



T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT FOTODİYOT
ÜRETİLMESİ VE FOTOVOLTAİK KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖKHAN ÖZEL

OCAK

GÖKHAN ÖZEL

**YENİLENEBİLİR ENERJİ VE
UYGULAMALARI ANA BİLİM DALI**

OCAK 2025

**GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT FOTODİYOT ÜRETİLMESİ
VE FOTOVOLTAİK KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Gökhan ÖZEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI ANA BİLİM DALI**

Danışman

Prof. Dr. Selçuk DEMİREZEN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Gökhan ÖZEL tarafından hazırlanan “Güneş Takip Sistemleri İçin Hibrit Fotodiyot Üretilmesi ve Fotovoltaik Karakteristiklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Selçuk DEMİREZEN

Sabuncuoğlu Şerefeddin SHMYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Amasya Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Hayriye Gökçen ÇETİNKAYA

Sağlık Hizmetleri MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Emine ALDIRMAZ

Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Amasya Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 20/01/2024

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

.....

Doç.Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tez sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.


Gökhan OZEL
20.01.2025

GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ İÇİN HİBRİT FOTODİYOT ÜRETİLMESİ VE FOTOVOLTAİK KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gökhan ÖZEL

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Günümüzde enerji ihtiyacı çoğunlukla fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıt kullanımı ile ortaya çıkan doğaya zararlı emisyonlar, insan sağlığını ve çevre yaşamını tehdit etmeye devam etmektedir. Bu yüzden enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının hızla hayata geçirilmesi gerekmektedir. Güneş enerjisi temiz ve sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bir fotovoltaik (PV) panel kullanarak, güneş enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür. Bir fotovoltaik panelinden elektrik üretim hızı, güneş ışınması, güneş pili malzemeleri, güneş pili yüzey sıcaklığı vb. gibi bazı faktörlere bağlıdır. Güneş paneli daha fazla güneş ışığı aldığı anda, daha fazla güç üretir. Sabit durumdaki bir güneş paneli, güneş ışığı saatinde maksimum güneş ışığını yakalayamaz çünkü güneşin gökyüzündeki konumu gün boyu değişir. Bu sebepten maksimum güneş ışığını yakalayıp panellerin verimliliğini arttırmak amacıyla güneş takip sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, güneşin hareketini izleyerek panellerin sürekli olarak güneşe dönük kalmasını sağlar, böylece enerji üretimi maksimize edilir. Fotodiyotlar, güneş takip sistemlerinde güneşin konumunu tespit etmek için kullanılır. Bu yarı iletken cihazlar, üzerine düşen güneş ışığını elektrik sinyaline dönüştürür ve bu sinyal, güneşin gökyüzündeki konumuna göre değişir. Güneş takip sisteminde, fotodiyotlardan gelen bu sinyaller, kontrol ünitesine iletilir ve sistemin panelleri güneşe doğru hareket ettirmesi sağlanır. Bu sayede paneller, gün boyunca güneş ışığını en verimli şekilde alarak enerji üretimini maksimize eder. Bu çalışma, güneş takip sistemlerinde kullanılabilecek yeni bir hibrit fotodiyot üretmek ve bu fotodiyotun karakteristik özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, ağırlıkça % 5, % 10, % 20 bakır fitalosiyanın (CuPc) katkılı çinko oksit (ZnO) arayüzeyine sahip Al/p-Si Schottky bariyer diyotları (SBD'ler), spin kaplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Bu çalışma, geniş bir voltaj aralığı ($\pm 5V$) ve aydınlatma altında (10 ile 100 mW/cm²) CuPc'nin farklı katkı oranlarıyla yapılandırılan diyotlar arasındaki akım-voltaj ($I-V$) özelliklerinin karşılaştırmalı karakterizasyonunu içermektedir. Bu ölçümler çeşitli aydınlatma seviyeleri (10 ile 100 mW/cm² arasında) ve karanlık koşullarda, idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B), seri direnç (R_s), şönt direnç (R_{sh}), değişken yoğunluğu (N_{ss}) gibi çeşitli kritik elektriksel değişkenlerin hesaplanmasına ve bunların çeşitli koşullardaki tepkilerini görmemize olanak sağlamıştır. Diyotların yaklaşık 10⁴ mertebesinde iyi bir doğrultma oranına (RR) sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, yapıların doğrultucu özelliklerinin CuPc katkısı ile kontrol edilebileceğini göstermiştir. Elde edilen değerler bu SBD'lerin hassas fotodiyotlar/sensörler/dedektörler kullanım alanları bulabileceğini göstermektedir.

Sayfa Adedi : 70
Anahtar Kelimeler : Yenilenebilir Enerji, Güneş Takip Sistemi, Güneş Fotovoltaik Paneli, Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar, foto-tepki özellikleri
Danışman : Prof. Dr. Selçuk DEMİREZEN

PRODUCTION OF HYBRID PHOTODIODES FOR SOLAR TRACKING SYSTEMS
AND INVESTIGATION OF PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS
(M. Sc. Thesis)

Gökhan ÖZEL

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

Today, energy needs are mostly supplied from fossil fuels. Harmful emissions from the use of fossil fuels continue to threaten human health and the environment. Therefore, energy saving and the use of renewable energy sources need to be implemented rapidly. Solar energy is a clean and sustainable renewable energy source. Using a photovoltaic (PV) panel, solar energy is converted into electrical energy. The rate of electricity generation from a photovoltaic panel depends on some factors such as solar irradiance, solar cell materials, solar cell surface temperature, etc. When the solar panel receives more sunlight, it generates more power. A steady-state solar panel cannot capture the maximum sunlight at sunlight hour because the position of the sun in the sky changes throughout the day. For this reason, solar tracking systems have been developed to increase the efficiency of the panels by capturing maximum sunlight. These systems track the movement of the sun and ensure that the panels are constantly facing the sun, thus maximizing energy production. Photodiodes are used in solar tracking systems to detect the position of the sun. These semiconductor devices convert the sunlight falling on them into an electrical signal, which changes according to the sun's position in the sky. In the solar tracking system, these signals from the photodiodes are transmitted to the control unit and the system moves the panels towards the sun. In this way, the panels maximize energy production by receiving sunlight in the most efficient way throughout the day. This study was carried out to fabricate a new hybrid photodiode that can be used in solar tracking systems and to investigate the characteristics of this photodiode. For this purpose, Al/p-Si Schottky barrier diodes (SBDs) with zinc oxide (ZnO) interface doped with 5 wt%, 10 wt%, 20 wt% copper phthalocyanine (CuPc) were fabricated using spin coating technique. This work includes the comparative characterization of the current-voltage (I - V) characteristics between diodes configured with different doping ratios of CuPc over a wide voltage range (± 5 V) and under illumination (10 to 100 mW/cm²). These measurements allowed the calculation of several critical electrical variables such as ideality factor (n), barrier height (Φ_B), series resistance (R_s), shunt resistance (R_{sh}), variable density (N_{ss}) and their response under various conditions at various illumination levels (between 10 and 100 mW/cm²) and dark conditions. The diodes were found to have a good rectification ratio (RR) of about 10^4 . The obtained results show that the rectifying properties of the structures can be controlled by CuPc doping. The obtained values indicate that these SBDs can be used as sensitive photodiodes/sensors/detectors.

Number of pages : 70

Keywords : Renewable Energy, Solar Tracking System, Solar Photovoltaic Panel,
Al/CuPc:ZnO/p-Si photodiodes, photo-response characteristics

Supervisor : Prof. Dr Selçuk DEMİREZEN

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Araştırmamdaki, tez konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar tüm aşamalarda yanımda olan ve engin bilgilerini esirgmeden paylaşan, değerli tez danışmanım Prof. Dr. Selçuk DEMİREZEN' e ve yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen, sevgili eşim Pınar ÖZEL ve güzel kızlarım Asıla ile Ada ÖZEL' e teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1. Güneş Takip Sistemi.....	6
2.2. Yarı İletkenler.....	9
2.2.1. Yarı iletken malzemeler	10
2.3. Diyot	11
2.4. Schottky Diyot/Kontaklar	13
2.4.1. P-Tipi yarıiletken/metal kontaklar	14
2.4.2. n-Tipi yarıiletken/metal kontaklar	16
2.5. Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Voltaj Karakteristikleri	20
2.6. Fotodiyotlar.....	22
2.6.1. İnorganik fotodiyotlar	24
2.6.2. Organik fotodiyotlar	24
2.6.3. Hibrit fotodiyotlar	25
2.6.4. Metal-yarıiletken fotodiyotlar	28
2.6.5. Fotodiyotların akım-voltaj karakteristiği	33

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Deneysel İşlemler ve Yöntemler.....	35
3.2. Farklı CuPc Oranlarına Sahip Bir Cupc Katkılı Zno Malzemesinin, Sol-Jel Yöntemiyle İnce Flimlerinin Hazırlanması	35
3.3. Fotodiyotların Üretilmesi.....	36
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	38
4.1. Optoelektronik Özellikler	39
4.2. Geçici Fotoakım, Fotokapasitans/İletkenlik Özellikleri	49
4.3. Kapasitans/İletkenlik-Voltaj Özellikleri	52
4.4. Sonuçlar	58
5. ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı aydınlatma düzeyinde bir güneş fotovoltaiik panelinin $P-V$ eğrisi	7
Şekil 2.2. Farklı güneş ışınımlarında bir güneş fotovoltaiik hücresinin $I-V$ eğrisi	8
Şekil 2.3. Güneşin konumunu izlemek için farklı güneş açıları	9
Şekil 2.4. Diyot, P ve N tipi yarı-iletkenlerin birleşmesiyle oluşur.	11
Şekil 2.5. Diyotun karakteristiğini gösteren Akım-Gerilim grafiği	12
Şekil 2.6. Schottky diyot yapısı ve sembolü	13
Şekil 2.7. p-tipi yarı iletken/metal doğrultucu ve omikkontakt enerji bandı diyagramları (a) ve (c) ayrıldıklarında nötrdürler ve temastan sonra termal dengeye ulaşmışlardır, (b) $\phi_s > \phi_m$ durumunda p-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmalı temaslar ve (d) $\phi_m > \phi_s$ durumunda p-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmasız kontaklar	15
Şekil 2.8. P-tipi yarı iletken/metal doğrultucu kontağının elektron enerji bandı diyagramları: (a) düz besleme durumunda, (b) ters besleme durumunda	16
Şekil 2.9. n-tipi yarı iletken/metal doğrultucu ve omik kontağın enerji bandı diyagramları (a) ve (c) ayrıldıklarında nötrdürler ve temas sonrasında termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\phi_m > \phi_s$ olduğunda n-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmalı kontaklar ve (d) $\phi_s > \phi_m$ olduğunda n-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmasız kontaklar.....	17
Şekil 2.10. n-tipi yarı iletken/metal doğrultucu kontağının elektron enerji bandı diyagramları. (a) düz besleme, (b) ters besleme.	20
Şekil 2.11. Bir Schottky diyodunun akım-gerilim karakteristiği.....	22
Şekil 2.12. p-n bağlantılı fotodiyotunun çalışma prensibi ve sembolü.	24
Şekil 2.13. Aydınlatılan Schottky eklemının diyagramı	29
Şekil 2.14. a) Uyarılmış elektronların metalden yarı iletkene fotoelektrik emisyonu ($E_g > h\nu > q\Phi_b$) b) delik-elektron çiftinin banttan banda uyarılması $h\nu > E_g$ c) büyük ters voltaj uygulaması altında delik-elektron çifti üretimi ve çıkış oluşumu ($h\nu > E_g$ ve $V = V_B$)	30
Şekil 2.15. Fotodiyotun yapısı.	32

Şekil 2.16. Bir Schottky diyodunun akım-gerilim karakteristiği.....	34
Şekil 3.1. Al/CuPc:ZnO/p-Si/Al yapının şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.2. Hazırlanan hibrit fotodiyotlar için kullanılan ölçüm sistemi.....	37
Şekil 3.3. Elektrikli cihazların karakterizasyonu için hem üretim sürecinin hem de FYTRONIX sisteminin şematik diyagramı.....	37
Şekil 4.1. Hem karanlık hem de aydınlık koşullarda gerçekleştirilen ölçümlerle, Farklı konsantrasyon seviyeleri altında ağırlıkça (a) % 5 CuPc, (b) % 10 CuPc ve (c) % 20 CuPc içeren Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlarının akım-voltaj ($I-V$) özellikleri.....	39
Şekil 4.2. (a-g) grafiklerde Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar için aydınlatma ve voltaja bağlı parametreler.....	41
Şekil 4.3. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların farklı CuPc içeriklerine sahip fotodiyotlar (a)karanlıkta (b)100mW/cm ² aydınlatma yoğunluğu altında $I-V$ özellikleri	44
Şekil 4.4. Al/CuPc:ZnO/p-Si farklı CuPc içeriklerine sahip fotodiyotlar için (a) karanlıkta (b)100mW/cm ² aydınlatma yoğunluğu altında R_f-V özellikleri.....	47
Şekil 4.5. Al/CuPc:ZnO/p-Si farklı CuPc içeriklerine sahip fotodiyotlar için (a)karanlıkta (b)100mW/cm ² aydınlatma yoğunluğu altında $N_{ss}-(E_{ss}-E_V)$ için özellikleri	49
Şekil 4.6. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar -5V'da farklı CuPc içeriklerine sahip (a) S1= % 5, (b) S2= % 10 ve (c) S3= % 20, zamana bağlı ölçümlerinin aydınlatma yoğunlukları altında fotoakım-zaman eğrileri.....	50
Şekil 4.7. Al/ CuPc:ZnO /p-Si fotodiyotlar için farklı CuPc içeriklerine sahip (a) S1= % 5, (b) S2= % 10 ve (c) S3= % 20 zamana bağlı ölçümlerinin fotokapasitans -zaman eğrileri.....	51
Şekil 4.8. Al/ CuPc:ZnO /p-Si fotodiyotlar için farklı CuPc içeriklerine sahip (a) S1= % 5, (b) S2= % 10 ve (c) S3= % 20 zamana bağlı ölçümlerinin fotoiletkenlik-zaman eğrileri.....	52
Şekil 4.9. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların (a)10 kHz'de ve (b)1 MHz'deki $C-V$ grafikleri.....	53
Şekil 4.10. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların (a)10 kHz'de ve (b)1 MHz'deki $G-V$ grafikleri.....	54
Şekil 4.11. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotları için (a)10 kHz'de ve (b)1 MHz'de R_s grafikleri.....	56
Şekil 4.12. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotları için 1 MHz'de (a) $C-V$ ve (b) $G-V$ grafikleri	57
Şekil 4.13. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar için $N_{ss}-V$ grafiği.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. İletkenlikler çizelgesi.....	10
Çizelge 4.1. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyot I - V özelliklerinden türetilen ana elektriksel parametreler.....	44
Çizelge 4.2. Elektriksel parametrelerin karşılaştırılması.....	46
Çizelge 4.3. C^2 - V grafikleri kullanılarak elde edilen ana elektriksel parametreler.....	55



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

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

Simgeler	Açıklama
kW	Elektrik güç birimi
W/m ²	Metrekareye düşen güç
I	Akım
V	Gerilim
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
N	Negatif yüklü silikon
P	Pozitif yüklü silikon
LDR	Foto direnç
RR	İyileştirme oranı
<i>n</i>	İdealite faktörü
Φ_B	Engel(bariyar) yüksekliği
C	Kapasitans
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
Hz	Frekans birimi (Hertz)
k	Kelvin cinsinden sıcaklık
K	Boltzmann sabiti
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
q	Elektrik yükü

R_i	Direnç
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Kısa devre direnci
π	Pi bağı
π^*	Pi bağı için karşıt bağlayıcı enerji seviyesi
A^*	Richardson sabiti
I_0	Ters doyma akımı

Kısaltmalar**Açıklama**

RE	Yenilenebilir enerji
PV	Photovoltaik
Max	Maksimum
OHM	Direnç birimi
TE	Termiyonik emisyon
Sn	Saniye
CuPc	Bakır fitalosiyenin
OPV	Organik fotovoltaiik
SBD	Shotky bariyer diyot
MS	Metal yarı iletken
MIS	Metal – yalıtkan – yarı iletken
Si	Silisyum
M	Metal
S	Semiconductor (yarı iletken)
I-V	Akım – voltaj
C-V	Kapasitans – voltaj

1. GİRİŞ

Dünyada gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı alternatif enerji kaynaklarının gerekliliğini zorunlu kılmıştır. Bu amaçla özellikle son yıllarda enerji ihtiyacının karşılanması yolunda bilim dünyası büyük bir arayış içerisine girmiştir. Bu ihtiyacın karşılanması amacıyla güneş enerjisinin alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi yolunda yapılan çalışmaların da önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak bilinen güneş enerjisi son dönemde çok önem kazanmıştır. Her ne kadar fosil yakıtlar hala enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir yere sahip olsada güneş enerjisine yatırımlar hızla artmaktadır.

Türkiye dünyada 36°-42° kuzey enlem, 26°-45° doğu boylamları arasında bulunmakta olup, senelik yaklaşık güneş ışınımı 1303 kWh/m²yıl, yaklaşık senelik güneşlenme zamanı ise 2623 saattir (1 yıl=365gün=8760 saat). Ülkemizde, yılın 10 ayı süresince, teknik ve ekonomik açıdan yüzölçümünün %63'ünde güneş (solar) enerjisinden faydalanılabilir. PV panellerden enerji üretimini maksimum seviyeye çıkarmak için güneş panellerinin güneşin doğuşundan, batımına dek güneş ışığını en doğru açıda görececek şekilde takip sistemlerine ihtiyaç duyulur (MEB, 2013:8).

Bir güneş ışığı izleme sistemi, güneş panelinin güç çıkışını artırmak için maksimum güneş ışınımını almasına yardımcı olur. Güneş doğu'dan doğar ve batı'dan batar, gün boyunca sürekli olarak gökyüzündeki konumunu değiştirir. Yani, bu sorunu çözmek için, otomatik bir güneş takip sistemi faydalı olacaktır. Otomatik güneş takip sistemi, güneşin gökyüzündeki pozisyonundaki değişikliklere göre güneş panelini otomatik olarak döndüren bir sistemdir.

Bu sistemin güneşi takip edebilmesi için fotodiyotlara ihtiyacı vardır. Fotodiyotlar yapısı gereği ışık şiddetinin artması direnç değerinin düşmesine, ışık şiddetinin azalması ise direnç değerinin artmasına sebep olur, yani ışık şiddeti farkı ile kontrol edilebilen yarı iletkendir. Bu özelliği sayesinde güneş ışığından aldığı veriyi takip sisteminin kontrol devresine aktararak panelin güneşi sürekli takip etmesini sağlar.

Yapılan çalışmalarda esnekliği ve basitliği nedeniyle inorganik-organik, hibrit fotodiyotlar büyük ilgi görmüştür. Bu hibrit yapıların, inorganik bileşenlerin nispeten yüksek yük taşıyıcılığı, organik bileşenlerinin yüksek soğurma katsayıları ile birleşerek gelişmiş bir cihaz performansı elde ettiği görülmüştür.

Bir metalin bir yarı iletkenle birleşmesiyle oluşan ve metal-yarıiletken (M/Y) birleşiminde elektronların akışına engel oluşturan Schottky etkisi kullanılarak tasarlanan Schottky bariyer diyotları (SBD'ler) popülerlik kazanmıştır. Fotodiyotlar, güneş pillerini, radyo frekans dedektörlerini ve transistörleri kapsayan çeşitli uygulamaları sayesinde teknoloji alanında büyük öneme sahiptir. (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams 1988; Tanrıku, Demirezen, Altındal ve Uslu 2017; Eroğlu, Demirezen, Azizian-Kalandaragh ve Altındal, 2020; Demirezen, Çetinkaya ve Altındal, 2022; Aldirmaz, 2022). Silikon (Si), galyum arsenit (GaAs) ve indiyum galyum arsenit (InGaAs) dahil olmak üzere çeşitli yarı iletken malzeme seçenekleri, fotodiyotların fiber optik iletişim, uzaktan algılama ve astronomik gözlem gibi belirli dalga boylarına ve uygulamalara göre uyarlanmasına olanak tanır. Ayrıca, metal ile yarıiletken arasına ince bir yalıtım katmanı büyütülmesiyle metal/yalıtkan/yarı iletken (MIS), metal/polimer/yarı iletken (MPY) veya metal/ferroelektrik/yarıiletken (MFS) yapıları elde edilebilir ve bu yapıların elde edilmesinde kullanılan arayüzey malzemelerin özelleştirilmesiyle bariyer yüksekliğine müdahale edebilir ve farklı Schottky diyotlarının fotodetektörler alanındaki inanılmaz potansiyelini açığa çıkarabiliriz. Bu nedenle metal/arayüzey/yarıiletken cihazların elektriksel özelliklerinin belirlenmesi çok önemlidir (Sze, 1981; Kasap ve Capper, 2017). Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakanın varlığı arayüzey durumlarını etkiler ve metal-yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirir.

Son zamanlarda, organik yarı iletkenler kullanılarak Schottky diyotlarının üretimi ve karakterizasyonu büyük ilgi görmüştür. Bu ilgi, organik yarı iletkenlerin sahip olduğu benzersiz özelliklerden kaynaklanmaktadır. Organik yarı iletkenler elektronik malzemelerde aktif bileşenler olarak kullanılabilir ve bu malzemeler kolay üretilebilirlikleri, düşük maliyetleri ve geniş alanlı malzeme karakterizasyonları nedeniyle belirgin avantajlara sahiptir. Bu özellikler onları özellikle büyük ölçekli uygulamalar ve esnek elektronik cihazlar için cazip kılmaktadır. Bir Schottky diyotun performansı, metal-organik yarı iletken bağlantısının elektriksel ve elektronik özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, metal ve organik yarı iletkenlerin birleşim yapısının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gereklidir.

Sonuç olarak, metal ve organik yarı iletkenler arasındaki arayüzey elektronik özelliklerinin anlaşılması malzeme uygulamaları için önemlidir. Bu anlayış, hem teorik hem de pratik düzeyde yeni uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlar.

Metal-yarı iletken bağlantılarının arayüzey özellikleri, malzemenin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, arayüzey mühendisliği ve optimizasyonu, yüksek performanslı elektronik cihazların tasarımında kritik bir rol oynar (Yakuphanoglu, 2007).

Genel olarak, ideal olmayan Schottky kontaklarında, metal-yarı iletken birleşimi her zaman ideal koşullar altında oluşmaz. Bunun sonucunda yapının karakteristiğinde idealite faktörü olarak bilinen bir çarpan ortaya çıkar. Bu faktör, metal ve yarı iletkenin yüzeylerinin mükemmel bir şekilde uyum sağlamadığı durumlarda devreye girer. Akım-voltaj karakteristiklerinde karşılaşılan ikinci bir durum ise seri direnç etkisidir. Bu etki, cihazın toplam direncine katkıda bulunan iç dirençlerden kaynaklanır ve ideal akım-gerilim denklemlerinde değişikliklere yol açar. Metal-yarı iletken (MS) yapı arasına farklı özelliklere sahip organik/inorganik ince/kalın film tabakaları yerleştirilerek yapılan çalışmalarda amaç, bariyer yüksekliklerini ve arayüzey koşullarını düzenlemektir. Bu düzenleme, özellikle cihazın performansını optimize etmek ve istenilen elektriksel özellikleri elde etmek için kritik öneme sahiptir. Metal/yarı iletken (MS) kontakların bariyer yüksekliği, organik ince/kalın film ile yarı iletken arasına bir dipol tabakası yerleştirilerek diyot yapılarının verimliliğini ve performansını artırmak amacıyla araştırılmıştır. Bu yöntem, farklı malzemelerin kombinasyonlarının etkilerini inceleyerek ideal olmayan kontakların performansını iyileştirmeyi hedeflemektedir (Demirezen, Kaya, Yerişkin, Balbaşı ve Uslu, 2016).

Fitalosiyanimler organik maddeler olarak sınıflandırılır. Birçok fitalosiyanimin rengi kimyasal ve kristal yapılarına bağlı olarak değişir. Örneğin, bakır fitalosiyanimin rengi, yüzeydeki süstitüe klor atomlarının sayısının artmasıyla maviden yeşile kayar (Ozan, 1999).

Fitalosiyanimin fotofiziksel özellikleri, Pc halkasının aksenal veya çevresel pozisyonlarına yeterli substituentlerin eklenmesi veya boşluğun merkezindeki metal atomunun değiştirilmesiyle istenilen uygulamaların gereksinimlerine göre kolayca ayarlanabilir (Claessens, Hahn ve Torres, 2008).

Metal fitalosiyeninler (MPc), basit hazırlanmaları, yüksek esneklikleri, daha az ağırlıkları, daha yüksek akım yoğunlukları ve çok yüksek moleküler katsayılı geniş bir ışık Emilimi gibi benzersiz özellikleri nedeniyle nanoteknoloji alanında büyük önem kazanmıştır (Martinez-Diaz, de la Torre ve Torres 2010; Bottari, de la Torre, Guldi ve Torres, 2011).

Bakır fitalosiyenin ilk olarak 1935 yılında endüstriyel olarak üretilmiştir. Mükemmel mavi ve yeşil boyalar olan ftalosiyeninler, plastik ve metal yüzeylerin renklendirilmesinde, dolma kalem mürekkeplerinde, tıpta, kanserin fotodinamik tedavisinde ve diğer tıbbi uygulamalarda, fotokopi makinelerinde foto iletken elemanlar olarak, lazer boyaalarında, sülfür gazı atıklarının kontrolünde, düşük sıcaklıklarda doymuş hidrokarbonların yükseltilmesinde ve benzinin oktan sayısının artırılmasında katalizör olarak kullanılmaktadır (Demirezen, Çetinkaya, Kara, Yakuphanoglu ve Altındal, 2021).

Ayrıca elektronik görüntüleme cihazları, bilgisayar optik okuma-yazma diskleri ve ilgili veri depolama sistemleri, sıvı kristal renkli ekran uygulamaları ve fotovoltaik hücre elemanları gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Günümüzde, endüstrinin sürekli artan ihtiyaçlarını karşılamak için mavi ve yeşil boyalar olarak yılda binlerce ton fitalosiyenin üretilmektedir (Ceyhan ve Bekaroğlu, 2002). Organik moleküllerin başka bir organik molekül veya inorganik madde ile çok farklı formülasyonlarda bir araya getirilmesiyle çok farklı yapı ve özelliklere sahip elektriksel ve optik cihazlar üretmek mümkündür.

Bakır fitalosiyenin (CuPc), fotovoltaik uygulamalar için iyi çalışılmış organik ışığa duyarlı yarı iletkenlerden biridir ve belirgin fotovoltaik etkisi ve fotoiletkenlik özellikleri nedeniyle organik güneş pillerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Yakimov ve Forrest, 2002; Peumans, Yakimov ve Forrest, 2003).

Metal oksitler metalik, yarı iletken, yalıtkan, ferromanyetik, süper iletkenlik ve ferroelektriklik gibi özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler kimyasal reaksiyonlarda, güneş pillerinde, pillerde, kimyasal veya optik dedektörlerde, boya ve kozmetik endüstrisinde, plastik üretiminde, ilaç endüstrisinde ve yarı iletken endüstrisinde katalizör olarak kullanılmaktadır. İnce film formundaki metal oksitler kimyasal sensörlerde, yüzey işlemlerinde (çizilmeye dayanıklı, su geçirmez, iletken veya yalıtkan yüzey kaplamaları) ve elektronik veya optoelektronik cihazlarda kullanılır.

Yarı iletken özelliğe sahip metal oksit ince filmler, yüksek bant aralığı, homo-eklem veya hetero-eklem yapılarını büyütebilme, esnek altaşlar üzerinde üretilebilme gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu özellikler, ince film transistör cihazlarının imalatında büyük ilgi görmektedir. Ayrıca yüksek kırılma indeksi nedeniyle uzun süredir yansıtıcı veya yansıma önleyici kaplama olarak kullanılan bu malzemeler, güneş pillerinde verimliliği artırma yarışının artmasıyla doping veya alaşımlama yöntemleriyle şeffaf iletken kontaklar olarak da kullanılıyor.

Bu tür gelişmeler metal oksitlerin güneş pili teknolojisinde önemli bir rol oynamasına yol açmıştır. LED (Işık Yayan Diyot) cihazlarının aydınlatma uygulamalarında yaygınlaşmasıyla birlikte metal oksitler yeni bir kullanım alanı bulmuş ve bu uygulamaların yarattığı motivasyonla birçok araştırmacının temel çalışma konusu haline gelmiştir (Seiyama, Kato, Fujiishi ve Nagatani, 1962; Wachs, 1996; Sun, Nakajima, Fujishima, Watanabe ve Hashimoto, 2001; Barsan ve Weimar, 2001; Palomares, Clifford, Haque, Lutz ve Durrant, 2003; Wang, Li, Xue ve Qi, 2010; Wang, Zhou ve David Lou, 2012). Bu alanlardaki araştırmalar metal oksitlerin potansiyelini daha da genişletmekte ve yeni uygulama olanakları sunmaktadır.

Bu tür yapılardaki malzemelerin hem elektriksel hem de dielektrik niteliklerini arttırmayı amaçlamaktadır. Farklı arayüzeyler, bariyer yüksekliği (Φ_B), ideallik faktörü (n) ve seri direnç (R_s) dahil olmak üzere kritik Schottky bariyer özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu parametrelerin optimizasyonu, en yüksek düzeltme oranına ($RR=IF/IR$), şönt direncine (R_{sh}) ulaşmak ve kaçak akımı, R_s 'yi ve yüzey durumlarını (N_{ss}) en aza indirmekle ve seçilen arayüz malzemesinin dielektrik sabitine önemli ölçüde bağlıdır (İncekara, Deniz ve Türüt, 2010; Ongun ve diğerleri, 2021; Altındal, Özdemir, Aydoğan ve Türüt, 2022; Aydoğan, Cavdar ve diğerleri, 2022; Kocyigit, Aydoğan, İncekara ve Yılmaz, 2023).

Diğer taraftan, bu yapıların sadece tek bir frekans ve voltaj değerinde alınan ölçümleri bize iletim mekanizmaları, M/S arasında oluşan engelin biçimi, elektrik ve dielektrik özellikleri hakkında yeterince bilgi sağlayamaz. Fakat bu ölçümler geniş bir frekans, sıcaklık ve voltaj aralığında gerçekleştirilirse, hem sözü edilen bu bilgiler yeterince sağlanabilir hem de bunların doğruluğu ve güvenilirliği istenilen düzeyde olur.

2. GENEL BİLGİLER

Günümüzde kullanılan güneş panellerinin uygulama verimlilikleri %20 civarındadır (Aksu, 2018). Bu nedenle güneş enerjisinin enerji ihtiyacını karşılamada alternatif bir kaynak olabilmesi için öncelikle güneş panellerinin verimliliğinin artırılması gerekmektedir.

2.1. Güneş Takip Sistemi

Daha fazla enerji ihtiyacını karşılayabilmek için daha büyük boyutlu güneş panelleri yapmak çözüm gibi görünse de bunların büyük boyutlu olmaları uygulamalarda sorunlara neden olmaktadır.

Yapılan çalışmalarda güneş panellerinin boyutunu büyütmeğe her bir güneş pilinin verimliliğini arttırmak cihazlardaki uygulanabilirliği göz önüne alındığında daha fazla önem kazanmaktadır.

Güneş panellerinin verimliliği iki ana etkene bağlıdır;

- 1) Hücre verimliliği
- 2) Hücre üzerindeki kaynak ışınım şiddeti

Güneş panellerinin hücre verimliliğini sınırlayan faktörlerin başında üretimde kullanılan materyaller gelmektedir. Bu faktörlere bağlı olarak verimliliğin artırılması zorlaştırmakta ve hücrenin tüm performansını sınırlamaktadır. Buna karşın panel hücrelerinin üzerine düşen ışık miktarının artırılması daha kolay bir yöntemdir. Bu nedenle verimi arttırmak için izlenen yollardan birisi de güneş enerji panellerini güneş ışınlarını dik bir açı ile alabilmeleri için hareketli olarak tasarlamak ve güneşin hareketi boyunca takip ettirmektir. Güneş takip sistemleri ile bir sistemin verimi %30-40'lara varan oranlarda iyileştirilebilmektedir.

Güneş takip sistemi, gün boyunca güneşin konumunu takip eden ve güneş panelinin yönünü güneşe doğru değiştiren bir sistem türüdür. Güneş takip sistemi, güneşin gökyüzündeki konumunun değişmesine göre güneş panelinin yatay, dikey yönünü ayarlamak için kullanılır.

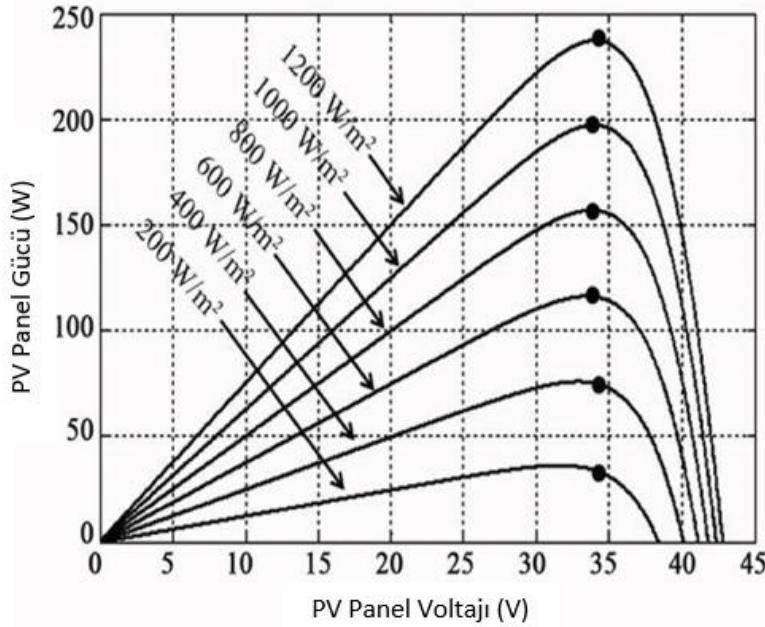
Güneş paneli yönlendirmesindeki ayarlamaya göre, izleme sistemi farklı tiplere ayrılmıştır. Güneş panelinin üzerine düşen güneş ışığı miktarını artırarak verimini artırmak için kullanılır (Paul, Mondol, Rahman, Easmin ve Moniruzaman 2020)

Şekil 2.1 ve şekil 2.2' de görüldüğü gibi, güneş ışığı yoğunluğu, güneş panelinin çıkış voltajını ve akımını önemli ölçüde etkiler. Güneş ışınımının artmasıyla, çıktı artar güneş ışınımının azalmasıyla azalır. Basit bir ifadeyle, güneş panelinin çıkışı farklı aydınlatma seviyelerinde değişir. Bu nedenle, maksimum çıkış elde etmek için güneş paneli güneşe doğru bakmalıdır.

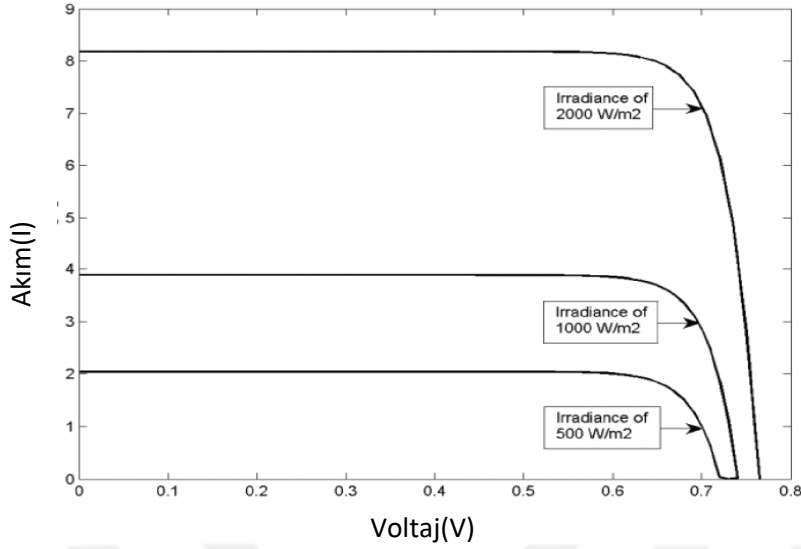
Temel olarak, iki tür izleme sistemi mevcuttur.

Bunlar;

- Tek Eksen Takip Sistemi,
- Çift Eksenli Takip Sistemi.



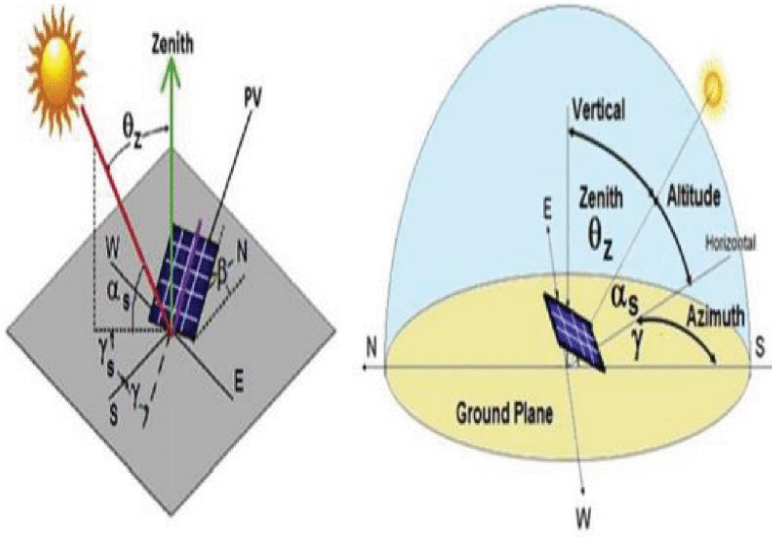
Şekil 2.1. Farklı aydınlatma düzeyinde bir güneş fotovoltaik panelinin *P-V* eğrisi



Şekil 2.2. Farklı güneş ışınımlarında bir güneş fotovoltaik hücrenin I - V eğrisi (Ahmed ve diğerleri, 2017)

Tek eksenli izleme sistemi, güneş fotovoltaik panelinin konumunu dikey veya yatay eksen gibi tek bir eksen üzerinde değiştirir. Öte yandan, çift eksenli bir izleme sistemi, güneşin konumunu hem yatay yönde hem de dikey yönde takip eder. Bir güneş takip sisteminin birincil işlevi, güneş fotovoltaik panelinin konumunu güneşin yönüne göre yönlendirmektir. Güneş fotovoltaik panelini yönlendirirken azimut açısı, zenit açısı ve güneş geliş açısı gibi bazı güneş açılarını koruması gerekir.

Tek eksenli izleme sistemi, güneş fotovoltaik panelini sabit bir eksen boyunca döndürür. Bu sistem, yatay eksen izleme, dikey eksen izleme, kutupsal hizalama izleme, eğik tek eksenli izleme vb. Çift eksenli izleme sistemi, azimut dönüşü ve yatay dönüş gibi iki dönüş derecesine sahiptir. Azimut dönüşü, panelin yüzeye paralel dairesel bir yolda hareket etmesini sağlar (Amelia, et al. 2019).



Şekil 2.3. Güneşin konumunu izlemek için farklı güneş açıları (Yılmaz, 2015)

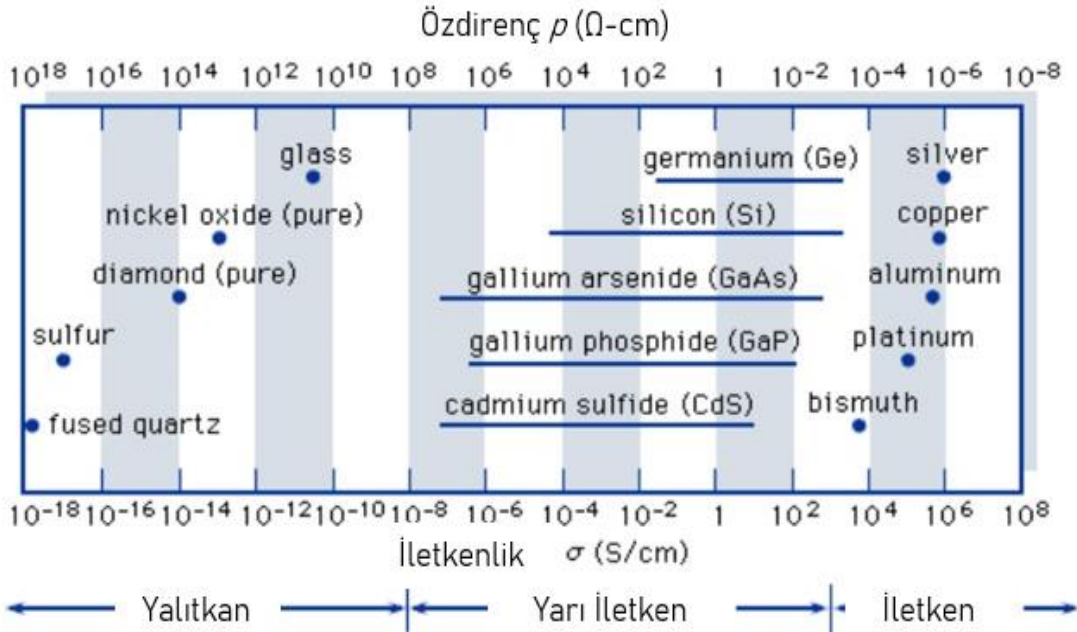
Şekil 2.3' te gösterildiği gibi, bir güneş paneline ilişkin farklı güneş açılarının değerleri gün boyunca sürekli olarak değişmektedir. Sabit durumdaki bir güneş paneli için bu güneş açılarının sabit bir değerde tutulması imkânsızdır ve bu nedenle bir takip sistemi gereklidir. Güneş takip sistemi, bu güneş açılarının değerleri sabit kalacak şekilde güneş panelinin konumunu değiştirir. Bu şekilde takip sistemi, güneş paneli sisteminin yüzünü güneşe doğru çevirmesine yardımcı olur ve böylece çıkış gücü artar ve güneş panelinin performansı artar.

2.2. Yarı İletkenler

Yarı iletkenler, iletken ile yalıtkan arasında elektriksel iletkenlik bakımından ara madde olan kristal katıların herhangi bir sınıfıdır. Yarı iletkenler; diyotlar, transistörler ve entegre devreler dahil olmak üzere çeşitli elektronik cihazların imalatında kullanılır. Yarı iletken teknolojisi, işlevsellik, güç verimliliği ve düşük maliyeti ile çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasına neden olur. İletişim, sinyal işleme, işlemci kontrol uygulamaları, onlarca yıldır (tüketici ve endüstriyel) elektronik sistemlerin temel unsuru oldular, yarı iletkenler entegre devre yapıların ana malzemesidir. Çok çeşitli akım ve gerilim işleme yeteneklerine sahiptirler ve daha da önemlisi, karmaşık ancak kolaylıkla üretilebilen mikroelektronik devrelerde kullanıma uygundur (Britannica, 2024). Elektronik sistemlerin ana unsuru olan yarı iletkenler şimdi olduğu gibi gelecekte de temel unsur olacaktır.

2.2.1. Yarı iletken malzemeler

Katı hal malzemeleri genellikle üç sınıfa ayrılır; yalıtkanlar, yarı iletkenler ve iletkenler. (Düşük sıcaklıklarda bazı iletkenler, yarı iletkenler ve yalıtkanlar süper iletkenlere dönüşebilir.) Erimiş kuvars ve cam gibi yalıtkanların iletkenlikleri santimetre başına 10^{-18} ila 10^{-10} siemens (elektrik iletkenliği birimi) düzeyinde iletkenliği çok düşüktür ve alüminyum gibi iletkenler, tipik olarak santimetre başına 10^4 ila 10^6 siemens arasında yüksek iletkenliğe sahiptir. Çizelge 2.1' de katı hal malzemelerinin iletkenlik değerleri gösterilmiştir. Yarı iletkenler bu uç noktalar arasında iletkenliklere sahiptir ve genellikle manyetik alanlara, aydınlatmaya, sıcaklığa ve çok az miktarda safsızlık atomuna duyarlıdır. Bipolar transistörün icadından önce, yarı iletkenler yalnızca doğrultucular ve fotodiyotlar gibi iki terminalli cihazlar olarak kullanılıyordu. 1950' lerin başında germanyum ana yarı iletken malzemeydi.



Çizelge 2.1. İletkinlikler çizelgesi

Ancak, bu malzemeden yapılan cihazlar yüksek sıcaklıklarda yüksek kaçak akımlar geliştirdiği için birçok uygulama için uygun olmadığı kanıtlandı. 1960' ların başlarından bu güne kadar silikon malzemeler cihaz imalatında neredeyse germanyumun yerini alarak en yaygın kullanılan yarı iletken haline geldi.

Bunun başlıca iki nedeni vardır:

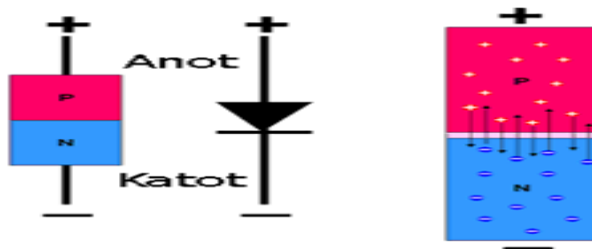
- (1) Silikon cihazlar çok daha düşük kaçak akım sergilerler,
- (2) Yüksek kaliteli bir yalıtkan olan silikon dioksitin (SiO_2) silikon tabanlı bir cihazın parçası olarak dahil edilmesi kolaydır. Böylece, silikon teknolojisi büyük ölçüde gelişmiş ve yaygınlaşmıştır; silikon cihazlar dünya çapında satılan tüm yarı iletken ürünlerin % 95' inden fazlasını oluşturmaktadır (Britannica, 2024).

2.3. Diyot

Diyot, akımın yalnızca bir yönde akmasına izin veren yarı iletken malzemelerden yapılmış bir devre elemanıdır. İlk diyotlar, iki elektrot (negatif yüklü bir elektrot), negatif yüklü bir katot ve pozitif yüklü bir anot içeren boşaltılmış bir cam veya metal elektron tüpü olan vakum tüpleriydi. Bunlar radyo ve televizyon alıcıları gibi elektronik devrelerde doğrultucu ve dedektör olarak kullanılmıştır.

Anoda (veya plakaya) pozitif bir voltaj uygulandığında, ısıtılmış katottan yayılan elektronlar plakadan akar ve harici bir güç kaynağı aracılığıyla katoda geri döner. Plakaya negatif bir voltaj uygulanırsa, elektronlar katottan kaçamaz ve plakadan akım geçmez. Böylece, bir diyot elektronların katottan plakaya akmasına izin verir, ancak elektronların plakadan katoda akmasına izin vermez. Plakaya alternatif bir voltaj uygulandığında, akım yalnızca plakanın pozitif olduğu süre boyunca akar. Alternatif akımın doğru akıma dönüştürüldüğü söylenir.

Devre şemalarında bir diyot, şekil 2.4' de görüldüğü üzere bir tepe noktası boyunca uzanan bir çizgiye sahip bir üçgen ile temsil edilir.

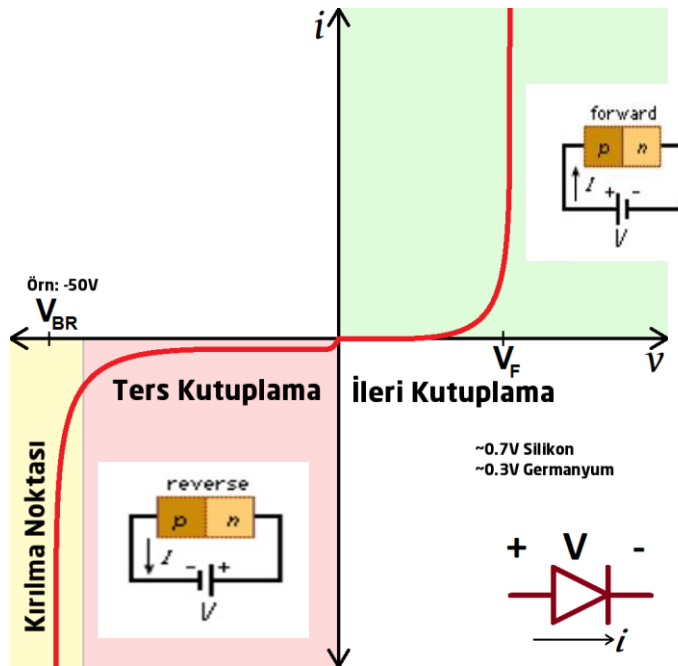


Şekil 2.4. Diyot, P ve N tipi yarı-iletkenlerin birleşmesiyle oluşur

En yaygın diyot tipi $p-n$ eklemeni kullanır. Bu tip diyotta, elektronların yük taşıyıcı olduğu bir malzeme (n), deliklerin (pozitif yüklü parçacıklar gibi davranan elektronların tükendiği yerler) yük taşıyıcı olarak görev yaptığı ikinci bir malzemeye (p) bitişiktir. Ara yüzeylerinde, elektronların (p) tarafındaki delikleri doldurmak için yayıldığı bir tükenme bölgesi oluşur. Bu, elektronların daha fazla akışını durdurur. Bu bağlantı ileri yönlü olduğunda (yani (p) tarafına pozitif bir voltaj uygulandığında), elektronlar boşlukları doldurmak için bağlantı noktası boyunca kolayca hareket edebilir ve diyottan bir akım akar.

Bağlantı noktası ters kutuplandığında (yani (p) tarafına negatif bir voltaj uygulandığında), tükenme bölgesi genişler ve elektronlar kolayca hareket edemez. Akım, belirli bir gerilime (kırılma gerilimi) ulaşılan kadar çok küçük kalır ve akım aniden artar (Britannica, 2024).

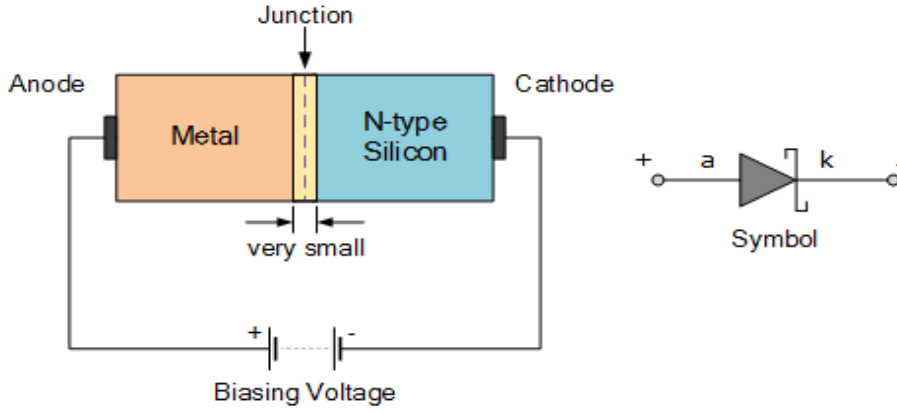
Bir elektronik devre elemanının davranışını, akım-gerilim grafiğine bakarak anlamamız mümkündür. Diyotun ileri kutuplama alanında çalışırken akım geçirmesi için V_F ile belirtilen eşik gerilimine ulaşması gereklidir. Bu değer silikon diyotlarda 0.7V, germanyum diyotlarda ise 0.3V civarındadır.



Şekil 2.5. Diyotun karakteristiğini gösteren Akım-Gerilim grafiği

2.4. Schottky Diyot/Kontaklar

Schottky diyot, metal-yarı iletkenine sahip olan bir diyot türüdür. Örneğin, bir n-tipi silikon substrat ile yakın temas halinde olan bir alüminyum katman gibi. Adını 1938'de bu tür temasın düzeltici davranışını açıklayan Alman fizikçi Walter H. Schottky'den almıştır. Schottky diyotu elektriksel olarak bir (PN) bağlantısına benzer, ancak Schottky diyottaki akım akışı doğası gereği hızlı tepki veren çoğunluk taşıyıcılarından kaynaklanmaktadır. Yüksek frekanslı, düşük gürültülü karıştırıcı ve anahtarlama devreleri için yaygın olarak kullanılır (Sze ve Holton, 2024). Şekil 2.6' da Schottky diyot yapısı ve sembolü görülmektedir.



Şekil 2.6. Schottky diyot yapısı ve sembolü

Yarı iletken ve yalıtkan kristallerin iletkenlik özelliklerini araştırmanın bir yolu da kristale uygun kontaklar yapmaktır. Bir yarı iletken ve bir metal temas haline getirildiğinde oluşan yapıya metal-yarı iletken kontağı denir. Oluşan kontağın ideallığı, kontak malzemelerinin yüzeylerinin düzgün ve temiz olmasıyla doğrudan ilişkilidir (Crowel ve Sze, 1966).

Bu durum her iki malzemenin elektronik enerji bandı diyagramı ile ilgilidir. Metal-yarı iletken kontaklar her iki malzemenin iş fonksiyonuna göre omik ve doğrultucu kontaklar olarak iki kısımda incelenir. Akım taşıyıcılarını bir yönde diğerine göre daha kolay geçiren kontaklar doğrultucu kontaklar olarak adlandırılır (Gümüş, 1997). Elektrik iletkenliklerine bağlı olarak, yarı iletkenler p-tipi yarı iletken/metal ve n-tipi yarı iletken/metal olarak hazırlanır.

2.4.1. P-tipi yarı iletken/metal kontaklar

Metal ile p-tipi yarı iletkenin kontak yapımında $\phi_m > \phi_s$ ve $\phi_m < \phi_s$ olacak şekilde 2 farklı durum vardır budurumlar Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Kontakta önce yarı iletkenlerin yüzeylerinde yük olmadığından, tüm yüzey aynı kalır ve bant bükülmez. Bir p-tipi yarı iletken ile bir metalin kontaklanması ile oluşan p-tipi yarı iletken-metal kontağı için metalin iş fonksiyonu ϕ_s ’den daha küçük ϕ_m ’nin yarıiletkenin iş fonksiyonu $\phi_m < \phi_s$ olduğu durumdaki enerji band yapısı Şekil 2.7(a-b)’de gösterilmektedir. p-tipi yarı iletkende iletkenliği sağlayan, pozitif yüklü boşluklardır. p-tipi yarı iletken, metal ile kontak yapıldığında E_F seviyeleri aynı enerji seviyesinde olacak şekilde hareketlenir. E_F seviyelerindeki bu hareketliliğin nedeni, metaldeki yüksek enerjili elektronların yarı iletkene doğru hareket etmesidir. Böylece metalin E_F seviyesi de düşmeye başlar.

Metaldeki elektronlar enerji seviyelerindeki yerlerini boşaltarak yarı iletkene geçtikleri ve yarı iletkendeki deliklerin bulunduğu enerji seviyelerine yerleştikleri için yarı iletkendeki delikler metalin içine doğru hareket ediyor gibi görünür. Böyle bir eklemede doğrultma olduğu gözlenir, yani oluşan kontak doğrultma özelliği gösterir ve Schottky kontağı olarak adlandırılır (Cafer, 2000). Şekil 2.7b’de gösterildiği gibi band bükülmesinin değeri, formül (1)’de gösterildiği şekilde olacaktır.

$$qV_i = \phi_s - \phi_m \quad (1)$$

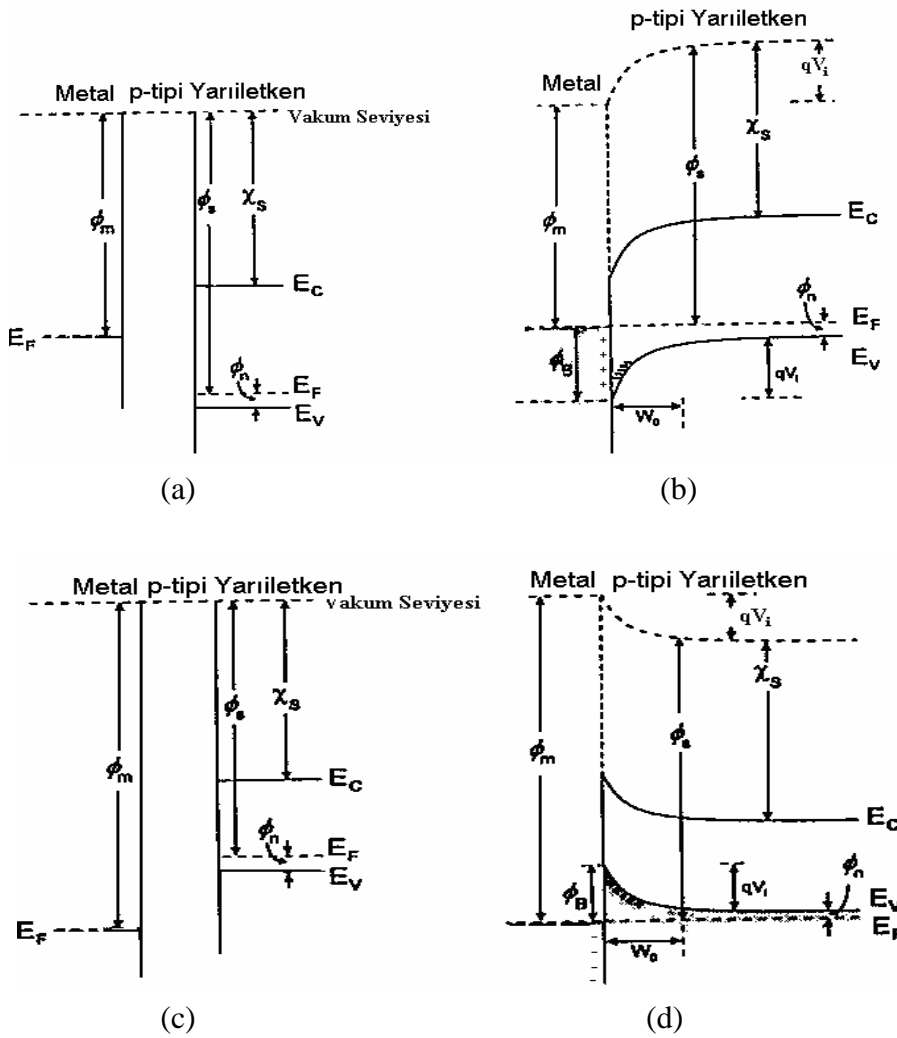
Burada, V_i temas potansiyel farkı veya bağlantı noktasının potansiyel birikimidir ve qV_i elektronlar tarafından oluşturulan potansiyel bariyerdir.

Bir p-tipi yarı iletken-metal kontağında, metalin iş fonksiyonu ϕ_m ’nin yarı iletkenin iş fonksiyonu ϕ_s ’den büyük olduğu durumda enerji band yapısı ($\phi_m > \phi_s$) Şekil 2.7(c-d)’de gösterilmiştir. Kontakın bu koşul altında yapılması durumunda, p-tipi yüksek enerjili elektronlar metale geçecek ve aşırı negatif yük nedeniyle metal tarafında temas bölgesine yakın bölgede bir tabaka ve aşırı pozitif yük nedeniyle yarı iletken tarafında bir W_0 tükenme bölgesi oluşacaktır. Sonuç olarak, yarı iletkenin yüzey bölgesinde pozitif yüklerin konsantrasyonu artarken direnci azalır.

Elektronların metale aktarılması nedeniyle yarı iletkenin E_F seviyesi aşağı doğru hareket ederken, metale giren elektron sayısındaki artış nedeniyle metalin E_F seviyesi yukarı doğru hareket eder. Böylece, metal/p-tipi yarı iletken yapı omik kontak özellikleri sergiler. Şekil 2.7d' de gösterildiği gibi, bant bükülmesinin değeri, formül (2)' de gösterildiği şekilde olacaktır.

$$qV_i = \phi_m - \phi_s \quad (2)$$

Metal/p-tipi yarı iletken kontakların termal denge koşulları Şekil 2.7' ye göre açıklanmıştır.

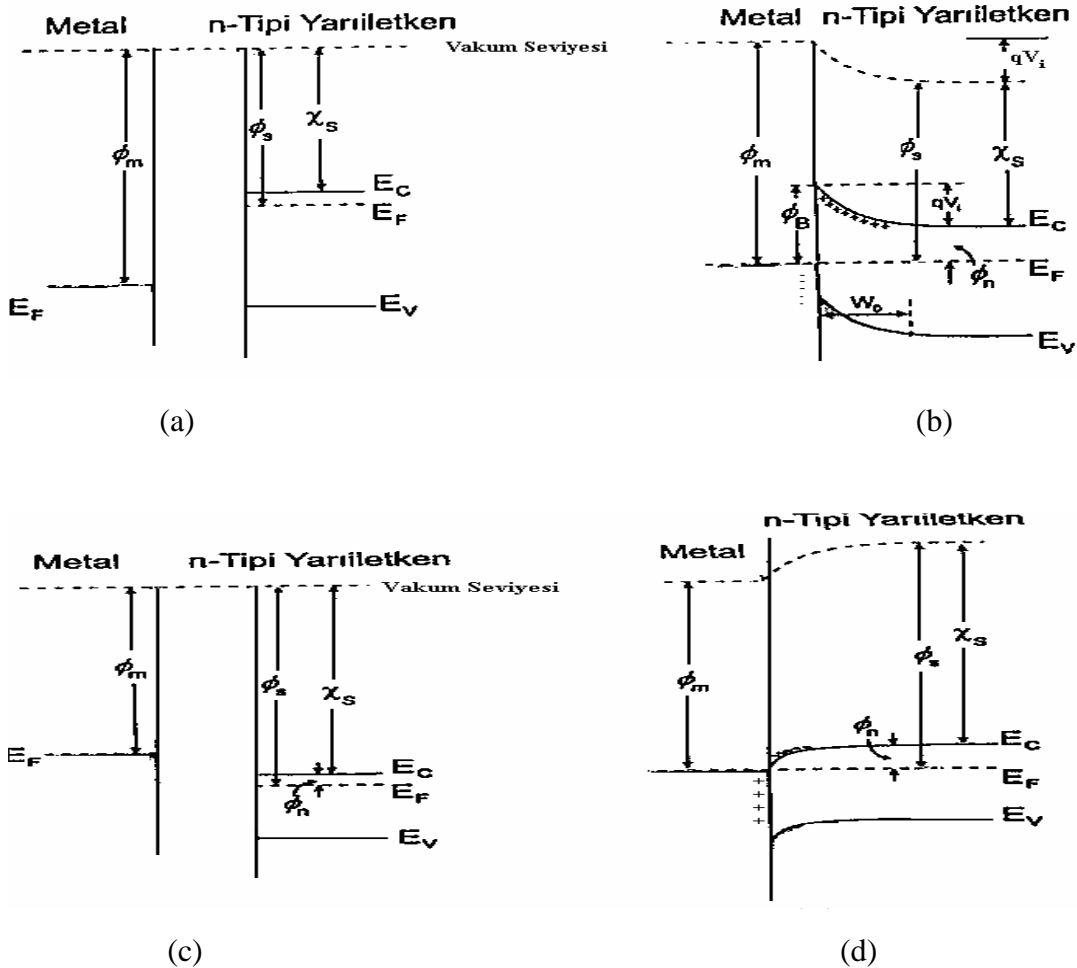


Şekil 2.7. p-tipi yarı iletken/metal doğrultucu ve omik kontak enerji bantı diyagramları: (a) ve (c) ayrıldıklarında nötrdürler ve temastan sonra termal dengeye ulaşmışlardır, (b) $\phi_s > \phi_m$ durumunda p-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmalı temaslar ve (d) $\phi_m > \phi_s$ durumunda p-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmasız temastan sonraki durum (Sedef, 2002)

Yarı iletken, metale yakın bölgedeki hareketli elektronlarını boşaltarak yarı iletkenin kenarında pozitif yüklü bir arayüzey oluşmasına neden olur. Bu durumda, metaldeki elektronlar da yarı iletkenin arayüzeyine yakın bir bölgede ($\approx 0,5 \text{ \AA}$) negatif bir arayüzey oluşturur. Bu nedenle, elektrik alanı yarı iletkenden metale doğru olur (Card ve Rhoderick, 1971).

Yarı iletkenin yasak enerji boşluğu metal ile kontaklandıktan sonra değişmediğinden, E_v , E_c vakum seviyesi de aynı şekilde aşağı doğru bükülür. Şekil 2.9b' de gösterildiği gibi, bant bükülme miktarı iki iş fonksiyonu arasındaki farka eşittir,

$$qV_i = (\phi_m - \phi_s) \quad (3)$$



Şekil 2.9. n-tipi yarı iletken/metal doğrultucu ve omik kontakın enerji bantı diyagramları: (a) ve (c) ayrıldıklarında nötrdürler ve temas sonrasında termal dengeye gelmişlerdir, (b) $\phi_m > \phi_s$ olduğunda n-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmalı kontaklar ve (d) $\phi_s > \phi_m$ olduğunda n-tipi yarı iletkenlerin eklenmesinden kaynaklanan doğrultmasız kontaklar

Metalden yarıiletkeneye doğru bakıldığında engel farkı oluşur ve engel yüksekliği, denklem (4) şeklinde olup, denklem (5) eşitliği yardımı ile denklem (6) ifadesine dönüşerek, bu denklem Schottky sınırı olarak tanımlanır (Aboelfotoh ve Tu, 1986; Haungh, Peng ve Lin, 1992).

$$\phi_b = (\phi_m - \chi_s) \quad (4)$$

$$\phi_s = \chi_s + \phi_n \quad (5)$$

$$\phi_b = (qV_i + \phi_n) \quad (6)$$

Potansiyel bariyerin tam şekli, ayrılmış yük katmanlarının yük dağılımı ile hesaplanabilir. Bariyerin şekli yarı iletkenindeki verici dağılımı tarafından belirlenir. Sabit bir alan yükü için elektrik alanının büyüklüğü, yük bölgesinin kenarından uzaklığı ile doğrusaldır ve bu nedenle parabolik bir bariyer oluşur. Bu bariyer Schottky bariyeri olarak adlandırılır (Sedef, 2002).

Termal uyarım nedeniyle, metalin yeterli enerjiye sahip bazı elektronları potansiyel bariyerini aşar ve yarı iletkeneye geçer. Benzer şekilde, yarı iletkenin bazı elektronları potansiyel bariyerini aşar ve metale girer. Denge durumunda, eşit ve zıt akımlar I_0 oluşacaktır.

Yarı iletkeneye bir voltaj (-V) uygulanırsa, soldan sağa (metalden yarı iletkeneye) giden elektronlar için bariyer değişmez ve bu nedenle sağdan sola karşılık gelen akım değişmez.

Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarı iletkenin iş fonksiyonu ϕ_s 'den küçükse, $\phi_m < \phi_s$ o zaman bir metal/n tipi yarı iletken omik kontak oluşur. Temas öncesi ve sonrası enerji bandı diyagramları Şekil 2.9(c-d)' de gösterilmiştir. Şekil 2.9c 'de görüldüğü gibi, temas öncesi yarı iletken Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinin $\phi_s - \phi_m$ kadar altındadır. Temastan sonra, metaldeki elektron konsantrasyonu yarı iletkenindeki elektron konsantrasyonundan daha büyük olduğundan, elektronlar metalden yarı iletkeneye akmaya başlayacaktır. Bu durum metal ve yarı iletkenin E_C seviyeleri eşitlenene kadar devam eder.

Elektronlar arkalarında negatif kütleli pozitif yüklü delikler bırakacaktır. Sonuç olarak E_C , E_V vakum seviyesi yukarı doğru bükülecektir. Böylece bu kontak omik bir kontak gibi davranır.

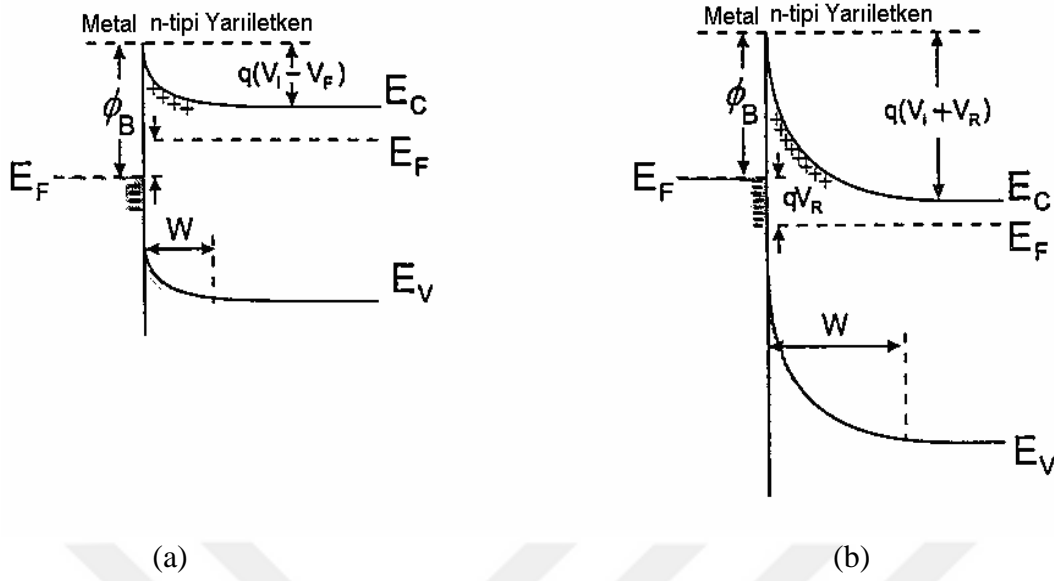
Metal/n-tipi yarı iletken kontakın düz ve ters besleme koşullarındaki enerji bant diyagramları Şekil 2.10a ve 2.10b'de gösterilmiştir. Düz besleme uygulandığında, bantların toplam bükülmesi değişecektir. Bu durumda, tükenme bölgesi üzerine düşen potansiyel V_i yerine $(V_i - V_F)$ değişecek ve tükenme bölgesinin genişliği de azalacaktır. Potansiyelin uygulanması durumunda, yarı iletken termal dengede olduğunda, yarı iletkenin tükenme bölgesinin kenarındaki elektron yoğunluğu, elektronların metale doğru akışı nedeniyle azalsa bile, elektronların metalden yarı iletkene akışı yarı iletkenin denge durumunu değiştirmeyecektir. Ters beslemeli kontak için enerji bant diyagramı Şekil 2.10b'de gösterilmektedir.

Burada yarı iletken $V = -V_R$ gerilimden dolayı metal kadar pozitif olacak ve tükenme bölgesine düşen potansiyel $(V_i + V_R)$ kadar artacaktır. Termal denge koşulunda kontaktaki E_F seviye tek iken, hem düz hem de ters besleme koşullarında metal ve yarı iletken tarafta iki ayrı E_F seviye ortaya çıkacaktır.

İdeal bir diyot, ters beslendiğinde sonsuz dirence, düz beslendiğinde ise sıfır dirence sahiptir. Bir diyotun akım-voltaj ilişkisi şöyledir,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

Burada I_0 , ters doyma akımı; q , taşıyıcı yükü; k , Boltzman sabiti; T , Kelvin cinsinden sıcaklık ve V , uygulanan voltajdır. n , idealite faktörüdür ve ideal bir diyot için $n=1$ değerini alır (Sze, 1981).



Şekil 2.10. n-tipi yarı iletken/metal doğrultucu kontağının elektron enerji bandı diyagramları. (a) düz besleme, (b) ters besleme

2.5. Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Voltaj Karakteristikleri

Yüksek hareketliliğe sahip yarı iletkenlerle inşa edilen Schottky diyotları, termiyonik emisyon teorisine uygun I - V karakteristiklerine sahiptir. Bu teoriye göre akım-voltaj ilişkisi denklem (8) deki gibi ifade edilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Burada I , diyottan geçen akım ve I_0 , ifadesiyle verilen ters doyma akımıdır.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left[-q\left(\frac{\phi_b - \Delta\phi_{bi}}{kT}\right)\right] \quad (9)$$

Burada, A diyot kontak alanı; ise A^* Richardson sabiti olup, denklem (10) daki ifade ile verilir (Cafer, 2000).

$$A^* = \frac{m_n e k^2}{2\pi^2 h^3} \quad (10)$$

Bir Schottky diyotu için, engel yüksekliği, denklem (11) İfadesi ile verilir.

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (11)$$

Termiyonik emisyon teorisine göre, $n=1$ ideal durumuna literatürde neredeyse hiç rastlanmamıştır. Bunun nedeni, bariyer yüksekliğinin uygulanan voltajla değişmesidir. Ayrıca bu durum, ideale en yakın Schottky yapılarında bile metal ve yarı iletken arasında en az 5-20Å kalınlığında ince bir oksit tabakasının doğal olarak oluşmasından kaynaklanmaktadır (Singh, 1985; Divigalpitiya, 1989; Kaminski, Marchand ve Laugier, 1998; Cova ve Singh, 1990; Szatkowski ve Sieranski, 1988; Akkal ve diğerleri 1998).

Bu nedenle diyotlar uygulamalarda denklem (8)' i tam olarak sağlamaz ve bu denklem aşağıdaki şekilde düzeltilir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (12)$$

Buradaki n idealite faktörüdür ve denklem (13) ile ifade edilir.

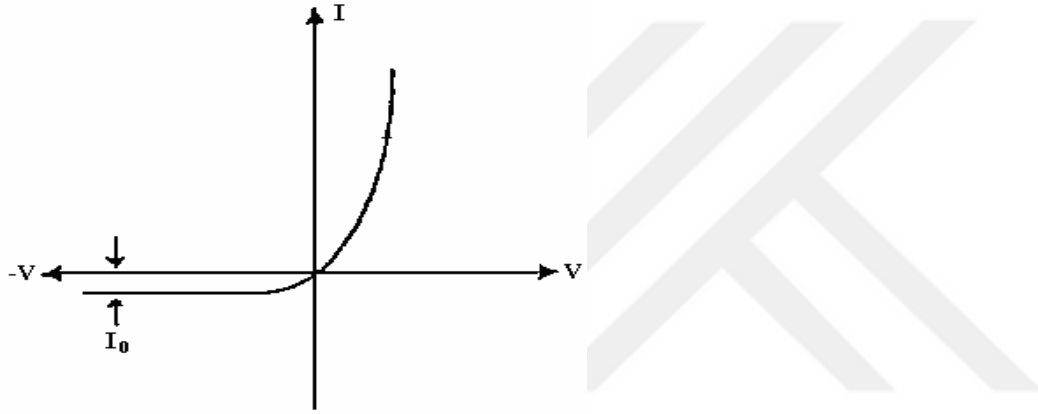
$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (13)$$

Denklemden n sıcaklığa bağlı olabilir ve yaklaşık olarak voltajdan bağımsız olup 1'den büyüktür. $V > 3kT/q$ için denklem (8), şeklini alır.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (14)$$

Şekil 2.11' de görüldüğü gibi, Schottky diyot doğrultucu özelliğe sahiptir, yani ileri yönde akım akar ve ters yönde neredeyse hiç akım akmaz. Schottky diyota ileri yönde gerilim uygulandığında, yarı iletkenenden metale geçen elektronlar için potansiyel bariyer yüksekliği gerilimle azalır ve akım-gerilim karakteristiği ileri yönde üstel bir değişim gösterir (Cafer, 2000).

Bir Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiğinin ters besleme kısmında ($V < 0$), diyottan geçen akım uygulanan gerilimin büyük değerleri için sabittir (Şekil 2.11)



Şekil 2.11. Bir Schottky diyodunun akım-gerilim karakteristiği.

Bir Schottky diyot için doğrultma katsayısı, denklem (15) ifadesi ile gösterilir.

$$r = \frac{I_d}{I_t} \quad (15)$$

Denklemden, I_d sabit bir gerilim değerindeki düz öngerilim akımı ve I_t ters öngerilim akımıdır. İyi kalitedeki diyotlar için, doğrultma katsayısı 10^5 - 10^6 seviyesindedir (Cafer, 2000).

2.6. Fotodiyotlar

Fotodiyotlar, ışığı elektrik akımına dönüştürebilen yarı iletkenler olarak tanımlanabileceği gibi, fotodedektörler olarak da adlandırılır.

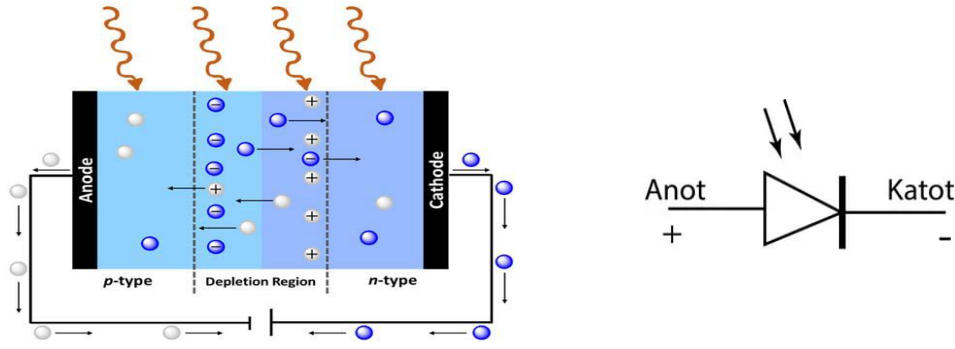
Fotodetektörler, fotosensörler veya ışık dedektörleri olarak da adlandırılan bu cihazlar ışığa karşı çok hassastır, hızlı dönüşüme olanak tanır ve biyotıp veya görüntü algılama gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır.

Küçük boyutlu, düşük maliyetli, uzun ömürlü, sıcaklığa düşük tepkili, ışığa yüksek tepkili ve duyarlı, düşük gürültülü ve yüksek kazançlı fotodiyot arayışı, bu nitelikleri geliştirmek için yeni yarı iletkenlerin (organik, inorganik veya hibrit) geliştirilmesine yol açtı (Armin ve diğerleri 2014). Fotodiyotlar, yapı türüne göre, p-n, PIN bağlantısı veya çığ, spektral yanıt penceresi genişliğine göre, geniş bant, pankromatik dar bant, dalga boyu seçici, kullanılan yarı iletkenlerin türüne göre, organik, inorganik veya hibrit olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir (Liu, Lin, Liao, Wu ve Zheng, 2018)

Tüm fotodiyotlar aynı şekilde çalışır. Bir fotodiyotun yapısı bir p-n bağlantısı veya bir PIN bağlantısı olabilir. Bir p-n bağlantısı, p-tipi bir yarı iletken (deliklerin çoğunluk yük taşıyıcıları ve serbest elektronların azınlık olduğu) ve bir n-tipi yarı iletkenin (serbest elektronlar çoğunluk yük ve delikler azınlık yük taşıyıcılarıdır) birleşimidir. Hem p hem de n tipi yarı iletkenlerin birleştiği bölgeye p-n bağlantısı adı verilir. Doğal olan, bir dengeye ulaşmak için elektronların deliklere geçmesidir. Ancak p-n eklem arayüzünde elektron transferini yavaşlatan bir tükenme bölgesi vardır (Bui ve Taneja, 2003). PIN bağlantısı durumunda p- ve n-yarı iletkenler arasında kendine özgü bir yarı iletken bulunur.

Genellikle fotodiyotların çalışma prensibi güneş pillerine benzer. Hem p-n bağlantıları hem de PIN yarı iletkenleri kullanılabilir, ancak bunlar ters öngerilim koşulları altında çalışırlar; bu, p tarafının anoda ve n tarafının katoda bağlı olduğu anlamına gelir.

Şekil 2.12 'de görüldüğü gibi bir foton diyota çarptığında bir elektron deliği çifti oluşur (fotoelektrik etki). Emme, tükenme bölgesinin bir difüzyon uzunluğunda veya tükenme bölgesinin içinde meydana gelirse, bu taşıyıcılar, tükenme bölgesinin yerleşik alanı yoluyla bağlantı noktasından uzağa doğru sürüklenir. Elektronlar katoda doğru hareket eder ve delikler anoda doğru hareket ederek bir fotoakım üretir (Schmidt, Perley ve Kuehm, 2012).



Şekil 2.12. p-n bağlantılı fotodiyotunun çalışma prensibi ve sembolü

Diyotun p kısmına giren fotonlar, eğer foton enerjisi yarı iletken enerji aralığından büyükse, tükenme alanında belirli sayıda elektron-delik çifti oluşturur. Tükenme alanının elektrik alanı, elektronları iletim bandında mevcut en düşük enerji pozisyonlarını işgal ettikleri n-parçasına iterek çiftleri ayırır ve sonuç olarak delikleri değerlik bandında mevcut en yüksek enerji durumlarına iter.

2.6.1. İnorganik fotodiyotlar

Şu anda ticari olarak temin edilebilen fotodiyotların çoğu inorganik yarı iletkenlerden oluşmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yarı iletken silikon olmasına rağmen, GaP, Ga₂O₃, GaAs, AlSb, GaN, InGaAs ve hatta ZnO, HgCdTe, Ge ve CdS gibi birçok inorganik yarı iletken de yaygın olarak kullanılmaktadır (Gray, 2006; Liu ve diğerleri, 2018; Yang ve Ma, 2018).

Yük taşıyıcılığı, küçük eksiton bağlama enerjisi, yüksek stabilite, en iyi özelliklerindedir. İnorganik fotodiyotlar için bazı dez avantajlar mevcuttur, bunlar arasında pahalı ve zorlu üretim, düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek tetik voltajları gibi (Siontas, Wang, Li, Zaslavsky ve Pacifici, 2018).

2.6.2. Organik fotodiyotlar

Benzersiz özellikleri nedeniyle, organik yarı iletken tabanlı fotodiyotlar optoelektronikte bir devrim yaratmıştır.

Organik fotodiyotlar, geniş bir optik ve spektral özellik yelpazesini kapsayan çok sayıda organik yarı iletken malzeme bulunmaktadır. Bunlar hem pigmentler gibi küçük molekülleri hem de doğrusal veya dendritik mimarilere sahip konjuge polimerleri içerir. Fullerenler (C60, C70, PC60BM, PC71BM) ve P3HT, F8T2, PEDOT, PSS, PTB7-Th gibi polimerler, PPDT2FBT, DPP-DTT, PCPDTBT, PCDTBT, MEH-PPV ve P(NDI2OD-T2), tek başına veya farklı çapraz kombinasyonlarda yaygın olarak kullanılan bazı organik yarı iletken örnekleridir (Gong ve diğerleri 2009; Dhawan, Aarti, Kotnala ve Chhikara, 2017; Simone ve diğerleri 2018).

Organik yarı iletkenler yüksek yük taşıyıcıları fotojenerasyon verimi, UV'den NIR'ye ayarlanabilir optik boşluklar ve basit ve düşük maliyetli süreçler; örneğin spin-kaplama, aerosol-jet baskı, sprej-kaplama, enjeksiyon baskı veya serigrafî gibi kullanılarak geniş alanlarda film üretimi (amorf olabilir) sağlar. Fotovoltaik hücrelerde olduğu gibi, bu özellikler biyomedikal görüntüleme ve algılama, iletişim, kontrol devreleri gibi fotodeteksiyonun ötesinde geniş uygulamalama alanları sunar (Gong ve diğerleri, 2009; Wojciechowski ve diğerleri, 2009; Dhawan ve diğerleri, 2017).

Yine de organik fotodiyotlar için bazı dezavantajlar mevcuttur bunlar, sıcaklığa karşı fotoakım hassasiyeti, düşük yük taşıyıcı hareketi, kalınlığa bağımlılık, sınırlı ışık emilimi güneş spektrumunu kırmak için güçlü bir itici güce ihtiyaç duyması gibi.

2.6.3. Hibrit fotodiyotlar

Hem inorganik hem de organik fotodiyotların bazı dezavantajları ve sakıncaları olmasına rağmen, organik-inorganik hibrit fotodiyotların (HPD'ler) son birkaç yılda büyük ilgi görmesinin nedenlerinden biri de bir araya geldiklerinde bu sorunların çoğunun üstesinden gelmeleridir. Düşük sıcaklık çözelti işlenebilirliği, yüksek ışığa duyarlılık veya mekanik esneklik gibi benzersiz fiziksel özellikleri ile organik polimerik ve inorganik yarı iletkenler arasında çok sayıda kombinasyonun rasyonel tasarım özgürlüğü ile birleştiğinde, HPD'ler astronomi, nükleer fizik veya spektroskopide yeni uygulamalarla fotodiyot dünyasında devrim yarattı (Ha, Yoon, Lee ve Chung, 2016; Singh Singh Gautam ve Singh 2018)

HPD cihazları artık daha kararlı, daha uzun ömürlü ve bazı durumlarda daha düşük karanlık akımlarda çalışa bilmektedir. Bu özelliklerine dayanarak, hibrit materyal araştırmaları artarak devam etmektedir.

Son yıllarda, fotodiyotlarda, özel uygulamalar için yeni tür fotodiyotların geliştirilmesine olanak tanıyan gelişmiş malzeme ve mimarilerin kullanımına özel olarak odaklanılarak, büyük bir evrime tanık olduk. Sonuç olarak, yukarıda açıklanan elektriksel özellikler, yapının kapsamlı analizinde büyük önem taşır ve ışık ve yarı iletkenler arasındaki etkileşimin, merkezi bir rol oynadığı fotodetektörler, güneş pilleri ve ışık yayan diyotlar gibi uygulamalara yönelik cihazların optimize edilmesi ve tasarlanması için hayati öneme sahiptir. Öte yandan yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeler ve yeni nesil malzemelerin ortaya çıkmasıyla fotodiyotların bu alandaki önemi oldukça artmıştır. Fotonlara ve yüksek enerjili parçacıklara karşı yüksek hassasiyetleriyle bilinen fotodiyotlar, ters öngerilim koşulları altında etkili bir şekilde çalışarak ışığı elektrik akımına dönüştürür. Yarıiletkenin bant aralığından daha büyük enerjiye sahip ışık fotodiyota çarptığında elektron-delik çiftleri oluşur. Bağlantı noktasındaki elektrik alanı yüklerin ayrılmasını kolaylaştırır, onları nötr bölgeye yönlendirir ve elektron-delik rekombinasyonunu önler. Bu işlem, bir elektrik sinyalinin üretilmesine yol açan bir fotoakımın üretilmesiyle sonuçlanır (Farooq ve diğeri 2019; Liu ve diğeri 2019; Karabulut, Dere, Al-Sehemi, Al-Ghamdi ve Yakuphanoglu, 2021).

ZnO, tipik olarak $100 \text{ cm}^2/\text{V}'$ yi (Özgür ve diğeri 2005; Gullu, Yıldız, Kocuyigit ve Yıldırım, 2020), aşan değerlerle mükemmel elektron hareketliliği sergiler ZnO, 300K'da yaklaşık 3.37 eV 'lik doğrudan geniş bant aralığına sahiptir ve bu da onun 370 nm'ye kadar dalga boylarına sahip ultraviyole (UV) ışığı tespit etmesine olanak tanır (Goze, Karabulut, Ameen, Yıldız ve Yakuphanoglu, 2020).

Buna ek olarak, ZnO düşük karanlık akıma sahiptir, gelen ışık yoğunluğundaki değişikliklere hızla yanıt verir (mikrosaniyelerden milisaniyelere kadar), sağlamdır ve çevresel faktörlere dayanabilir, üretimi nispeten uygun maliyetlidir, büyük eksiton bağlanma enerjisine (60 meV), biyo- güvenli, biyo-uyumlu ve çevre dostudur (Özgür ve diğeri 2005; Demirezen ve diğeri 2021). Bu nedenle, ZnO'nun olağanüstü özellikleri onu fotodiyotlar için çekici bir seçim haline getiriyor; yüksek hassasiyet, hızlı tepki süreleri ve çok çeşitli dalga boylarında çok yönlülük sunar.

Öte yandan, p-Si Schottky bariyer diyotlarında (SBD'ler) arayüz malzemesi olarak çinko oksidin (ZnO) kullanılması, arayüz katmanları olmadan üretilen benzerlerine göre çok daha fazla avantaj sağlar.

Benhaliliba, ortalama akım-gerilim, kapasitans ve iletkenlik ile gerilim profillerini kullanarak (Benhaliliba, 2021). ZnO/p-Si heteroeklemleri için iletim mekanizmalarını incelemiş, açık bir şekilde tanımlamış ve metal-yalıtkan enerji bariyerinde elektrostatik etkileşimin bir sonucu olarak Schottky etkisinin azaldığını bulmuştur. Rajan ve arkadaşları metal yalıtkan arayüzündeki elektrik alanı incelemek için, Au/ ZnO /n-Si Schottky diyotları ürettir ve elektriksel özelliklerini $I-V$ ve $C-V$ karakterizasyonlarını araştırdılar (Rajan, Periasamy ve Sahula, 2016).

Doğrultma oranı 93, idealite faktörü ~ 6 , bariyer yüksekliği 0.804 eV ve 1.37×10^{-10} A doyma akımı ile diyotun doğrultucu doğasını rapor ettiler. Aydoğan ve arkadaşları Au/n'yi üretmek için elektron-biriktirme tekniğini kullandılar (Aydoğan, Çınar, Asıl, Coşkun ve Türüt, 2009). ZnO /n-Si Schottky diyotların elektriksel özelliklerini incelemek ve ideallik değerlerini bildirmek için faktör, bariyer yükseklik ve düzeltme oranlarını 1.21, 0.61 eV ve 3×10^4 olarak bildirdiler.

Maliyet etkinliği, esneklik, üretim kolaylığı ve büyük ölçekli uygulamalara uyarlanabilirlik gibi niteliklerle donatılmış organik malzemeler, organik tabanlı elektronik ve optoelektronik cihazların oluşturulmasında bunlardan yararlanmaya olan ilginin artmasına neden oldu.

Araştırmalar, organik bazlı yarı iletkenlerin çevresel ayak izinin azaltılması, daha düşük enerji tüketimi, kaynakların korunması, biyolojik olarak parçalanabilirlik, çok yönlülük ve uyarlanabilirlik, geri dönüştürülebilirlik, tehlikeli kimyasalların azaltılması, gelişmiş enerji hasadı gibi muazzam özelliklere sahip olduğunu, ayrıca geri dönüşümü basitleştirebileceğini ve giderek artan bir çevre sorunu olan elektronik atıkların imhasını kolaylaştırma bileceği değerlendirilmektedir.

Organik malzemelerin elektronik cihazlara dahil edilmesi, benzersiz özellikleri ve potansiyel uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Fitalosiyeninler (Pc) kimyasal ve termal olarak stabil olup, makrosilisik halkada 18 π elektrondan oluşan π -sistemi, görünür bölgede (400-700 nm) ışık soğurma duyarlılığına sahiptir ve merkeze farklı metaller dahil edildiğinde

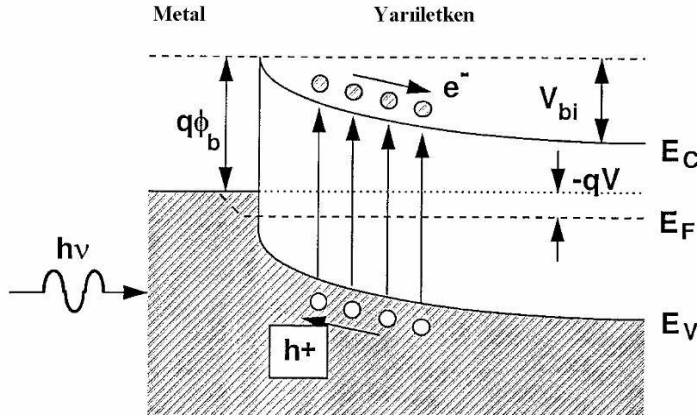
metaloftalosiyenin adı verilmektedir (Urbani, Ragoussi, Nazeeruddin ve Torres, 2019; Demirel ve diğeri, 2020). Bunların arasında bakır ftalosiyenin (CuPc), Schottky diyotlarda arayüz malzemesi olarak büyük umut vaat etmektedir. CuPc, mükemmel yük taşıma özellikleri, yüksek termal stabilite ve iyi tanımlanmış bir enerji seviyesi yapısı sergileyen organik bir yarı iletkenidir. CuPc, organik fotovoltaiklerde (OPV'ler) Schottky diyotlarda arayüz malzemesi olarak başarıyla kullanılmıştır.

Hibrit kompozit filmler üretmek için bir takım girişimlerde bulunulmasına rağmen, özellikle metal-ftalosiyenin kompozit hibrit malzemelerin oluşturulması konusunda yalnızca birkaç girişimde bulunulmuştur. Wang ve diğeri, indiyum kalay oksit substratlar üzerinde, Ni katkılı CuPc filmler oluşturdu ve yapısal analiz gerçekleştirdi (Wang, Zheng, Qiao, Qu ve Cao, 2014). Filmlerin düz yüzey morfolojisine sahip olduğunu ve CuPc filmlerinin başlangıçtaki amorf fazını koruduğunu, yalnızca kristalit boyutlarında veya kristallikte değişiklikler ve artan Ni katkı seviyeleriyle taşıyıcı taşınmasının modifikasyonunu gösterdiğini buldular.

Reddy ve ark. Al/n-tipi Si SBD'ler için oda sıcaklığında çeşitli Au ve CuPc bileşimlerine sahip Au- CuPc filmler gibi fabrikasyon organik-inorganik hibrit kompozit ara katmanlar oluşturdu ve Al/n-tipi Si'nin Φ_{Bo} , n ve R_s değerlerini buldular (Reddy ve diğeri 2020). Au-CuPc ara katmanına sahip SBD'ler Au içeriğinin artmasıyla azaldı. Tatar ve ark. Kimyasal sprej piroliz tekniğini kullanarak organik-inorganik hibrit Ag/p-CuPc/a-Si/n-Si/Ag ve Ag/p-CuPc/a-Si/p-Si/Ag heteroeklem fotovoltaik cihazları üretti. p-CuPc/a-Si/c-Si hibrit heterojonksiyonlu fotovoltaik cihazların elektriksel ve morfolojik özelliklerinin, cihaz performansı, kararlılığı ve güvenilirliği açısından oldukça umut verici olduğunu bildirdiler (Tatar, Demiroğlu ve Ürgen, 2013).

2.6.4. Metal-yarıiletken fotodiyotlar

Bir fotodiyot, elektronik işlemler sırasında optik sinyaller üreten ve yüksek bir elektrik alanıyla boşaltılmış yarı iletken bir bölgede serbest yük taşıyıcılarına sahip bir sensördür. Tükenme bölgesinde oluşan fototaşıyıcılar, yüksek alanın varlığı nedeniyle malzemenin kenarında toplanır. Şekil 2.13'de bir metal-yarı iletken (Schottky) bağlantısının tipik bir enerji bandı diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Aydınlatılan Schottky eklemesinin diyagramı

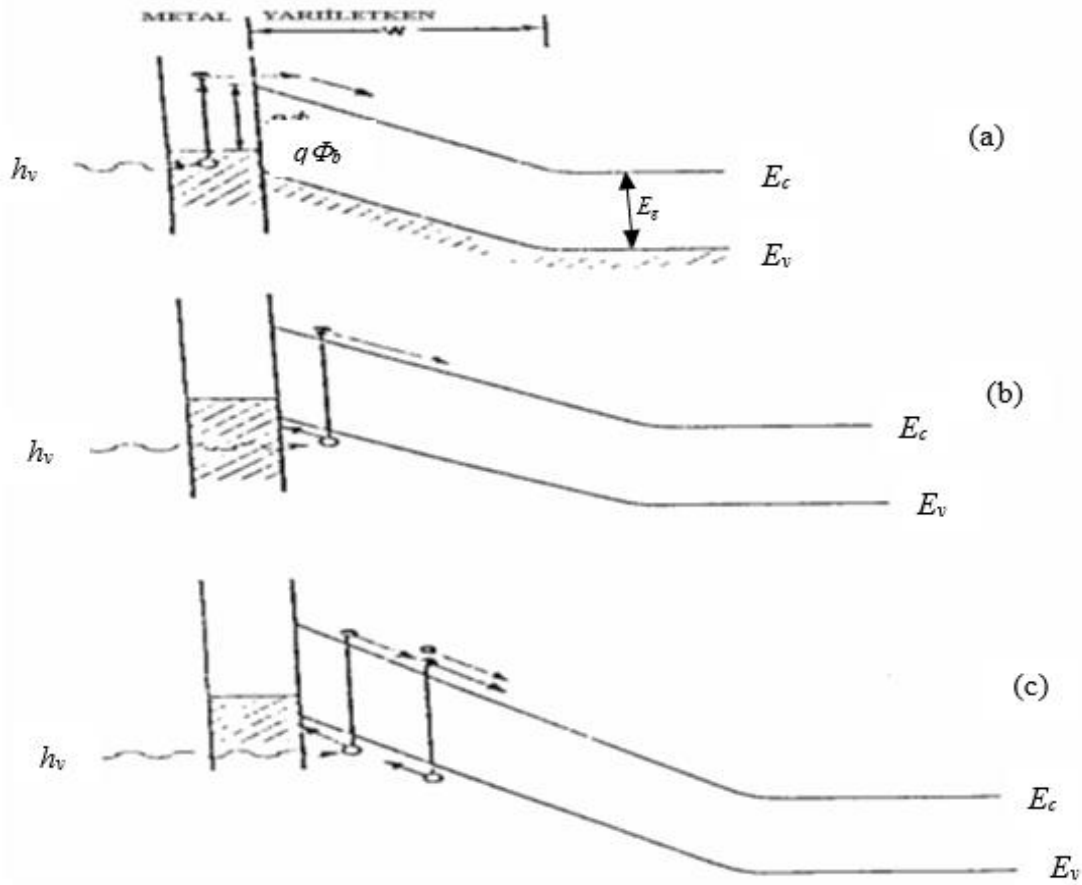
Yüksek verimli fotodetektörler için bir metal-yarı iletken diyot kullanılabilir. Foton enerjisine ve potansiyel fark eğimine bağlı olarak, farklı diyot türleri düşünülebilir.

Diyotun üç çalışma modu vardır ve bunlar;

1) $E_g > h\nu > q\Phi_b$ ve $V < V_B$ için Şekil 2.14a' burada V_B bariyer aşma (çığ kırılma) voltajıdır, metaldeki foto uyarılmış elektronlar bariyer potansiyelinin üstesinden gelebilir ve yarı iletkende toplanabilir. Bu süreç, Schottky bariyer yüksekliğini ve metal filmdeki sıcak-elektron geçişini belirlemek için kullanılır.

2) $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için Şekil 2.14b' radyasyon yarı iletkende delik-elektron çifti üretir ve diyotun genel karakteristiği p-i-n fotodiyotuna benzer.

3) $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ için, yani yüksek ters ön gerilim için, Şekil 2.14c diyot fotodiyot olarak çalışabilir (Türkmen, 2002). Yani, bu koşullar altında diyot çığ kırılma bölgesinde çalışabilir.



Şekil 2.14. a) Uyarılmış elektronların metalden yarı iletkene fotoelektrik emisyonu ($E_g > h_v > q\Phi_b$) b) delik-elektron çiftinin banttan banda uyarılması ($h_v > E_g$), c) büyük ters voltaj uygulaması altında delik-elektron çifti üretimi ve çıkış oluşumu ($h_v > E_g$ ve $V = V_B$)

Temel olarak, fotodiyotun çalışması diyot kavşağı içindeki foto taşıyıcıların yer değiştirmesine dayanır. Doğrultucu bağlantı noktasına ışık geldiğinde, yeterli enerjiye ($h_v > E_g$) sahip fotonlar emilir. Oluşan fazla elektronlar ve delikler difüzyon bağlantı alanı boyunca yayılır ve diyotun farklı taraflarında toplanır. Diyot harici bir yüke bağlanırsa, emilen fotonların ve oluşan taşıyıcıların sayısı ile orantılı bir akım üretilir (Bıyıklı, 1998) Fotodiyotlar, diyotun yapısına ve kontakların türüne bağlı olarak p-n bağlantı diyotları, Schottky diyotları, p-i-n diyotları ve heterojonksiyon diyotları olarak sınıflandırılırlar.

Schottky fotodiyotlar görünür ışığın (UV) algılanması için mükemmeldir ve mevcut en hızlı yarı iletken fotodetektörlerdir. Bununla birlikte, bu diyotlar ince soğurma bölgeleri ve yüksek katkılı metal katmanları nedeniyle düşük verime sahiptir.

Böyle bir diyot, Şekil 2.15'de gösterildiği gibi fotodeteksiyon için kullanılabilir. Yeterince yüksek ön gerilimler uygulayarak, tüm n-bölgesi tüketilebilir, yani bu bölge boyunca sürekli bir elektrik alanı oluşturulur. Yeterli enerjiye sahip fotonlar tükenme bölgesinde emilerek elektron-delik çiftleri oluşturur.

Bir fotodiyot, anot ve katot olmak üzere iki elektrik kontağına sahip bir yarı iletken den oluşur. Şekil 2.15 bir fotodiyotun yapısını göstermektedir. Bir yarı iletkenin bant aralığından daha yüksek enerjiye sahip fotonların yarı iletken katman içinde emilme olasılığı vardır.

Böyle başarılı bir soğurma, serbest bir elektron-delik çiftinin oluşmasından kaynaklanır. Kontaklara bir ters ön gerilim uygulanırsa, yani anot katottan daha düşük bir potansiyele sahipse, yarı iletken boyunca bir elektrik alanı oluşturulur.

Elektronlar ve delikler zıt yönlerde sürüklenir, yani elektronlar katoda doğru, delikler ise anoda doğru sürüklenir. Böyle bir taşıma işlemi dış devrede bir elektrik akımı yaratır, bu akıma fotoakım denir. Sonuç olarak, fotodeteksiyon olayı şu şekilde özetlenebilir,

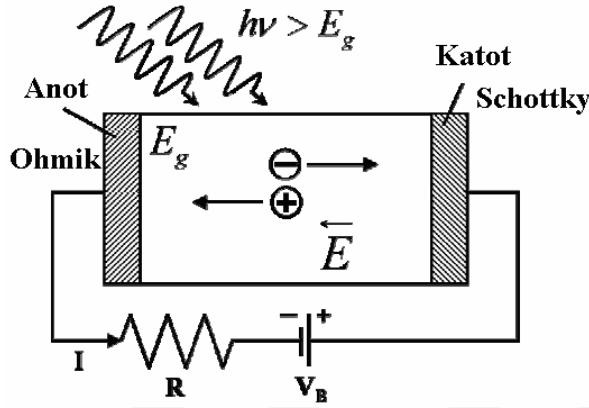
- 1) Fotonların soğurulması ve yarı iletken de taşıyıcıların oluşması,
- 2) Taşıyıcıların yerel elektrik alanı altında sürüklenmesi,
- 3) Malzeme temas noktalarında taşıyıcıların toplanması.

Yarı iletken malzeme içindeki fotodiyot üzerine düşen fotonların yayılımı ışığın dalga boyuna bağlıdır. Düşük dalga boylu ışınlar (ultraviyole) yüzeyde emilirken, kızılötesi ışınlar yarı iletkenin derinliklerine doğru ilerler.

Diyotun yapısına ve kontakların türüne bağlı olarak, Schottky fotodiyot, metal-yarı iletken-metal (MSM) fotodiyot, p-i-n fotodiyot, çığ fotodiyot ve foto transistörler gibi çeşitli fotodiyot türleri vardır (Bhattacharya, 1994).

Schottky fotodiyotlar çoğunluk taşıyıcı malzemeler olarak bilinir. Bu özellik, yüksek hızlı algılamının gerekli olduğu uygulamalar için Schottky fotodiyotlara olan ilgiyi artırmıştır. Fotoyanıt açısından Schottky fotodiyotlar, yüksek oranda emici ve yansıtıcı metal Schottky katmanını nedeniyle düşük verimlilikten muzdariptir.

Bu durum, şeffaf temas malzemeleri kullanılarak veya daha karmaşık arka aydınlatmalı heteroyapı tasarımları kullanılarak aşılabılır. Monopolar Schottky ve MSM (metal-yarı iletken-metal) fotodiyotlar, bir tür katkılama ile kolayca geliştirilebilir



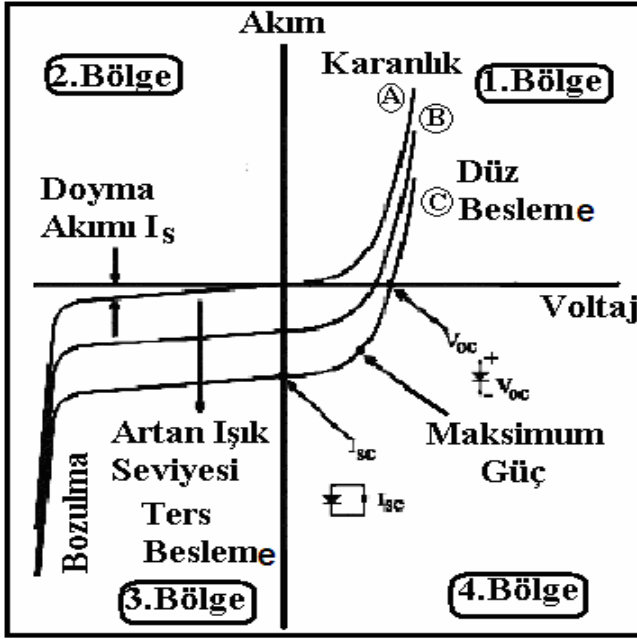
Şekil 2.15. Fotodiyotun yapısı

Fotoyanıt veya malzeme verimliliği açısından, dikey olarak aydınlatılmış MSM ve Schottky fotodiyotlar, metalik Schottky kontakların optik kaybindan yoksundur. Bu kayıp, çok ince (<100 Å) yarı iletken metalik kontaklar kullanılarak azaltılabilir. Bu kaybın tamamen ortadan kaldırılması, metalik olmayan, oldukça şeffaf iletken malzemeler kullanılarak mümkündür. Bir başka alternatif çözüm de aydınlatma düzenini değiştirmektir. Arkadan aydınlatmalı (alt tabaka tarafı) Schottky ve MSM fotodiyotların üst yüzeylerinde kalın Schottky metalleri olabilir, ancak alt tabaka ve orta malzeme katmanları çalışma dalgaboyunda şeffaf olmalıdır. Arkadan aydınlatmalı heteroeklem yapılar, Schottky ve MSM fotodiyotlar için düşük verimlilik sorununun üstesinden gelebilir. Schottky ve MSM fotodiyotların p-i-n fotodiyotlardan daha yüksek hız özelliklerine sahip olması beklenmektedir. Schottky bağlantılarının doğası büyük ölçüde yarı iletken yüzeyin özelliklerine bağlıdır. Yüzey koşulları, yüzey kusurları ve ince oksit tabakaları gibi dış etkiler Schottky bağlantılarının kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Schottky ve MSM fotodiyotlarının malzeme performansı yüzey özelliklerinden doğrudan etkilenir. Sonuç olarak, bu malzemelerle sabit verimlilik elde etmek zordur (Bıyıklı, 2004).

2.6.5. Fotodiyotların akım-voltaj karakteristiği

Bir fotodiyodun akım-voltaj ($I-V$) karakteristiği, diyot kavşağındaki akım taşıma süreçleri tarafından belirlenir. Metal-yarı iletken bağlantılarına (Schottky ve MSM fotodiyotları) ve p-n bağlantılarına bağlı fotodiyotlarda farklı akım taşıma mekanizmaları oluşabilir (Bıyıklı, 2004). Bir fotodiyotun akım-voltaj karakteristiği normal bir diyotunkine benzer şekildedir. Şekil 2.16' da bir fotodiyodun karanlık ve aydınlık durumlardaki akım-voltaj karakteristiği gösterilmektedir. Fotodiyodun hassas yüzeyine ışık düşmediğinde, fotodiyottan akan akım, termal yol boyunca azınlık taşıyıcıları tarafından üretilen akımdır. Bu akıma karanlık akım denir. Şekil 2.16' da A eğrisi fotodiyodun karanlık durumdaki akım-gerilim karakteristiğini, B ve C eğrileri ise fotodiyodun aydınlık durumdaki akım-gerilim karakteristiğini göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, karakteristikler dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci (1) bölgede akım ve gerilim değerleri pozitifdir. Bu bölgede fotodiyoda doğru polaritede bir gerilim uygulanır, yani bu bölge fotodiyodun doğru besleme bölgesidir. Ayrıca bu bölge fotodiyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede fotodiyot normal bir diyot gibi davranır. İkinci (2) bölgede, fotodiyotun hiçbir yanıtı yoktur. Üçüncü (3) bölgede ise sadece çok küçük bir akım I_s akar. Fotodiyotun aktif alanına düşen ışığın yoğunluğu artırıldığında, bu bölgedeki eğriler negatif akım yönünde tamamen aşağıya doğru kayacaktır. $V=0$ ekseninde, bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa devre akımını I_{sc} verir. Sıfır akım noktalarında, eğrilerin gerilim eksenini kestiği noktalar açık devre gerilimini V_{oc} 'yi verir. Çok yüksek ters öngerilim voltajlarında akım hızla artar ve diyot bozulabilir. Bu bölge ters arıza bölgesidir. Bu nedenle üçüncü (3) bölge ters polarite geriliminin uygulandığı bölgedir ve ışığı algılamak için uygundur (Johnson, 2003). Dördüncü (4) bölge fotodiyotun fotovoltaik bölgesidir.

Fotodiyotların üç ana özelliği vardır: akım-voltaj, kuantum verimliliği ve bant genişliği (çalışma hızı). Bir fotodiyotun performansı bu üç özellik ile ölçülür. Düşük karanlık akım ve yüksek kırılma gerilimi diyot bağlantı kalitesinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akım daha yüksek hassasiyet anlamına gelir ve aydınlatılmadığında ve ters önyargı altında diyottan akan akımdır.



Şekil 2.16. Fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım-gerilim karakteristikleri (Johnson, 2003)

Bir fotodiyot yeterince yüksek bir ters öngerilime maruz kaldığında, çığ kırılma bölgesinde çalışır. Bu ters ön gerilim değeri, kırılma gerilimine karşılık gelir ve fotodiyodun çalışması için uygulanabilecek ters ön gerilim sınırını belirler. Bu değerden sonra diyotun çalışmasını kazanç ve çarpma mekanizmaları gerçekleştirmeye başlar (Sze ve Gibbons, 1966).

Fotodiyot temelde bir akım kaynağıdır ve yeterli ışık aldığı anda çalışmaya başlar. Işık, fotodiyotta zayıf bir akım oluşmasına neden olur. Fotodiyoda bir voltaj uygulanması sonucunda ve devrede bir yük direncinin varlığından dolayı bir fotoakım üretilir. Bu yük, harici devre direncinin toplamıdır. Fotoakım etkilidir çünkü küçük bir kısmı iç direnç üzerinde üretilirken, büyük bir kısmı dış devre direnci üzerinde üretilir. Bu nedenle, fotodiyot bir voltaj kaynağı (fotovoltajik) veya bir akım kaynağı (iletken bölge) olarak kullanılabilir. Bir Schottky fotodiyodun doğru akımını analiz ederek, ters doyma akımı, bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi diyot parametreleri belirlenebilir. I_0 ve Φ_b , $V=0$ 'daki düz öngerilim akımına uydurularak bulunabilir. n idealite faktörü, düz $I-V$ eğrisinin (dV/dI) eğimi ile belirlenir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu projede hazırlanan hibrit fotodiyotların oda sıcaklığında farklı ışık şiddetleri altında ve geniş bir voltaj aralığında akım-voltaj ilişkileri incelendi ayrıca hem geniş bir frekans hem de voltaj aralığında ölçümleri detaylıca yapılarak incelendi.

3.1. Deneysel İşlemler ve Yöntemler

Hazırlanan organik Bakır Fitalosiyanın (CuPc) inorganik çinko oksit (ZnO) ile belirlenen oranlarda karıştırılıp p-Si alttaş üzerine ince film kaplanarak hibrit SBD lar oluşturuldu. Çalışmada, Al/p-Si (metal/yarı iletken) arayüzünde değişen oranlarda CuPc (% 5, % 10 ve % 20) katkılı bir ZnO ara katmanı kullanıldı ve optoelektronik karakterizasyonu için gerekli olan parametrelerin hesaplanabilmesi için fotodiyotların akım-voltaj ($I-V$) ve fotoiletkenlik ölçümleri yapıldı.

3.2. Farklı CuPc Oranlarına Sahip Bir Cupc Katkılı ZnO Malzemesinin, Sol-Jel Yöntemiyle İnce Flimlerinin Hazırlanması

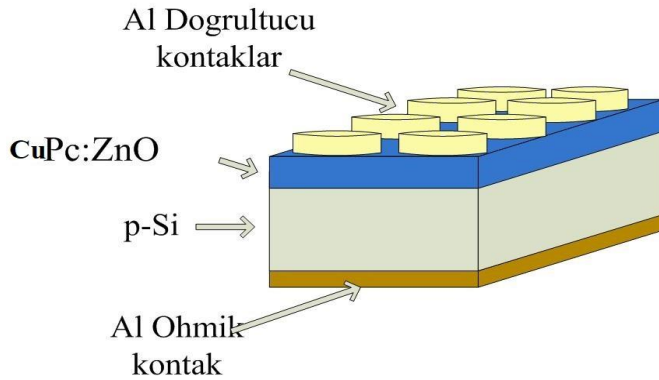
Değişen CuPc oranlarına sahip bir CuPc katkılı ZnO malzemesi, sol-jel yöntemiyle sentezlendi ve p-tipi Silikon (Si) substratlar üzerine ince filmler halinde biriktirildi. Silikon substratlar 600 μm kalınlığa, 5-10 $\Omega\text{-cm}$ dirence ve $\langle 111 \rangle$ yönelime sahipti. Başlangıçta çinko kaynağı olarak çinko asetat dihidrat $[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ kullanıldı. Ayrıca 2-metoksietanol ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{-CH}_2\text{OH}$) çözücü görevi görürken monoetanolamin $[(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{NH}_2]$ stabilizatör görevi gördü. Bakır fitalosiyanın çözeltileri dimetilformamid (DMF: $(\text{CH}_3)_2\text{NC(O)H}$) içerisinde ayrı ayrı hazırlandı. Bir p-tipi Si levhanın arka tarafında termal buharlaştırma sistemi kullanılarak buharlaştırılan alüminyum (Al) metali vardı. Daha sonra p-Si/Al teması, direnci azaltmak için nitrojen (N_2) atmosferinde 550°C 'de 5 dakika süreyle termal işleme tabi tutuldu. Daha sonra çeşitli oranlarda CuPc katkılı ZnO malzemeleri [ağırlıkça % 5, ağırlıkça % 10 ve ağırlıkça %20] hazırlandı.

3.3. Fotodiyotların Üretilmesi

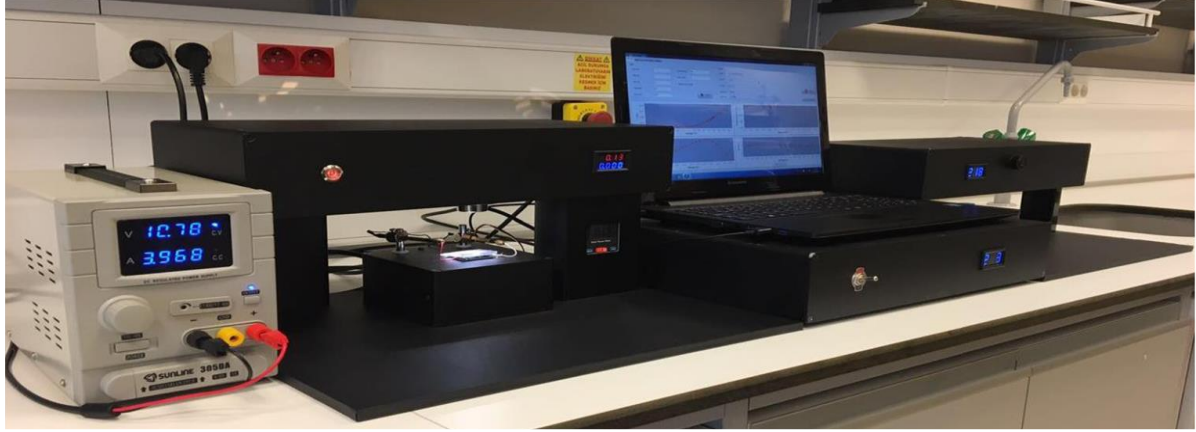
Fotodiyotların üretimi için farklı oranlarda hazırlanan, CuPc katkılı ZnO malzemelerin [ağırlıkça % 5, ağırlıkça % 10 ve ağırlıkça % 20] ,

- 1) Karışımların homojen ve şeffaf olması için 70°C'de 3 saat karıştırıldı,
- 2) Bu işlemten sonra ve silikon üzerine kaplanmadan önce nihai karışımların oda sıcaklığında 24 saat boyunca stabil hale gelmesi sağlandı,
- 3) Ara katman malzemeleri hazır olduğunda, kimyasal olarak temizlenmiş ve omik kontaklar oluşturmak üzere alüminyuma bağlanmış olan silikon, alt tabaka üzerine kaplama kullanılarak 2000 rpm'de döndürerek uygulandı.
- 4) Kaplama süresi 8 saniyeye ayarlandı. 0.5 mm yarıçaplı alüminyumdan yapılmış redresör kontakları, bir gölge maskesi kullanılarak film kaplı alt tabakalar üzerinde üretildi.

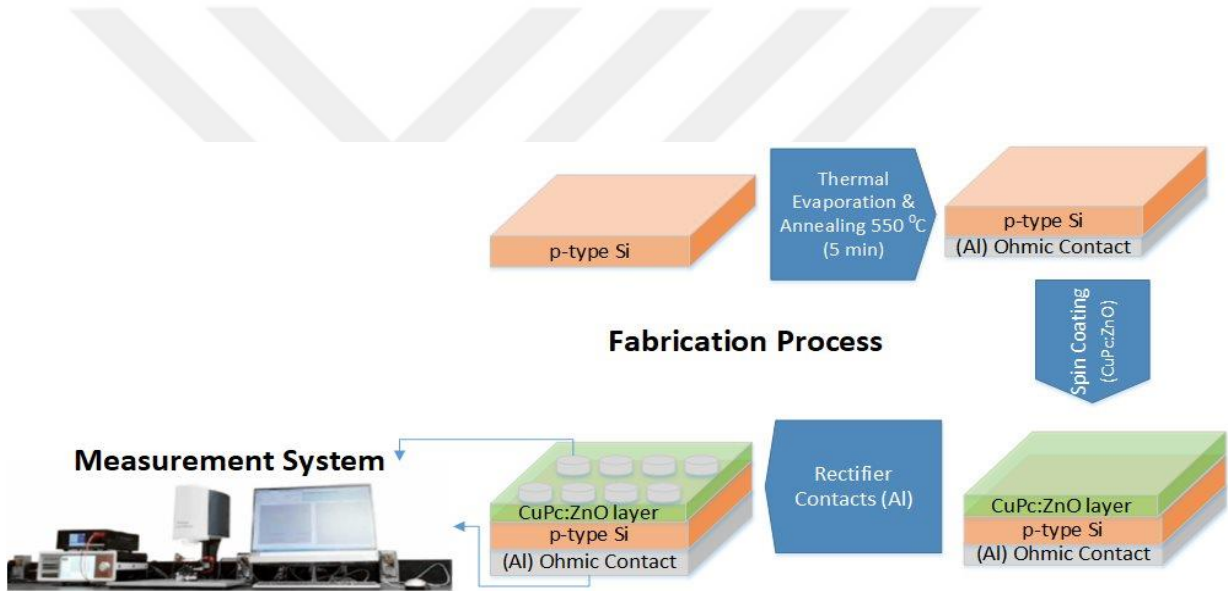
Üretilen Al/CuPc:ZnO/p-Si/Al yapının şematik gösterimi Şekil 3.1' de verilmiştir. Diyotların elektriksel özellikleri, Şekil 3.2' de gösterilen Fytronix 9000 Solar *I-V/C-V* karakterizasyon sistemi kullanılarak değerlendirildi. Üretilen cihazların şematik gösterimi Şekil 3.3'de sunulmaktadır. Bu sistem, AA sınıfı bir güneş simülatörü, bir kaynak ölçer ve bir *C-V* analizörünü içeriyordu. Diyotun fotoelektrik performansı çeşitli aydınlatma koşulları altında analiz edildi.



Şekil 3.1. Al/CuPc:ZnO/p-Si/Al yapının şematik gösterimi



Şekil 3.2. Fytronix 9000 Solar I - V / C - V karakterizasyon sistemi



Şekil 3.3. Elektrikli cihazların karakterizasyonuna yönelik şematik diyagram

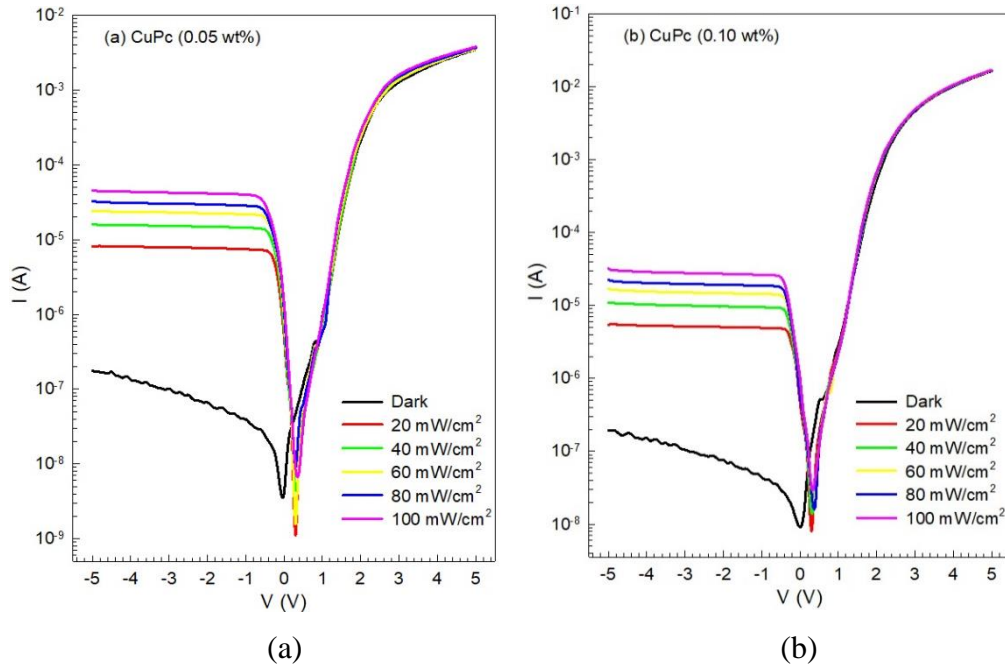
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

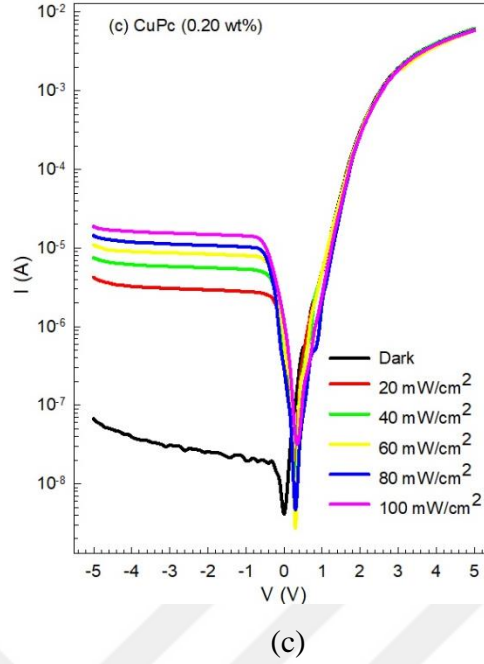
Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların elektriksel özellikleri akım-voltaj $I-V$ ve $C/G-V$ ölçümleri kullanılarak hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri için detaylıca incelendi.

4.1. Optoelektronik Özellikler

Aydınlatma yoğunluğu, çalışma frekansı ve uygulanan voltaj gibi faktörlerin hem ters hem de ileri öngerilim konfigürasyonlarında $I-V$ ve $C/G-V$ özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak gerekir. Metal ve yarı iletken arasındaki arayüzde ister oksit ister polimer (organik veya inorganik) olsun ince bir yalıtım katmanı içeren MS mimarileri, özellikle ters öngerilim bölgesinde ışığa karşı yüksek hassasiyet gösterir.

Gelen fotonların enerjisi yarı iletkenin bant aralığını aştığında, orta aralık bölgesinin yakınında önemli sayıda elektron-delik çifti üretilebilir. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar durumunda, çeşitli CuPc konsantrasyonları (ağırlıkça % 5, % 10 ve % 20) kullanıldı ve bunların ileri ve geri eğilim $I-V$ özellikleri hem karanlık hem de aydınlık koşullar altında incelenmiştir. Sonuçlar şekil 4.1(a-c)' de gösterilmiştir.





Şekil. 4.1. Hem karanlık hem de aydınlık koşullarda gerçekleştirilen ölçümlerle, farklı konsantrasyon seviyeleri altında ağırlıkça (a) % 5 CuPc, (b) % 10 CuPc ve (c) % 20 CuPc içeren Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlarının akım-voltaj (I - V) özellikleri

Bu şekillerde görüldüğü üzere Şekil 4.1(a-c)' de özellikle ters öngerilim bölgesi içinde, aydınlatma yoğunluğu arttıkça fotoakımının (I_{ph}) belirgin şekilde arttığı açıktır. Bu olgu, her bir diyot içindeki ileri öngerilim bölgesi ile karşılaştırıldığında ters öngerilim bölgesindeki daha yüksek elektrik alan kuvvetine atfedilebilir. Ters öngerilim akımının artması, aydınlatma etkisinin neden olduğu elektron-delik çiftlerinin oluşmasından kaynaklanır. Daha basit bir ifadeyle, ışığa maruz kaldığında önemli sayıda elektron-delik çifti üretilir ve bu da fotoiletken davranışa yol açar. Bu davranış, değerlik bandındaki elektronların iletim bandına geçiş için yeterli enerjiyi ($hc/q\lambda \geq E_g$) absorbe etmesiyle açıklanabilir. Elektron-delik çiftlerinin rekombinasyonu, ters öngerilim bölgesinde yüksek bir elektrik alanının etkisi altında engellerle karşılaşırken, mevcut daha düşük elektrik alan kuvveti nedeniyle ileri öngerilim bölgesinde daha kolay yeniden birleşme eğilimi gösterirler.

Tipik olarak fotoiletkenlik davranışı aşağıdaki denklem kullanılarak karakterize edilebilir:

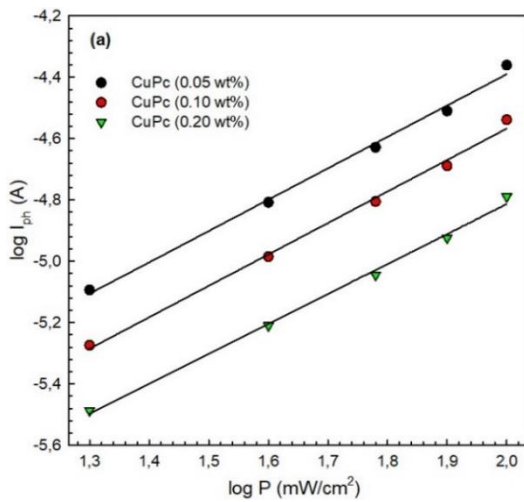
$$I_{ph} = AP^m \quad (16)$$

Bu denklemde I_{ph} fotoakımı, A sabit, P Aydınlatma yoğunluğunu ve m ise aydınlatma yoğunluğuyla bağlantılı bir üssü temsil eder. Denklem 16' nın her iki tarafının logaritmasını alarak şu sonuca ulaşırız.

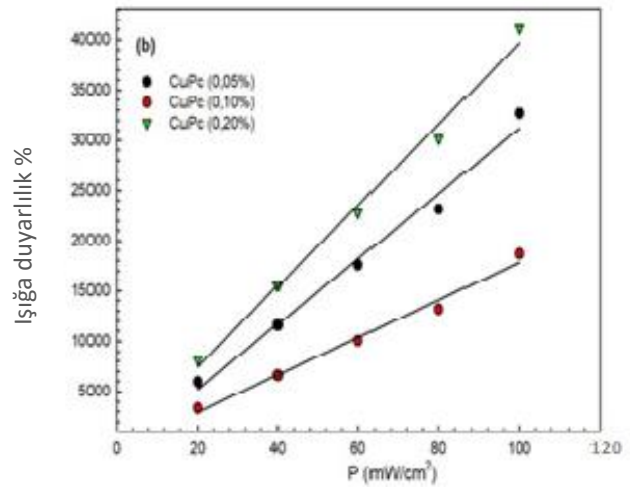
$$\log I_{ph} = m \log P + B \quad (17)$$

Denklem 17' de, B , $\log A$ 'ya eşittir ve m , $\log(I_{ph})$ ve $\log(P)$ grafiğinin doğrusal kısmının eğiminden belirlenebilir. Şekil 4.2a' da -5V'da değişen CuPc konsantrasyonlarına (% 5, % 10 ve % 20) sahip her bir diyot için $\log(I_{ph})$ ve $\log(P)$ grafiklerini göstermektedir. Bu konsantrasyonlarla fotodiyotlar için elde edilen m değerleri sırasıyla 1.03, 1.03 ve 0.97 olarak bulunmuştur. " m " değeri, diyot örneğinde rol oynayan fotoiletken mekanizma tipinin bir göstergesi olarak hizmet eder. " m " 0.5 ila 1 aralığına düştüğünde fotoiletkenlik süreci tuzak seviyeleriyle ilişkilendirilir. Tersine, eğer " m " 1'i aşarsa, önceki araştırmalarda belgelendiği gibi, fotoiletken mekanizma boş tuzak seviyelerinin daha düşük yoğunluklarıyla bağlantılıdır (Al-Ghamdi ve diğerleri, 2015; Yükseltürk, 2021; Yıldırım, 2019; Demirezen, 2022). Bu çalışmada gözlemlenen " m " değerlerine dayanarak, fotoakımın, altta yatan fotoiletkenlik sürecinin göstergesi olan doğrusal bir fotoiletkenlik davranışı sergilediği görülür.

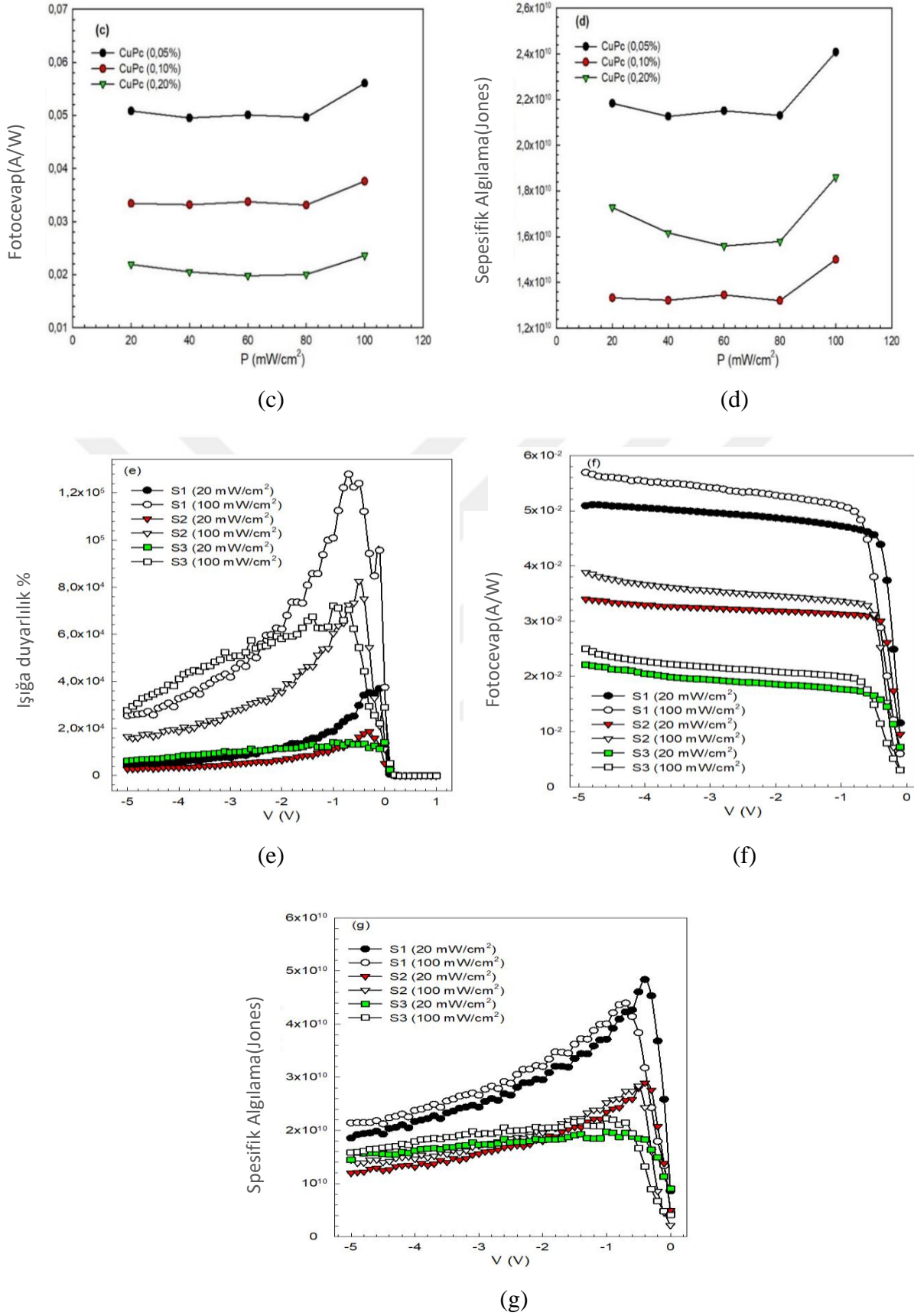
Bu bulgular, Al/CuPc:ZnO/p-Si Schottky bariyer diyotlarının oldukça etkili fotodiyotlar veya foto cihazlar olarak hizmet etme potansiyeline sahip olduğunu gösterir.



(a)



(b)



Şekil 4.2. (a-g) grafiklerinde Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar için aydınlatma ve voltaja bağlı parametreler

Diğer taraftan, bir fotodetektörün doğrusal dinamik aralığını (LDR), fotodetektörün mevcut tepkisinin gelen ışığın yoğunluğu ile doğrusal ve orantılı bir ilişki gösterdiği aralık olarak tanımlarız. Bu ilişki şu şekilde anlatılmaktadır.

$$LDR = 20 \log \left(\frac{J_{\max}}{J_{\min}} \right) \quad (18)$$

Burada J_{\max} maksimum ve J_{\min} minimum gözlemlenen akım yoğunluklarıdır. -5V'da LDR değerleri sırasıyla S1=14.65, S2= 14.71 ve S3= 13.96 olarak hesaplandı. LDR, geniş bir ışık yoğunluğu yelpazesinde etkili bir şekilde çalışması gerektiğinden görüntü sensörleri için çok önemlidir. Basitçe ifade etmek gerekirse, çeşitli aydınlatma koşullarında net ve ayrıntılı görüntülerin yakalanabilmesini sağlamak için yeterince geniş bir LDR'ye sahip olmak çok önemlidir (Demirezen 2022; Ko, Park, Son ve Chung, 2020; Zhao, Li ve Shen, 2018). Bu bulgulara göre Al/CuPc:ZnO/p-Si yapılarının foto-cihazlar ve görüntü sensörleri gibi uygulamalara çok uygun olduğu görülmektedir. Işığa duyarlılık, spesifik algılama üzerindeki aydınlatma ve önyargı etkisi Şekil 4.2' de gösterilmiştir.

Denklem (19), optoelektronik cihazların ışığa duyarlılığını (S) hesaplamak için kullanılabilir; bu, şu şekilde ifade edilir.

$$S(\%) = \left(\frac{I_{\text{photo}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{dark}}} \right) \times 100 \quad (19)$$

Işığa duyarlılık ile ışık yoğunluğu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 4.2b' de sunulmaktadır. S ve I_{ph} arasında doğrusal bir korelasyon olduğundan, gelen ışığın artan yoğunluğuyla birlikte S ' nin değeri de artar. Işık yoğunluğunun artmasıyla birlikte ışığa duyarlılıktaki bu artış, Al/CuPc:ZnO/p-Si SBD'lerin fotoiletken özelliklerine atfedilebilir. Sonuçlar aynı zamanda fotodiyota benzer bir şekilde çalıştığını da gösteriyor. Temel olarak, artan ışık yoğunluğuna bağlı olarak foto üretilen taşıyıcıların miktarındaki artışın, fotodiyotun foto akımında bir artışa yol açtığı sonucuna varılabilir (Tataroğlu ve diğerleri 2019).

Bu değerlendirme aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir;

$$R = \frac{I_{photo} - I_{dark}}{PA} \quad (20)$$

$$D^* = R \sqrt{\frac{A}{2qI_d}} \quad (21)$$

burada (q) temel yük ve (A) aktif alandır. 21. Denklemden gösterildiği gibi yüksek tespit edilebilirlik, yalnızca yüksek hassasiyet (yüksek fotoakım) değil aynı zamanda düşük karanlık akım (düşük gürültü) gerektirir. Aydınlığa bağlı R ve D^* grafikleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir. R ve D^* değerleri, bu şekillerde görülebileceği gibi ışık yoğunluğuna güçlü bir şekilde bağlıdır. Her iki şekilde de görülebileceği gibi, R ve D^* yüksek yoğunluklarda düşük yoğunluklara göre daha yüksektir. Ek olarak R , uygulanan voltajın artmasıyla kısmi bir artış gösterir. S1 fotosensörünün en yüksek R değeri yaklaşık 50 mA/W idi ve bu değer öngerilim azaldıkça azalır. Al/CuPc:ZnO/p-Si'nin yukarıdaki tüm aydınlatma özellikleri onun bir fotodiyot olarak kullanılabilmesini göstermektedir.

CuPc katkılı varyantlar içeren yapılarıdaki ileri öngerilim I - V özelliklerinin, özellikle ara öngerilimlerine ($V \geq 3kT/q$) odaklanarak değerlendirilmesini kolaylaştırır. Bu değerlendirme aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılacaktır (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams 1988).

$$I = I_o \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \quad (22)$$

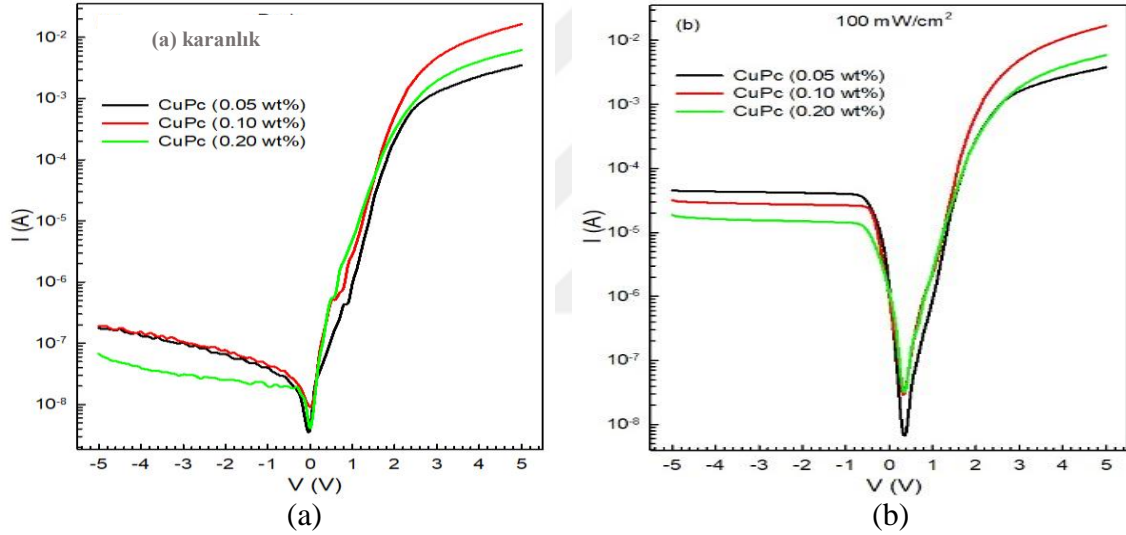
$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_s)}{d(\ln(I))} \quad (23)$$

Denklemler 22 ve 23 de, (I_o) ters öngerilim doyma akımıdır, n ise idealite faktörüdür. Bu parametreler $\ln I$ - V ' nin doğrusal bölümünün kesişimi ve eğiminin analiz edilmesiyle belirlenir. Bariyer yüksekliği (Φ_B), I_o değerinden aşağıdaki formül kullanılarak elde edilir.

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_o} \right) \quad (24)$$

" T " Kelvin derece cinsinden ölçülen mutlak sıcaklıktır, " k " ise Boltzmann sabitidir. Ek olarak " A^* ", p tipi silikon için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ olan etkili Richardson sabitini temsil eder.

Düzeltilme oranı (RR), I_o ve n özelliklerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için Al/CuPc:ZnO/p-Si farklı CuPc içerikli fotodiyotların yarı logaritmik ileri ve geri polarizasyon I - V karakteristikleri karanlık koşullar için Şekil 4.3a' da ve 100 mW/cm^2 aydınlatma yoğunluğu altında Şekil 4.3b' de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların farklı CuPc içeriklerine sahip fotodiyotlar (a) karanlıkta (b) 100 mW/cm^2 aydınlatma yoğunluğu altında I - V özellikleri

Çizelge 4.1. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyot I - V ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametreler

	Karanlık						100 mW/cm ² 'nin altında				
	RR ($\times 10^4$)	I_o (A) ($\times 10^{-9}$)	n	Φ_B (eV)	R_s (Ω)	R_{sh} (M Ω)	I_o (A) ($\times 10^{-9}$)	n	Φ_{Bo} (eV)	R_s (Ω)	R_{sh} (k Ω)
S1 (ağırlıkça % 5)	1.9	0.11	8.26	0.73	1490	28	0.28	4.95	0.81	1370	106
S2 (ağırlıkça % 10)	8.6	7.61	4.45	0.74	319	26	2.06	5.44	0.77	308	156
S3 (ağırlıkça % 20)	9.2	5.19	4.01	0.75	836	93	5.60	5.60	0.76	881	273

Düzeltilme oranını (RR), I_o ve n 'yi değerlendirmek için, kullanılan CuPc miktarlarını değiştirilerek Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlarının yarı logaritmik $I-V$ grafiğini inceledik. Şekil 4.1' de gösterildiği gibi yapılar hem fotovoltaiik hem de mükemmel doğrultucu davranış sergiledi (± 5 V'de, 10^4), bu da kaçak akımda önemli bir azalmaya neden oldu. Daha yüksek CuPc içeriği, ters öngerilimdeki yük ayrımını önemli ölçüde azaltır ve buna karşılık ters akım önemli ölçüde azalır, böylece S3'ün ters akımı S1 ve S2'ninkinden daha azdır.

Çizelge 4.1' de S1, S2 ve S3 için 1.9×10^4 , 8.6×10^4 ve 9.2×10^4 olarak belirlenen $RR = I_F / I_R$ değerleri gösterilmektedir. ± 5 V' da, ağırlıkça % 20 CuPc içeren yapının daha rektifiye olduğu açıktır. Bu, S3'ün kaçak akımının diğerlerine göre oldukça azaltıldığı anlamına gelir. Çizelge 4.1'de ayrıca I_o , n ve Φ_B Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyot değerleri, hem karanlık hem de aydınlık koşullar altında (100 mW/cm^2 'de) TE teorisi kullanılarak elde edilen Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar için I_o , n ve Φ_B değerleri görülmektedir. CuPc konsantrasyonlarının ağırlıkça % 5, % 10 ve % 20 artmasıyla Φ_B artar ve n azalır.

Normalde bir diyotun mükemmel olması için n 'nin 1(bir) olması gerekir. Ancak gerçek dünyada, yarı iletken tünelleme akımı, N_{ss} ' nin uzaysal yoğunluk dağılımı, metal-yarı iletken arayüzünde bariyer homojensizliklerinin varlığı, ara yüzey katmanı, taşıyıcı enjeksiyon etkileri ve üretim-rekombinasyon etkileri gibi faktörlerin tümü, n 'nin daha büyük yani 1'den fazla olmasını sağlar (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988).

Hesaplamalar değerlendirildiğinde ağırlıkça % 20 CuPc konsantrasyonuna sahip ZnO ile yapılan cihaz RR , n ve Φ_{Bo} gibi en iyi elektriksel özellikleri gösterdiği için en iyi diyot olarak öne çıkıyor.

Çizelge 4.2'de çeşitli hibrit heteroeklemlerin elektriksel parametrelerinin oda sıcaklığında karşılaştırması listelenmektedir. Çizelgede gösterildiği gibi, bu çalışmada üretilen Al/CuPc:ZnO/p-Si hibrit heteroeklem diyotlar diğer p-n heteroeklem diyotlarla karşılaştırıldığında benzer idealite faktörüne ve bariyer yüksekliğine sahiptir. Diğer taraftan diğer çalışmaların raporlarına göre Al/CuPc:ZnO/p-Si hibrit heteroeklem diyotlar daha yüksek düzeltme oranına, şönt direncine ve daha küçük seri direncine sahip olduğu görülmektedir.

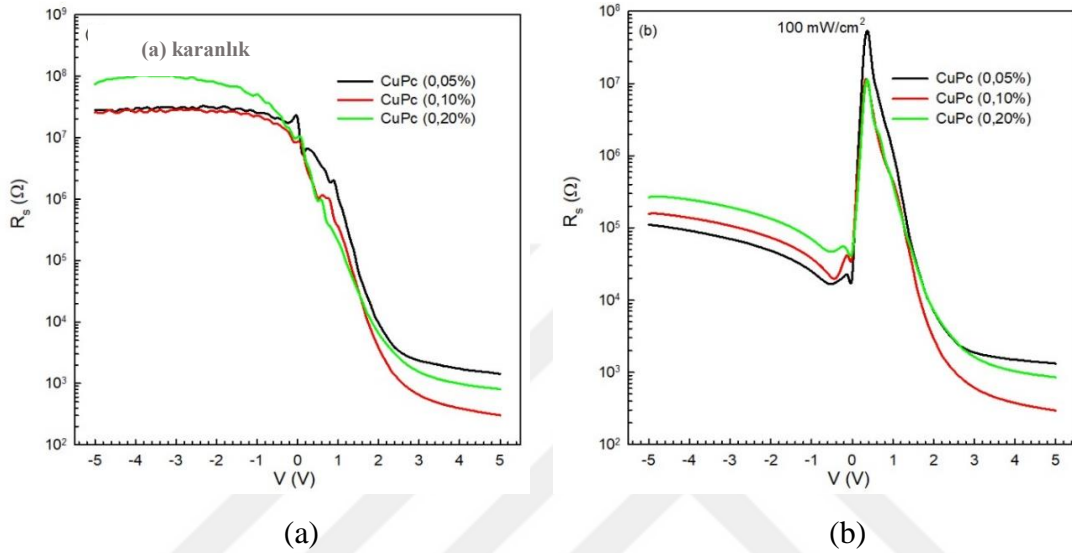
Çizelge 4.2. Elektriksel parametrelerin literatür ile karşılaştırılması

	I_o (A)	n	Φ_{Bo} (eV)	RR	R_s (k Ω)	R_{sh} (M Ω)	Ref.
Al/ZnO/p-Si	3×10^{-9}	3.50	0.74	250	5.4		(Benhaliliba, 2021).
Au /ZnO/n-Si	1.37×10^{-10}	6.00	0.80	93	0.12		(Rajan ve diğerleri, 2016)
Au /ZnO/n-Si		1.21	0.61	3000	1.8		(Aydoğan ve diğerleri, 2009).
Al/ Au-CuPc /n-Si	-	1.64	0.72	-	254	-	Reddy ve diğerleri, 2020)
p - CuPc /a-Si/p-Si	-	5.70	0.93	-	28.6	3.7	(Tatar ve diğerleri, 2013)
p - CuPc /a-Si/n-Si	-	2.50	0.95	-	26	9.2	(Tatar ve diğerleri, 2013)
Al/ZnO/p-Si	2.32×10^{-7}	4.55	0.65	541	0.87	0.47	(Al-Sehemi ve diğerleri, 2023)
Al/H ₃ BO ₃ (%1):ZnO /p-Si	5.99×10^{-10}	4.33	0.77	1660	0.55	0.91	Al-Sehemi ve diğerleri, 2023)
Al/ CuPc /p-Si	-	2.38	0.71	350	43.5	-	(Yakuphanoglu, 2007)
Pd/ Cu:p -ZnO /n-Si	4.57×10^{-8}	2.08	0.68	1190	-	-	(Agarwal, Tripathi ve Chakrabarti, 2017).
Al/ CuPc /n-Si	3×10^{-9}	3.91	0.59	1770	2.46	3	(Elgazzar, 2020)
Au / ZnPc /Si		4.87	0.69	208	7.9		Benhaliliba, Missoum, Ozelik ve Asar, 2020)
Al/ Zn (II) Pc /p-Si	4.87×10^{-8}	4.06	0.74	6130	18.95		(Al-Sehemi, ve diğerleri, 2023)
p - FePc /p-Si		4.07	1.10		159	132	Tatar ve Demiroğlu, 2015)
Al/ CuPc (% 20) : ZnO /p-Si	5.19×10^{-9}	4.01	0.75	9200	0.84	93	Mevcut Çalışma

Hem R_s hem de R_{sh} , diyotun karakterizasyonunda kritik öneme sahiptir; düşük bir R_s , diyot boyunca voltajı artırır ve yüksek bir R_{sh} , kaçak akımı azaltır. Bu nedenle R_s ve R_{sh} 'nin diyot performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır.

Toplam R_s , deneysel ölçümlerde kullanılan uçlardan ölçülen dirençlerin, metal temas dirençlerinin ve yarı iletken malzemenin doğasında bulunan dirençlerin toplamıdır. Sonuç olarak R_s , hem karanlıkta hem de aydınlıkta elektriksel parametrelerin hesaplanmasında önemli hatalara neden olabilir ve özellikle $\ln I$ 'ye karşı V grafiğinde doğrusallıktan sapmalara yol açabilir.

Farklı CuPc katkı seviyelerine sahip diyotlar için R_s ve R_{sh} 'yi belirlemek amacıyla Ohm yasası ($R_i = dV/dI$) uygulandı. Şekil 4.4' de, hem karanlık koşullar hem de 100 mW/cm^2 'deki ışık yoğunluğu için voltaja bağlı direnç profillerini göstermektedir. Her numune için R_s ve R_{sh} 'ye yönelik deneysel veriler Çizelge 4.1' de verilmiştir. Ölçülen R_s ve R_{sh} değerleri, yüksek ileri ve geri eğilim koşulları sırasında gözlemlenen direnç değerlerini gösterir.



Şekil 4.4. Al/CuPc:ZnO/p-Si farklı CuPc içeriklerine sahip fotodiyotlar için (a) karanlıkta (b) 100 mW/cm^2 aydınlatma yoğunluğu altında, R_s - V özellikleri

R_s değerlerinin başlangıçtaki eğilimi azalma yönünde olup, bunu doping konsantrasyonu arttıkça artış eğilimi izlemektedir. Bu durum, filmlerde daha yüksek bir CuPc konsantrasyonunun ilave iletken elektronların mevcudiyetinin artmasına yol açması, bunun da Çizelge 4.1' de de görüldüğü gibi film direncinin azalmasına ve dolayısıyla R_s 'nin azalmasına neden olmasıyla açıklanabilir. Bir Si levhanın yüzeyi CuPc katkılı aktif bir ZnO katmanı ile kaplandığında, aktif katmanın tekdüzeliği değişir. Sonuç olarak CuPc'nin varlığı cihazın seri direncinin azalmasına katkıda bulunur. Öte yandan, arayüz katmanı, homojenliği, uzay yükü enjeksiyonu ve arayüzey durumlarının veya yapısal kusurların varlığı gibi değişkenler, R_s 'deki önemli artışı açıklayabilir (Akin, Farazin, Altındal, ve Azizian-Kalandaragh, 2022).

N_{ss} 'nin veya imalat işlemi sırasında oluşmuş olabilen yarı iletken bant aralığı (E_g) içindeki enerji seviyelerinde, özellikle arayüzde bulunabilen varlığı, derinlemesine araştırılması gereken bir başka kritik cihaz parametresidir.

Kusurlar, eşleşmemiş arayüzey bağları ve oksijen boşlukları dahil olmak üzere çeşitli faktörler yüzey tuzaklarının varlığını etkileyebilir (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988).

Hem ışığın olmadığı hem de iyi aydınlatılmış ortamlarda, bu tuzaklar veya yapısal düzensizlikler, değişen aydınlatma koşullarında cihazın çalışması üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

Bunlar, elektrik alanları, radyasyon ve sıcaklık dalgalanmaları gibi dış faktörlerin bir fonksiyonu olarak elektronların yeniden birleşmesi, yakalanması ve serbest bırakılması için merkezler olarak hareket edebilir. Gerilime bağlı idealite faktörü ($n(V)$) ve etkin bariyer yüksekliği (Φ_e) aşağıdaki denklemler vasıtasıyla belirlenir (Rhoderick ve Williams, 1988).

$$n(V) = \frac{q}{kT} \left[\frac{(V - IR_s)}{\ln(I / I_o)} \right] = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (25)$$

$$\Phi_e = \Phi_{Bo} + \beta(V - IR_s) = \Phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V - IR_s) \quad (26)$$

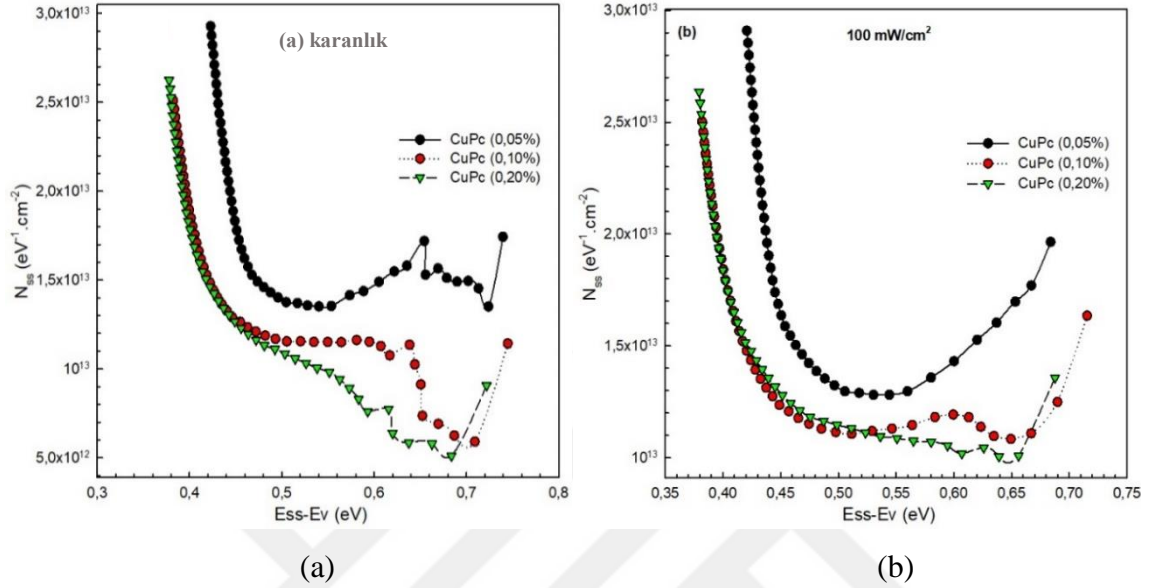
Burada β etkin BH geriliminin katsayısıdır. I - V ölçümlerinden, N_{ss} 'nin enerji yoğunluğu dağılımı aşağıdaki Card ve Rhoderick formülü kullanılarak elde edilir (Rhoderick ve Williams, 1988).

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (27)$$

" δ " arayüzey katmanı kalınlığı, C^2 - V grafiğinden belirlenen " W_D " tükenme katmanı genişliği ve " ϵ_i " ve " ϵ_s " yarı iletkenin arayüzey katmanı geçirgenliği. Yüzey durumlarının enerjisinin konumu (E_{ss}) değerlik bandına göre (E_v) p tipi yarı iletkenler için aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (28)$$

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.5. (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Şekil 4.5' de gösterildiği gibi, eğriler N_{ss} silikon bant aralığının merkezinden (E_V) değerlik bant kenarına kadar dik bir üstel artış gösterir.



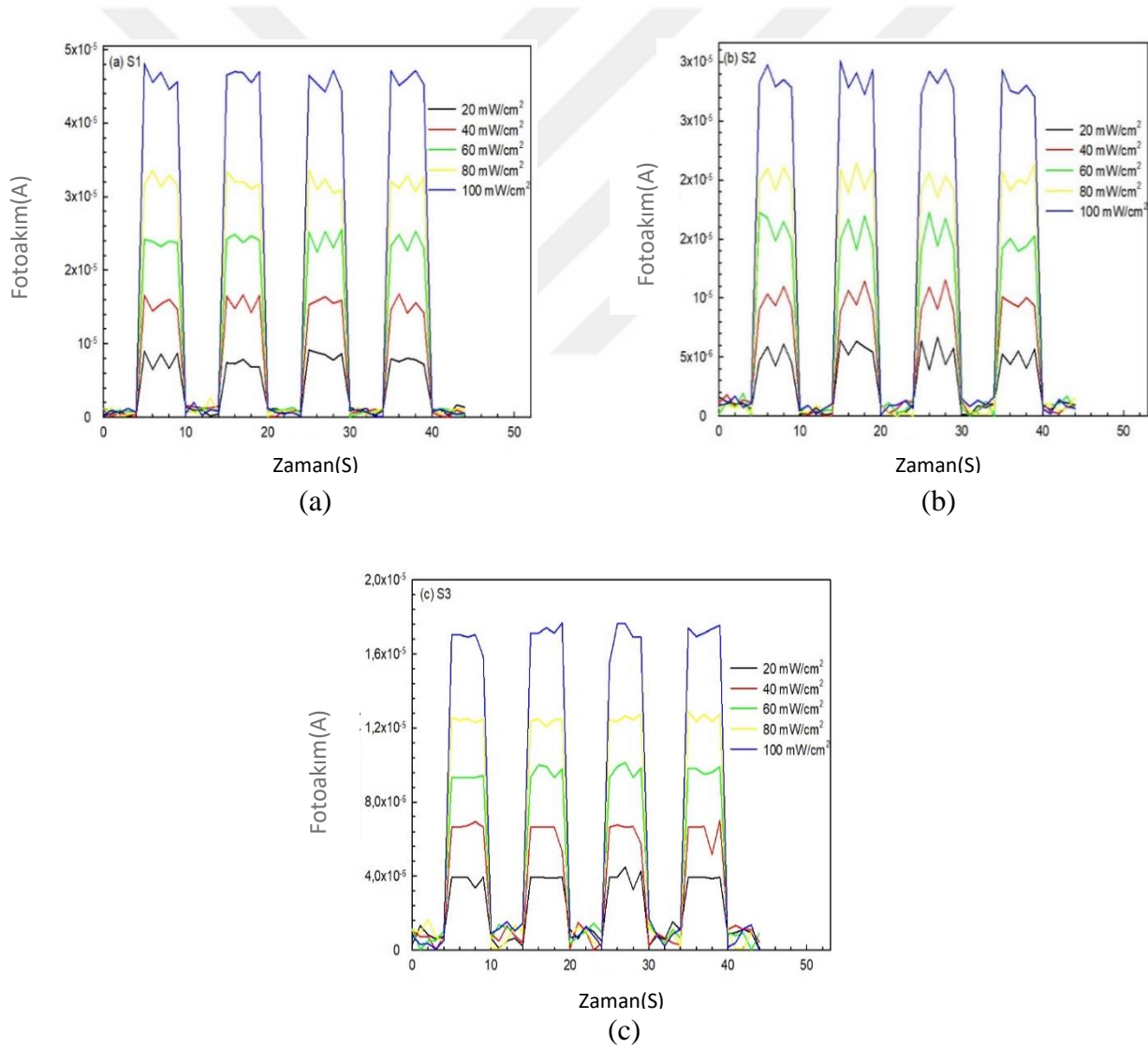
Şekil 4.5. Al/CuPc:ZnO/p-Si farklı CuPc içeriklerine sahip fotodiyotlar için (a) karanlıkta (b) 100mW/cm² aydınlatma yoğunluğu altında, N_{ss} -(E_{ss} - E_V) için özellikleri

4.2. Geçici Fotoakım, Fotokapasitans/İletkenlik Özellikleri

Elektron-delik çifti üretiminin verimliliğini değerlendirmek ve Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların fotoiletken mekanizmasını ve foto-tepki stabilitesini aydınlatmak için zamana bağlı bir geçici fotoakım tepki tekniği kullanıldı. -5V' luk bir öngerilim uygulandığında, aydınlatma farklı yoğunluk seviyelerinde dönüşümlü olarak açılıp kapatılmıştır. Şekil 4.6(a-c), zamanın bir fonksiyonu olarak bu fotodiyotlardaki fotoakımın gelişimini göstermektedir. Bu rakamlardan aydınlatma şiddeti arttıkça fotoakımın da arttığı açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, gelen ışığın ürettiği taşıyıcıların sayısının artmasıdır. Bu taşıyıcılar toplam akıma katkıda bulunur. Bundan sonra mevcut seviyeler doyum noktasına ulaşır. Işık kaynağı kapatıldığında akım başlangıç değerine döner. Bu durumların her ikisi de yük tutulmasının derin seviyelerde gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Bu rakamlardan 1 ve 9' un 100 mW /cm² deki I_{on}/I_{off} oranı S1, S2 ve S3 için sırasıyla 980, 484 ve 274 olarak hesaplandı. En iyi ışık tepkisi değeri S1 için elde edilir ve CuPc içeriğinin artmasıyla azalır (Yaşar, Kahraman, Çetinkaya ve Bilican, 2015).

Cu_2SnS_3 ince filmlerini Triton-X100 yüzey aktif madde ile n-Si substrat üzerinde sol-jel döndürmeli kaplama kullanarak büyüttüler ve 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğunda I_{on}/I_{off} oranı 347' dir (Demirbilek, Yakuphanoglu ve Kaya, 2021). n-Si/ ZnO:Al %1: Cd %2 katkıli fotodiyot için 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında I_{on}/I_{off} oranını 271.22 olarak hesaplandı. Ortak sonuç olarak bu durum cihazların fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir.

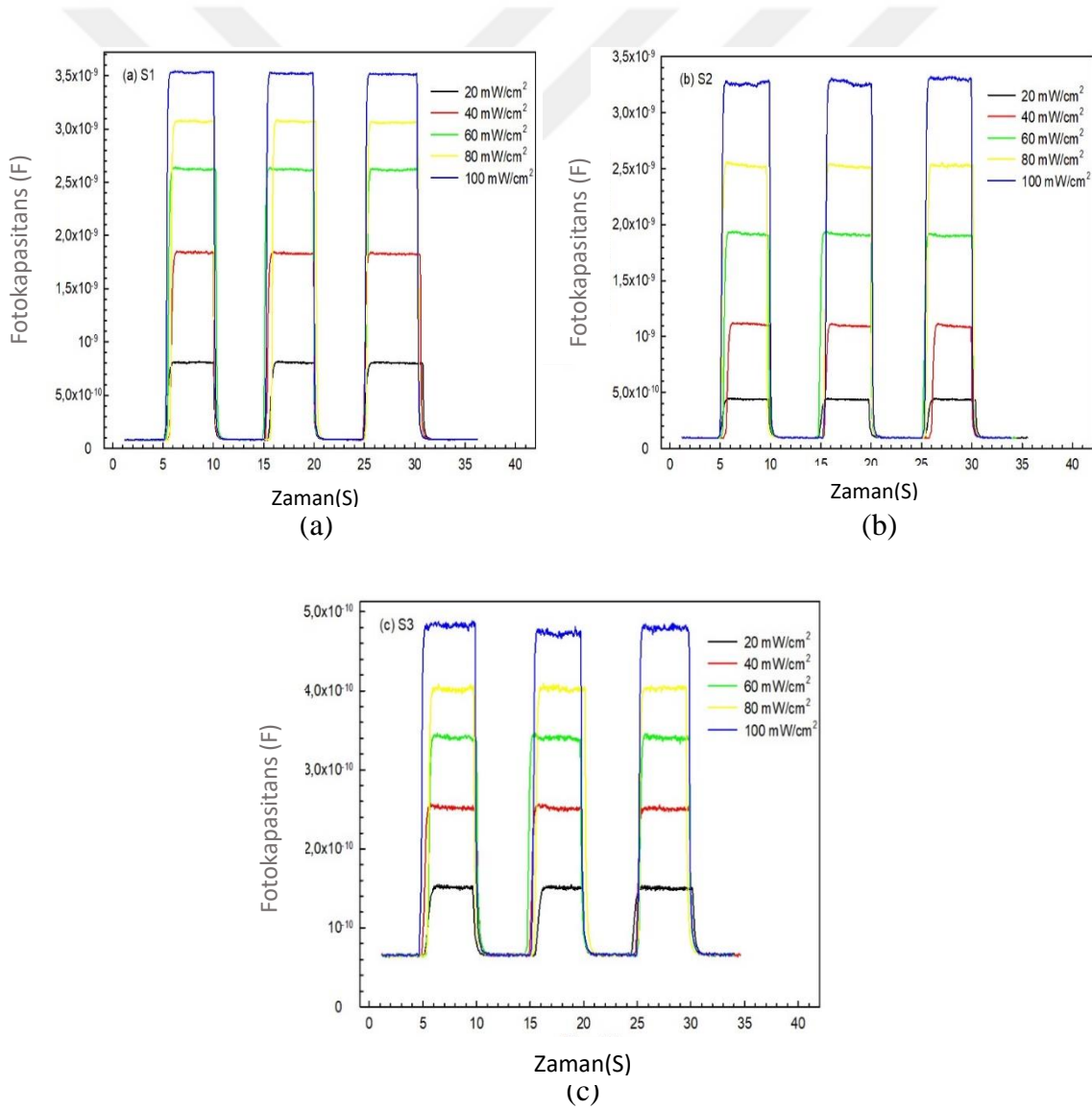
Gözlemlenen bu davranış, fotodiyottaki derin safsızlık seviyelerinde taşıyıcının yakalanmasıyla ilgilidir (Moore ve Thompson, 2013; Mekki ve diğerleri, 2016; Çiçek ve diğerleri, 2016; Khan ve Kim, 2017; Tataroğlu ve diğerleri, 2019; Demirezen ve diğerleri, 2021).



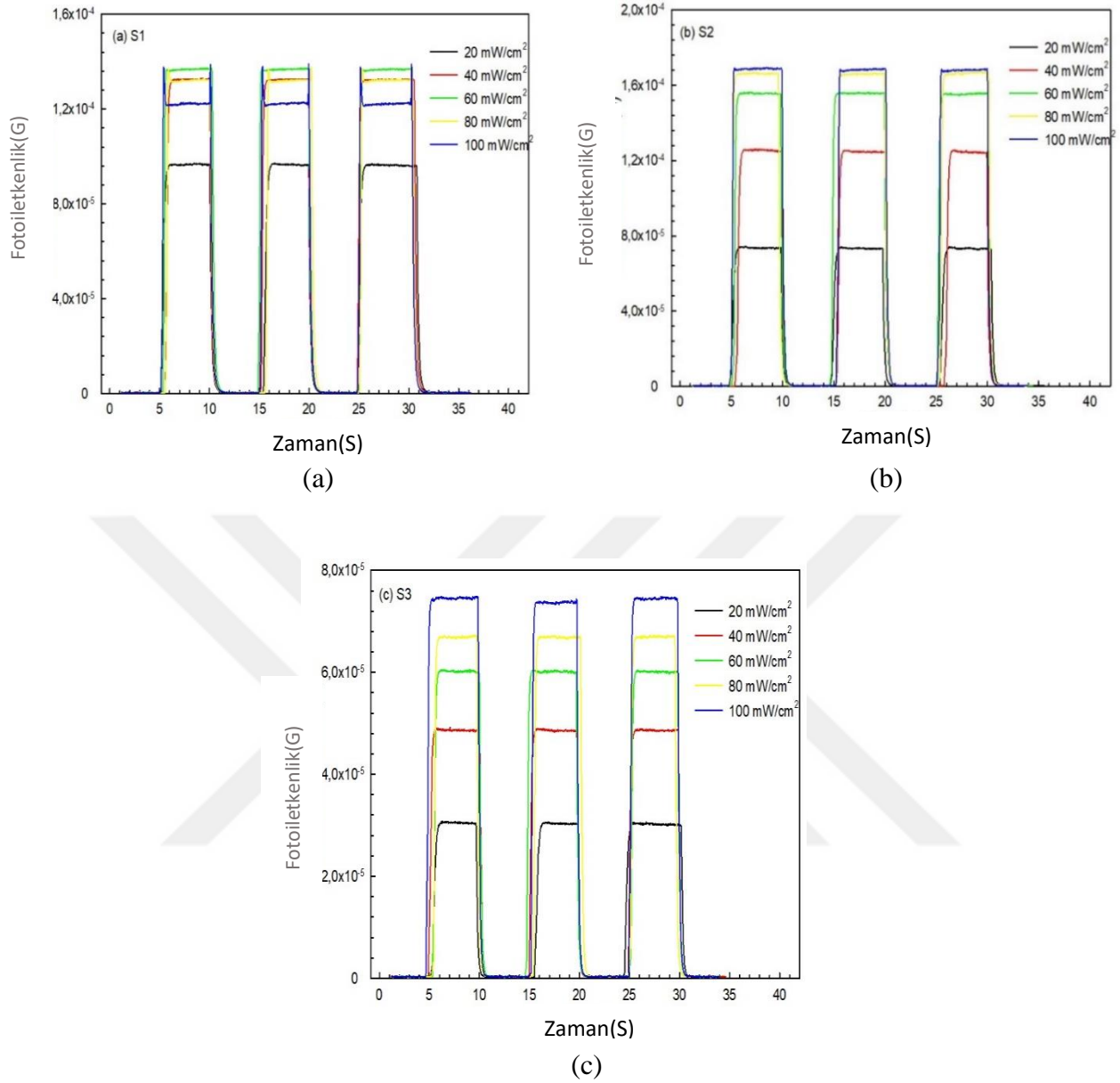
Şekil 4.6. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar -5V'da farklı CuPc içeriklerine sahip (a) S1=% 5, (b) S2= % 10 ve (c) S3=% 20, zamana bağlı ölçümlerinin aydınlatma yoğunlukları altında fotoakım-zaman eğrileri

Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar için sırasıyla geçici fotokapasitans ve fotoiletkenliğin zamana bağlı ölçümlerinin grafiksel gösterimleri de Şekil 4.7(a-c) ve 4.8(a-c). Bu ölçümler 10 kHz frekansında, farklı koşullarda değişen aydınlatma şiddetiyle gerçekleştirilmiştir. Işık açıldığında, aydınlatmanın yük taşıyıcıları üretmesi sonucunda hem fotokapasitans hem de fotoiletkenlik önemli ölçüde artar. Ancak aydınlatma kapatıldığı anda bu parametreler azalarak başlangıç değerlerine döner.

Bu sonuçlar, üretilen Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlarının fotokapasitans ve fotoiletkenlik açısından olumlu davranış sergilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, potansiyel fotokapasitör uygulamalarına sahiptirler.



Şekil 4.7. Al/ CuPc:ZnO /p-Si fotodiyotlar için farklı CuPc içeriklerine sahip (a) S1=% 5, (b) S2= % 10 ve (c) S3=% 20, zamana bağlı ölçümlerinin fotokapasitans - zaman eğrileri



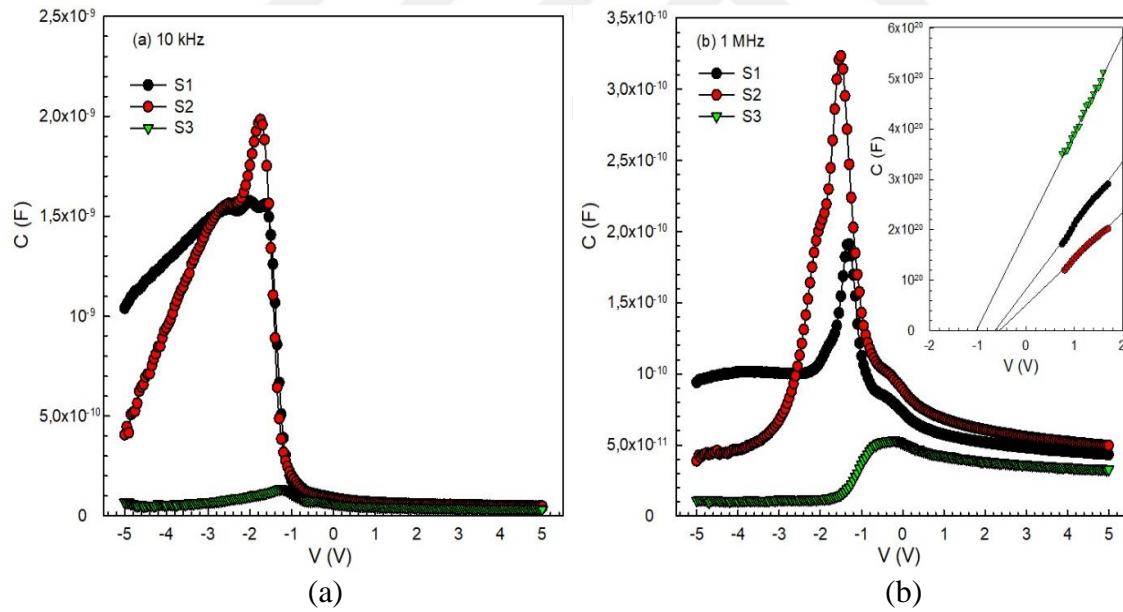
Şekil 4.8. Al/ CuPc:ZnO /p-Si fotodiyotlar için farklı CuPc içeriklerine sahip (a) S1=% 5, (b) S2= % 10 ve (c) S3= % 20 zamana bağlı ölçümlerinin fotoiletkenlik-zaman eğrileri

4.3. Kapasitans/İletkenlik-Voltaj Özellikleri

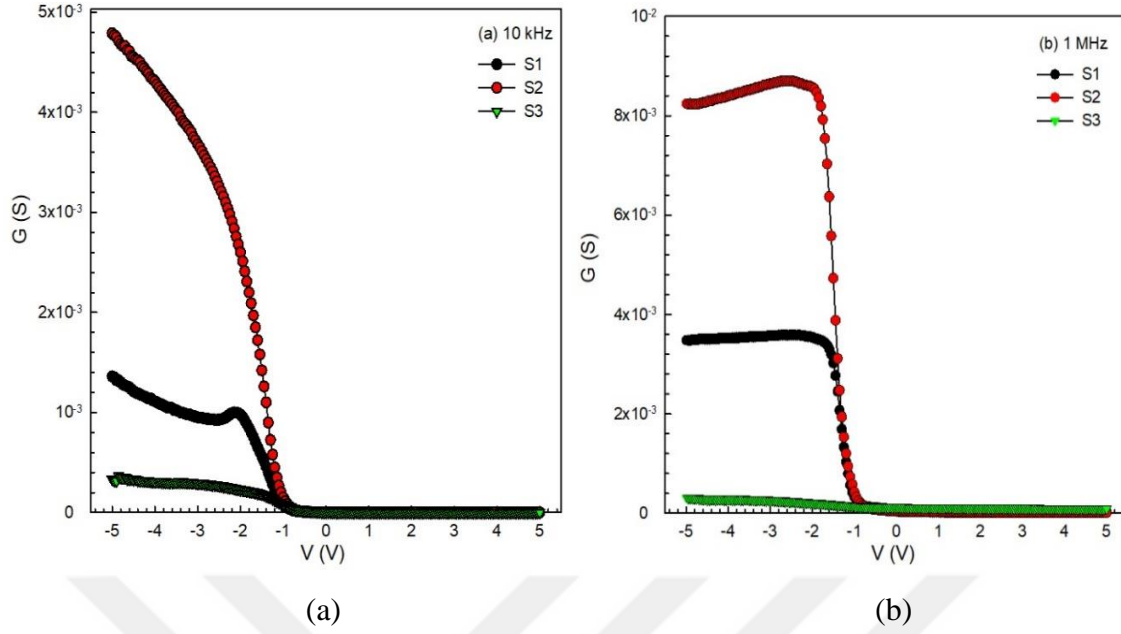
S1, S2 ve S3 etiketli fotodiyotlar için 10 kHz ve 1 MHz olmak üzere iki farklı frekansta kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/\omega-V$) ölçümlerinin karşılaştırmalı analizini incelemek için, Şekil 4.9. ve 4.10. çizildi. Bu rakamlar, bu fotodiyotların $C-V$ ve $G/\omega-V$ eğrileri içinde ters çevirme, tükenme ve birikim gibi dikkate değer alanların varlığını göstermektedir.

Bir elektrik alanının uygulanmasının ters bölgedeki diyotun kapasitansı üzerinde çok az etkisi vardır, ancak birikim bölgesinde önemli kapasitans değişikliklerine neden olur. 10 kHz'deki C ve G değerlerinin, voltaj bölgesi boyunca daha yüksek frekanslarda kaydedilen değerleri aştığını not etmek de önemlidir. Arayüz durumlarının (N_{SS}) varlığı ve bunların silikon (Si) bant aralığı içindeki uzaysal yoğunluk açısından dağılımı, azalan frekansla birlikte C ve G 'nin bu artan seviyelerinden sorumludur.

Arayüz durumlarının gevşemesi ve uygulanan alternatif akım (AC) sinyalinin frekansı arasındaki etkileşim, N_{SS} 'nin (AC) sinyalini takip etmesine neden olur ve bu da aşırı kapasitans ve aşırı iletkenliğe neden olur. Ayrıca CuPc içeriğinin artmasıyla birlikte özellikle düşük frekanslarda kapasitans değerlerinin değiştiğini gözlemledik. Bu artış, arayüz durumlarının ayırt edici dağıtım yoğunluğuna atfedilebilir (Tataroğlu, Al-Ghamdi, El-Tantawy, Farooq ve Yakuphanoglu, 2016; Demirezen, Orak, Azizian-Kalandaragh ve Altındal, 2017; Tanrikulu, Demirezen, Altındal ve Uslu, 2018).



Şekil 4.9. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların (a)10 kHz'de ve (b)1 MHz'deki C - V grafikleri



Şekil 4.10. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların (a)10 kHz'de ve (b)1 MHz'deki G - V grafikleri

Difüzyon veya yerleşik potansiyel (V_D), katkı konsantrasyonu (alıcı atomlar) (N_A), Fermi enerji seviyesi (E_F), tükenme katmanı genişliği (W_D) ve (Φ_B) SBD'lerin diğer önemli ana elektriksel parametreleridir ve ayrıca 1 MHz'deki C^{-2} - V eğrisinden elde edilir (Şekil 4.9 (b)'de). Bu parametreler, bu grafiklerde gözlemlenen kesişme gerilimlerinden (V_0) ve eğimlerden ($=dC^{-2}/dV$) türetilmiştir (Sze, 1981).

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (29)$$

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_0\epsilon_s A^2 \underbrace{\frac{d(1/C^{-2})}{dV}}_{\text{slope}(\tan\theta)}} \quad (30)$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad (31)$$

$$N_V = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_h^*}{m_0}\right)^{3/2} \quad (32)$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 V_D}{qN_A}} \quad (33)$$

$$\Phi_B(C-V) = V_D + E_F \quad (34)$$

Çizelge 4.3' de V_o , N_A , E_F , V_D ' nin deneysel değerleri gösterilmektedir ve $\Phi_B(C-V)$. Artan değeri Φ_B ZnO' da % 20 CuPc katkılı ara yüzey katmanında gözlemlenen bu durum, önemli katkı seviyesinden kaynaklanmaktadır ve bu da kesişme noktasında önemli bir artışa neden olmaktadır.

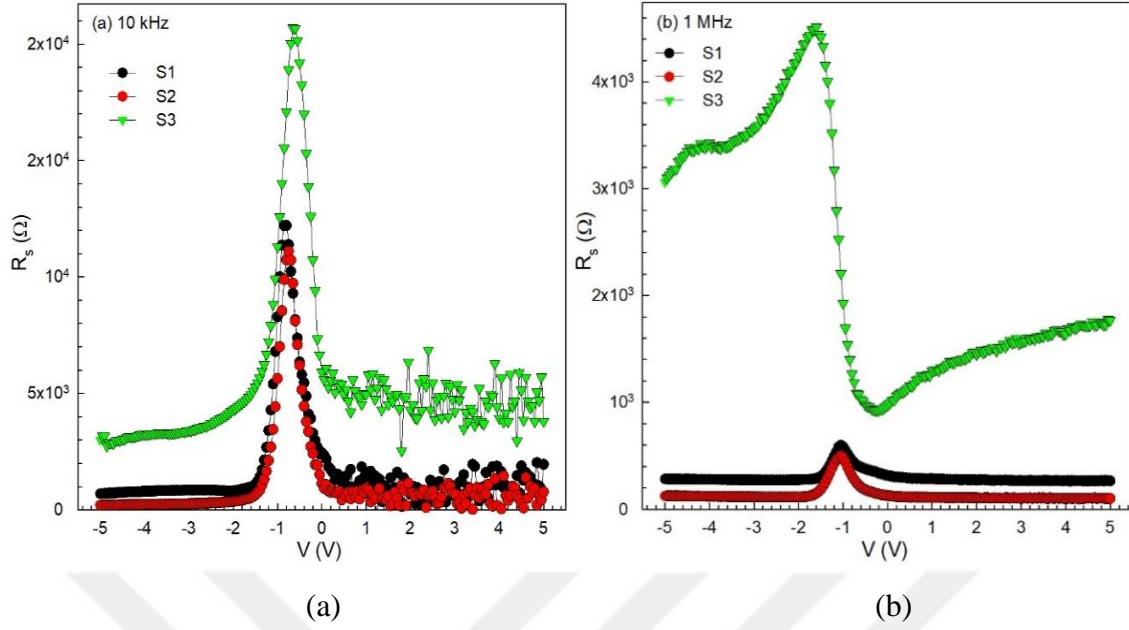
Çizelge 4.3. C^{-2} - V grafikleri kullanılarak elde edilen ana elektriksel parametreler.

	V_o (V)	$N_A(\text{cm}^{-3})$ ($\times 10^{15}$)	V_D (eV)	E_F (eV)	$G(\text{cm})$ ($\times 10^{-5}$)	Φ_B (eV)
S1	0.63	1.52	0.66	0.18	7.50	0.84
S2	0.52	2.08	0.55	0.17	5.85	0.72
S3	0.99	1.00	1.02	0.19	11.50	1.21

Seri direnç başka bir önemli elektriksel parametredir, çünkü arayüzün seri direnci gerçek kapasitansı ve iletkenliği önemli ölçüde etkiler, dolayısıyla elektriksel özellikleri etkiler. Güçlü birikim bölgesinde ölçülen C_m ve G_m/w değerlerine dayanarak, S1, S2 ve S3 fotodiyotları için R_s 'nin voltaja bağlı grafikleri, Nicollian ve Brews formülü olarak bilinen denklem (35) kullanılarak belirlendi (Nicollian ve Brews, 1982).

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (35)$$

Bu denklemde, ω açısal frekansı belirtir ($=2\pi f$). Şekil 4.11' de (a,b), fotodiyotların düşük frekansta (10kHz) daha yüksek R_s değerleri gösterdiği ve 10kHz'den 1MHz'e kadar gözlemlenen tepe noktalarının, gevşeme zamanlarından dolayı (arayüzey durum yoğunluğu) N_{ss} ' nin yeniden düzenlenmesi ile ilişkili olduğunu açıkça göstermektedir (Demirezen ve diğerleri, 2022; 2024).



Şekil 4.11. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotları için (a) 10 kHz'de ve (b)1 MHz'de R_s grafikleri

Elektrik alanlarına bağlı uzaysal yoğunluk dağılımları; yukarıda belirtildiği gibi, Schottky Bariyer Diyotlarının (SBD'ler) ideal olmayan elektriksel özelliklerine neden olmada R_s 'nin önemli bir rolü olduğunu gösteren denklem vardır. Diyot kapasitesinin ve diyot iletkenliğinin doğru belirlenmesi için, formül 36, 37 ve 38'de açıklandığı gibi R_s 'nin etkisi dikkate alınarak (düzeltilmiş kapasitans değeri) C_m ve G_m (düzeltilmiş iletkenlik değeri) değerleri yeniden hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.12' de 1MHz frekans için gösterilmektedir.

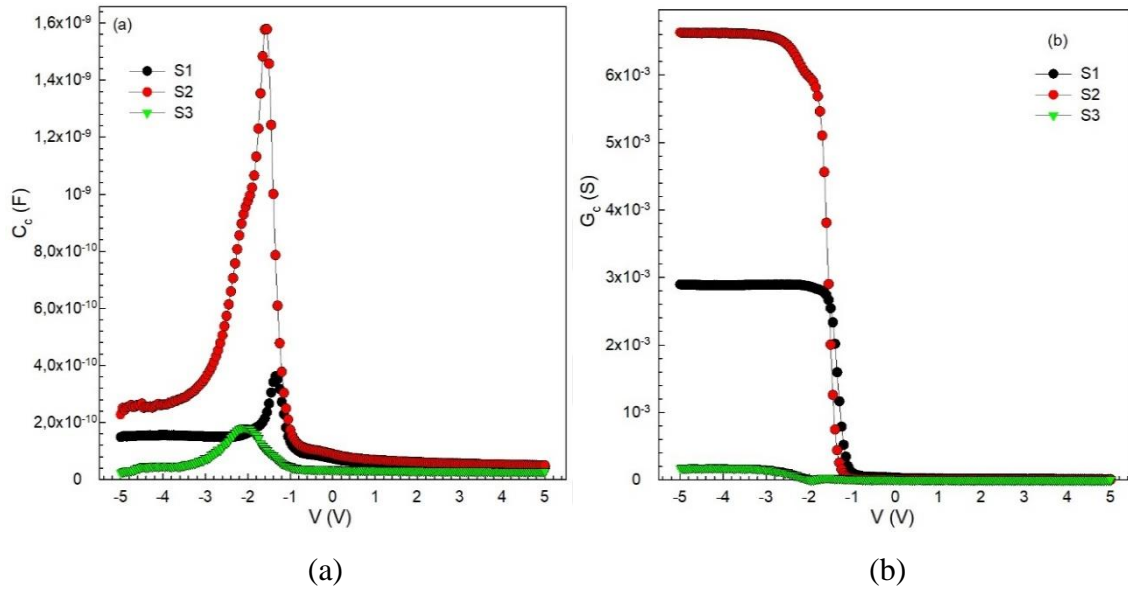
$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (36)$$

$$G_c = \frac{G_m^2 + (\omega C_m)^2 a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (37)$$

burada “a” aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Nicollian ve Brews, 1982).

$$a = C_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (38)$$

Şekil 4.12' de görüldüğü gibi özellikle R_s etkisinin zayıfladığı birikim bölgesinde ölçülen değerlere göre düzeltilmiş kapasitans değeri (C_c) önemli bir artış gösterirken, düzeltilmiş iletkenlik değeri (G_c) önemli bir azalma göstermektedir. Bu gözlem, R_s 'nin, özellikle hem tükenme hem de birikim bölgelerinde, özellikle yüksek frekanslarda, C ve G ölçümlerini etkilemede önemli bir rol oynadığı, bu nedenle, özellikle elektriksel ve dielektrik özelliklerin hesaplanmasında bu etkinin dikkate alınması gerekmektedir (Sze, 1981; Nicollian ve Brews, 1982).

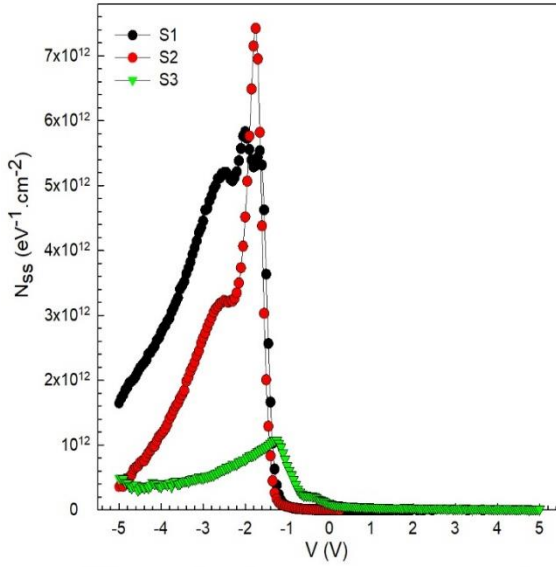


Şekil 4.12. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotları için 1 MHz'de (a) C - V ve (b) G - V grafikleri

N_{ss} voltajın bir fonksiyonu olarak yüksek frekans/düşük frekans ($C_{HF}-C_{LF}$) kapasitans yöntemi kullanılarak belirlendi (Nicollian ve Brews, 1982). Denklem 39'da hesaplandığı ve Şekil 4.13' de görsel olarak gösterildiği gibi bu yöntem, kapasitansın toplam kapasitansa katkısını değerlendirerek N_{ss} 'yi ölçer.

$$qAN_{ss} = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right] \quad (39)$$

Bu denklemde C_{LF} düşük frekanslı kapasitans, C_{HF} ise yüksek frekanslı kapasitandır. C_{ox} , birikim bölgesindeki oksit/yalıtkan katman/arrayüz ile ilişkili kapasitandır. ' q ' değişkeni elektronik yükü temsil eder ve ' A ' fotodiyotların doğrultucu kontak alanını temsil eder.



Şekil 4.13. Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotlar için N_{ss} - V grafiği

Şekil 4.13' te N_{ss} - V grafiklerinin S1, S2 ve S3 için sırasıyla -2V ile -1V arasında değişen maksimum/tepe değerleri verdiği görülmektedir. Bu sonuçlar, CuPc:ZnO ara yüzey katmanı ve Si yarı iletken arasındaki arayüz durumlarının uzaysal yoğunluk dağılımına atfedilebilir (Acar, Büyükbas-Uluslan ve Tataroglu, 2018). Kaydedilen maksimum arayüz durumu değerleri sırasıyla; $S1=5.76 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$, $S2= 7.42 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ve $S3= 1.02 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ dir. Bu değerlerin elektronik cihazlarda kullanımı için uygun olduğu görülmektedir (Şafak-Asar, Asar, Altındal ve Özçelik, 2015; Demirezen, Kaya, Altındal ve Uslu, 2017; Demirbilek, Yakuphanoglu ve Kaya, 2021).

4.4. Sonuçlar

Hazırlanan Al/CuPc:ZnO/p-Si fotodiyotların elektriksel özellikleri akım-voltaj (I - V) ölçümleri kullanılarak hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri için detaylıca incelendi ve aşağıda özetlenen sonuçlar elde edildi.

Elektriksel özellikleri; I - V (0-100 mW/cm²). RR , I_0 , n , Φ_B ve R_s değerleri I - V verilerinden elde edildi ve sonuçta,

- 1) S1, için; $RR= 1.9 \times 10^4$, $I_0= 0.11 \times 10^{-9}$ A, $n =8,26$, $\Phi_B= 0.73$ eV ve $R_s=1490 \Omega$
- S2 için; $RR= 8.6 \times 10^4$, $I_0= 7.61 \times 10^{-9}$ A, $n =4.45$, $\Phi_B= 0.74$ eV ve $R_s=319 \Omega$

S3 için; $RR= 9.2 \times 10^4$, $I_0= 5.19 \times 10^{-9}$ A, $n =4.01$, $\Phi_B= 0.75$ eV ve $R_s =8360 \Omega$ değerleri elde edildi. Bu RR sonuçlarının, yapıların olumlu düzeltme davranışı sergilediğini göstermektedir.

- 2) Bu yapıların ışığa tepki davranışı ise, $I_{ph} = AP^m$ denklemi kullanılarak elde edildi.İlgili diyotlar için m değerleri S1=0.69, S2=0.69 ve S3=0.66 olarak belirlenmiştir ve bu, diyotların doğrusal bir fotoiletkenlik mekanizması gösterdiği görülmüştür.
- 3) Öte yandan I_{on} / I_{off} oranları için sırasıyla S1=980, S2=484 ve S3=274 olarak hesaplandı.
- 4) Ayrıca, görüntü sensörü uygulamalarıyla birlikte kullanılarak elde edilen fotodiyotların (LDR) değerlerini gösteren doğrusal dinamik Aralık 14 mertebesinde hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, CuPc katkı konsantrasyonunun bu diyotların elektriksel ve optoelektronik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, örneğin N_{ss} ve R_s değerlerini önemli ölçüde azalttığını ve bu değerlerin onları potansiyel olarak optoelektronik uygulamalarda fotodiyotlar, sensörler veya dedektörler olarak kullanıma uygun hale getirdiğini göstermektedir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışma, CuPc'nin farklı katkı oranlarıyla yapılandırılan diyotlar arasındaki akım-voltaj ($I-V$) özelliklerinin karşılaştırmalı karakterizasyonunu içermektedir. Çeşitli aydınlatma seviyeleri (10 ile 100 mW/cm² arasında) ve karanlık koşullarda, idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B), seri direnç (R_s), şönt direnç (R_{sh}), değişken yoğunluğu (N_{ss}) gibi çeşitli kritik elektriksel değişkenlerin ölçümleri, Fytronix 9000 Solar $I-V$ karakterizasyon sistemi kullanılarak değerlendirildi.

Yapılan çalışmada alınan verilerin ve sonuçların benzeri konular hakkında yapılacak olan araştırmalara ve araştırmacılara faydalı olması yönünden verilebilecek öneriler aşağıda sunulmuştur.

- 1) Araştırmaya başlamadan önce konuyla ilgili detaylı inceleme yapılmalı, kullanılacak malzemeler ve yöntem belirlenmeli,
- 2) Araştırmada kullanılan diyodların siteril bir laboratuvarda hazırlanması temin edilmeli,
- 3) Üretilen bu diyodlar hakkında hem elektriksel hem de optik özellikleri için mümkün olduğu kadar geniş aydınlatma şiddeti ve voltaj aralığında değerlerin alınması sağlanmalı,
- 4) Elde edilen sonuçlar yorumlanırken bu konu hakkında daha önce yapılmış araştırmalar, tezler, makaleler incelenerek elde edilen sonuçlar sentezlenmeli ve karşılaştırmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aboelfotoh, M.O. and Tu, K.N. (1986). Schottky-Barrier Heights of Ti and on n-type Si (100), *Physical Review B*, 34 (4), 2311-2318.
- Acar, F. Z. Buyukbas-Ulusan, A. and Tataroglu, A. (2018). Analysis of interface states in Au/ZnO/p-InP (MOS) structure: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 29, 12553-12560.
- Agarwal, L., Tripathi, S. and Chakrabarti, P. (2017). Analysis of structural, optical and electrical properties of metal/p-ZnO-based Schottky diode. *Journal of Semiconductors*, 38(10), 104002.
- Ahmed, M. T. Gonçalvesb, T. Albinob, A. Rashel, M. R. Veigab, A. and Tlemcani, M. (2017). "Different parameters variation analysis of a PV cell," International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE), Newcastle Upon Tyne, UK, pp. 176-180.
- Akin, B., Farazin, J., Altindal, S. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2022). A comparison electric-dielectric features of Al/p-Si (MS) and Al/ (Al₂O₃:PVP)/p-Si (MPS) structures using voltage–current (V–I) and frequency–impedance (f–Z) measurements. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33, 21963 - 21975.
- 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.
- Aksu, İ.A (2018). Rüzgâr Hızının ve Dış Hava Sıcaklığının Panel Sıcaklığına Etkisinin Deneysel İncelenmesi Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Aldirmaz, E. (2022). Investigating the illumination and deformation effects on the electrical properties of a CuMnZn-based-diode, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 33, 15023
- Al-Ghamdi, A.A., Dere, A., Tataroğlu, A., Arif, B., Yakuphanoglu, F., El-Tantawy, F., and Farooq, W.A. (2015). Composite metal oxide semiconductor based photodiodes for solar panel tracking applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 650, 692-699.
- Al-Sehemi, A. G. Tataroglu, A. Karabulut, A. Dere, A. Al-Ghamdi, A. A. and Yakuphanoglu, F. (2023). Optoelectronic and Photonic Characteristics of Al/p-Si Diode with Boric Acid-Doped Zinc Oxide Interlayer: *JOM* 75, 3587.
- Al-Sehemi, A.G., Ocakoğlu, K., Ince, M., Karabulut, A., Tataroğlu, A., Dere, A., Al-Ghamdi, A.A. and Yakuphanoglu, F. (2023). The electronic and optoelectronic properties of Al/hydroxymethyl functionalized Zn(II)Pc/p-Si photonic device. *Polymer Bulletin*.

- Altındal, Ş. Özdemir, A. F. Aydoğan, Ş. and Türüt, A. (2022). Discrepancies in barrier heights obtained from current–voltage and capacitance–voltage of Au/PNoMPhPPy/n-GaAs structures in wide range of temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(15), 12210-12223.
- Amelia A. R. et al. (2019). Technologies of solar tracking system: A review, International Symposium on Engineering and Technology (ISETech), erils, Malaysia, pp. 1-10.
- Armin, A. Hamsch, M. Kim, I.K. Burn, P.L. Meredith, P. and Namdas, E.B. (2014). Thick junction broadband organic photodiodes. *Laser Photonics Rev.*8(6), 924–932.
- Aydoğan, Ş. Çınar, K. Asıl, H. Coşkun, C. and Türüt, A. (2009). Electrical characterization of Au/n-ZnO Schottky contacts on n-Si: *J Alloys Compd* 476, 913-918.
- Aydoğan, Ş. İncekara, Ü. Deniz, A. R. and Türüt, A. (2010). Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic Orcein. *Microelectron Eng* 87, 2525-2530.
- Barsan, N. and Weimar, U. (2001). Conduction model of metal oxide gas sensors. *Journal of Electroceramics*, 7(3), 143–167.
- Benhaliliba, M. (2021). Electrical Transport and Current Conduction Mechanisms in ZnO/Si Heterojunction Diode: *International Journal of Robotics and Automation Technology* 8, 60.
- Benhaliliba, M., Missoum, I., Ozcelik, S. and Asar, T. (2020). Optical filter and electrical behavior of innovative Au/ZnPc/Si/Al organic heterojunction. *Optik*, 206, 163629.
- Bhattacharya, P. (1994). *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Prentice Hall, New Jersey.18.
- Bıyıklı, N. (1998) Design, Fabrication and Characterization of High Performance Resonant Cavity Enhanced Photodetectors, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- Bıyıklı, N. (2004). High-Performance Al_x Ga_{1-x} N-Based UV Photodetectors for Visible/Solar-Blind Applications, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- Bottari G, de la Torre G, Guldi, D. M. and Torres, T. (2011). Phthalocyanine-porphyrin heteroarrays: A perfect marriage between two unique macrocycles. *Materials for chemical sensing Chem. Rev.* 110 6768–816.
- Bui, P.S. and Taneja, N.D. (2003) U.S. Patent 6 593 636 B1.
- Cafer, T. (2000). *Katıl Elektrowniği*, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi. İstanbul.
- Card, H. C. and Rhoderick, E. (1971) Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes, *J. Phys.*, 1589-1601.

- Cavdar, S. Demiroglu, Y. Turan, N. Koralay, H. Tuğluoğlu, N. and Arda, L. (2022) Investigation of Trap States, Series Resistance and Diode Parameters in Al/Gelatin/n-Si Schottky Diode by Voltage and Frequency Dependent Capacitance and Conductance Analysis. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 11, 025001.
- Ceyhan, T. and Bekaroğlu, Ö. (2002). The Synthesis of New Phthalocyanines Substituted with 12-Membered Diazadioxa Macrocycles. *Monatshefte Für Chemie/Chemical Monthly*, 133(1), 71–78.
- Claessens, C. G., Hahn, U. and Torres, T. (2008). Phthalocyanines: from outstanding electronic properties to emerging applications. *Chemical record (New York, N.Y.)*, 8(2), 75–97.
- Cova, P. and Singh, A. (1990). Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes, *Solid-State Elec.* 33, 11-19.
- Crowel, C.R. and Sze, S.M. (1966) Current Transport In Metal-Semiconductor Barriers, *Solid State Electronics*, 9, 1035-1048.
- Çiçek, O., Tecimer, H., Tan, S.O., Tecimer, H., Altındal, Ş. and Uslu, I. (2016). Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphene (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions. *Composites Part B-engineering*, 98, 260-268.
- Demirbilek, N., Yakuphanoglu, F. and Kaya, M.A. (2021). The Optical and Structural Properties of Undoped ZnO and Co-doped ZnO:Al_x:Cd_y = 1 at %, y = 1, 2, 3, 5 at % Thin Films, and Their Electrical Characteristics as Photodiode. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 57, 488 - 499.
- Demirezen, S. Çetinkaya, H. G. Kara, M. Yakuphanoglu, F. and Altındal, Ş. (2021). Synthesis, electrical and photo-sensing characteristics of the Al/(PCBM/NiO: ZnO)/p-Si nanocomposite structures, *Sensors and Actuators A Phys* 317, 112449.
- Demirezen, S. Dere, A. Çetinkaya, H. G. Al-Sehemi, A. G. Al-Ghamdi, A. A. and Yakuphanoglu, F. (2023). Hybrid photonic device based on Graphene Oxide (GO) doped P3HT-PCBM/p-Silicon for photonic applications: *Phys Scr* 98, 115916.
- Demirezen, S. Kaya, A. Altındal, Ş. and Uslu, I. (2017). The energy density distribution profile of interface traps and their relaxation times and capture cross sections of Au/GO-doped PrBaCoO nanoceramic/n-Si capacitors at room temperature. *Polymer Bulletin*, 74(9), 3765–3781.
- Demirezen, S. Kaya, A. Yerişkin, S. A. Balbaşı, M. and Uslu, I. (2016). Frequency and voltage dependent profile of dielectric properties, electric modulus and ac electrical conductivity in the PrBaCoO nanofiber capacitors. *Results in Physics*, 6, 180–185.

- Demirezen, S., Al-Sehemi, A.G., Yüzer, A., Ince, M.A., Dere, A., AL-Ghamdi, A.A., and Yakuphanoglu, F. (2022). Electrical characteristics and photosensing properties of Al/symmetrical CuPc/p-Si photodiodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33, 21011 - 21021.
- Demirezen, S., Çetinkaya, H.G. and Altındal, Ş. (2022). Doping rate, Interface states and Polarization Effects on Dielectric Properties, Electric Modulus, and AC Conductivity in PCBM/NiO:ZnO/p-Si Structures in Wide Frequency Range. *Silicon* 14, 8517–8527.
- Demirezen, S., Orak, I., Azizian-Kalandaragh, Y., and Altındal, Ş. (2017). Series resistance and interface states effects on the C–V and G/w–V characteristics in Au/(Co3O4-doped PVA)/n-Si structures at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 12967-12976.
- Demiroglu, M., Sirka, L., Çalışkan, E., Biryani, F., Koran, K., Görgülü, A.O. and Yakuphanoglu, F. (2020). Synthesis and photodiode properties of chalcone substituted metallo-phthalocyanine. *Journal of Molecular Structure*, 1219, 128571.
- Dhawan, T. Aarti, Kotnala, A. and Chhikara, B.S. (2017) Organic Light Emitting Diode: Energy efficient material for sustainable green environment, Proceedings of National Conference RACSGSE-SBAP, 45-56.
- Divigalpitiya, W.M.R. (1989) Temperature dependence of the photovoltaic characteristics of silicon MIS solar cells, *Solar Energy Mater.* 5, 253-262. dynamic spin coating method: *Mater Sci Semicond Process* 134, 106034.
- Elgazzar, E. (2020). Improvement the efficacy of Al/CuPc/n-Si/Al Schottky diode based on strong light absorption and high photocarriers response *Mater Res Express* 7, 095102.
- Eroglu, A., Demirezen, S., Azizian-Kalandaragh, Y., and Altındal, Ş. (2020). A comparative study on the electrical properties and conduction mechanisms of Au/n-Si Schottky diodes with/without an organic interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 14466 - 14477.
- Farooq, W. A. Elgazzar, E. Dere, A. Dayan, O. Serbetci, Z. Karabulut, A. Atif, M. and Hanif, A. (2019). Photoelectrical characteristics of novel Ru(II) complexes based photodiode: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30, 5516-5525.
- Gong, X. Tong, M. Xia, Y. Cai, W. Moon, J.S. Cao, Y. Yu, G. Shieh, C.-L. Nilsson, B. and Heeger, A. J. (2009) High-detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1450 nm. *Science* 325(5948), 1665–1667.
- Gozeh, B. A. Karabulut, A. Ameen, M. M. Yıldız, A. and Yakuphanoglu, F. (2020). Synthesis and characterization of La-DOPED ZnO (La: ZnO) films for photodetectors: *Surface Review and Letters* 27, (07), 1950173.
- Gray, B. (2006) *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*, John Wiley & Sons, Portsmouth.

- Gullu, H. H. Yildiz, D. E. Kocyigit, A. and Yıldırım, M. (2020). Electrical properties of Al/PCBM:ZnO/p-Si heterojunction for photodiode application: *J Alloys Compd* 827, 154279.
- Gümüş, A. (1997). CrNiCo/MBE n-GaAs Schottky Diyotlarında Termal Tavlamanın ve Numune Sıcaklığının Elektriksel Karakteristiklere Etkileri, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Ha, J. Yoon, S. Lee, J.-S. and Chung, D.S. (2016) Organic-inorganic hybrid inverted photodiode with planar heterojunction for achieving low dark current and high detectivity. *Nanotechnology* 27(9), 095203.
- Haugh, T.S. Peng, J.G. and Lin, C.C. (1992). High temperature stable Schottky Diodes with Enhanced Barrier Height, *J. Appl. Phys.*, 61, 3017-3020. nGaAsMoAl_{7,2}.
- İnternet: Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024). *Diode*. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/technology/diod>. Son erişim tarihi: 08.04.2024.
- İnternet: Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2024).Semiconductor. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/semiconductor>. Son erişim tarihi: 17.05.2024.
- İnternet: Sze, S. and Holton, . William Coffeen (2024).*Semiconductor device*. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/technology/semiconductor-device> Son erişim tarihi: 27.04.2024.
- Johnson, Mark. (2003), *Photodetection and Measurement*. Blacklick, McGraw-Hill Professiona Publishing, p. 14, 15. OH, USA.
- 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.
- Karabulut, A., Dere, A., Al-Sehemi, A.G., Al-Ghamdi, A.A., and Yakuphanoglu, F. (2021). Zinc oxide based 3-components semiconductor oxide photodiodes by dynamic spin coating method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 134, 106034.
- Kasap, S. and Capper, P. editors, (2017).Springer *Handbook of Electronic and Photonic Materials*. Springer International Publishing. Cham.
- Khan W. and Kim, S.-D. (2017). Ultra-violet photo-response characteristics of p-Si/i-SiO₂/n-ZnO heterojunctions based on hydrothermal ZnO nanorods; *Mater Sci Semicond Process* 66, 232-240.
- Ko, H., Park, S., Son, H.J., and Chung, D.S. (2020). Wide-Linear-Dynamic-Range Polymer Photodiode with a New Benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene-Copolymer: The Role of Crystalline Orientation. *Chemistry of Materials*, 32, 3219-3228.
- Kocyigit, A. Aydogan, S. Incekara, Ü. and Yılmaz, M. (2023). The Electrical Characteristics of the Co/Giemsan-Si Heterostructure Depending on Measurement Temperatures and Frequencies *IEEE Sens J* 23, 8184.

- Liu, X. Lin, Y. Liao, Y. Wu, J. and Zheng, Y. (2018) Recent advances in organic nearinfrared photodiodes. *J. Mater. Chem. C* 6(14), 3499–3513.
- Liu, X. Sun, G. Chen, P. Liu, J. Zhang, Z. Li, J. Ma, H. Zhao, B. Wu, R. Dang, W. Yang, X. Dai, C. Tang, X. Chen, Z. Miao, L. Liu, X. Li, B. Liu, Y. and Duan, X. (2019). Direct van der Waals epitaxial growth of 1D/2D Sb₂Se₃/WS₂ mixed-dimensional p-n heterojunctions. *Nano Res* 12, 1139–1145.
- Martinez-Diaz M V, de la Torre G and Torres T (2010). Lighting porphyrins and phthalocyanines for molecular photovoltaics *Chem. Commun.* 46 7090–108.
- Mekki, A., Ocaya, R., Dere, A., Al-Ghamdi, A.A., Harrabi, K., and Yakuphanoglu, F. (2016). New photodiodes based graphene-organic semiconductor hybrid materials. *Synthetic Metals*, 213, 47-56.
- Moore J. and Thompson, C. (2013). A Phenomenological Model for the Photocurrent Transient Relaxation Observed in ZnO-Based Photodetector Devices: *Sensors* 13, 9921-9940.
- Nicollian, E. H. and Brews, J. R. (1982) *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology*: Wiley-Interscience. New York.
- Ongun, O. Taşçı, E. Emrulloğlu, M. Akın, Ü. Tuğluoğlu, N. and Eymur, S. (2021). Fabrication, illumination dependent electrical and photovoltaic properties of Au/BOD-Pyr/n-Si/In schottky diode. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 32, 15707-15717.
- Ozan, N. (1999). 2, 4, 6-Tris[Amino-Hekzakis(Hekziltio) fitalosiyenin] – S-Triazin Sentesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yayınlanmamış Doktora Tezi. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özgür, Ü. Alivov, Ya. I. Liu, C. Teke, A. Reshchikov, M. A. Doğan, S. Avrutin, V. Cho, S.-J. and Morkoç, H. (2005). ZnO malzemeleri ve cihazlarının kapsamlı bir incelemesi: *J Appl Phys* 98, 041301.
- Palomares, E. Clifford, J. N. Haque, S. A. Lutz, T. and Durrant, J. R. (2003). Control of Charge Recombination Dynamics in Dye Sensitized Solar Cells by the Use of Conformally Deposited Metal Oxide Blocking Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 125(2), 475–482.
- Paul, S. Mondol, N. Rahman, S. Easmin, F. and Moniruzaman (2020) “Performance improvement of solar photovoltaic panel using smart water cooling technology” *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, ICMIEE20*-184.
- Peumans, P. Yakimov, A. and Forrest, S.R. (2003) Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells. *J. Appl. Phys.* 93, 3693-3723.
- Rajan, L., Periasamy, C. and Sahula, V. (2016). Electrical characterization of Au/ZnO thin film Schottky diode on silicon substrate. *Perspectives on Science*, 8, 66-68.

- Reddy, P.R., Janardhanam, V., Shim, K., Lee, S., Kumar, A., Reddy, V.R., and Choi, C. (2020). Temperature dependent Schottky barrier characteristics of Al/n-type Si Schottky barrier diode with Au–Cu phthalocyanine interlayer. *Thin Solid Films*, 713, 138343.
- Rhoderick E. H. and Williams R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press, Oxford University Press:2nd ed. 19, New York.
- Schmidt, R.A. Perley, M.O. and Kuehm, R.A. (2012) U.S. Patent 8 290 726 B2.
- Sedef, A. G. (2002) Polipirol-Poliamid/Metal Eklemlerinin Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Seiyama, T. Kato, A. Fujiishi, K. and Nagatani, M. (1962). A New Detector for Gaseous Components Using Semiconductive Thin Films. *Analytical Chemistry*, 34(11), 1502–1503.
- Simone, G. Rasi, D.D.C. de Vries, X. Heintges, G.H.L. Meskers, S.C.J. Janssen, R.A.J. and Gelinck, G.H. (2018) Near-infrared tandem organic photodiodes for future application in artificial retinal implants. *Adv. Mater.* 30(51),1804678.
- Singh, A. (1985). Characterization of interface states at Ni/n Schottky barrier type diodes and the effect of surface preparation. *Solid-State Electronics*, 28, 223-232. 2CdF2CdF.
- Singh, J. Singh, R.G. Gautam, S.K. and Singh, F. (2018) Multifunctional hybrid diode: Study of phosphorescence, high responsivity, and charge injection mechanisms. *J. Appl. Phys.* 123(17), 174503.
- Siontas, S. Wang, H. Li, D. Zaslavsky, A. and Pacifici, D. (2018) Broadband visible-totelecom wavelength germanium quantum dot photodetectors. *Appl. Phys. Lett.* 113(18), 181101.
- Sun, R.-D. Nakajima, A. Fujishima, A. Watanabe, T., and Hashimoto, K. (2001). Photoinduced Surface Wettability Conversion of ZnO and TiO₂ Thin Films. *The Journal of Physical Chemistry B*, 105(10), 1984–1990.
- Szatkowski, J. and Sieranski, K. (1988). Interface effects on Mg-Zn₃P₂ Schottky diodes, *Solide State Electron.*, 31, 257-260.
- Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*, (2nd ed). John Wiley and Sons, 55: New York.
- 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.
- Şafak-Asar, Y. Asar, T. Altındal, Ş. and Özçelik, S. (2015). Investigation of dielectric relaxation and ac electrical conductivity using impedance spectroscopy method in (AuZn)/TiO₂/p-GaAs(110) schottky barrier diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 628, 442–449.

- T.C. Millî Eğitim Bakanlığı (2013) *Yenilenebilir Enerji Teknolojileri* Ankara: T.C. Millî Eğitim Bakanlığı.
- Tanrikulu, E. E. Demirezen, S. Altındal, Ş. and Uslu, İ. (2017). Analysis of electrical characteristics and conduction mechanisms in the Al/(%7 Zn-doped PVA)/p-Si (MPS) structure at room temperature *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 28, 8844-8856.
- Tanrikulu, E. E. Demirezen, S. Altındal, Ş. and Uslu, İ. (2018). On the anomalous peak and negative capacitance in the capacitance-voltage (C-V) plots of Al/(%7 Zn-PVA)/p-Si (MPS) structure: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 29, 2890-2898.
- Tatar, B. And Demiroğlu, D. (2015). Electrical properties of FePc organic semiconductor thin films obtained by CSP technique for photovoltaic applications. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 31, 644-650.
- Tatar, B., Demiroğlu, D. and Ürgen, M. (2013). Structure and photovoltaic properties of Ag/p-CuPc/a-Si/c-Si/Ag organic-inorganic hybrid heterojunction fabricated by chemical spray pyrolysis technique. *Microelectronic Engineering*, 108, 150-157.
- Tataroglu, A. Koran, K. Çaliskan, E. Al-Sehemi, A. G. Görgülü, A. O. Al-Ghamdi, A.A. and Yakuphanoglu, F. (2019). Metallo-Phthalocyanines Based Photocapacitors: *Silicon* 11, 1275-1286.
- Tataroğlu, A., Al-Ghamdi, A.A., El-Tantawy, F., Farooq, W.A., and Yakuphanoglu, F. (2016). Analysis of interface states of FeO-Al₂O₃ spinel composite film/p-Si diode by conductance technique. *Applied Physics A*, 122, 1-6.
- Türkmen, C. (2002) AIII BIV Kristallerinde Fotoiletkenlik ve GaS, GaSe, GaTe ve GaSe_{1-x}Tex Kristallerle Metal-Yarıiletken-Metal Eklemler, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Urbani, M., Ragoussi, M., Nazeeruddin, M.K., and Torres, T. (2019). Phthalocyanines for dye-sensitized solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*.381,1-64.
- Wachs, I. E. (1996). Raman and IR studies of surface metal oxide species on oxide supports: Supported metal oxide catalysts. *Catalysis Today*, 27(3-4), 437-455.
- Wang, X. Zheng, J. Qiao, K. Qu, J. and Cao, C. (2014) Studies on structure and Raman spectroscopy of Ni-doped copper phthalocyanine thin films; *Appl Surf Sci* 297, 188-194.
- Wang, Y. Li, J. Wang, L. Xue, T. and Qi, T. (2010). Preparation of Rutile Titanium Dioxide White Pigment via Doping and Calcination of Metatitanic Acid Obtained by the NaOH Molten Salt Method. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(16), 7693-7696.
- Wang, Z. Zhou, L. and David Lou, X. W. (2012). Metal Oxide Hollow Nanostructures for Lithium-ion Batteries. *Advanced Materials*, 24(14), 1903-1911.

- Wojciechowski, J.R. Shriver-Lake, L.C. Yamaguchi, M.Y. Füreder, E. Pieler, R. Schamesberger, M. Winder, C. Prall, H.J. Sonnleitner, M. and Ligler, F.S. (2009) Organic photodiodes for biosensor miniaturization. *Anal. Chem.* 81(9), 3455–3461.
- Yakimov, A. and Forrest, S. R. (2002). High photovoltage multiple-heterojunction organic solar cells incorporating interfacial metallic nanoclusters. *Appl. Phys. Lett.* 80, 1667-1669.
- Yakuphanoglu, F. (2007). Electronic and photovoltaic properties of Al/p-Si/copper phthalocyanine photodiode junction barrier. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91, 1182–1186.
- Yang, D. and Ma, D. (2018) Development of organic semiconductor photodetectors: From mechanism to applications. *Adv. Optical Mater.* 7(1), 1800522.
- Yaşar, S. Kahraman, S. Çetinkaya, S. and Bilican, İ. (2015). Improved characteristics for chemically grown Cu₂SnS₃ promising solar absorbers through the use of TritonX-100® surfactant: *J Alloys Compd* 618, 217-221.
- Yıldırım, M. (2019). Characterization of the framework of Cu doped TiO₂ layers: An insight into optical, electrical and photodiode parameters; *Journal of Alloys and Compounds* 773, 890-904.
- Yılmaz S. et al. (2015). “Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 997-1005.
- Yükseltürk, E., Surucu, O., Terlemezoglu, M., Parlak, M., and Altındal, Ş. (2021). Illumination and voltage effects on the forward and reverse bias current–voltage (I-V) characteristics in In/In₂S₃/p-Si photodiodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 21825 - 21836.
- Zhao, Y. Li, C. and Shen, L. (2018). Recent research process on perovskite photodetectors: A review for photodetector—materials, physics, and applications: *Chinese Physics B* 27, 127806.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gökhan ÖZEL

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

- 1-) Özel, G and Demirezen, S. (2024) Investigation of hybrid CuPc-doped ZnO/p-silicon photodiodes for photonic and electronic applications, J Mater Sci: Mater Electron, April 27. 2024. 35:946.

