaj etkileri ile foto voltaj, bir metal ve yarıiletken veya yalıtkan arasında ara yüzeye yakın olan potansiyel engelinden (Schottky engeli) dolayı veya oradaki ara yüzey durumların varlığından dolayı oluşur.
- (c) Tükenim-tabakası fotovoltaj etkileri ile foto voltaj, p-n homoeklemi veya heteroeklem yapıları gibi zıt yönlerde yük taşıyıcıların iki tipini sürüklemek için eklemdeki difüzyon (built-in) alanından dolayı oluşur ve
- (d) Anormal (düzensiz) fotovoltaj etkileri ile foto voltaj, p-n eklemleri, Schottky engelleri veya tane sınırlardaki fotovoltaj etkileri, mikro-bölgelerde Dember etkisi gibi birkaç mekanizmanın bileşeninden dolayı da oluşabilir [44].



Şekil 2.10 Fotodiyodun (a) $V=f(E)$, $I=f(E)$ ve (b) $I_k=f(V)$ eğrileri [13].

2.3.2.1 Hacimsel Fotovoltaj Etkiler

1931'in başlarına kadar Dember, bakır oksit materyalinin soğurma bölgesinin, güçlü bir ışık ile aydınlatıldığı zaman, bakır oksit numunesine karşı oluşan bir potansiyelin söz konusu olduğunu ileri sürdü ve daha sonra bu olay *Dember etkisi* olarak adlandırıldı. Bu durum, daha

sonra elmas ve çinko sülfat'ta [45], germanyum ve silikonda [46–48] ve kadmiyum sülfat CdS'de [49] de gözlemlendi. Kallmann ve Pope [50] ilk olarak antrasen (anthracene) kristalinin ana soğurma bölgesinin $\lambda = 3650 \text{ Å}$ dalga boyu güçlü bir ışık ile aydınlatıldığı zaman, 0,2 V'a kadar aydınlatılan yüzeye negatif kutuplanması ile organik kristallerin oluştuğunu gösterdi. Bu olay, aydınlatılan yüzeyden aydınlatılmayan yüzeye olan elektronlardan daha foto üretici boşlukların difüzyonuna atfedildi, çünkü antrasen kristallerinde boşluk mobilitesi, elektron mobilitesinden daha büyüktür. O zamandan beri, birçok araştırmacı organik kristallerdeki fotovoltaj etkilerini araştırmaktadırlar [51–54]. Vladimirov ve arkadaşları [55] ve Vertsimakha ve arkadaşları [54], eğer antrasen kristali önemsiz soğurmaya maruz kalması halinde, yani ($\lambda > 4000 \text{ Å}$) dalga boyu ışık ile aydınlatıldığı durumda, fotovoltaj üreticinin polaritesi, Kallmann ve Pope [50] tarafından ileri sürülene ters düştüğünü belirttiler. Onlar bu olayı, kristaldeki tuzaklardan yük taşıyıcıların serbest bırakılan fotonlara ve aydınlatılan yüzeydeki band bükülmelerinin oluşumuna atfeder. Fotovoltaj aralığının spektral dağılımının, soğurma spektrumu ile yakın bir ilişkili olduğu ve ışık yoğunluğunun değişimi sadece fotovoltaj ile değiştiğini ancak, bu ilişkinin çok da etkili olmadığını ve fotovoltajın yüzey şartlarına duyarlı olduğu bilinmektedir [54–56].

2.3.2.2 Yüzeysel Fotovoltaj Etkileri

Yüzeysel fotovoltaj etkileri,

- (i) Yüksek elektrik alan uygulamasıyla yüzey potansiyel engelini azaltmak
- (ii) Işık yoğunluğunu artırarak numuneyi uyarmak için incelenir.

Yüzey fotovoltajı, özellikle yüzeydeki enerji bandının eğiliminden kaynaklanır ve sonuçta onun büyüklüğü ve işareti numune yüzeyinin yüzey durumlarıyla birbirlerine güçlü bir şekilde bağlıdır.

Organik yarıiletken p-n eklemleri gibi, n-tipi ve p-tipi organik yarıiletkenin bileşenleriyle bir fotovoltaj malzeme oluşturabilir. Organik fotovoltaj malzemelerde, $10^{-9} - 10^{-8} \text{ A}$ mertebesindeki fotoakımlar ve 200 mV'a kadar fotovoltaj değerleri bulunmuştur. Işık yoğunluğunun artırılmasıyla fotoakım artar ve onun cevap süresi 10^2 saniyeden daha azdır [57, 58]. Eklemlerdeki elektronlar, ışık aydınlatmasının yönünü hesaba katmaksızın p-tipi materyalden n-tipi materyale doğru akarlar.

2.3.3 Organik Yarıiletken-Metal Kontaklarda Fotovoltaik Etkiler

Organik yarıiletken malzemeler, ince film elektroniğinde geniş bir uygulama alanına sahiptirler [18]. Son zamanlarda, organik yarıiletkenler kullanılarak Schottky diyotların üretimi ve karakterizasyonu önemli derecede ilgi görmektedir. Organik yarıiletkenler, elektronik malzemelerde aktif bileşenler olarak kullanılabilir ve bu malzemeler, kolay üretilebilirliği, düşük maliyet ve geniş alan malzeme karakterizasyonundan dolayı farklı avantajlara sahiptirler. Schottky diyotunun performansı, bir metal-organik yarıiletken eklemine elektriksel ve elektronik karakteristiklerine bağlıdır. Sonuçta, metal ve organik yarıiletkenler arasındaki ara yüzey elektronik özelliklerinin anlaşılması, malzeme uygulamaları için önemlidir. Çoğu organik yarıiletken malzemeler, p-tipi elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Metal yarıiletken eklemelerin ara yüzey özellikleri, malzemenin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [19].

Polimer elektroniği, iletken polimerlerin 1977’de keşfedilmesinden beri çok hızlı bir şekilde gelişmektedir. İletken polimer malzemeler, ışık yayan diyotlar (LED), alan etkili transistörler (FET) ve fotodiyotlar gibi birkaç optoelektronik malzemelerde aktif bir araç olarak kullanılmaktadırlar. Halen polimer güneş pilleri, inorganik benzerleri ile karşılaştırıldığı zaman, ışık etkisi, esneklik ve kolay fabrikasyondan dolayı dikkat çekmektedirler. Işık yayan diyotlarda geniş ölçüde kullanılan yüksek moleküler ağırlıklı polimer poli (2-metoksi-5-(2’-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil (MEH-PPV) polimeri fotodiyotlarda etkili bir malzemedir. Yapılan çalışmalarda, MEH-PPV ve fullerene türevi olan [6,6]-fenil-C₆₁-bütrik asit metilester (PCBM) organiklerle yapılan iki-tabakalı fotodiyotların iyi verime sahip oldukları gösterilmiştir [20].

MEH-PPV ve PCBM organikleri ile polimerik fotovoltaik piller hazırlanabilir. Organik fotovoltaikler, inorganik yarıiletken fotovoltaiklere göre düşük maliyetlidirler. Organik fotovoltaiklerin geniş bir şekilde kullanılması için temel engel, onların düşük verimleri ve kısa yaşama ömürleridir [22].

Fotovoltaik malzemelerin verimleri hakkında, bazı araştırmacılar, organik fotovoltaik malzemelerin (PV) sınır faktörlerinin, başlıca organik malzemelerdeki iletim ve foto oluşumun temel doğasından ve organik ince film malzemelerinin optik soğurma karakteristiklerinden kaynaklandığını düşündüler. Çalışmaların bazıları, çözümün organik filmler arasındaki ara yüzey özellikleriyle ilgili olduğunu ve bazıları da metal elektrot iş fonksiyonlarıyla ilgili olduğunu göstermişlerdir [23]. Organik PV diyotların PV performansını geliştirmek için, malzeme seçimi, malzeme üretim teknikleri son derece önemlidir [23].

2.3.4 Fotovoltaik Parametreler

Bir fotodiyodun veya güneş pilinin yük karakteristiklerinin belirlenmesi ile spektral kuantum verimi η , açık-devre voltajı V_{oc} , kısa devre akımı I_{sc} , doldurma faktörü FF , maksimum güç noktasındaki voltaj V_m , maksimum güç noktasındaki akım I_m , maksimum çıkış gücü P_m , seri direnç R_s ve şönt direnci R_{sh} olarak isimlendirilen çeşitli fotovoltaik parametreler analiz edilir [59].

2.3.4.1 Açık-Devre Voltajı

Aydınlatma altındaki diyotun akım-voltaj karakteristiğinde, eğrinin voltaj eksenini kestiği değere açık-devre voltajı V_{oc} denir ve akımın sıfır olduğu durumda belirlenir ve

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (2.16)$$

ifadesi ile verilir [59]. Denklem 2.16'dan de anlaşılacağı gibi n 'nin yüksek değerleri ile yüksek açık-devre voltajları elde edilir, fakat bu her zaman geçerli olan bir durum değildir. Çünkü yüksek n , genelde I_s 'nin yüksek değerleri ile mümkündür. p-n eklemleri için V_{oc} her zaman, n 'nin (1 e yakın) düşük değerleri için daha yüksektir. Aydınlatma şiddeti ile I_{sc} ve V_{oc} 'nin değişimi Şekil 2.11c'de gösterilmektedir.

2.3.4.2 Kısa-Devre Akımı

Kısa-devre akımı I_{sc} , çıkış akımı olup, uygulanan voltajda ve ideal durumda (R_s ve R_{sh} direnç etkileri yok olduğu zaman) aydınlatma altında oluşmaya başlar. Bu akım, gelen foton sayısı ve aydınlanma şiddeti ile orantılıdır.

2.3.4.3 Spektral Cevap

Spektral cevap, belirli dalga boylarında yüzeye gelen fotonların sayısı ile bağlantılı olup, her bir dalga boyundaki toplam fotoakım, bir malzemenin spektral cevabını belirler. Bir iç

spektral cevap $SR(\lambda)$, numuneye gelen fotonların sayısı ile ilgili kısa-devre şartları altında oluşan elektron-boşluk çiftinin sayısıdır ve

$$SR(\lambda) = \frac{J_p(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_n(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} + \frac{J_{dr}(\lambda)}{qF(\lambda)[1-R(\lambda)]} \quad (2.17)$$

bağıntısı ile verilir [59]. Dış spektral cevap $SR(\lambda)_{ext}$ ise, bir numunenin yüzeyinden daha düşük refleksiyon ile azalabilen bir iç tepki cevabı olup,

$$SR(\lambda)_{ext} = SR(\lambda)[1-R(\lambda)] \quad (2.18)$$

ifadesi ile verilir. $J_p(\lambda)$, $J_n(\lambda)$ ve J_{dr} , toplam fotoakım yoğunluğuna katkı sağlayan bu terimler sırasıyla, boşluk difüzyon akım yoğunluğu, elektron difüzyon akım yoğunluğu ve sürüklenme akım yoğunluğudur.

2.3.4.4 Seri Direnç

Bir fotodiyodun seri direnci, kontakların ve altlığın hacminin direncidir. Yani fotodiyodun seri direnci kontakların ve altlıkların direncinden kaynaklanır ve devrede, Şekil 2.11a'da gösterildiği gibidir. Seri dirençler, fotovoltaiik durumdaki fotodiyodun doğrusallığını tanımlamak için kullanılır. Bir fotodiyodun seri direnci aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$R_s = \frac{(W_0 - W_d)\rho}{A_j} + R_c \quad (2.19)$$

Denklemden, W_0 altlık kalınlığı, W_d tükenim bölgesinin genişliği, A_j eklemin yayıldığı alan, ρ altlığın öz direnci ve R_c kontak direncidir. İdeal fotodiyotların seri dirence sahip olmaması gerektiği halde, 10-1000 ohm arasında değerlere sahip oldukları görülmüştür [60].

2.3.4.5 Şönt Direnci

Bir fotodiyotta şönt direnci, bir akım kaynağı olarak gösterilebilir. Şönt direnci, başlangıcı $V=0$ 'da olan fotodiyodun akım-voltaj eğrisinin eğimidir. İdeal bir fotodiyot için, şönt direnci sonsuz ($R_{sh} = \infty$) ve seri direnci sıfır ($R_s = 0$) olmalıdır. Ancak gerçekte, şönt direnci birkaç mega ile giga ohm arasında değişen değerleri alır. Şönt direnci fotodiyota besleme voltajı uygulanmadığı durumlardaki gürültü akımını tanımlamak için kullanılır. Şönt direnci deneysel olarak, fotodiyota ± 10 mV uygulanarak ve fotodiyodun etkin direnci hesaplanarak elde edilir. Bir fotodiyot, ne kadar yüksek bir şönt direncine sahip olursa, o derece ideal bir fotodiyot olmuş olur. Bir şönt direncinin devredeki gösterimi Şekil 2.11a'da gösterilmektedir.

2.3.4.6 Kuantum Verimi

Bir fotodiyotunun kuantum verimi, fotoakımı sağlayan ve fotodiyoda gelen foton sayısının yüzdesidir. Yani fotodiyodun gelen ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirme yeteneğine kuantum verimi denir ve yüzde (%) olarak ifade edilir. Diğer bir ifadeyle, bir fotodiyodun kuantum verimi, fotoakıma katkı sağlayan, elektron-boşluk çiftini üreten dedektör üzerine gelen tek foton ihtimali olarak da tanımlanır. Kuantum verimi ile fotodiyot duyarlılığı aşağıda verilen eşitlik birbirine bağlıdır.

$$Q.E. = \frac{R_{\lambda \dots \text{gözlemlenen}}}{R_{\lambda \dots \text{ideal}}} \times 100 = \quad (2.20)$$

$$Q.E = R_{\lambda} \frac{hc}{\lambda q} \quad (2.21)$$

İfadelerde, h Planck sabiti, c ışık hızı, q elektron yükü, R_{λ} fotoduyarlılık, λ ise dalga boyudur.

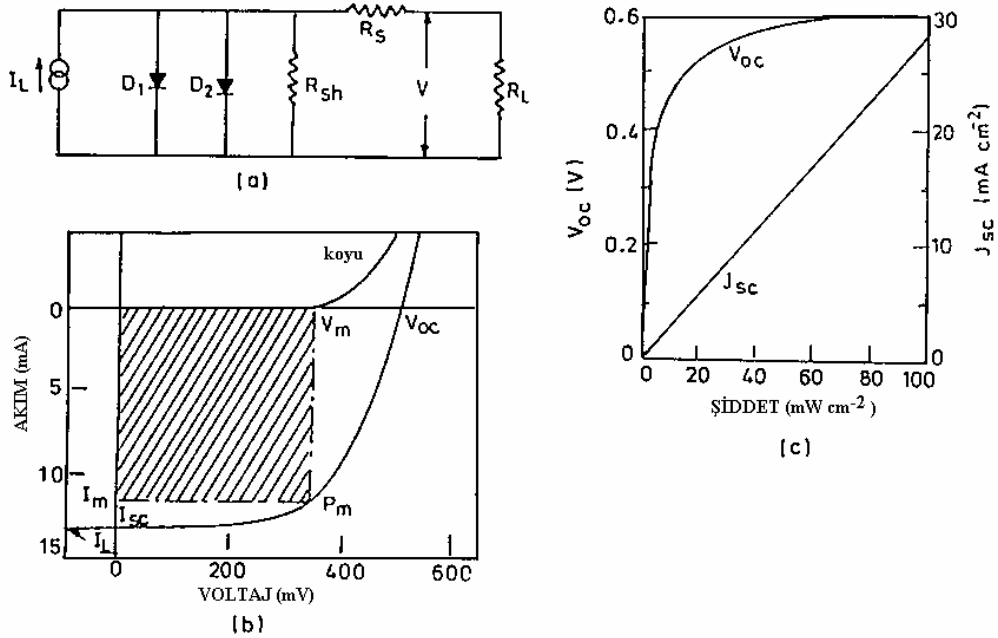
2.3.4.7 Doldurma Faktörü

Doldurma Faktörü (FF),

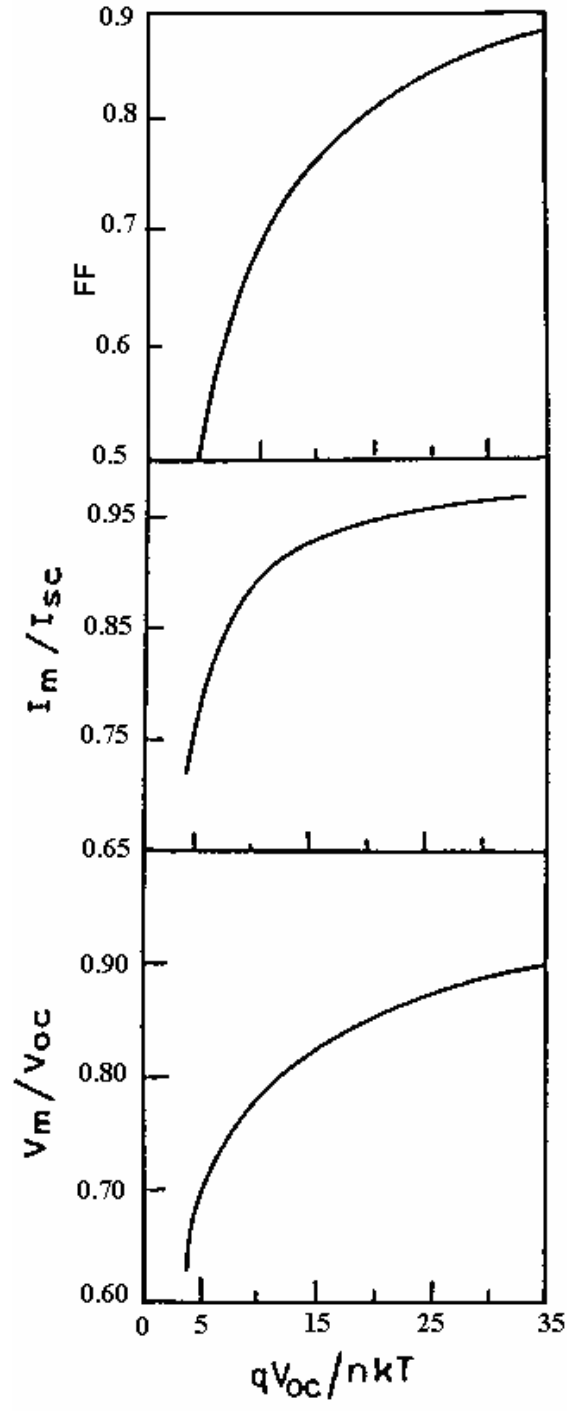
$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.22)$$

bağıntısı ile verilir. Şekil 2.11c'dende görüldüğü gibi doldurma faktörü FF, I-V eğrisiyle çizilen kare veya dikdörtgen ile ilgilidir.

Yüksek band aralıklı malzemelerin, onların daha yüksek açık-devre voltajlarından dolayı, yüksek doldurma faktörlerini oluştururlar. Normalize edilen V_{oc} 'nin fonksiyonu olarak V_m/V_{oc} , I_m/I_{sc} ve FF'nin değişimleri Şekil 2.12'da gösterilir. Seri direnç ve şönt direnci ihmal edildiği zaman V_m/V_{oc} , I_m/I_{sc} ve FF oranı Şekil 2.12'de gösterilen bütün alt değerlere kadar azalır.



Şekil 2.11 (a) Seri ve şönt dirençleri kapsayan bir fotodiyodun eşdeğer devresi, (b) Bir fotodiyodun tipik aydınlatma ve karanlık I-V karakteristikleri, (c) ışık şiddetinin fonksiyonu olarak V_{oc} ve J_{sc} 'leri.



Şekil 2.12 qV_{oc}/nkT 'nin fonksiyonu olarak V_m/V_{oc} , I_m/I_{sc} ve FF'nin değişimi [59].

2.3.4.8 Fotoduyarlılık

Fotoduyarlılık R , başka bir ölçümün parametresidir ve optik gücü oluşturan fotoakım ile ilgilidir. Bir fotodiyodun duyarlılığı, ışığa duyarlılığın bir ölçüsü olup, fotoakımın (I_{ph}), verilen dalga boylarında fotodiyot yüzey üzerine düşen ışığın gücüne oranı olarak tanımlanır. Fotoduyarlılık, bir diğer ifadeyle ışık gücünün elektrik akıma dönüştürülme etkisinin bir ölçümüdür. Fotoduyarlılık, fotodiyot üzerine düşen ışığın dalga boyu ile ve bunun yanında sıcaklık ve uygulanan ters besleme voltajı ile değişmektedir. Fotodiyotlar için duyarlılık,

$$R = \frac{I_{ph}}{P} = \frac{\eta e}{h\nu} \quad (2.23)$$

ifadesi ile verilir [41]. Burada η , spektral kuantum verimi, λ fotodiyoda gelen ışığın dalga boyudur. Fotoduyarlılığın birimi denklem (2.23)'den da anlaşılacağı gibi, A/W'dir. Bir fotodiyodun duyarlılığını artırmak için, fotodiyot yüzeyine çarpan ışıkla yansıyan ışık arasındaki oran azaltılır. Schottky fotodiyotları için bu, ince metalik kontaklar kullanılarak sağlanabilir. Oysa p-i-n fotodiyotları için yarıiletken/hava ara yüzeyi arasındaki çarpan-yansıyan ışık oranı uygun bir anti-yansıma işlemi ile azaltılabilir. Üstelik Schottky kontak materyallerinde soğurma ve p^+ veya n^+ tabakalarındaki soğurma sırasıyla Schottky ve p-i-n fotodiyotları içinde ek kayıplar olarak hesaba katılabilmelidir.

3. DENEYSEL İŞLEMLER VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu çalışmada, [100] yönelimine sahip $10^{-3} - 40 \text{ } \Omega.cm$ öz dirençli ve fabrikasyon olarak parlatılmış n-tipi silisyum ince tabakası, [111] yönelimine sahip $10^{-3} - 40 \text{ } \Omega.cm$ öz dirençli ve fabrikasyon olarak parlatılmış p-tipi silisyum ince tabakası ve 15-25 Ω dirençli indiyum tin oksit kaplı ITO camları kullanıldı. Si ince tabakaları ve ITO camları, Sigma-Aldrich şirketinden satın alındı. Si ince tabakaları ve ITO camları üzerinde oluşacak olan oksit tabakayı kaldırmak için Si ince tabakaları ve ITO camları için farklı kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. Si tabakaları ve ITO camlarının temizleme işleminden sonra farklı yapılarıdaki organik yarıiletken fotodiyotların hazırlanma işlemlerine geçildi. Elde edilen organik yarıiletken fotodiyotların optoelektronik karakterizasyonu için gerekli olan parametrelerin hesaplanabilmesi için fotodiyotların akım-voltaj ve fotoiletkenlik ölçümleri yapıldı.

3.1 Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al, Al/p-Si/PCBM:MEH-PPV/Al ve Al/p-Si/PANI/Al Organik Yarıiletken Fotodiyotları

3.1.1 Silisyum İnce Tabakalarının Temizlenmesi

Bu çalışmada kullanılan n-Si ve p-Si ince tabakaları üzerinde bulunan organik ve ağır metal kirliliklerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri gidermek için kimyasal temizleme işlemleri yapıldı. n-tipi Si ve p-Si ince tabakaları için aşağıdaki kimyasal temizleme işlemleri ayrı ayrı yapıldı [61].

- a) Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içerisinde gerçekleştirildi. Ayrıca ultrasonik tankında aseton kullanıldı.
- b) Eşit miktarda alınan trikloretilen, alkol ve aseton (25:25:25 ml) içerisinde ultrasonik olarak 3 dakika yıkandı ve daha sonra 25 ml De-iyonize suda ultrasonik olarak yıkandı.
- c) Aynı oranda alınan hidrojen peroksit (H_2O_2) ve sülfürik asit (H_2SO_4) içerisinde (25:25 ml) 2 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve daha sonra 25 ml De-iyonize suda 10 dakika temizlendi.
- d) $H_2O + HF$ (50:10 ml) 'de ultrasonik olarak 15 dakika temizlendi. Daha sonra tekrar 25 ml De-iyonize suda 10 dakika boyunca ultrasonik olarak temizlendi.

- e) $H_2O + HF + HNO_3$ (75:5:30 ml) çözeltisinin içerisinde 15 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Ardından da 25 ml De-iyonize su içerisinde ultrasonik olarak 5 dakika yıkandı.
- f) Daha sonra 30 ml H_2O_2 'de 15 dakika ultrasonik olarak yıkandı ve ardından tekrar 25 ml De-iyonize (DI) su içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.
- g) Son olarak da hazırlanan $H_2O + HF$ (30:20 ml) çözeltisinde 15 dakika ultrasonik olarak yıkandı ve ardından 30 ml De-iyonize su içerisinde 15 dakika ultrasonik olarak yıkandı.

Kimyasal temizleme işleminin ikinci kısmı

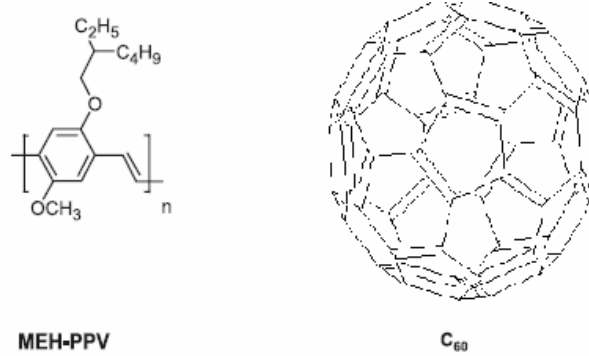
- a) Tekrar ultrasonik tanka yaklaşık tankın 2/3'ü dolacak kadar aseton koyuldu ve behere konulan 50 ml aseton ile silisyum kristali 10 dakika ultrasonik olarak yıkandı ve daha sonra 30 ml De-iyonize (DI) suda 10 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
- b) 30 ml metanolde 10 dakika ultrasonik olarak yıkandı. Sonrasında 30 ml De-iyonize (DI) suda 15 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
- c) $H_2O + H_2O_2 + NH_3$ çözeltisi (60:10:10 ml) hazırlanarak 60 °C'de 10 dakika yıkandı ve arkasından 30 ml De-iyonize (DI) suda 10 dakika yıkandı.
- d) Hazırlanan $H_2O + H_2O_2 + HCl$ çözeltisinde 60 °C'de 10 dakika ultrasonik olarak yıkandı, daha sonra 30 ml De-iyonize (DI) suda 10 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
- e) Son olarak kristal $H_2O + HF$ çözeltisinde (50:5 ml) 1 dakika yıkandıktan sonra 30 ml De-iyonize (DI) su içerisinde de 15 dakika ultrasonik olarak temizlendi [61].

3.1.2 Silisyum Altlığı Üzerine Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması

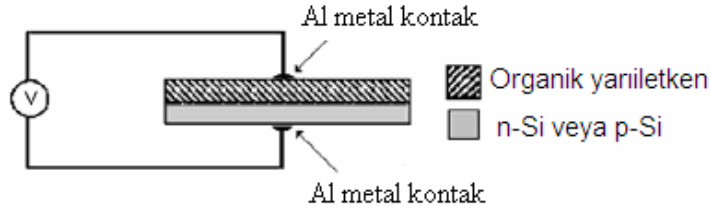
Kimyasal temizleme işleminden sonra silisyumun mat yüzeyi üzerine alüminyum (Al) metali termal buharlaştırma işlemiyle buharlaştırıldı ve azot atmosferinde 3 dakika için 570 °C'de ısıtılma işlemi tutuldu. Temizleme işlemi tamamlandıktan sonra, Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al organik fotodiyodu hazırlamak için, poli [2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil] (MEH-PPV) ve Fulleren C₆₀ organik yarıiletkenleri kullanıldı. Bu materyallerin kimyasal yapısı Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Her iki materyalde, Sigma-Aldrich şirketinden satın alındı. MEH-PPV ve C₆₀ karışımı, aynı oranda alınarak toluen çözücüsünde, vorteks ve ultrasonik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılarak hazırlandı. Hazırlanan C₆₀-MEH-PPV karışımı, n-Si üzerine ince filmi oluşturuldu [62, 63] ve kurutulmaya bırakılarak Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al fotodiyodu hazırlandı. Hazırlanan Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al organik fotodiyotunun,

polimer-fulleren (MEH-PPV- C_{60}) tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $1\mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $45 mm^2$ olarak hesaplandı. Bütün buharlaştırma işlemleri yaklaşık $10^{-5} mbar$ 'da bir vakum kaplama ünitesinde yapıldı. Hazırlanan Al/n-Si/ C_{60} -MEH-PPV/Al organik fotodiyotunun şematik yapısı Şekil 3.2'de gösterildiği gibidir.

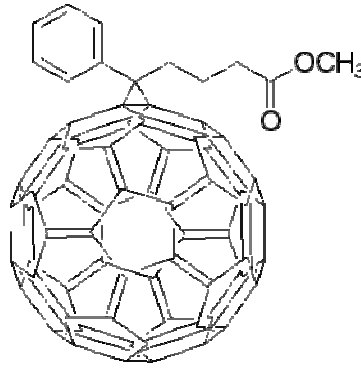
Daha sonra Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al organik fotodiyodunu hazırlamak için, poli [2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil] (MEH-PPV) ve Fulleren türevi olan [6,6]-fenil- C_{61} -bütrik asit metilester (PCBM) kullanıldı. Fulleren türevi olan [6,6]-fenil- C_{61} -bütrik asit metilester (PCBM)'nin kimyasal yapısı Şekil 3.3'de gösterildiği gibidir. Bu malzeme, Sigma-Aldrich şirketinden satın alındı. [6,6]-fenil- C_{61} -bütrik asit metilester (PCBM) ve MEH-PPV karışımı, (0.5:9.5) oranlarında hazırlandı, yani ağırlıkça, %5 oranında [6,6]-fenil- C_{61} -bütrik asit metilester (PCBM) ve geri kalan %95 oranında ise MEH-PPV kullanıldı. Kullanılan MEH-PPV'nin miktarı, $m_{MEH-PPV} = 0,0015 gr$ iken, PCBM'nin miktarı $m_{PCBM} = 0,0000789 gr$ şeklindedir. Bu oranlarda karıştırılan PCBM-MEH-PPV, kloroform ($CHCl_3$) çözücüsünde, vorteks ve ultrasonik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılarak hazırlandı. Hazırlanan PCBM-MEH-PPV karışımı, p-Si üzerine ince filmi oluşturuldu [62, 63] ve kurutulmaya bırakılarak, Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyodu hazırlandı. Hazırlanan Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun, polimer-fulleren (MEH-PPV-PCBM) tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $1\mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $54 mm^2$ olarak hesaplandı. Bütün buharlaştırma işlemleri yaklaşık $10^{-5} mbar$ 'da bir vakum kaplama ünitesinde yapıldı.



Şekil 3.1 MEH-PPV ve C_{60} organik yarıiletken malzemelerin kimyasal yapıları.



Şekil 3.2 Silisyum altlığı üzerine yapılan organik fotodiyotların şematik yapısı.



Şekil 3.3 [6,6]-fenil-C₆₁-bütrik asit metilester (PCBM)'nin kimyasal yapısı.

Daha sonra Al/p-Si/PANI/Al fotodiyodu hazırlandı. Polianilin'in kimyasal yapısı Şekil 3.4'te gösterildiği gibidir [64]. Çözeltisi hazırlanan PANI'nın, p-Si üzerine ince filmi oluşturuldu [62, 63] ve kurutulmaya bırakılarak, Al/p-Si/PANI/Al organik yarıiletken fotodiyodu hazırlandı. Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al organik yarıiletken fotodiyotunun, polimer-fulleren (MEH-PPV-PCBM) tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $1\mu m$ ve aktif fotodiyot alanı 15 mm^2 olarak hesaplandı. Bütün buharlaştırma işlemleri yine yaklaşık 10^{-5} mbar 'da bir vakum kaplama ünitesinde yapıldı.

ITO camlarının ultrasonik olarak yıkanmasının avantajları:

- (i) Ultrasonik, yüzeyi ve oyukları, çizmeden, fırçalamadan veya kazımadan yıkamayı sağlar.
- (ii) Ultrasonikle temizlemek, kısa zaman alır. En karmaşık yapıları bile tamamen temizleme olanağı sağlar.
- (iii) Ultrasonik temizleme, elle temizlemeye göre daha basit ve daha kolaydır. Bilinen temizlemeye göre ihtiyaç duyulan kimyasalların konsantrasyonları daha azdır.
- c) Ultrasonik olarak yıkanıp kurutulan ITO'lar daha sonra 20 dakika boyunca 95 °C'ye kadar fırında bırakıldı.
- d) ITO camları, 2 dakika boyunca UV'ye Model UVgl-58 MINERALIGHT LAMP, 254/366 nm dalga boyu) maruz bırakıldı.
- e) ITO camlara, DI + KOH çözeltisinde banyo yaptırıldı, DI suda durulandı ve 125 °C'de son fırınlama işlemi 30 dakika boyunca yapıldı.
- f) 200 ml DI + 60 ml HCl ve 15 ml HNO₃ 'te 6 dakika boyunca 55 °C'de asitlemeye bırakıldı.
- g) ITO camları, DI suda durulandı ve ardından RCA 5:1:1 (200 ml DI + 40 ml H₂O₂ + 40 ml NH₄OH) çözeltisinde 30 dakika boyunca ısıtılarak temizlendi.
- h) Son olarak da, DI suda durulanan ITO camları, 5 dakika boyunca ultrasonik tankta yıkandı ve kurutularak tüm temizleme işlemleri tamamlandı.

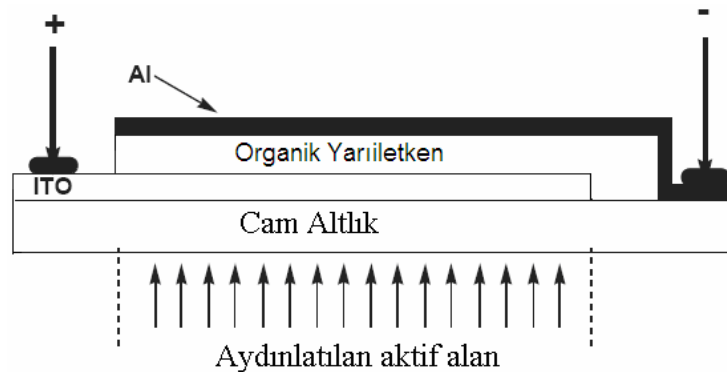
ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyodu için ITO camı, birinci kimyasal temizleme işlemiyle yıkandı ve kurutma işleminden sonra, ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyodunu hazırlamak için, MEH-PPV, kloroform çözücüsünde, vorteks ve ultrasonik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılarak hazırlandı. Hazırlanan MEH-PPV karışımı, ITO camı üzerine filmi oluşturuldu ve kurutulmaya bırakıldı, daha sonra MEH-PPV üzerine alüminyum (Al) metali termal buharlaştırma işlemiyle buharlaştırıldı. Böylece, ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyodu hazırlandı. Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al organik fotodiyotunun, MEH-PPV tabakasının kalınlığı yaklaşık 60 μm ve aktif fotodiyot alanı 165 mm² olarak hesaplandı. Bütün buharlaştırma işlemleri yaklaşık 10⁻⁵ mbar 'da bir vakum kaplama ünitesinde yapıldı. Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al organik fotodiyotunun yapısı Şekil 3.5'de gösterildiği gibidir.

ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyodunu hazırlamak için, ITO camı birinci temizleme şekli ile temizlendi. Fotodiyodun yapımı için, MEH-PPV ve Fulleren türevi olan PCBM kullanıldı. MEH-PPV ve PCBM karışımı, (1:4) oranlarında yapıldı. Yani ağırlıkça, %20 oranında MEH-PPV ve geri kalan %80 oranında ise PCBM kullanıldı. Kullanılan MEH-PPV'nin miktarı $m_{MEH-PPV} = 0,0048 gr$ iken, PCBM'nin miktarı $m_{PCBM} = 0,0192 gr$ şeklindedir. Bu oranlarda karıştırılan MEH-PPV: PCBM (1:4), kloroform

çözücüsünde, vorteks ve ultrasonik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılarak hazırlandı. Hazırlanan MEH-PPV: PCBM (1:4) karışımı, ITO camı üzerine filmi oluşturuldu. Daha sonra kurutulmaya bırakılarak organik yarıiletken ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyodu hazırlandı. Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun, polimer-fulleren (MEH-PPV-PCBM) tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $20\mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $108mm^2$ olarak hesaplandı. Bütün buharlaştırma işlemleri yine yaklaşık $10^{-5} mbar$ 'da bir vakum kaplama ünitesinde yapıldı. Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik fotodiyotunun yapısı Şekil 3.5'te gösterildiği gibidir.

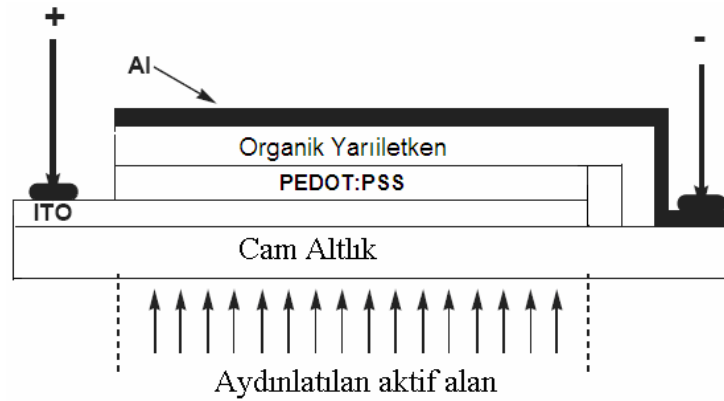
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunu hazırlamak için, ITO camı yine birinci temizleme şekli ile temizlendi. Yukarıda verilen oranlarda MEH-PPV: PCBM (1:4), ksilen çözücüsünde, vorteks ve ultrasonik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılarak ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotu hazırlandı. Yani ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun, hazırlama bakımından ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotundan tek farkı MEH-PPV: PCBM karışımının kloroform yerine ksilen çözücüsünde çözünmesidir. MEH-PPV: PCBM (1:4) karışımının kalınlığı yaklaşık olarak $10\mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $221mm^2$ olarak hesaplandı.

Benzer bir şekilde ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) organik yarıiletken fotodiyotu hazırlandı. Bu fotodiyot için de, ITO camı ikinci temizleme şekli ile temizlendi ve MEH-PPV: PCBM karışımı için çözücü olarak kloroform kullanıldı. Daha sonra, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) için yapılan işlemler, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) için de yapılarak ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) organik yarıiletken fotodiyotu hazırlandı. MEH-PPV: PCBM (1:4) karışımının kalınlığı yaklaşık olarak $15\mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $156mm^2$ olarak hesaplandı.



Şekil 3.5 ITO/organik yarıiletken fotodiyotların şematik yapısı.

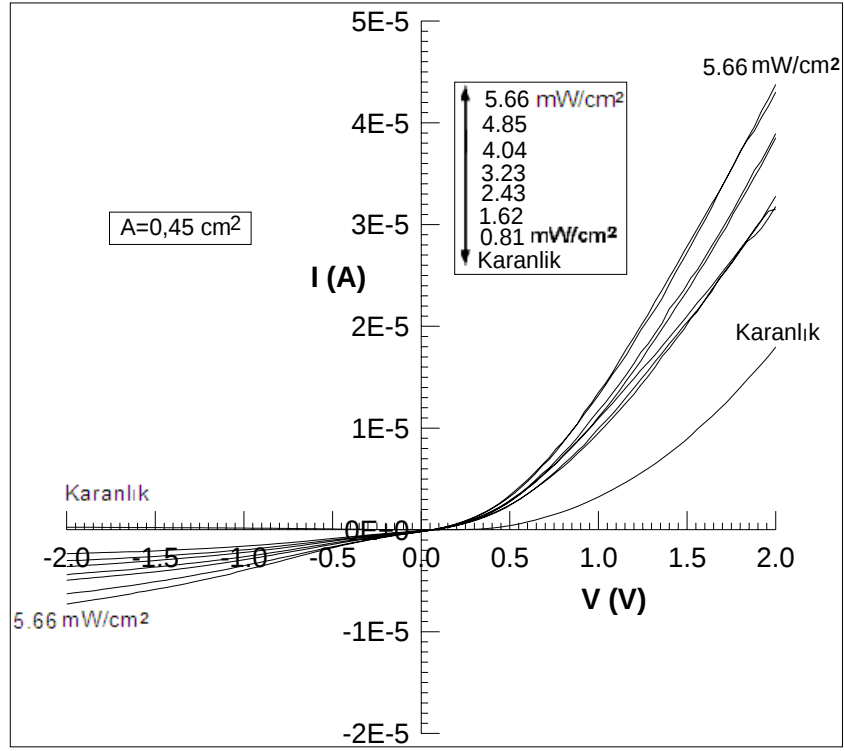
Daha sonra iki adet, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al organik yarıiletken fotodiyodu hazırlandı. Bunlardan birincisi, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) için, ITO camı, birinci temizleme işlemi ile temizlenirken, ikinci fotodiyot ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) için, ITO camı ikinci temizleme işlemiyle temizlendi. ITO camları temizlenip kurutulduktan sonra ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1), (2) organik yarıiletken fotodiyotunun hazırlanması için ITO camı üzerine, sentetik metal olan ve boşluk-enjeksiyon materyali olarak da bilinen poli (sitren sülfonat) ile kaplı poli (3,4-etilen dioksitiyofen) (PEDOT-PSS) ince film oluşturuldu. PEDOT-PSS'nin kalınlığı yaklaşık olarak $10 \mu m$ 'dir. Daha sonra PCBM ve MEH-PPV karışımı, (1:4) oranlarında yapıldı. Yani ağırlıkça, %20 oranında MEH-PPV ve geri kalan %80 oranında ise PCBM kullanıldı. Kullanılan MEH-PPV'nin miktarı, $m_{MEH-PPV} = 0,0048 gr$ iken, PCBM'nin miktarı $m_{PCBM} = 0,0192 gr$ şeklindedir. Bu oranlarda karıştırılan MEH-PPV: PCBM (1:4), kloroform çözücüsünde, vorteks ve ultrasonik karıştırıcı ile yarım saat karıştırılarak hazırlandı. Hazırlanan MEH-PPV: PCBM (1:4) karışım ile ITO camı üzerine kaplanan PEDOT-PSS üzerine ince film oluşturuldu. Daha sonra kurutulmaya bırakılarak, organik yarıiletken ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1), (2) fotodiyotları hazırlandı. ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyodu için, PEDOT-PSS:Polimer-Fulleren (MEH-PPV-PCBM) tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $20 \mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $104,5 mm^2$ ve ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) için, PEDOT-PSS:Polimer-Fulleren (MEH-PPV-PCBM) tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak $15 \mu m$ ve aktif fotodiyot alanı $143 mm^2$ olarak hesaplandı. Bütün buharlaştırma işlemleri yine yaklaşık $10^{-5} mbar$ 'da bir vakum kaplama ünitesinde yapıldı. Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1), (2) organik yarıiletken fotodiyotlarının yapısı Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir.



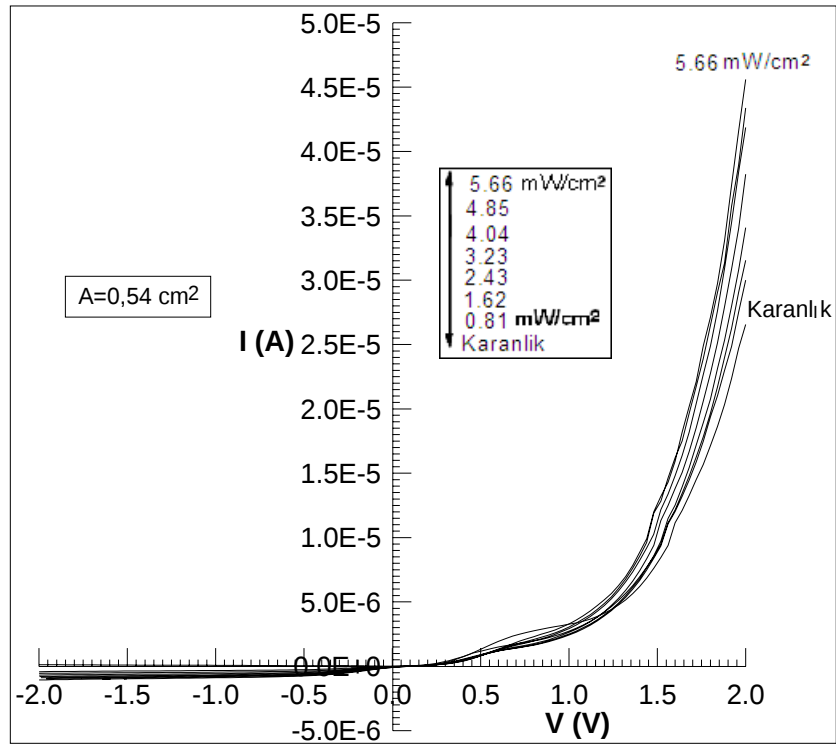
Şekil 3.6 ITO/PEDOT:PSS/organik yarıiletken fotodiyotların şematik yapısı.

Bu çalışmada hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotların elektriksel karakterizasyonunu yapmak amacıyla, akım-voltaj (I-V) ölçümleri farklı aydınlatma altında yapıldı. I-V ölçümleri, Şekil 3.7’de gösterilen deney düzeneğinde yapıldı. Akım-voltaj karakteristiklerinin belirlenmesi için alınan I-V ölçümleri KEITHLEY 2400 Akım-Voltaj Kaynağı ile alındı. Silisyum altlığı üzerine yapılan organik yarıiletken fotodiyotlara -2 ile +2 V arasında ve ITO camı üzerine yapılan organik yarıiletken fotodiyotlara da -4 ile +4 V arasında gerilim uygulanarak ölçümler yapıldı.

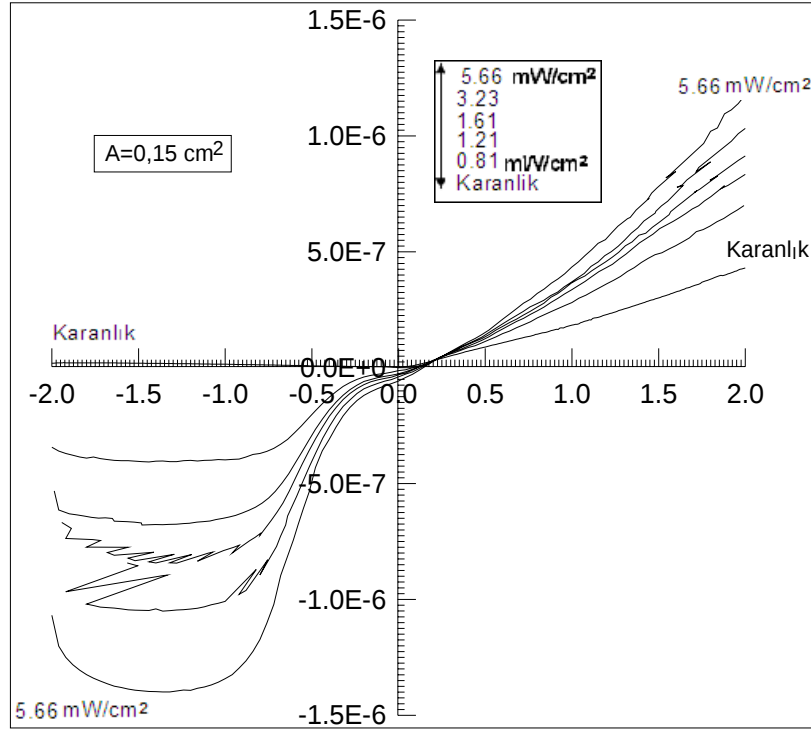
37



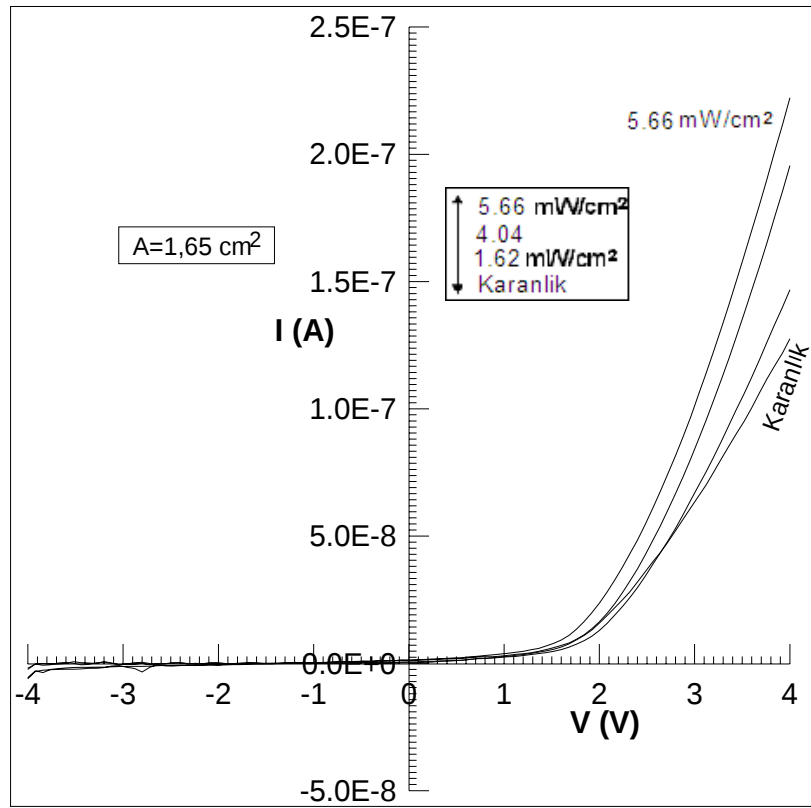
Şekil 3.8 Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



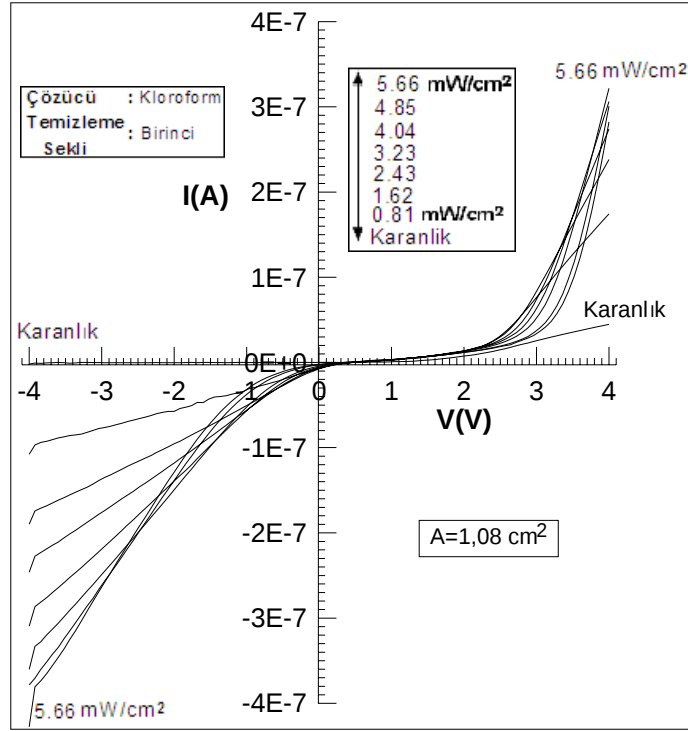
Şekil 3.9 Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



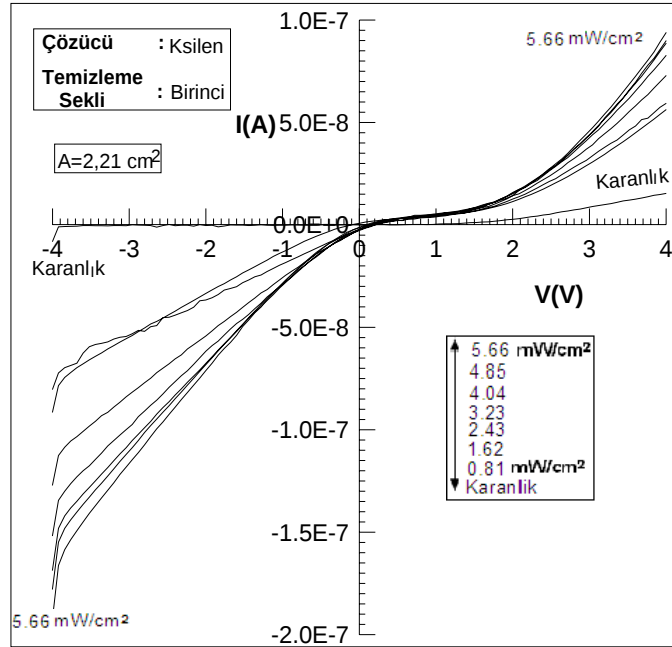
Şekil 3.10 Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



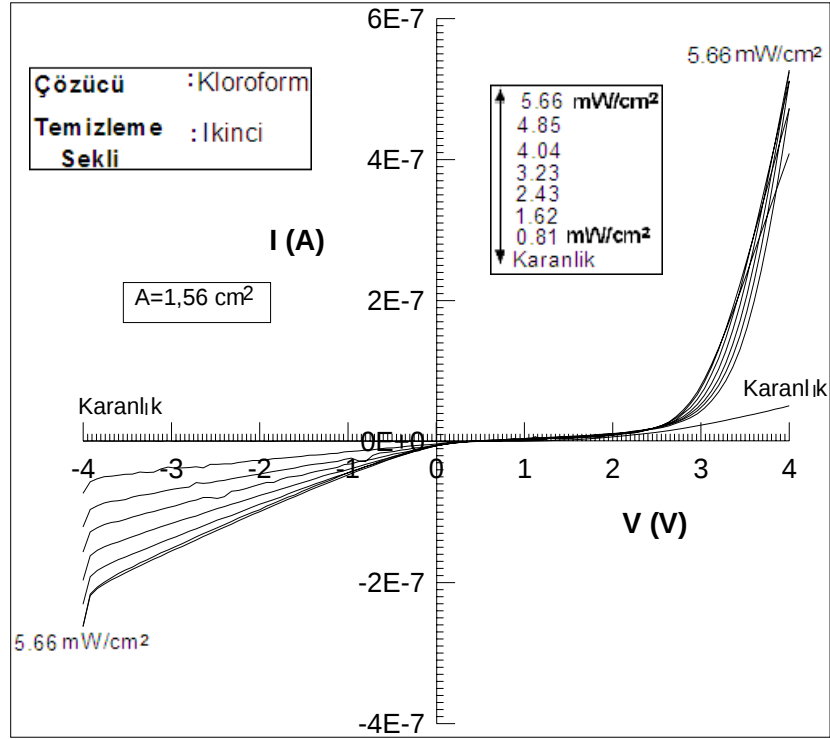
Şekil 3.11 Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



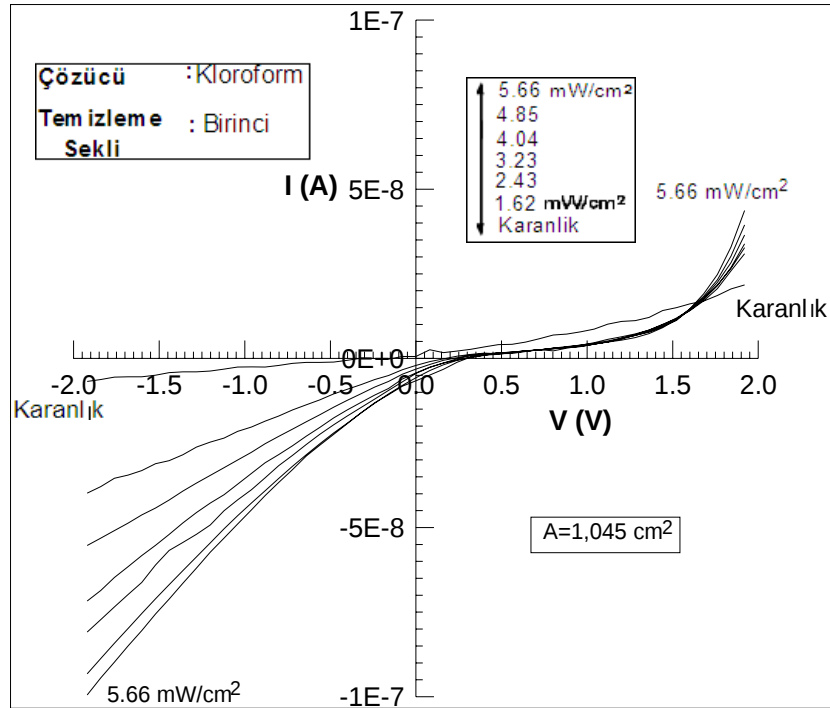
Şekil 3.12 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



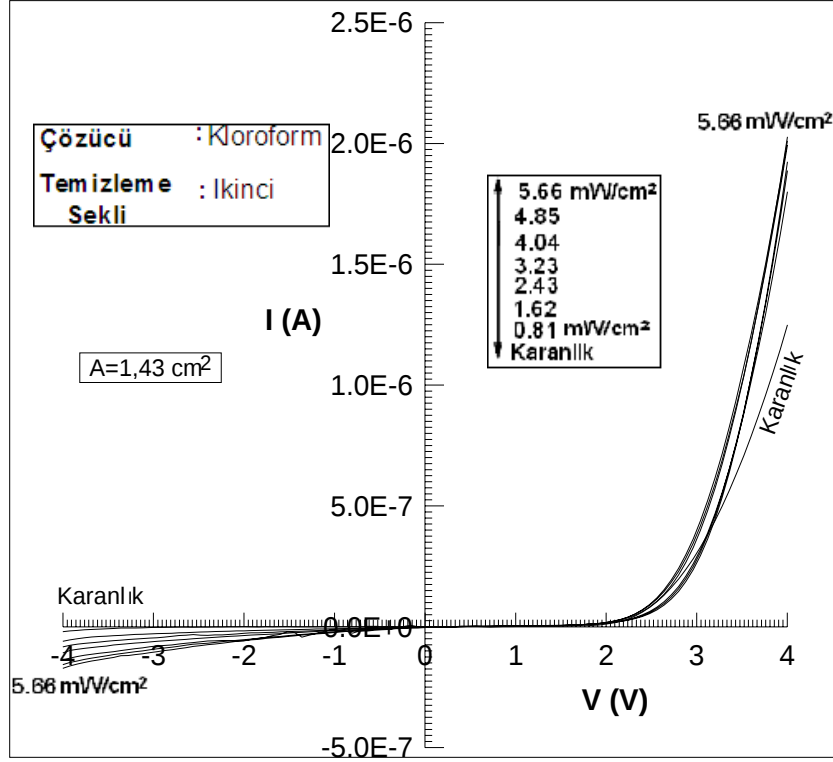
Şekil 3.13 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



Şekil 3.14 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.

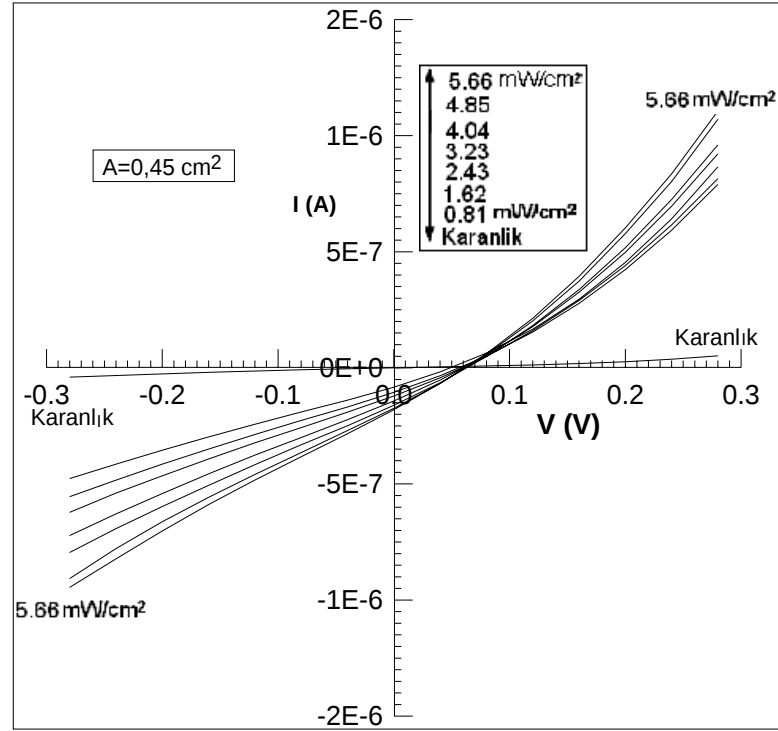


Şekil 3.15 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.

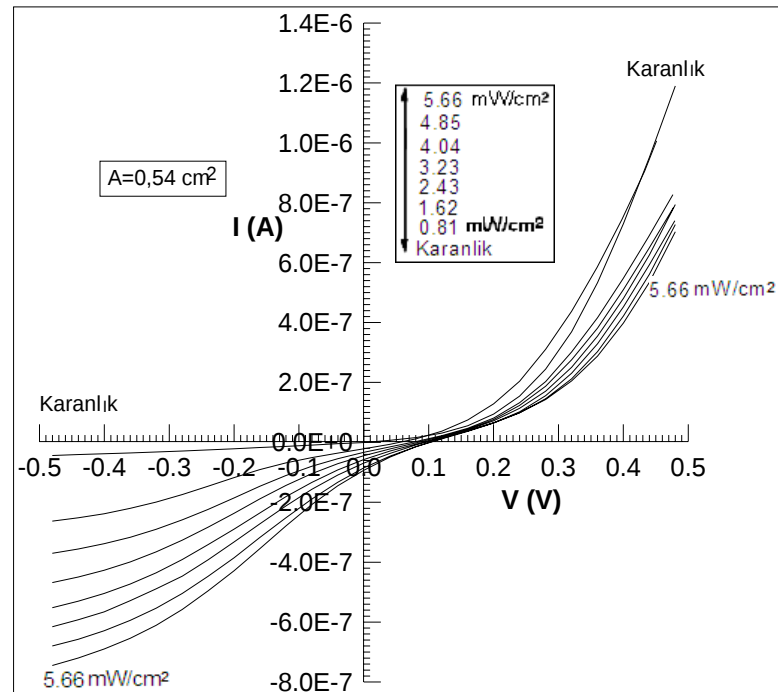


Şekil 3.16 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.

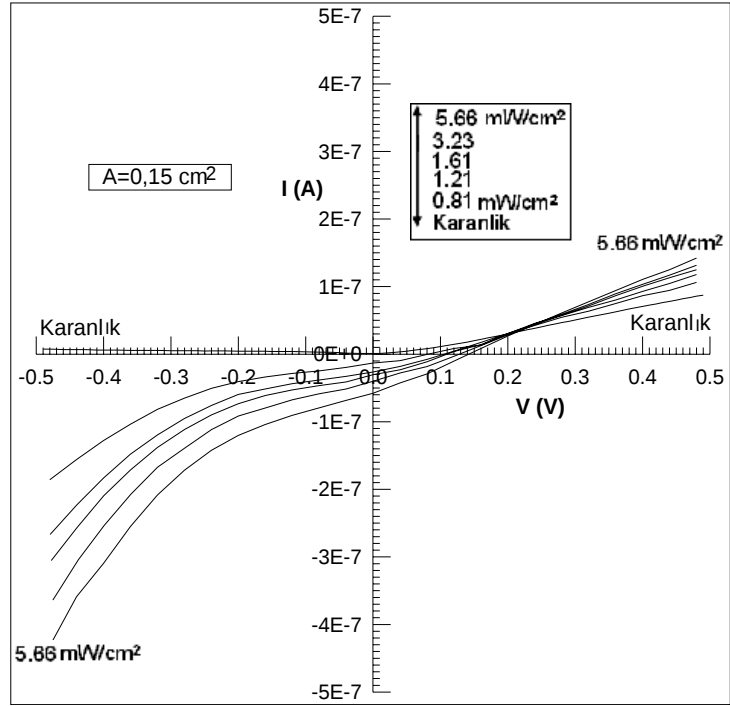
Şekil 3.8-3.16'dan da görüldüğü gibi, fotodiyotun üzerine düşen ışığın şiddeti artırıldığı zaman, ters besleme bölgesindeki eğriler, negatif akım yönünde aşağıya doğru kaymaktadırlar. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımını I_{SC} verir. Sıfır akım noktalarında, eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık-devre voltajı V_{OC} 'yi verir. Hazırlanan fotodiyotların fotovoltajik değişimini görmek için, önceden çizilmiş olan I-V eğrileri daha düşük voltaj aralıklarında tekrar çizildi. Çizilen grafikler, Şekil 3.17-3.25'de gösterilmektedir.



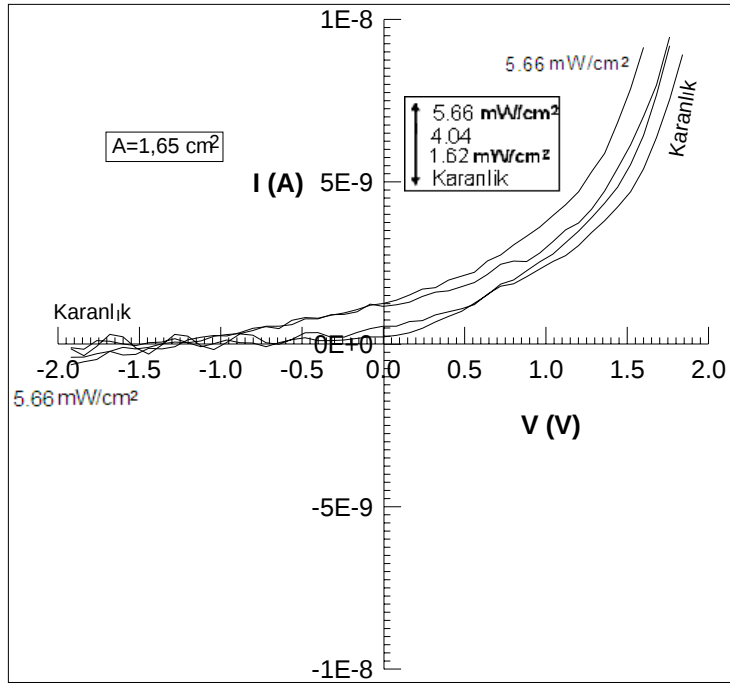
Şekil 3.17 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



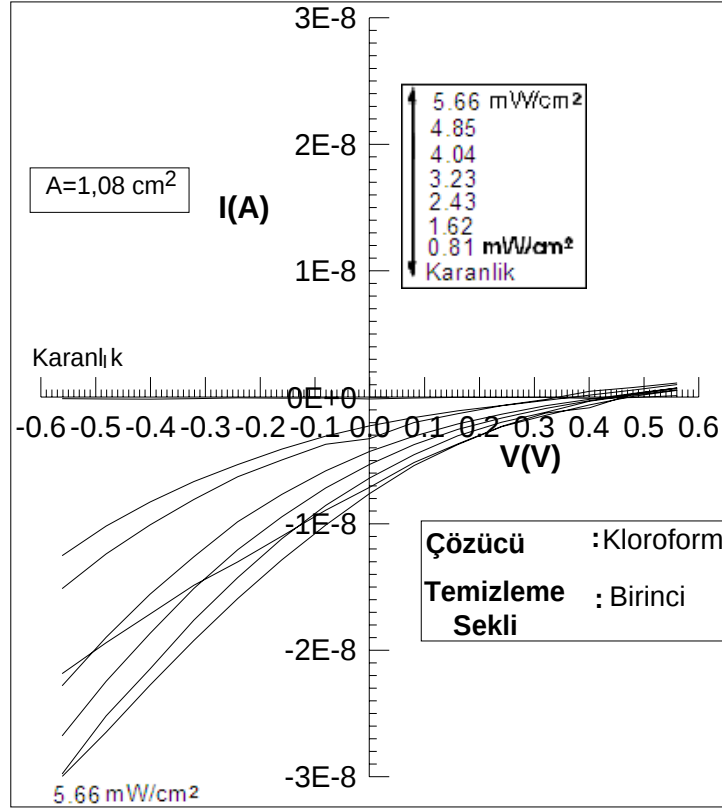
Şekil 3.18 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



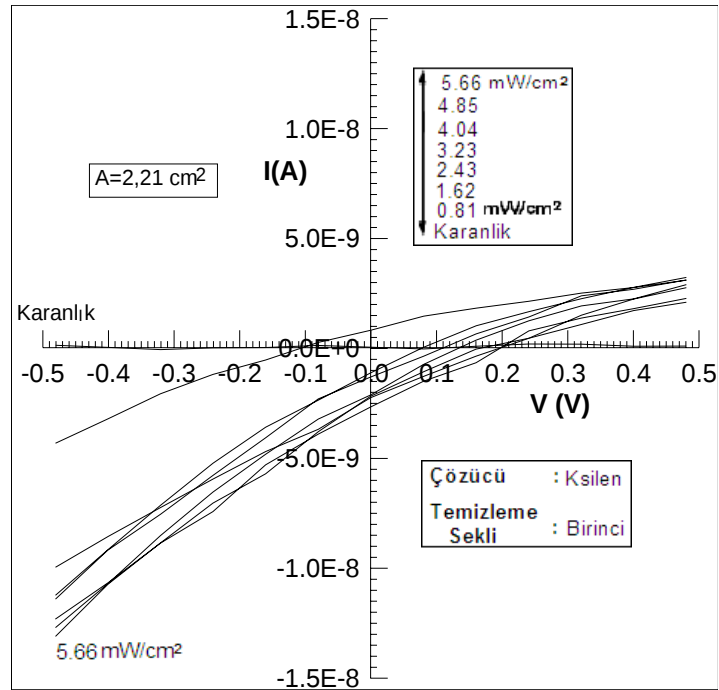
Şekil 3.19 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, Al/p-Si/PANI/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



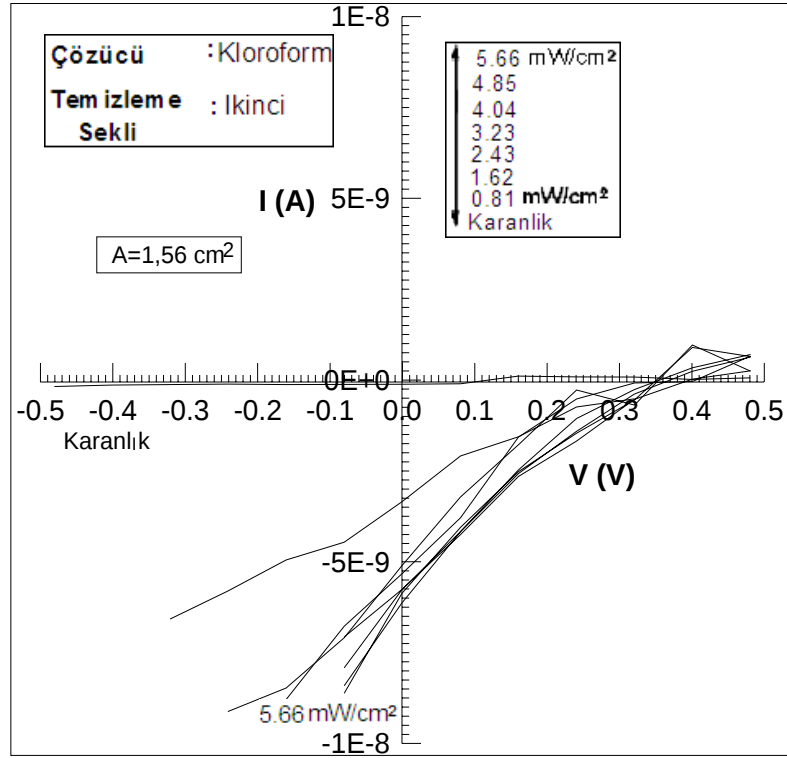
Şekil 3.20 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV/Al organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



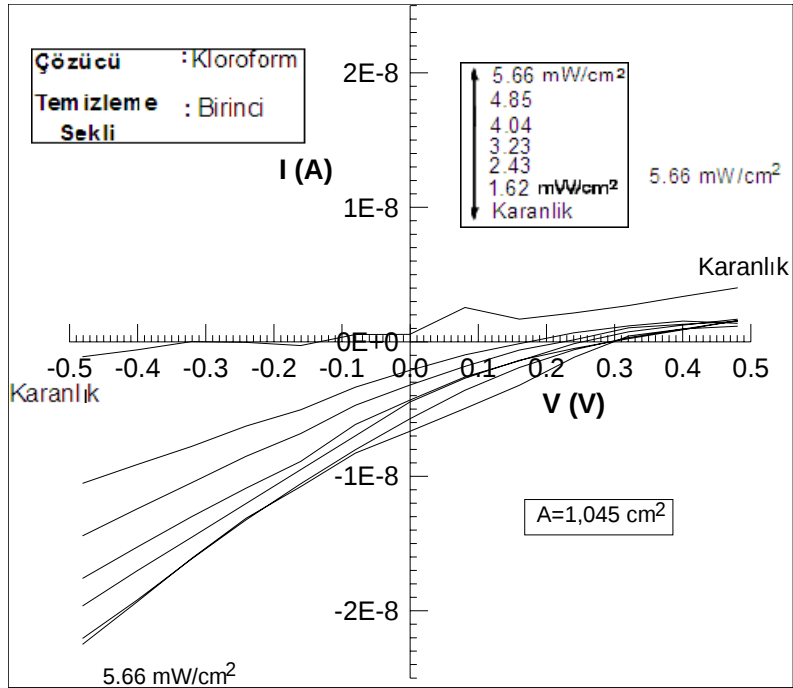
Şekil 3.21 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristiği.



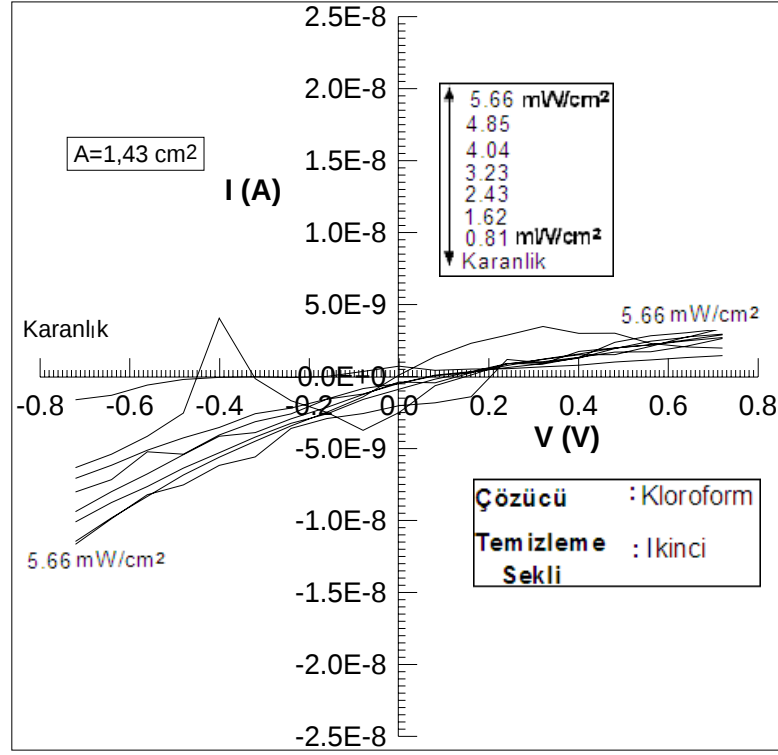
Şekil 3.22 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



Şekil 3.23 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



Şekil 3.24 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.



Şekil 3.25 Kısa-devre akımı I_{SC} ve açık-devre voltajı V_{OC} için ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyotunun akım-voltaj karakteristikleri.

Bir Schottky fotodiyotunun doğru akımı analiz edilerek, ters doyma akımı I_0 , idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi diyot parametreleri belirlenebilir. Hazırlanan tüm organik yarıiletken fotodiyotları için idealite faktörü değerleri, her bir fotodiyodun karanlık durumundaki $\ln I$ - V grafiğinin lineer kısmının eğimlerinden hesaplandı. Hesaplanan idealite faktörü değerleri Tablo 3.1’de verildi. Fotodiyotlar için doyma akımı değerleri I_0 , $\ln I$ - V grafiklerinin lineer kısımlarının V eksenini kestiği noktalardan bulundu ve her bir diyot için elde edilen I_0 değerleri Tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, doyma akımı ve idealite faktörü değerleri.

Fotodiyodun Adı	I_0 (A) $\times 10^{-9}$	n
Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al	1,93	2,25
Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al	2,91	1,82
Al/p-Si/PANI/Al	10,53	1,48
ITO/MEH-PPV/Al	0,198	10,18
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	0,00041	7,60
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,0014	6,76
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3)	0,00073	4,60
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	0,92	4,02
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,57	3,64

3.4 Fotovoltaik Özellikleri

Hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotlarının opoelektronik özelliklerini araştırmak için, fotodiyotların akım-voltaj karakteristiği ile birlikte fotoiletkenlik ölçümleri de yapıldı.

Hazırlanan diyetotların fotoiletkenlik ölçümleri (I-t), KEITHLEY 6517A elektometresiyle 200 Watt'lık bir beyaz ışık altında yapıldı.

3.4.1 Fotovoltaik Parametreler

Şekil 3.17-3.25'de gösterildiği gibi, hazırlanan fotodiyotların farklı aydınlatmalar altındaki akım-voltaj karakteristiklerinden, açık-devre voltajı V_{oc} ve kısa-devre akımı I_{sc} hesaplandı ve bulunan değerler Tablo 3.2-3.10'da verildi.

Tablo 3.2 Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	I_{sc} (A) $\times 10^{-7}$	V_{oc} (V)	V=-2,16 V'ta I_{ph} (A) $\times 10^{-6}$
0,81	0,82	0,0495	1,51
1,62	1,05	0,057	1,82
2,43	1,2	0,059	2,06
3,23	1,4	0,06	2,45
4,04	1,6	0,063	2,71
4,85	1,75	0,062	3,22
5,66	1,8	0,061	3,64

Tablo 3.3 Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	I_{sc} (A) $\times 10^{-8}$	V_{oc} (V)	V=-1,36 V'ta I_{ph} (A) $\times 10^{-7}$
0,81	2,2	0,055	2,74
1,62	3,4	0,075	3,83
2,43	4,5	0,085	4,84
3,23	5,8	0,0925	5,71
4,04	7	0,095	6,34
4,85	8,6	0,102	6,99
5,66	9,3	0,1025	7,66

Tablo 3.4 Al/p-Si/PANI/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	I_{sc} (A) $\times 10^{-8}$	V_{oc} (V)	V=-2,16 V'ta I_{ph} (A) $\times 10^{-7}$
0,81	1,3	0,082	3,95
1,21	2,6	0,11	6,27
1,62	3,08	0,12	7,57
3,23	4	0,13	9,76
5,66	5,8	0,142	12,79

Tablo 3.5 ITO/MEH-PPV/Al fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	$I_{sc} (A) \times 10^{-9}$	$V_{oc} (V)$	V=-1,36 V'ta $I_{ph} (A) \times 10^{-10}$
1,62	0,55	0,98	3,55
4,04	1,18	1,25	3,97
5,66	1,28	1,38	5,39

Tablo 3.6 ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	$I_{sc} (A) \times 10^{-9}$	$V_{oc} (V)$	V=-2,16 V'ta $I_{ph} (A) \times 10^{-7}$
0,81	7	0,46	0,58
1,62	7,5	0,48	1,02
2,43	6	0,42	1,28
3,23	5	0,48	1,52
4,04	4	0,4	1,66
4,85	3	0,35	1,58
5,66	2	0,34	1,49

Tablo 3.7 ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	$I_{sc} (A) \times 10^{-9}$	$V_{oc} (V)$	V=-1,36 V'ta $I_{ph} (A) \times 10^{-8}$
0,81	2,25	0,2	3,68
1,62	0,75	0,1	4,00
2,43	2,75	0,2	5,63
3,23	2,25	0,16	6,81
4,04	2	0,16	7,37
4,85	1,25	0,11	7,48
5,66	1	0,08	7,81

Tablo 3.8 ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	I_{sc} (A) $\times 10^{-9}$	V_{oc} (V)	V=-1,36 V'ta I_{ph} (A) $\times 10^{-8}$
0,81	3,25	0,38	2,37
1,62	5	0,35	4,08
2,43	5,75	0,4	5,35
3,23	6,2	0,36	6,75
4,04	5,8	0,35	7,87
4,85	5,75	0,35	8,63
5,66	5,25	0,4	8,30

Tablo 3.9 ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	I_{sc} (A) $\times 10^{-9}$	V_{oc} (V)	V=-1,36 V'ta I_{ph} (A) $\times 10^{-8}$
1,62	2,1	0,17	4,97
2,43	3,25	0,225	7,55
3,23	4,25	0,25	9,52
4,04	4,5	0,3	11,51
4,85	5,7	0,318	13,14
5,66	6,5	0,322	14,16

Tablo 3.10 ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodu için bulunan bazı parametreler.

P (mW/cm ²)	I_{sc} (A) $\times 10^{-9}$	V_{oc} (V)	V=-1.36 V'ta I_{ph} (A) $\times 10^{-8}$
0,81	0,25	0,15	1,99
1,62	0,48	0,08	3,39
2,43	0,5	0,08	4,38
3,23	0,4	0,13	5,28
4,04	0,9	0,11	5,78
4,85	1	0,01	6,48
5,66	2	0,21	7,15

Diyotların seri direnç ve şönt dirençleri, karanlıkta alınan I-V eğrilerinden hesaplandı ve Tablo 3.11’de verildi.

Tablo 3.11 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, seri direnç ve şönt direnci değerleri.

Fotodiyodun Adı	R_s (Ω) $\times 10^6$	R_{sh} (Ω) $\times 10^9$
Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al	0,101	0,0089
Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al	0,054	0,0051
Al/p-Si/PANI/Al	3,7	0,143
ITO/MEH-PPV/Al	20,4	2,5
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	45,6	1,79
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	123	4,29
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3)	6,84	0,223
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	28	0,279
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,58	0,019

Hazırlanan fotodiyotların maksimum güç noktasındaki voltaj V_m ve akım I_m değerleri de 5.66 mW/cm²’lik aydınlanma altındaki eğrilerden hesaplandı ve Tablo 3.12’de verildi.

Fotodiyotların bir diğer önemli parametresi aydınlatılan fotodiyodun doldurma faktörü (FF)’dür. Diyotlar için doldurma faktörü FF,

$$FF = \left| \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \right| \quad (3.1)$$

bağıntısı ile hesaplandı [22] ve doldurma faktörü FF değerleri Tablo 3.12’de verildi.

Hazırlanan her bir fotodiyodun, farklı aydınlanmalar altındaki ters besleme bölgesinde sabit bir gerilime karşılık gelen fotoakım değerleri, alınan I-V ölçümlerindeki verilerden bulundu. Bulunan fotoakım değerleri Tablo 3.2-3.10’da verildi. Sabit voltaj altında her bir fotodiyot için bulunan fotoakım değerleriyle çizilen $I_{ph} - P$ grafikleri Şekil 3.26-3.34’de gösterildi.

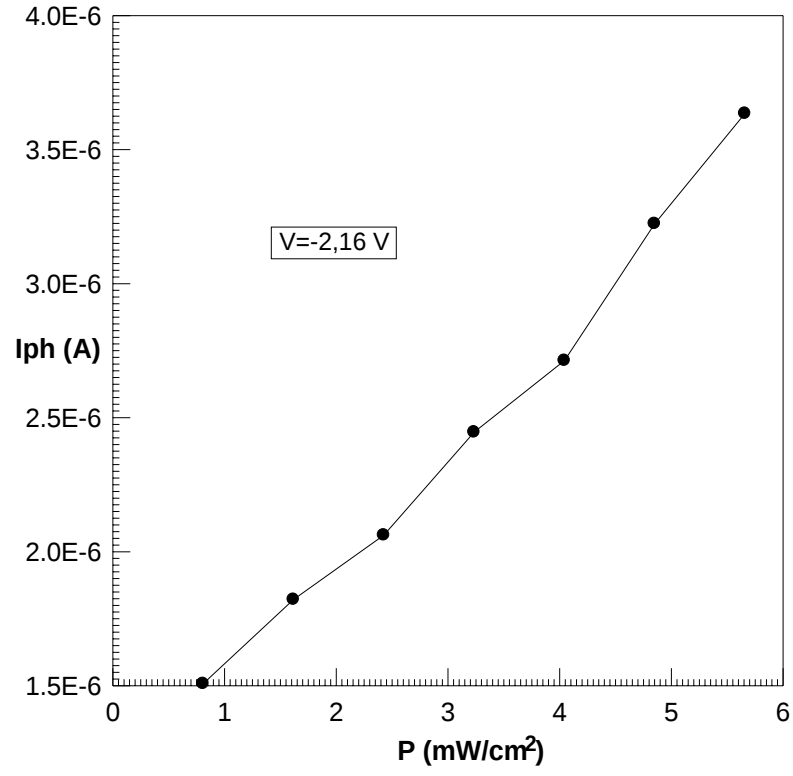
Hazırlanan diyotların fotoakım değerleri,

$$I_{ph} \propto AP^m \quad (3.2)$$

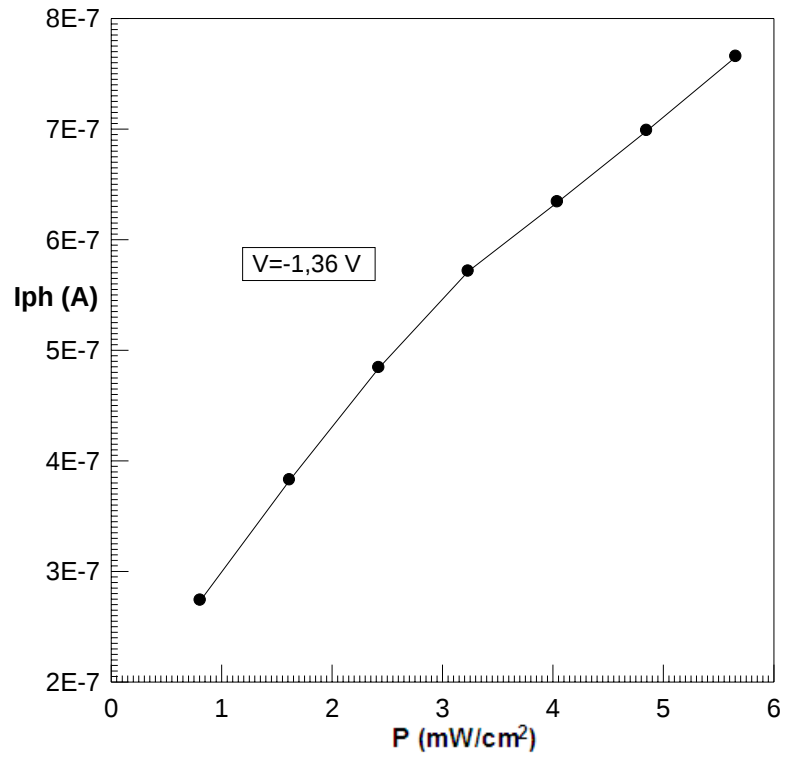
bağıntısı ile elde edildi [68]. Burada P, gelen ışığın şiddeti ve m bir sabittir. Şekil 3.26-3.34’de diyotlar için $I_{ph} - P$ grafikleri verildi ve bu grafiklerin lineer bölgesinin eğiminden m değerleri hesaplandı. Bulunan m sabitinin değerleri Tablo 3.13’de verildi.

Tablo 3.12 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, P_m , V_m , I_m ve FF değerleri.

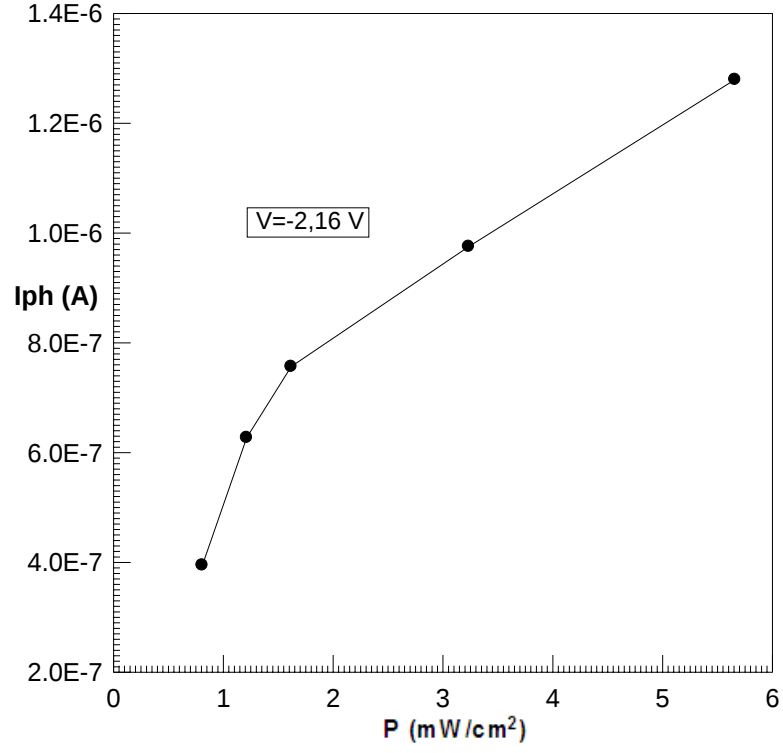
Fotodiyodun Adı	P_m (Watt) $\times 10^{-9}$	V_m (V)	I_m (A) $\times 10^{-9}$	FF (%)
Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al	2,70	0,030	90	24,2
Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al	3,35	0,036	93	34,38
Al/p-Si/PANI/Al	2,20	0,09	24,5	26,77
ITO/MEH-PPV/Al	0,43	0,54	0,8	27
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	0,60	0,14	4,2	16,92
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,14	0,11	1,3	26
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3)	0,42	0,12	3,5	19,13
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	0,52	0,13	4	25
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,22	0,16	1,42	54,09



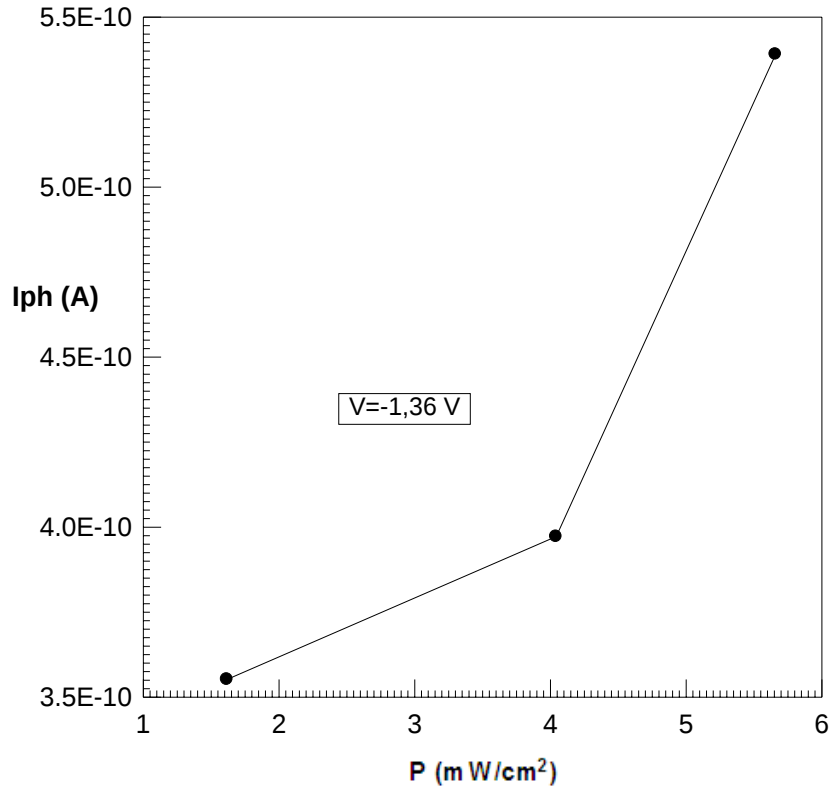
Şekil 3.26 Hazırlanan Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



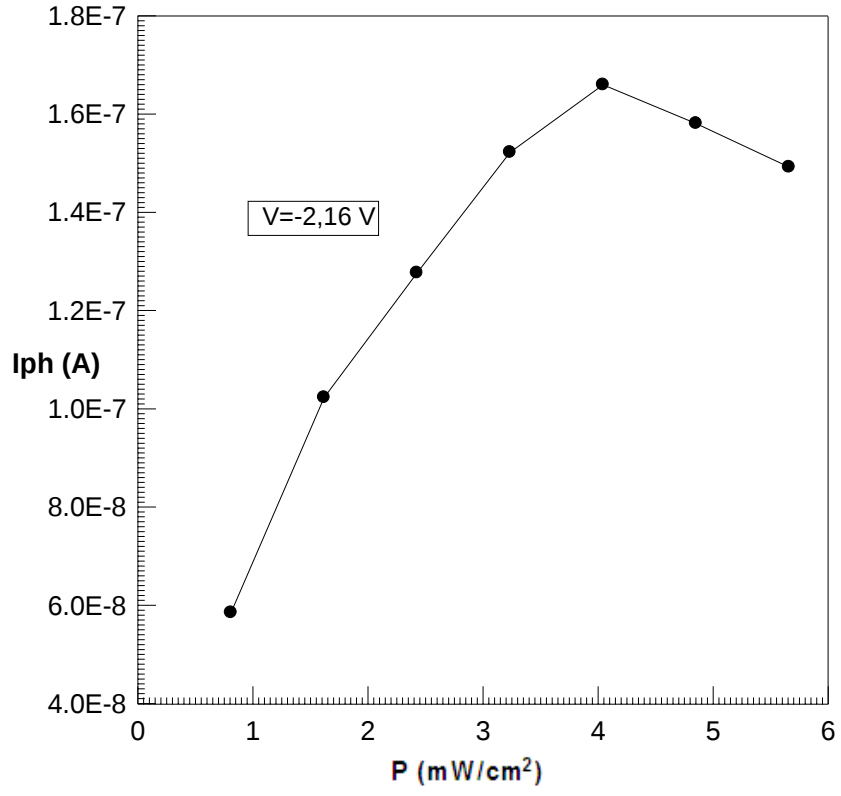
Şekil 3.27 Hazırlanan Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



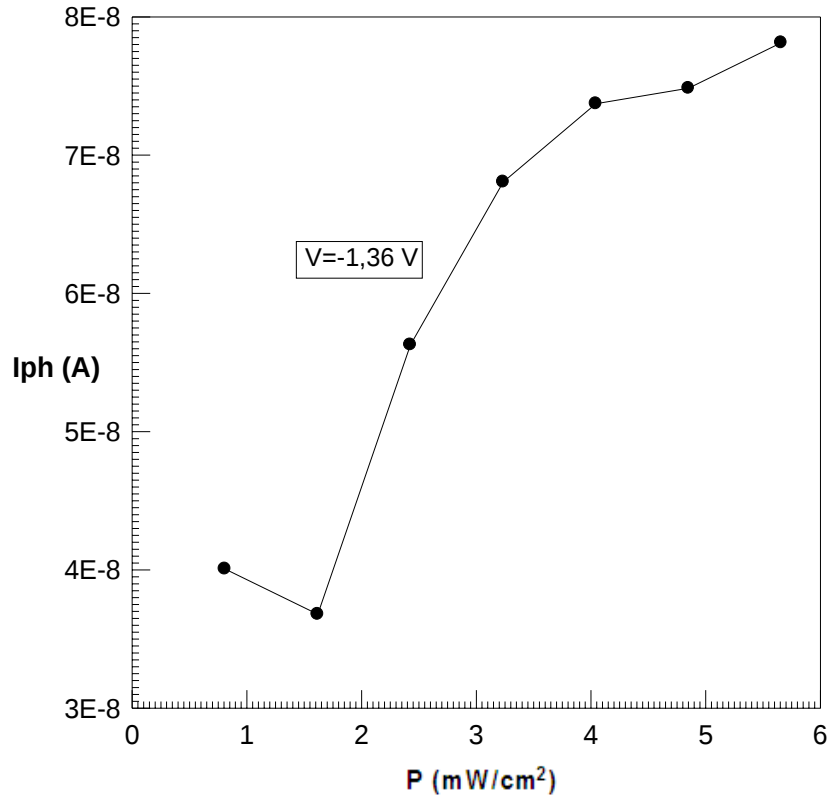
Şekil 3.28 Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



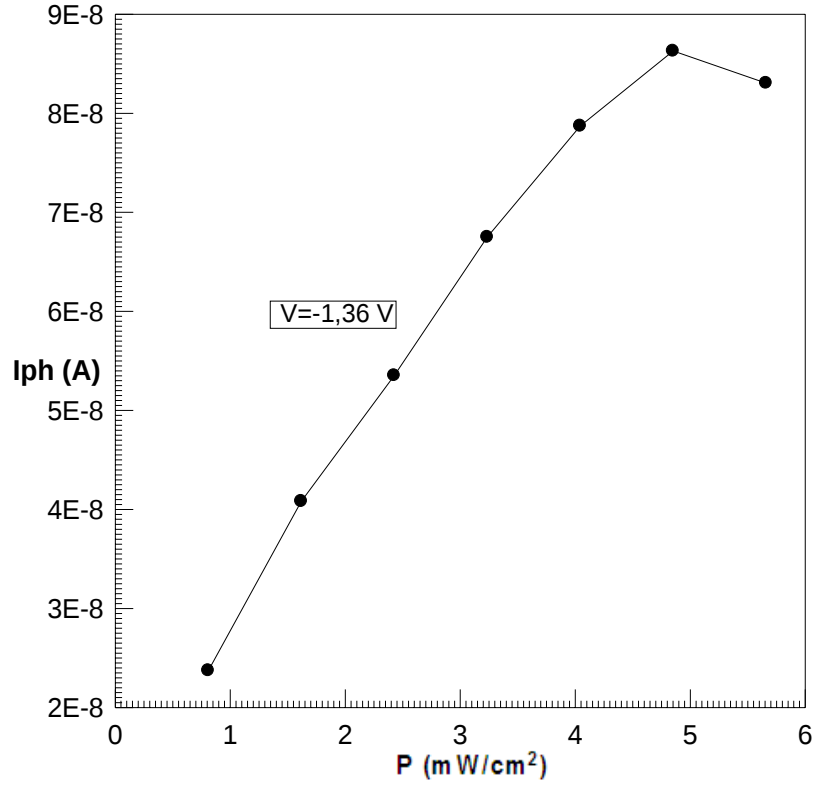
Şekil 3.29 Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



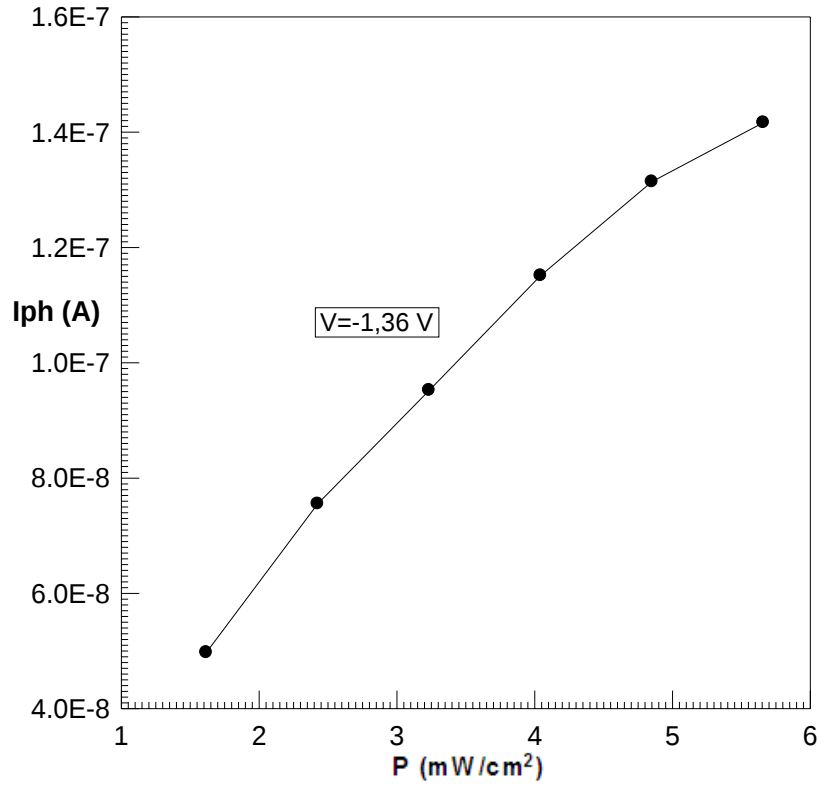
Şekil 3.30 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



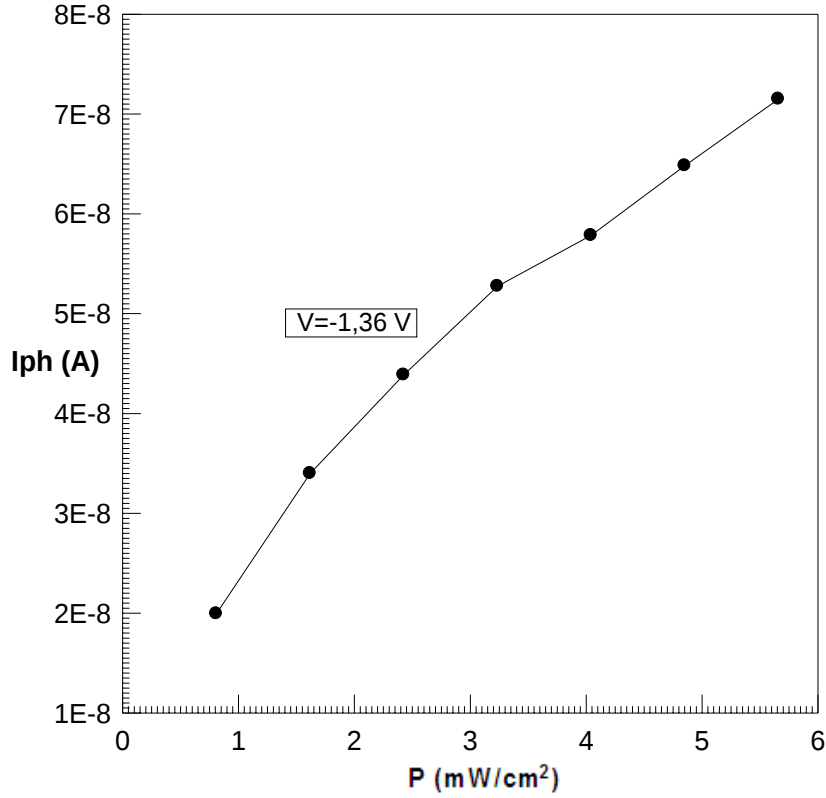
Şekil 3.31 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



Şekil 3.32 Hazırlanan ITO/MEH-PPV:PCBM/Al (3) fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



Şekil 3.33 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV:PCBM/Al (1) fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.



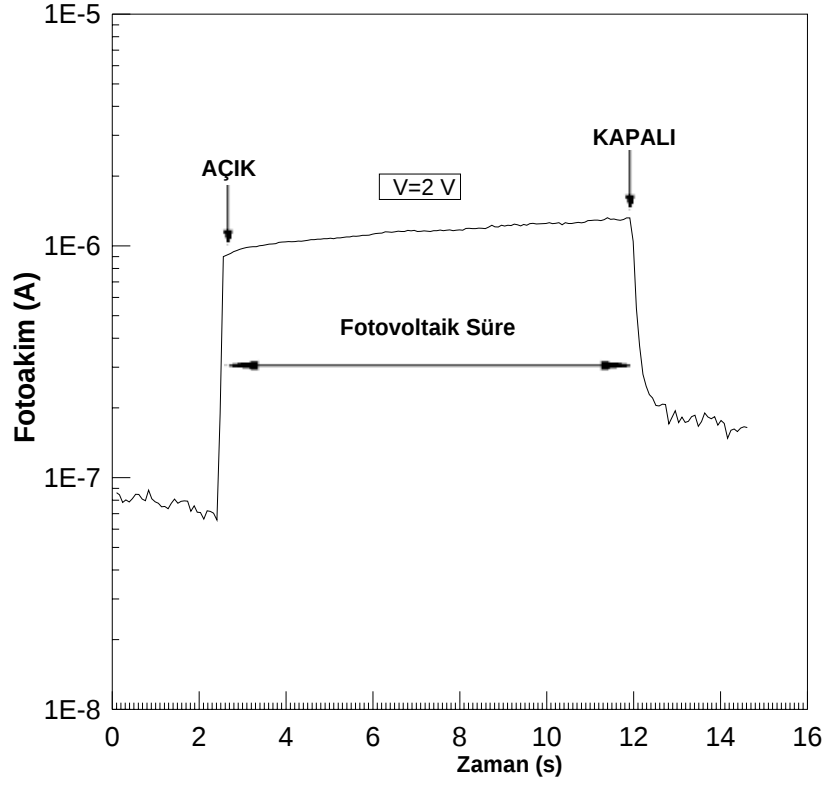
Şekil 3.34 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun ışık şiddetine karşı fotoakım değişimi.

Hazırlanan fotodiyotların, ışığın açık ve kapalı olması durumundaki akım-zaman (I-t) grafikleri Şekil 3.35-3.43’de verildiği gibidir. Bu ölçümler 5.66 mW/cm² altında alındı. Diyotlar için hesaplanan I_{ph} değerleri, Tablo 3.13’de verildi. Diyotların fotoduyarlılık parametreleri (R), I_{ph} değerleri kullanılarak hesaplandı ve Tablo 3.13’de verildi.

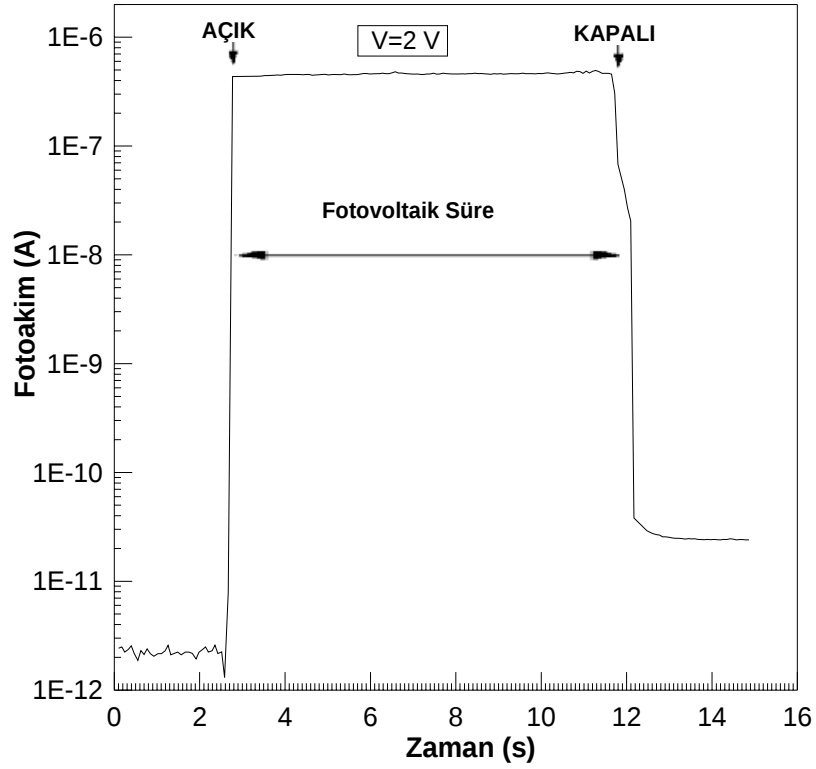
Fotodiyotlar için fotoiletkenlik hassasiyeti ise,

$$S_f = \frac{I_{ph} \ell}{PAV} \quad (3.3)$$

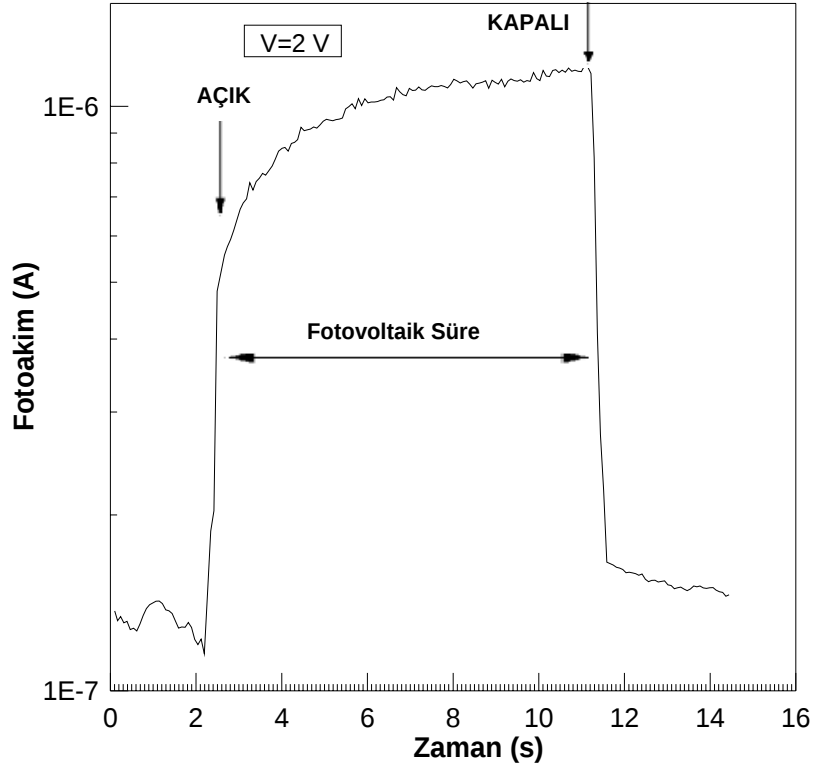
ifadesiyle verilir. İfadede ℓ , filmin kalınlığı P, diyota gelen ışığın şiddeti, A fotodiyotların aktif alanı, V ise diyota uygulanan voltajdır. Tüm diyotlar için hesaplanan fotoiletkenlik hassasiyet değerleri (S_f), Tablo 3.13’de verildi.



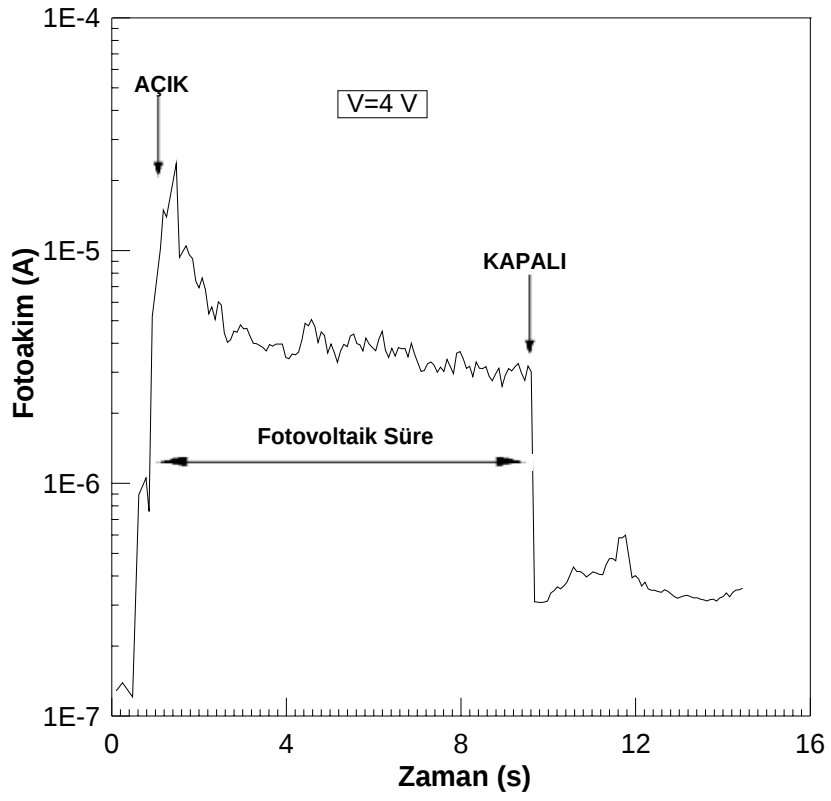
Şekil 3.35 Hazırlanan Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



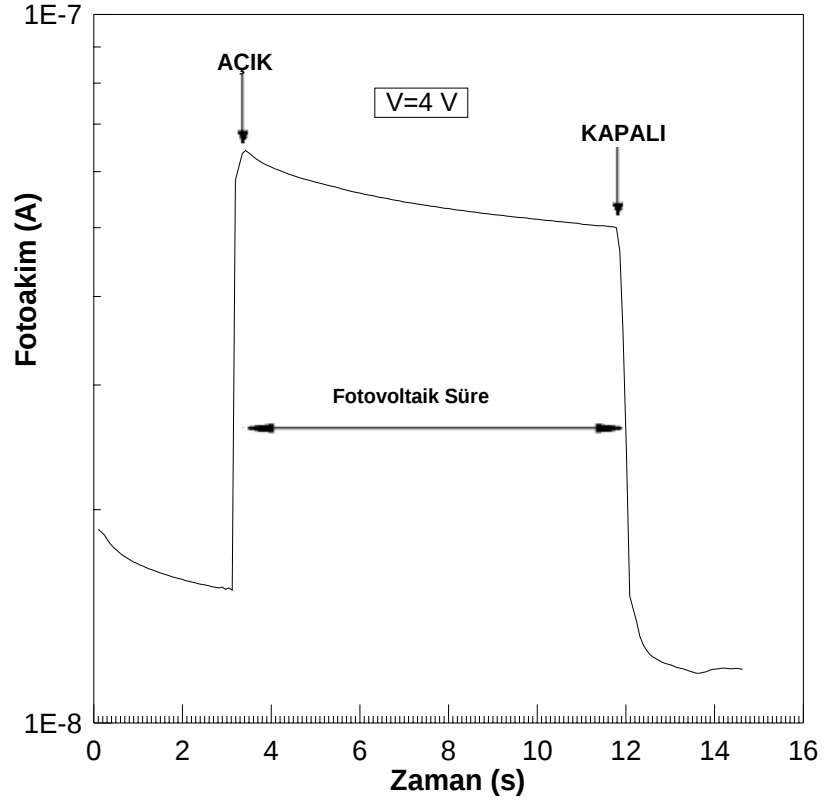
Şekil 3.36 Hazırlanan Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



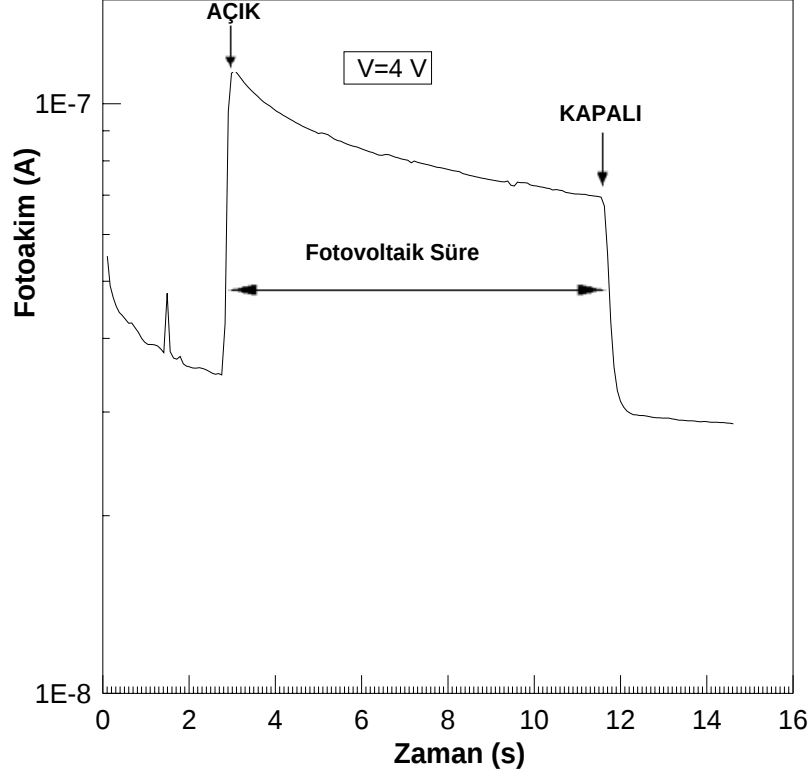
Şekil 3.37 Hazırlanan Al/p-Si/PANI/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



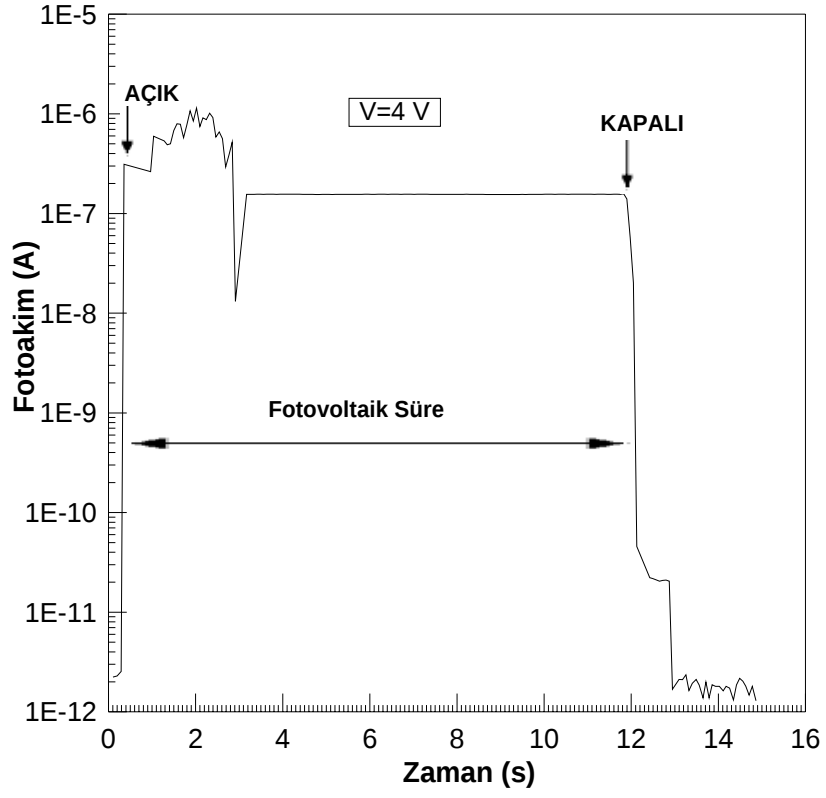
Şekil 3.38 Hazırlanan ITO/MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



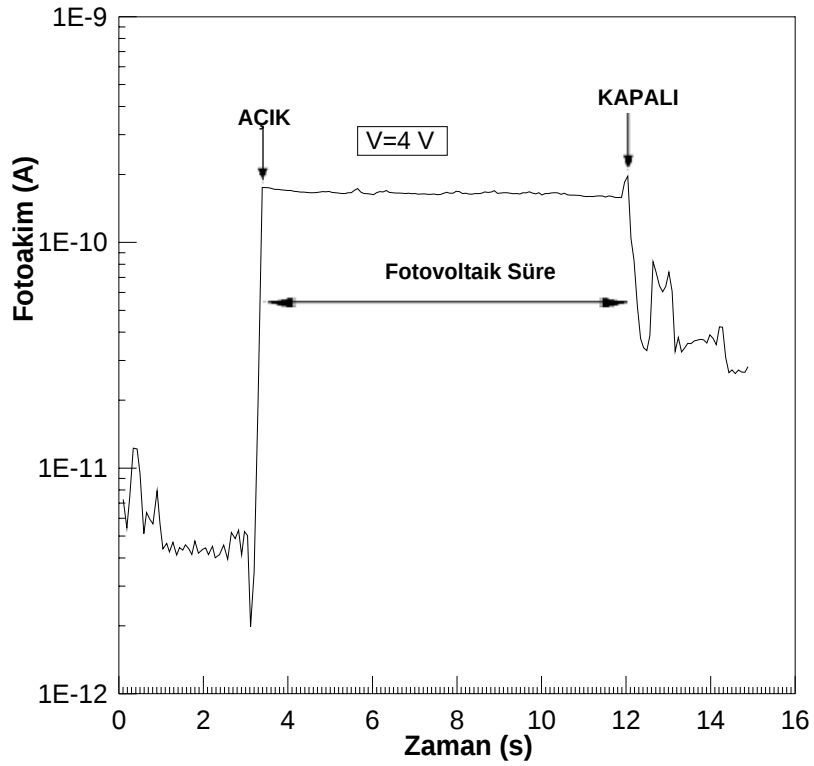
Şekil 3.39 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



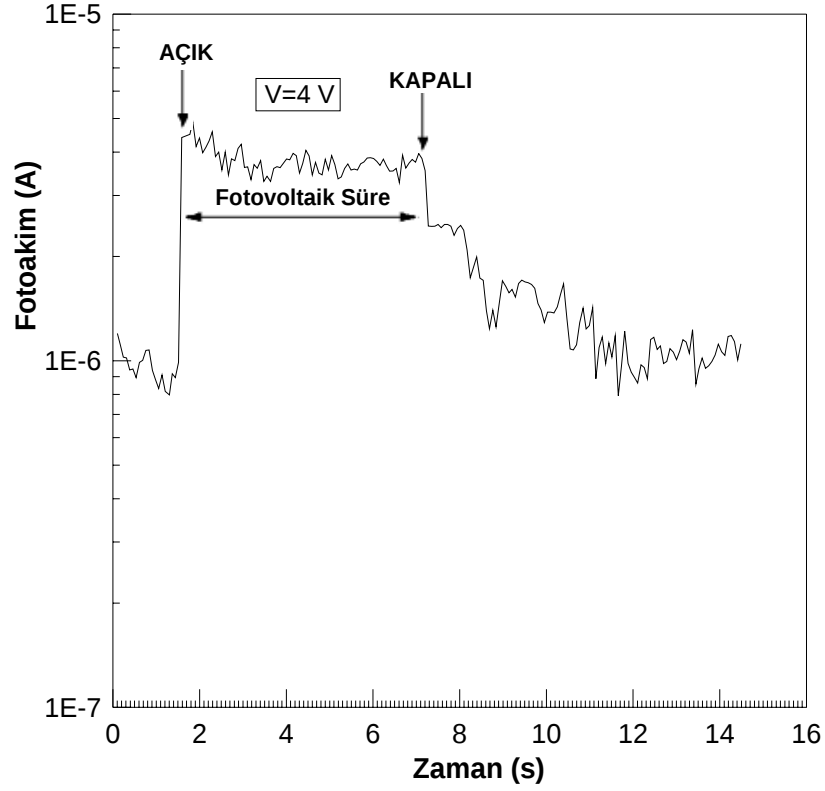
Şekil 3.40 Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



Şekil 3.41 Hazırlanan ITO/MEH-PPV:PCBM/Al (3) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



Şekil 3.42 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV:PCBM/Al (1) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.



Şekil 3.43 Hazırlanan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyotunun fotoakım-zaman eğrisi.

Tablo 3.13 Hazırlanan fotodiyotlar için elde edilen, m sabiti, fotoakım (I-t ölçümüyle), fotoduyarlılık ve fotoiletkenlik hassasiyet değerleri.

Fotodiyodun Adı	m	I_{ph} (A) (I-t) $\times 10^{-6}$	R (A/W) $\times 10^{-4}$	S_f (S.m/W) $\times 10^{-10}$
Al/n-Si/C ₆₀ -MEH-PPV/Al	0,445	1,235	4,849	2,42
Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al	0,532	0,475	1,554	0,777
Al/p-Si/PANI/Al	0,435	1,06	12,486	6,24
ITO/MEH-PPV/Al		23,87	25,561	383,4
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	0,539	0,0485	0,7935	0,3968
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,418	0,0805	6,436	0,1609
ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3)	0,681	0,149	16,989	0,6375
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1)	0,840	0,0001726	0,000292	0,001459
ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2)	0,644	3,52	4,349	16,305

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotların akım-voltaj (I-V) ve fotoiletkenlik (I-t) ölçümlerinden yararlanılarak idealite faktörü, doyma akımı, açık-devre voltajı, kısa-devre akımı, maksimum güç noktasındaki voltaj ve akım değerleri, doldurma faktörü, seri direnç ve şönt direnci olarak adlandırılan elektronik parametreler hesaplandı.

Genellikle akım-voltaj (I-V) eğrileri voltaja bağlı olarak literatürde üç farklı bölgeye sahip olduğu bilinmektedir. Bu bölgeler, düşük besleme bölgesi ($V < 0,1$ V), orta besleme bölgesi ($\approx 0,1-0,6$ V) ve yüksek besleme ($V > 0,6$ V) bölgeleridir [33-35]. Hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotların karanlık I-V eğrilerinin üç farklı bölgeye sahip olduğu görüldü. Orta gerilim bölgesi ($0,1 < V < 0,6$) ise lineer bir bölge olup, bazı diyot parametreleri (eğim, idealite faktörü, doyma akımı), bu bölgeden yararlanılarak hesaplandı. Yüksek gerilim bölgesinde, yani $V \geq 0,5$ Volt bölgesinde, karanlık I-V eğrilerinde (Şekil 3.8-3.16) de görüleceği gibi doğrusallıktan sapmalar görülmektedir. Bu sapmalar özellikle seri dirençten kaynaklanmaktadır [3, 69]. Şekil 3.8-3.16'da görüldüğü gibi, hazırlanan fotodiyotlar, doğrultma özelliğine sahiptirler. Işık şiddetinin artırılmasıyla, diyotun doğru besleme bölgesindeki akım, fazla değişmemesine rağmen, ters besleme bölgesinde akım artmaktadır. Bu davranış, diyotların fotovoltaiik etkiye sahip olduğunu gösterir. Silisyum altlığı üzerine hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotların seri direnç ve şönt direnci, ITO camı üzerine hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotlarınkinden daha düşük çıkmaktadır.

Hesaplanan idealite faktörü değerleri 1'den büyüktür ve bu da ideal durumdan ($n=1$) sapma olduğunu gösterir. Bu durum ara yüzey durum yoğunluğuna, tükenim bölgesinde yüksek ihtimalli elektron ve boşluk rekombinasyonuna, tünelleme akımının varlığına ve ara yüzey tabakasına atfedilmektedir [32, 35]. Böyle bir ara yüzey tabakası yüzey hazırlama ve metal buharlaştırma sırasında oluşabilir [3]. Daha ideal olan diyotların n idealite faktörü düşük olur, yani 1'e daha yakın olur ve bu durum, uygulanan gerilimin nerdeyse tamamının Schottky bölgesine düştüğü anlamına gelmekte ve bu durum termiyonik emisyon teorisine uymaktadır [3]. Hazırlanan fotodiyotlar için idealite faktörü değerleri 1'den büyüktür. İdealite faktörünün 1 ile 2 arasında olması, difüzyon ve rekombinasyon (yeniden birleşme) akımının baskın olduğunu göstermektedir. Hazırlanan diyotların karanlık akım-voltaj eğrilerindeki doğrusallıktan sapmalar, organik tabakanın varlığından ve seri dirençten kaynaklanmaktadır [20]. Al/p-Si/PCBM-MEH-PPV/Al ve Al/p-Si/PANI/Al fotodiyotları için, idealite faktörü 1 ile 2 arasında olduğu için, difüzyon/rekombinasyon akımı baskın iken diğer fotodiyotlarda $n > 2$ olduğundan rekombinasyon mekanizmasının baskın olduğunu gösterir. Şekil 3.10'da Al/p-Si/PANI/Al

diyotunun ters besleme eğrilerinde artan ışık şiddetiyle bazı düzensizlikler görülmektedir. Bu düzensizlikler, organik yarıiletken malzemelerin termal ve foto kararsızlığından kaynaklanmaktadır.

ITO/MEH-PPV/Al organik fotodiyotunun akım-voltaj karakteristiği (Şekil 3.20), diğer diyotların akım-voltaj karakteristiklerinden farklıdır. Yani diğer diyotlarda, fotodiyotun ışığa akım-voltaj karakteristiğinin 2. bölgesinde cevabı yok iken, ITO/MEH-PPV/Al organik fotodiyotunun ışığa 2. bölgede duyarlılığı vardır. Bundan dolayı açık-devre voltaj değerleri negatif, kısa-devre akım değerleri pozitif çıkmaktadır. Bunun sebebi, ITO/MEH-PPV/Al diyotunun iç elektrik yönünün farklı olmasıdır [3].

ITO/MEH-PPV:PCBM/Al (1) (2) (3) organik yarıiletken fotodiyotlarında Fullerenenin bir bileşeni olan PCBM malzemesi kullanıldı. PCBM'nin kullanılmasıyla fotoakım değerleri artmaktadır. Bu da literatür sonuçları ile uyumaktadır [15]. Ayrıca Al/n-Si/C₆₀-MEH-PPV/Al fotodiyotunun fotovoltaj özellikleri C₆₀ fullerinin kullanılmasıyla artmaktadır.

Farklı çözücü ve temizleme işlemleri ile hazırlanan ITO/MEH-PPV:PCBM/Al (1) (2) (3) organik yarıiletken fotodiyotlarda, fotovoltaj etkilerde filmin kalınlığının önemli olduğu görülmektedir. Benzer bir durum, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM (1), (2), organik yarıiletken fotodiyotları için de geçerlidir.

ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) organik yarıiletken fotodiyodu için bulunan açık-devre voltajı ve kısa-devre akımı değerleri de literatürde benzer mevcut çalışmalarla uyum içindedir [14]. Elde edilen sonuçlara göre, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1)'in kısa-devre akımları, ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2), (3) diyotların kısa-devre akım değerlerinden daha büyük olduğu görüldü ve en küçük değerleri ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodu için bulundu. Bu durum organik film kalınlıklarından, çözücülerin ve temizleme işlemlerinin farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. ITO/MEH-PPV:PCBM/Al (1) (2) (3) fotodiyotlarında, organik film kalınlığı arttıkça kısa-devre akımlarının da arttığı görülmektedir.

PEDOT-PSS sentetik bir metaldir ve boşluk enjeksiyon malzemesi olarak bilinir [18]. PEDOT fotodiyotlarda anot metali olarak malzemenin iletkenliğini artırmak için kullanılır [70]. ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (1), (2) ve (3) diyotların ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1), (2) diyotlarıyla kıyaslandığında, PEDOT'lu diyotların doyma akımlarında ve fotoakım değerlerinde bir artış görülür. Dolayısıyla PEDOT'un kullanılması fotodiyotların elektronik parametrelerini geliştirmiştir ve bu sonuç yapılan benzer çalışmalarla uyum içerisindedir [70].

Fotodiyotlarda fotoakım, 1) organik yarıiletken/metal ara yüzeyine gelen fotonların ayrışmasıyla, 2) aktif tabaka içindeki serbest yük taşıyıcıların taşınması ve 3) serbest yük taşıyıcıların elektroda transferinden oluşur. Düşük fotoakım değerleri, gelen düşük ışık şiddetlerinden kaynaklanır.

Doldurma faktörleri FF, ışık şiddetinin artırılmasıyla ve anotların iletkenliklerinin artırılmasıyla artar ki bu da anodun iletkenliği, malzemedeki yük iletimini sınırlar.

Hazırladığımız ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodu, literatürde mevcut olan ve farklı bir şekilde temizlenen ITO camı ile farklı çözücü kullanılarak yapılan ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al fotodiyodu ile benzer karakteristikler sergilemektedir [21].

ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) fotodiyodunu hazırlamadan önce ITO camı üzerine yıkama işlemleri sırasında KOH kaplanmıştı. Elde edilen sonuçlara göre ITO camının temizleme işlemi esnasında KOH tabakası ile kaplanması fotoakım değerini azaltmaktadır. Benzer bir durum literatürde, ITO üzerine kaplanan LiF tabakası ile sağlanmıştır [22]. ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (1) ve ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) diyotlarının sonuçlarına göre, hem temizleme işlemi hem de MEH-PPV: PCBM (1:4) karışımının çözücüsü, diyodun fotovoltaj özelliklerini değiştirmektedir. Dolayısıyla fotodiyotların hazırlanmasında aydınlanma şiddeti, film kalınlığı ile birlikte karışımın çözücüsü ve ITO camının temizleme işlemlerinde önemlidir.

Bu çalışmada kullanılan çözücülerin fotodiyotların elektronik özellikleri üzerinde etkin olduğu görüldü. Üretim şartlarının optimizasyonu ve malzeme yapısının değişimi, daha iyi nitelikli malzemelerin elde edilmesi için yapılabilir. Daha ince aktif tabaka ile malzemede foto cevabın daha iyi olduğu ve aktif film kalınlığı artırıldığı zaman, ters akımının düştüğü görüldü. Dolayısıyla hazırlanan organik yarıiletken fotodiyotlarında, polimer yapıda olan fotodiyotların iyi elektrik ve optik karakteristiklere sahip oldukları görüldü. Saf MEH-PPV'nin organik fotodiyotlarda aktif malzeme olarak kullanılabileceği görüldü. Ayrıca aktif tabaka olarak PCBM ile MEH-PPV karışımları kullanılarak hazırlanan fotodiyotlar, aktif tabaka olarak sadece MEH-PPV olan malzemeye göre daha gelişmiş fotovoltaj etki göstermektedirler. Hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al organik yarıiletken fotodiyotlar içerisinde, fotoduyarlılığı ve fotoiletkenlik hassasiyeti en yüksek olan fotodiyodun, 2. temizleme şekli ile temizlenen ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) fotodiyotunun olduğu görüldü. Benzer bir şekilde hazırlanan, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al organik yarıiletken fotodiyotlardan yine 2. temizleme şekli ile temizlenen, ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2) diyotunun fotoduyarlılığı ve fotoiletkenlik hassasiyeti daha büyük olduğu görüldü. Hem ITO/MEH-PPV: PCBM/Al organik yarıiletken fotodiyotlarında hem de ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al organik yarıiletken fotodiyotlarında, fotoakımın en yüksek değerleri 2. temizleme işlemi ile hazırlanan ITO/MEH-PPV: PCBM/Al (3) ve ITO/PEDOT-PSS/MEH-PPV: PCBM/Al (2)'de elde edildi. Elde edilen sonuçlara göre, 2. temizleme şeklinin 1. temizleme şekline göre daha ideal olduğu bulundu. Hazırlanan diyotlar, ışığın açılmasıyla, ışığa hemen duyarlı olup, akım birden bire yüksek bir

değere çıkmaktadır ve bu durum ışığın kapanmasına kadar devam etmektedir. Işığın açılmasıyla artan akım, ışığın kapanmasıyla tekrar azalmaktadır. Fotoiletkenlik sonuçlarına göre, silisyum altlığı üzerine yapılan organik yarıiletken fotodiyotların, ITO camı üzerine yapılan organik yarıiletken fotodiyotlara göre daha kararlı bir fotoiletkenlik sergiledikleri görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., 1988, Metal–Semiconductor Contacts, Clarendon, Oxford.
- [2] Aydin, M.E., Yakuphanoglu, F., Eom, J.H. and Hwang, D.H., 2007, Electrical characterization of Al/MEH-PPV/P-Si Schottky diode by current-voltage and capacitance-voltage methods, *Physica B*, 387, 239-244.
- [3] Sze, S.M., 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., Wiley, New York.
- [4] Rhoderick, E.H., 1978, *Metal–Semiconductor Contacts*, Oxford University Press, Oxford.
- [5] Okutan, M., Basaran, E. and Yakuphanoglu, F., 2005, Electronic and interface state density distribution properties of Ag/p-Si Schottky diode, *Applied Surface Science*, 252, 1966-1973.
- [6] Bolotnikov, A.E., Boggs, S.E., Hubert Chen, C.M., Cook Walter, R., Harrison, F.A. and Schindler, S.M., 2002, Properties of Pt Schottky type contacts on high-resistivity CdZnTe detectors, *Nucl. Instrum. Methods, A* 482 395-407.
- [7] Ayyildiz, E., Cetin, H. and Horvath, Z. J., 2005, Temperature dependent electrical characteristics of Sn/p-Si Schottky diodes, *Applied Surface Science*, 252, 4, 1153-1158.
- [8] Kanbur, H., Altındal, Ş. and Tataroğlu, A., 2005, The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes, *Applied Surface Science*, 252, 5, 1732-1738.
- [9] Çakar, M., Onganer, Y. and Türüt, A., 2002, The nonpolymeric organic compound (pyronine-B)/p-type silicon/Sn contact barrier devices, *Synth. Met.* 126, 213-218.
- [10] Türüt, A. and Köleli, F., 1992, Metallic polythiophene/inorganic semiconductor Schottky diodes, *Physica B, Condensed Matter*, 192 (3) 279-283.
- [11] Inganas, O., Roman, L. S., Zhang, F., Johansson, D.M., Andersson, M.R. and Hummelen, J.C., 2001, Recent progress in thin film organic photodiodes, *Synthetic Metals*, 121, 1525-1528.
- [12] Gupta, R.K., Singh, R.A., 2004, Thermochemical and microstructural studies on binary organic eutectics and complexes, *Journal of Crystal Growth*, 267, 340-347.
- [13] Donati, S., 1999, *Photodetectors: devices, circuits and applications*, Prentice Hall.
- [14] Uzun, A., 2002, *Mikroişlemciler Arası Optik Yolla Haberleşme*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

- [15] Nyberg, T., 2004, An alternative method to build organic photodiodes, *Synthetic Metals*, 140, 281-286.
- [16] Bhattacharya, P., 1997, *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [17] Sahingoz, R., Soykan, C., Yakuphanoglu, F., Voigt, M. and Çetin, H., 2006, The determination of the conduction mechanism and extraction of diode parameters of ITO/PEDOT-PSS/POLYMER/Al heterojunction diode, 28, 962-965.
- [18] Stallinga, P., Gomes, H.L., Murgia, M. and Müllen, K., 2002, Interface state mapping in a Schottky barrier of the organic semiconductor terrylene, *Org. Electron.*, 3, 43-51.
- [19] Yakuphanoglu, F., 2007, Electrical Characterization and Interface State Density Properties of the ITO/C₇₀/Au Schottky Diode, *J. Phys. Chem. C*, 111, 1505-1507.
- [20] Zhang, F.L., Johansson, M., Andersson, M.R., Hummelen, J.C. and Inganas, O., 2003, Polymer solar cells based on MEH-PPV and PCBM, *Synthetic metals*, 137, 1401-1402.
- [21] Deng, X. Y., Zheng, L. P., Yu, G. and Cao, Y., 2003, Polymer heterojunction photodiodes with MEHPPV doped with organic acceptors, *Synthetic Metals*, 135-136, 823-824.
- [22] Frederik, C.K., Jon, E.C., Nicolaj, C.B., Andersen, M., Mathilde, R.L., Mark, A.H. and Soren, H., 2005, Lifetimes of organic photovoltaics: photochemistry, atmosphere effects and barrier layers in ITO-MEHPPV:PCBM-aluminium devices, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 86, 499-516.
- [23] Wen, F. S., Li, W. L., Liu, Z., Wei, H. Z., 2006, Effect of electrode modification on organic photovoltaic devices, *Materials Chemistry and Physics*, 95, 94-98.
- [24] Crowel, C.R. and Sze, S.M., 1966, Current Transport In Metal-Semiconductor Barriers, *Solid State Electronics*, 9, 1035-1048.
- [25] Van der Ziel, A., 1968, *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall, 2nd. Ed.
- [26] Gümüş, A., 1997, CrNiCo/MBE n-GaAs Schottky Diyotlarında Termal Tavlamanın ve Numune Sıcaklığının Elektriksel Karakteristiklere Etkileri, Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri.
- [27] Sedef, A. G., 2002, Polipirol-Poliamid/Metal Eklemlerinin Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat.
- [28] Cafer, T., 2000, Katıhal Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- [29] Card, H. C., Rhoderick, E., 1971, Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes, *J. Phys.*, 1589-1601.

- [30] Aboelfotoh, M.O. and Tu, K.N., 1986, Schottky-Barrier Heights of Ti and $TiSi_2$ on n-type Si (100), Physical Review B, 34 (4), 2311-2318.
- [31] Haungh, T.S., Peng, J.G. and Lin, C.C., 1992, High temperature stable $MoAl_{2.7}nGaAs$ Schottky Diodes with Enhanced Barrier Height, J. Appl. Phys., 61, 3017-3020.
- [32] Singh, A., 1985, Characterization of interface states at Ni/n CdF_2 Schottky barrier type diodes and the effect of CdF_2 surface preparation. Solid-State Electronics, 28, 223-232.
- [33] Divigalpitiya, W.M.R., 1989, Temperature dependence of the photovoltaic characteristics of silicon MIS solar cells, Solar Energy Mater., 5, 253-262.
- [34] Kaminski, A., Marchand, J.J. and Laugier, A., 1998, Non ideal dark I-V curves behavior of silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 51, 221-231.
- [35] Cova, P. and Singh, A., 1990, Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n- CdF_2 Schottky barrier type diodes, Solid-State Elec., 33, 11-19.
- [36] Szatkowski, J. and Sieranski, K., 1988, Interface effects on Mg- Zn_3P_2 Schottky diodes, Solide State Electron., 31, 257-260.
- [37] Akkal, B., Benamara, Z., Boudissa, A., Bouiadjra, N.B., Armani, M., Bideux, L. and Gruzza, B., 1998, Modelization and characterization of Au/InSb/InP Schottky systems as a function of temperature, Materials Science and Engineering, B55, 162-168.
- [38] Türkmen, C., 2002, $A^{III} B^{IV}$ Kristallerinde Fotoiletkenlik ve GaS, GaSe, GaTe ve $GaSe_{1-x} Te_x$ Kristallerle Metal-Yarıiletken-Metal Eklemler, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- [39] Bıyıklı, N., 1998, Design, Fabrication and Characterization of High Performance Resonant Cavity Enhanced Photodetectors, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- [40] Bhattacharya, P., 1994, Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice Hall, New Jersey.
- [41] Bıyıklı, N., 2004, High-Performance $Al_x Ga_{1-x} N$ -Based UV Photodetectors for Visible/Solar-Blind Applications, Doktora Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- [42] Johnson, Mark., 2003, Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professiona Publishing, p. 14, 15.
- [43] Sze, S.M. and Gibbons, G., 1966, Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs and GaP, Appl. Phys. Lett. 8, 111.
- [44] Pankove, J. I., 1971, Optical Processes in Semiconductors, Prentice-Hall (Englewood Cliffs).

- [45] Roberts, R., Fox, J.J., and Martin, A.M., 1932, Photo-Conductivity of diamonds, *Nature* 129, 579.
- [46] Moss, T.S., Pincherle, L. and Wood Ward, A.M., 1953, Photoelectromagnetic and Photodiffusion effects in germanium, *Proc. Phys. Soc. (Lond.)*, 66B, 743-52.
- [47] Moss, T.S., 1959, *Optical Properties of Semiconductors*, Academic Press, New York.
- [48] Tauc, J., 1959, Generation of an e.m.f. in semiconductors with-equilibrium Current Carrier Concentrations, *Rev. Mod. Phys.*, 29, 308-24.
- [49] Kallmann, H., Kramer, B., Shain, J. and Spruch, G.M., 1960, Photovoltaic effects in CdS crystals, *Phys. Rec.*, 117, 1482-1486.
- [50] Kallmann, H. and Pope, M., 1959, Photovoltaic effect in organic crystals, *J. Chem. Phys.*, 30, 585-6.
- [51] Geacintov, N.E., Pope, M. and Kallmann, H., 1966, Photogeneration of charge carriers in tetracene, *J. Chem. Phys.*, 45, 2639-49.
- [52] Lyons, L.E. and Newman, O. M. G., 1971, Photovoltages in tetracene films, *Just, J. Chem.*, 24, 13-23.
- [53] Plotnikov, Y.I. and Matalygina, ZH. I., 1961, Photoelectromotive force in anthracene, *Soviet Phys. Solid State*, 2, 2244-51.
- [54] Verstimakha, YA. I., Kurik, M.V., Lopatrin, Yu, M. and Tsikora, L.N., 1973, Photoconductivity of pentanene crystals, *Soviet Phys., Solid State*, 15, 666.
- [55] Vladimirov, V.V., Kurik, M.V. and Pirvatinskii, Yu P., 1969, Sign Inversion of the photo-e.m.f in anthracene, *Solid Phys.*, 13, 789-90.
- [56] Nakada, I. and Kojima, T., 1964, On the surface Photovoltaic effect in anthracene, *J. Phys. Soc. Japan*, 19, 695-701.
- [57] Meier, H., 1968, *Spectral Sensitization* Focal Press, London and New York.
- [58] Meier, H., 1974, *Organic Semiconductors-Dark and photoconduvtivity of organic Solids*, Verlag-Chemie, Germany.
- [59] Hovel, H. J., 1975, *Solar Cells, Semiconductors and Semimetals*, Vol. 11 (Eds., R.K. Willardson ve A.C. Beer), Academic Press, New York.
- [60] Durak, M., 2002, Silikon Fotodiyotların Optik Karakterizasyonu, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [61] Dökme, İ., 2002, Al/p-Si ve Au/n-Si Schottky Diyotlarda I-V ve C-V Karakteristiklerinin Geniş Bir Sıcaklık Aralığında Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [62] Ng. K.K., 1995, *Complete Guide to Semiconductor Devices*, McGraw-Hill New Jersey.

- [63] Ltaief, A., Davenas, J., Bouazizi, A., Chaabane, R. Ben, Alcouffe, P. and Ouada, H. Ben, 2005, Film morphology effects on the electrical and optical properties of bulk heterojunction organic solar cells based on MEH-PPV/C₆₀ composite, *Materials Science and Engineering, C* 25, 67-75.
- [64] Yakuphanoglu, F., Şenkal, F., 2007, Electronic and thermoelectric Properties of Polyaniline Organic Semiconductor and Electrical Characterization of Al/PANI MIS Diode, *J. Phys. Chem., C* 111, 1840-1846.
- [65] Yakuphanoglu, F., 2007, Electronic and photovoltaic properties of Al/p-Si/copper/phthalocyanine photodiode junction barrier, *Solar energy Materials&Solar Cells*, 91, 1182-1186.
- [66] Sharma, G.D, Sharma, S. K., Roy, M.S., 2004, Photovoltaics properties of Schottky device based on dye sensitized poly (3-phenyl azo methine thiophene) thin film, *thin Solid Films*, 468, 208-215.
- [67] Arias, A.C., Granström, M., Petritsch, K. and Friend, R.H., 1999, Organic Photodiodes using Polymeric Anodes, *Synthetic Metals*, 102, 953-954.
- [68] Ghosh, A.K., Mobel, D.L., Feng, T., Shaw, R.F. and Rowf, C.A., 1974, Photovoltaic and rectification properties of Al/Mg phthalocyanine/Ag Schottky barrier cells, *J. Appl. Phys.* 45, 230-236.
- [69] Norde, H. A., 1979, Modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *J. Appl. Phys*, 50, 5052-5054.
- [70] Admassie, S., Zhang, F., Manoj, A.G., Svensson, M., Andersson, M.R. and Inganas, O., 2006, A polymer photodiode using vapour-phase polymerized PEDOT as an anode, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 90, 133-141.

ÖZGEÇMİŞ

Bayram GÜNDÜZ

Fırat Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü
23169, ELAZIĞ

Tel: (424) 2370000 / 3569
Faks: (424) 2330062
e-posta:
bgunduz83@hotmail.com

Kişisel Bilgiler:

Doğum Tarihi : 13.08.1983
Doğum Yeri : Baskil
Uyruğu : T.C.
Medeni Hali : Bekar

Eğitim:

İlköğretim:

1989–1994 Kızıluşağı Köyü İlköğretim Okulu

Ortaöğretim:

1994–1997 Elazığ İmam Hatip Lisesi

Lise:

1997–2000 Elazığ İmam Hatip Lisesi

Lisans:

2001–2005 Fırat Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ

Yüksek Lisans:

2005–2007 Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ

Konu: Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması

Danışman: Doç. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU