



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BODIPY ARAYÜZEYLİ DİYOTLARIN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN
AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI
ARAŞTIRILMASI**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

Muhammed Ferit ŞAHİN

162108009

Haziran 2019

GİRESUN

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

**BODIPY ARAYÜZEYLİ DİYOTLARIN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN
AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Ferit ŞAHİN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serkan EYMUR

Haziran 2019

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

**BODİPY ARAYÜZEYLİ DİYOTLARIN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN
AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Ferit ŞAHİN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu tez 21/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


**Doç. Dr.
Ömer Faruk YÜKSEL
Jüri Başkanı**


**Prof. Dr.
Nihat TUĞLUOĞLU
Üye**


**Doç. Dr.
Serkan DİNLER
Üye**

**Doç. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammed Ferit ŞAHİN

21/06/2019



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilimsel desteklerini benden esirgemeyen, her türlü olanağı sağlayan kıymetli hocalarım Doç. Dr. Serkan EYMUR ve Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez aşamasında bilgi birikimi ve görüşleriyle katkı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL'e, Doç. Dr. Osman PAKMA'ya ve Arş. Gör. Dr. Ümmühan Akın'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bütün destekleri için arkadaşım Abdulhamit Ömer SARIKAYA'ya da teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen başta annem olmak üzere aileme de sonsuz sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Metal – Yarıiletken Kontaklar	3
2.1.1. Metal – n tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	4
2.1.2. Metal – n tipi yarıiletken omik kontak.....	6
2.2. Metal/Organik Yarıiletken/Yarıiletken/Schottky Diyotların Yapısı.....	7
2.3. Metal – Yarıiletken Kontakların Akım – Voltaj Karakteristikleri	8
2.4. Arayüzey Durum Yoğunluğu	10
2.5. Metal – Yarıiletken Fotodiyotlar.....	11
2.6. Fotodiyotların Akım – Gerilim Karakteristiği	12
2.7. Fotovoltaik Parametreler	14
2.7.1. Açık devre voltajı.....	14
2.7.2. Kısa devre akımı	15
2.7.3. Maksimum akım – maksimum voltaj.....	15
2.7.4. Dolum faktörü	15
2.7.5. Seri direnç	15
BÖLÜM 3. MATERYAL ve YÖNTEM	19

3.1. Organik Yarıiletken Malzemenin Hazırlanması ve Sentezi.....	19
3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi.....	20
3.3. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Diyotunun Hazırlanması	20
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	22
4.1. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım – Voltaj Karakteristikleri	22
4.2. Cheung Metodu Yardımı İle Seri Direnç Hesaplanması.....	26
4.3. Organik Arayüzey Yoğunluğunun Hesaplanması.....	28
4.4. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri.....	30
 BÖLÜM 5. SONUÇLAR.....	35
 KAYNAKLAR	37
 ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Alan
A^*	: Richardson sabiti
E_c	: İletim bandı maksimum enerji seviyesi
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi
FF	: Dolum faktörü
I	: Akım
I_0	: Ters doyma akımı
I_m	: Maksimum akım
I_{sc}	: Kısa devre akımı
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzman Sabiti
n	: Elektron konsantrasyonu
n	: İdealite faktörü
p	: Boşluk konsantrasyonu
P	: Güç
P_m	: Maksimum güç
q	: Taşıyıcı yük
R	: Direnç
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık

V	: Gerilim
V_m	: Maksimum gerilim
V_{oc}	: Açık devre voltajı
W_D	: Tükenim tabakası
ϕ_b	: Engel yüksekliği
ϕ_m	: Metal iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletken iş fonksiyonu
ε_i	: Arayüzey katmanı geçirgenliği
ε_s	: Yarıiletken geçirgenliği
δ	: Arayüzey tabakası kalınlığı
MS	: Metal/Yarıiletken
MIS	: Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MOS	: Metal/Organik/Yarıiletken
OLED	: Organik ışık yayan diyot

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. (a) Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan önceki enerji bant diyagramı, (b) Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan sonraki enerji bant diyagramı.....	5
Şekil 2.2. Metal/yarıiletken kontağının doğrultucu kontak davranışı	6
Şekil 2.3. (a) Metal n-tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan önceki enerji bant diyagramı, (b) Metal n-tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan sonraki enerji bant diyagramı.....	7
Şekil 2.4. Metal/Organik/Yarıiletken yapısının şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.5. Aydınlatılan bir metal – yarıiletken kontağın şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.6. Bir fotodiyotun yapısı	12
Şekil 2.7. Bir fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım – gerilim karakteristikleri	13
Şekil 2.8. Fotodiyotun akım – gerilim grafiği	14
Şekil 2.9. Metal – yarıiletken kontaklarda seri direncin etkili olduğu bölge	16
Şekil 3.1. BODIPY-MF organik bileşiğinin sentezi.....	19
Şekil 3.2. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun şematik gösterimi.....	21
Şekil 4.1. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj grafiği	24
Şekil 4.2. Au/BODIPY-MF/n-Si/In diyotunun n ve Φ_b değerlerinin ışık şiddetiyle değişimi	25
Şekil 4.3. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $H(I) - I$ grafiği	26
Şekil 4.4. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky Diyotunun 1MHz’de kapasite voltaj grafiği.....	29
Şekil 4.5. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky Diyotunun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki $N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ grafiği.....	29

Şekil 4.6. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği	31
Şekil 4.7. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği	31
Şekil 4.8. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun tüm aydınlatma şiddetlerine karşılık V_{oc} ve J_{sc} grafiği	32
Şekil 4.9. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun aydınlatma şiddetine karşılık FF ve P_{max} grafiği.....	33



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. İş fonksiyonuna göre metal – yarıiletken kontak türü	3
Tablo 4.1. Au/BODIY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan n ve Φ_b değerleri	24
Tablo 4.2. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun seri direnç (R_s) değerleri .	27
Tablo 4.3. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun V_{oc} ve J_{sc} değerleri	32
Tablo 4.4. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun aydınlatma şiddetine göre V_{max} , I_{max} , P_{max} ve FF değerleri	34

BODIPY ARAYÜZEYLİ DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, $C_{42}H_{36}B_2F_4N_4$ organik bileşiği spin kaplama yöntemi ile n tipi silisyum kristalinin üzerine ince film olarak büyütülmüştür. $C_{42}H_{36}B_2F_4N_4$ organik bileşiği sentezi ilk defa bu çalışmada yapılmıştır ve BODIPY-MF ismi verilmiştir. Au/BODIPY-MF/n-Si/In diyotu üretildi ve diyota ait elektriksel parametreler karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde I – V ölçümleri kullanılarak incelendi. Diyot ve fotodiyot parametrelerinden olan idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b), kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve dolum faktörü (FF) gibi parametreler hesaplanmıştır. İdealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerleri karanlık için sırasıyla 2,66 ve 0,906 eV, 100 mW/cm^2 için ise sırasıyla 1,21 ve 0,967 eV olarak hesaplanmıştır.

Hesaplamalardan da görüldüğü gibi engel yüksekliği (ϕ_b), artan aydınlatma şiddeti ile birlikte idealite faktörünün azalmasıyla artmıştır. Yapmış olduğumuz diyotun 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddetindeki kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}) ve dolum faktörü (%) sırasıyla $8,93 \times 10^{-4} mA/cm^2$, 0,14 V ve 20,23 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak hazırlamış olduğumuz Au/BODIPY-MF/n-Si/In diyotunun ışığa karşı duyarlı olduğunu ve fotovoltaiik özellik gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Schottky diyot, idealite faktörü, engel yüksekliği, aydınlatma yoğunluğu,

BODIPY ARAYÜZEYLİ DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI ARAŞTIRILMASI

SUMMARY

In this thesis, $C_{42}H_{36}B_2F_4N_4$ organic compound was grown as thin film on n type silicon crystal by spin coating method. The synthesis of organic compound $C_{42}H_{36}B_2F_4N_4$ was performed for the first time in this study and named BODIPY-MF. The Au/BODIPY-MF/n-Si/In diode was produced and the electrical parameters of the diode were examined using I - V measurements at dark and different illumination intensities. Diode and photodiode parameters such as ideality factor (n), obstacle height (ϕ_b), short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}) and filling factor (FF) were calculated. Ideality factor (n) and barrier height (ϕ_b) values were calculated as 2,66 and 0,906 eV for darkness and 1,21 and 0,967 eV for 100 mW/cm^2 , respectively.

As it can be seen from the calculations, the barrier height (ϕ_b) increased with decreasing of ideality factor with *increasing illumination intensity*. The short-circuit current (I_{sc}), the open-circuit voltage (V_{oc}) and the fill factor (%) of the diode we have made with a lighting intensity of 100 mW/cm^2 respectively was calculated as, $8,93 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$, 0,14 V and 20,23. As a result, the Au/BODIPY-MF/n-Si/In diode that we prepared was sensitive to light and showed photovoltaic properties.

Keywords: Schottky diode, Ideality factor, barrier height, illumination intensity

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektronik ve fizik bilimi Schottky diyotlara günümüz teknolojisiyle önem kazandırmıştır. Schottky diyotlar metal – yarıiletken kontakların birleşmesiyle oluşur. Schottky diyotlar yarıiletken devre elemanlarında doğrultucu kontak ve omik kontak olarak görev yapabilirler. Metal – yarıiletken kontaklardan elde edilen bu Schottky diyotlar güneş pilleri, LED uygulamaları, mikrodalga karıştırıcı dedektörler, varaktörler, telekomünikasyon, organik ışık yayan diyot (OLED), radar sistemleri, termal görüntüleme sensörleri, organik alan etkili transistörler, yüksek frekanslarda hızlı anahtarlama gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Metal – yarıiletken kontaklarla ilgili ilk çalışma Braun tarafından 1874'lü yılların başlarında yapılmıştır. Metal – yarıiletken kontaklarda doğrultma davranışı ile ilgili çalışmaları ilk olarak Schottky ve arkadaşları yapmıştır [1]. Schottky diyotlarda uygun kontaklar yapabilmek için elektriksel karakteristiklerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini anlamak için uzun süredir yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir.

Schottky kontakların elektriksel özelliklerini genel olarak ara yüzey özellikleri belirler. Metal – yarıiletken arasında bir oksit tabaka meydana gelir. Oksit tabaka metal/yalıtkan/yarıiletken MIS yapısına dönüştürür. MIS ile ilgili başarılı anlamda ilk çalışma Ligenza ve Spitter tarafından Si altlık üzerine SiO_2 ince filmin büyütülmesiyle yapılmıştır [1]. Elektriksel karakteristikler metal ile yarıiletken arasına bir organik katmanın ilave edilmesiyle kontrol edilebilir. Schottky diyotların verimlerini arttırmanın bir yolu uygun bir organik yarıiletken seçimi olacaktır. Organik yarıiletken malzemeler çeşitli kaplama yöntemleriyle kaplanıp fazla miktarda, ucuz maliyetle üretilibildikleri için ilgi çekmektedir. Organik

yarıiletkenler üretiminin seri ve ucuz olmasından dolayı birçok teknoloji alanında tercih edilmiştir.

Schottky diyotlarının birçok alanda tercih edilmesinin sebebi yüksek frekanslarda uygulanan gerilimin yön değiştirmesine bağlı olarak verdikleri yanıtların yüksek performansı, daha önce yapılan nokta – kontak diyotlara göre seri direncinin düşük olması, yüksek güç kapasitesi ve düşük gürültü seviyesi yer almaktadır. Metal – yarıiletken kontakların elektriksel özellikleri kullanılan ara yüzey malzemesiyle ilişkilidir. Metal ile yarıiletken arasında kullanılan ara yüzey malzeme diyota ait idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç gibi birçok parametreyi etkileyecektir [2,3]. Schottky kontakların elektriksel özelliklerini geliştirmek için çoğu araştırmacı ara yüzey malzemesi olarak organik yarıiletken malzeme üzerine çalışma yapmaktadır. Araştırmacıların ara yüzey malzeme olarak organik yarıiletken malzeme ile çalışma yapmalarının sebepleri arasında organik yarıiletkenlerin spin kaplama ve baskı gibi ucuz maliyetle üretilebilmeleri, yüksek nonlinearlık gibi birçok özelliğe sahip olmaları gibi etkenler yer almaktadır [4].

BODIPY, bileşikler ışık ve kimyasallara karşı dayanıklı floresans maddelerdir. Görünür bölgedeki ışınları yoğun olarak absorbe edebilirler. BODIPY organik bileşiklerinin kuantum verimleri yüksek ve görünür bölgedeki emisyonları nedeniyle büyük ilgi çekmektedir. Dipirimoten ligandlarının Bor (B) ile yaptığı bileşikler BODIPY bileşikler olarak adlandırılır [5,6].

Bu çalışmada n tipi Si kristali altlık olarak kullanılmıştır. Doğrultucu kontak altın (Au), omik kontak Indiyum (In) kullanılarak Au/BODIPY-MF/In Schottky diyotu oluşturulmuştur. Bu Schottky diyotun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerinde akım – gerilim (I –V) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre hazırlanmış olduğumuz Schottky diyotun doğrultucu özelliğine sahip bir diyot olduğu görülmüştür. Termiyonik emisyon teorisinden faydalanarak oluşturduğumuz diyotun idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b) ve seri direnç (R_s) parametreleri hesaplanmıştır. Hazırladığımız diyotun ışığa karşı duyarlılığını akım – gerilim (I –V) ölçümlerinden tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2.TEORİK BİLGİLER

2.1. Metal – Yarıiletken Kontaklar

Schottky diyotlar bir metal ile yarıiletkenin kontağı sonucu oluşur. Oluşturulan kontakın ideal olması, kontak maddelerinin yüzeylerinin pürüzsüz ve temiz olmasıyla ilişkilidir. Kontak haline getirilen malzemeler arasında Fermi enerji seviyeleri aynı seviyeye gelinceye kadar bir yük alışverişi olur. Bu durum, her iki maddenin elektronik enerji bant diyagramı ile ilgilidir. Metal – yarıiletken kontaklar her iki maddenin iş fonksiyonuna göre omik ve doğrultucu kontak olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Akım taşıyıcılarını bir yönde diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontak denir.

Metal – yarıiletken kontak türünün omik veya doğrultucu kontak olması metal iş fonksiyonuna (ϕ_m), yarıiletken iş fonksiyonuna (ϕ_s) ve yarıiletkenin p tipi veya n tipi oluşuna bağlıdır. Omik ve doğrultucu kontakların metal iş fonksiyonuna ve yarıiletken iş fonksiyonuna göre oluşumu aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

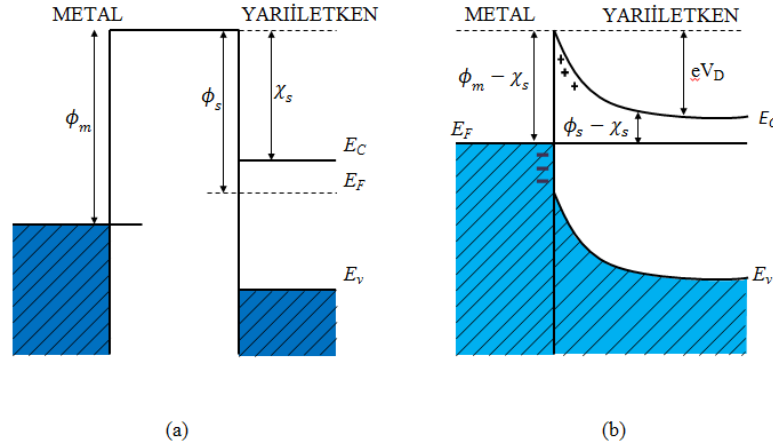
Tablo 2.1. İş fonksiyonuna göre metal – yarıiletken kontak türü

İş Fonksiyonlarının Durumu	Yarıiletken Durumu	Kontak Türü
$\phi_m < \phi_s$	n tipi	Omik kontak
$\phi_m > \phi_s$	n tipi	Doğrultucu kontak
$\phi_m > \phi_s$	p tipi	Omik kontak
$\phi_m < \phi_s$	p tipi	Doğrultucu kontak

2.1.1. Metal – n tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Metal ile yarıiletkenin kontak haline getirilmesiyle aralarında bir yük alışverişi gerçekleşir. Bu yük alışverişi Fermi enerji seviyeleri aynı düzeye gelene kadar devam eder. Akım taşıyıcılarını bir yönden diğer yöne daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontak denir. Doğrultucu kontakta elektronlar potansiyel engelinden dolayı bir yönde serbest hareket ederken ters yöndeki geçişleri bu potansiyel engelden dolayı zorlaşacaktır.

Metal iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletken iş fonksiyonu ϕ_s 'den büyük ise metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontağı oluşur. Metal ile yarıiletkenin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı Şekil 2.1(a)'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kontak öncesi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden metal iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonunun farkı kadar yukardadır. İş fonksiyonu, bir elektronu Fermi enerji seviyesinden (E_F) vakum seviyesine çıkarabilmek için gerekli enerjiye denmektedir, χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir ve iletim bandı (E_c) ile vakum seviyesi arasındaki farka eşittir [1]. Metal – yarıiletken kontağından sonra yarıiletkenin iletkenlik bandından metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip elektronlar Fermi enerji seviyeleri eşit olana kadar kontak bölgesine girerler. Yarıiletkendeki elektron yoğunluğunun azalmasıyla birlikte iletim bandı (E_c) ile Fermi enerji (E_F) seviyesi arasındaki mesafe giderek artar ve termal dengeye ulaşınca sabit kalacaktır. Yarıiletkenin iletim bandındaki elektron konsantrasyonunun azalması Fermi enerji (E_F) seviyesinin daha aşağıdaki bir enerji seviyesine doğru hareketine sebep olacaktır. İletim bandı elektronları geride pozitif yüklü iyonize boşluklar bırakacaklardır [7]. Kontak sonrası yarıiletken bant diyagramı Şekil 2.1(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. (a) Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontaklan önceki enerji band diyagramı, (b) Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontaklan sonraki enerji band diyagramı

Metal ile kontaklanan yarıiletkenin kontak sonrası yasak enerji aralığı değişmeyeceği için E_V , E_C ile vakum seviyesi birlikte aşağıya doğru bükülür. Şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibi bant bükülme miktarı metal iş fonksiyonu ile yarıiletken iş fonksiyonu farkına eşittir.

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

Metalden yarıiletkene doğru bir engel farkı oluşur. Bu engel yüksekliği;

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s \quad (2.2)$$

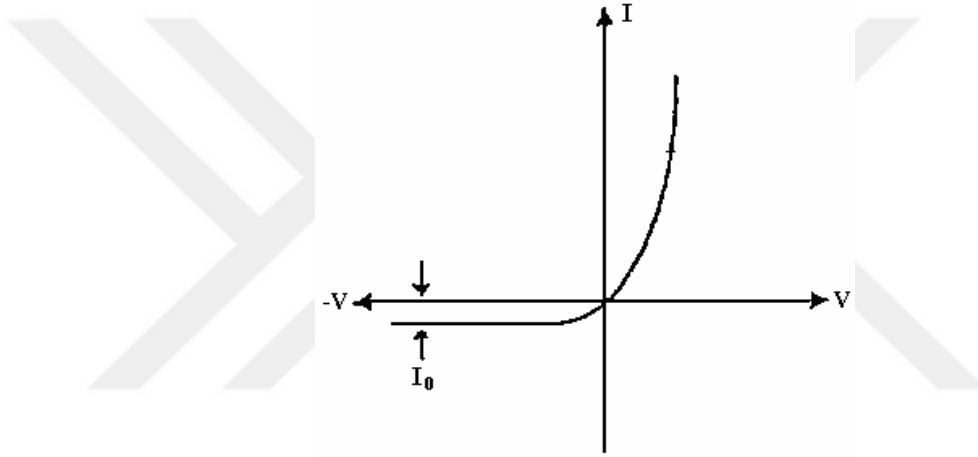
şeklinde ifade edilir.

Metalin bazı elektronları potansiyel engelini aşarak yarıiletkenin içine girerler, yarıiletkenin de bazı elektronları da potansiyel engeli aşarak benzer bir şekilde metalin içine girerler. Denge durumunda eşit ve zıt yönlü bir I_0 akımları oluşturacaklardır. Yarıiletkene bir $-V$ uygulanırsa metalden yarıiletkene doğru giden elektronlar için engel değişmez ve bundan dolayı yarıiletkenden metale gelen akım da değişmeyecektir. Diyotun akım – gerilim ilişkisi;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

şeklinde verilir. Burada I_0 ters doyma akımı, q taşıyıcı yük, k Boltzman sabiti, T sıcaklık (Kelvin), n idealite faktörü ve V ise uygulanan gerilimdir. İdeal bir diyot için idealite faktörü $n = 1$ 'dir [2]. Metal n-tipi doğrultucu kontakta kontak $V > 0$ olursa düz beslemde, $V < 0$ olursa ters beslemde.

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, düz beslem durumunda akım geçer ve ters yönde ise neredeyse akım geçmemektedir. Kontakta doğru yönde gerilim uygulandığında, yarıiletken metale geçen elektronlar için potansiyel engel yüksekliği, gerilimle azalmakta ve akım – gerilim karakteristiği düz beslem tarafı üssel bir değişim göstermektedir.

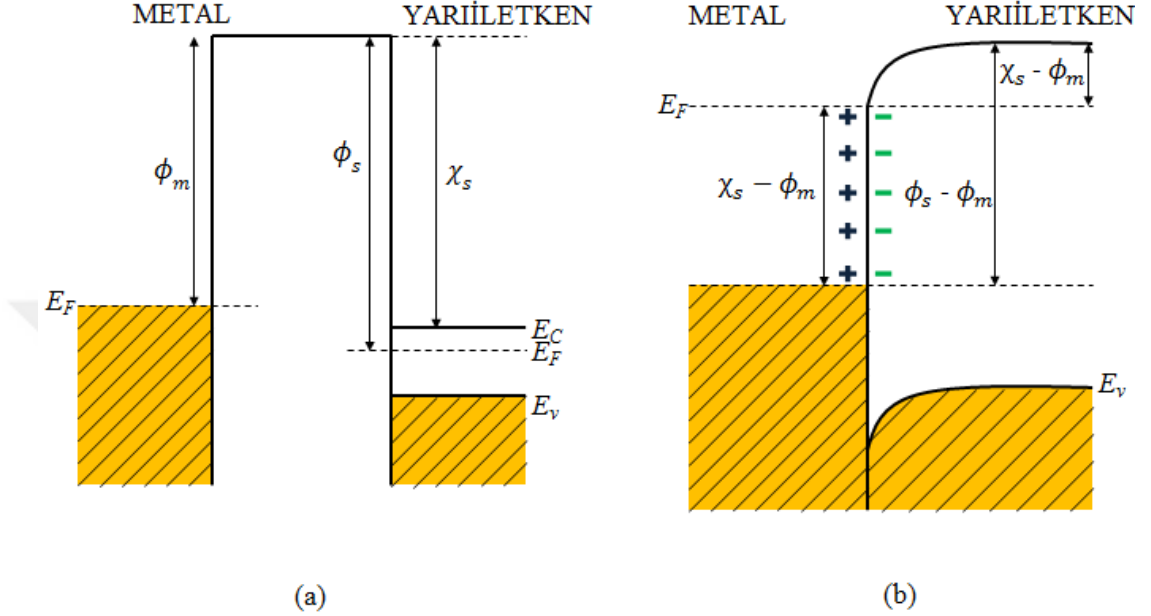


Şekil 2.2. Metal/yarıiletken kontakta doğruyu kontak davranışı

2.1.2. Metal – n tipi yarıiletken omik kontak

Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklarda iletimi sağlayan akım taşıyıcıları akımı her iki yönde de kolayca iletebiliyor. Tablo 2.1'de de belirtildiği gibi metal iş fonksiyonunun yarıiletken iş fonksiyonundan küçük olması durumunda omik kontak oluşur ($\phi_m < \phi_s$). Metal ile yarıiletkenin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı Şekil 2.3 (a)'da gösterilmiştir. Şekil 2.3(a)'da görüldüğü gibi kontak öncesi yarıiletken Fermi enerjisi metal Fermi enerjisinden $\phi_m - \phi_s$ kadar aşağıdadır. Kontak yapıldıktan sonra metaldeki elektron konsantrasyonu yarıiletken elektron konsantrasyonundan daha büyük olmasından dolayı metalden yarıiletkene doğru elektronlar akmaya başlayacaktır. Bu durum metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam edecektir. Kontak sonrası metal ile

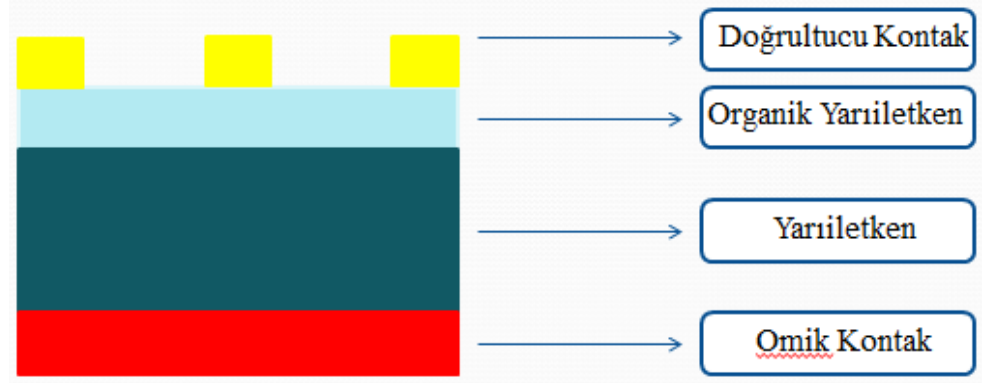
yarıiletkenin enerji bant diyagramı Şekil 2.3(b)'de verilmiştir. Elektronlar, geride negatif yüklü boşluklar oluşturacaklardır. Sonuçta, E_c , E_v ve vakum seviyesi yukarı doğru bükülecektir. Böylece bu kontak omik kontak olarak davranacaktır.



Şekil 2.3. (a) Metal n-tipi yarıiletken omik kontakın kontak öncesi enerji bant diyagramı, (b) Metal n-tipi yarıiletken omik kontakın kontak sonrası enerji bant diyagramı

2.2. Metal/Organik Yarıiletken/Yarıiletken/Schottky Diyotların Yapısı

Yarıiletken ile doğrultucu metal kontak arasına organik bir yarıiletken kaplandığı zaman metal/yarıiletken (MS) yapısı, metal/organik yarıiletken/yarıiletken (MOS) yapıya dönüşür. Bir organik arayüzey tabakası metal ile yarıiletkeni birbirinden izole ederken metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini de düzenler. Bu sebeple MOS yapısındaki diyotların akım iletimi MS yapısındaki diyotların akım iletiminden farklı olur. Bir MOS yapısının şematik gösterimi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Metal/Organik/Yarıiletken yapısının şematik gösterimi

2.3. Metal – Yarıiletken Kontakların Akım – Voltaj Karakteristikleri

Schottky diyotlar, termiyonik emisyon teorisine uyan $I - V$ karakteristiğine sahiptir. Termiyonik emisyon teorisi sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların yayınlanması anlamına gelir. Bu olay metal – yarıiletken kontaklarda taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesi olayıdır. Termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell – Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için Schottky kontağa ait potansiyel engelin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir [2,8,9]. Bu teoriye göre akım – voltaj ilişkisi;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

ifadesi ile verilir. Burada I_0 ters doyma akımı, q taşıyıcı yük, k Boltzman sabiti, T sıcaklık (Kelvin), n idealite faktörü ve V ise uygulanan gerilimdir, I_0 ;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[-q \left(\frac{\phi_b - \phi_{bi}}{kT} \right) \right] \quad (2.5)$$

ifadesiyle verilir. Burada A diyot kontak alanı ve A^* Richardson sabitidir. Bu sabit;

$$A^* = \frac{m_n e k^2}{2\pi^2 \hbar^3} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir [10].

Bir Schottky diyotu için engel yüksekliği;

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.7)$$

ifadesi ile verilir.

Termiyonik emisyon teorisine göre, idealite faktörü $n = 1$ durumunun pratikte elde edilmesine literatürde hiç rastlanmamıştır. Bu durum, engel yüksekliğinin uygulanan gerilimle değişmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bunun nedeni, metal – yarıiletken arasında ideale en yakın diyotlarda bile ince bir oksit tabakasının doğal olarak oluşmasıdır. [11,12]. Denklem (2.4) bu sebepten dolayı aşağıdaki gibi düzeltilir.

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

Buradaki n idealite faktörünü ifade eder. n ;

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.9)$$

denklemini ile verilir.

Termiyonik emisyon teorisine göre düz beslemede $V > 3kT/q$ bölgesinde hesaplama yapılmaktadır. Bu durumda denklemin ikinci kısmı ihmal olur ve denklem aşağıdaki şekilde kullanılır;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad (2.10)$$

2.4. Arayüzey Durum Yoğunluğu

Bir metal, yarıiletkenin yüzeyine buharlaşma yolu ile kaplandığı zaman metal ile yarıiletken arasında bir kimyasal reaksiyon oluşur. Bu reaksiyon sonucu arayüzey durumları oluşur [2,13].

Arayüzey durumları arayüzeydeki yasak bant aralığındaki girilebilir enerji seviyesidir. Arayüzey durumu verici (donör) veya alıcı (akseptör) tipinde olabilir. Donör, enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. Akseptör ise enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Bir gerilim uygulandığında, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletim bantları ile aşağı ve yukarı doğru hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletim bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Metal – yarıiletken kontaklarda arayüzey tuzakları genel olarak metal ile dengededir. Fakat metal ile yarıiletkenin arasına 30µm'dan kalın olan bir arayüzey tabakası kaplanırsa yarıiletken ile dengede olur [13].

Metal ile yarıiletken kontaklar için aşağıdaki denklem ile arayüzey durum yoğunluğunun değeri hesaplanır.

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} \frac{1}{(n(V)-1)} - \frac{\epsilon_i}{\delta} \right] \quad (2.11)$$

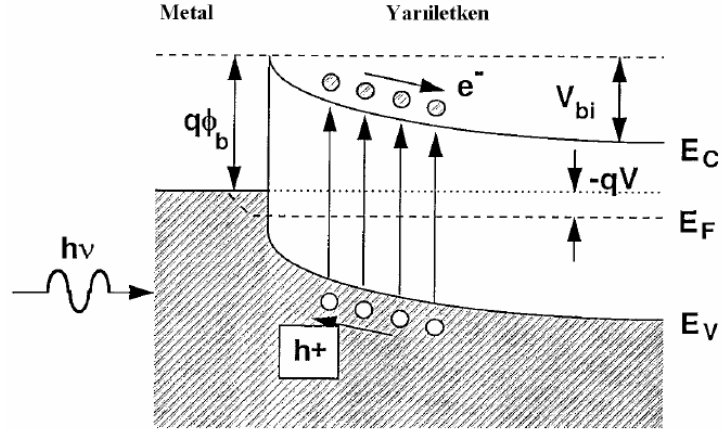
Arayüzey durum yoğunluğu Metal/Organik/Yarıiletken (MOS) kontaklar için aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right) \quad (2.12)$$

Denklemde belirtilen q elektron yükü, ϵ_i arayüzey katmanı geçirgenliği, δ arayüzey tabakası kalınlığı, ϵ_s yarıiletken geçirgenliği ve W_D ise tükenim tabakası genişliğini ifade etmektedir.

2.5. Metal – Yarıiletken Fotodiyotlar

Fotodiyotlar bilindiği gibi ışığa karşı diyotlar olarak tanımlanır. Fotodiyot yüksek bir elektrik alanı ile boşaltılmış yarıiletken bölgesinde serbest yük taşıyıcılarına sahiptir. Şekil 2.5’ de aydınlatılan bir metal – yarıiletken kontağın şematik gösterilimi verilmiştir.



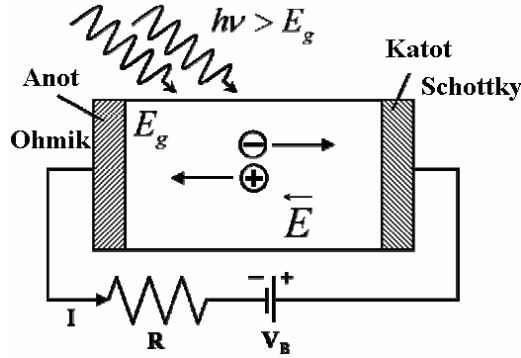
Şekil 2.5. Aydınlatılan bir metal – yarıiletken kontağın şematik gösterimi [16]

Diyot eklemi içindeki foto taşıyıcıların yer değiştirmesi ile fotodiyot çalışır. Işık doğrultucu kontağa geldiği zaman, yeteri miktarda enerjiye sahip olan fotonlar soğurulmaya başlar. Fazlalık boşluklar ve elektronlar kontak alanına yayılarak metal – yarıiletken kontağının farklı yerlerinde toplanırlar. Elektronlar katoda, boşluklar anoda doğru sürüklenir ve bir elektrik akımı oluşur. Bu akım foto akımdır.

Schottky fotodiyotları, görünür ışık olan UV’nin algılanmasında mükemmeldir ve var olan fotodiyotlar arasında en hızlısıdır. Fakat bu fotodiyotlar yüksek katkılamalı metal tabakasından ve soğurma bölgesinin ince olmasından dolayı verimleri düşüktür. Fotodiyotun üzerine düşen fotonların yarıiletken malzeme içinde ilerlemesi ışığın dalga boyu ile ilişkilidir. Dalga boyu düşük olan ışınlar (UV), yüzeyde emilirken kızılötesi ışınlar yarıiletkenin derinliklerine kadar ilerler.

Fotodiyotlar, anot-katot elektriksel kontakları ve bir yarıiletkenenden oluşur. Bir yarıiletkenin bant aralığından daha yüksek enerji ile gelen fotonlar, yarıiletken

tabakanın içinde soğurulurlar. Serbest elektron – boşluk çiftinin oluşmasından dolayı soğurulma işlemi olur. Eğer anot katottan daha düşük potansiyele sahip olursa, yarıiletken karşısında elektrik alanı oluşur.

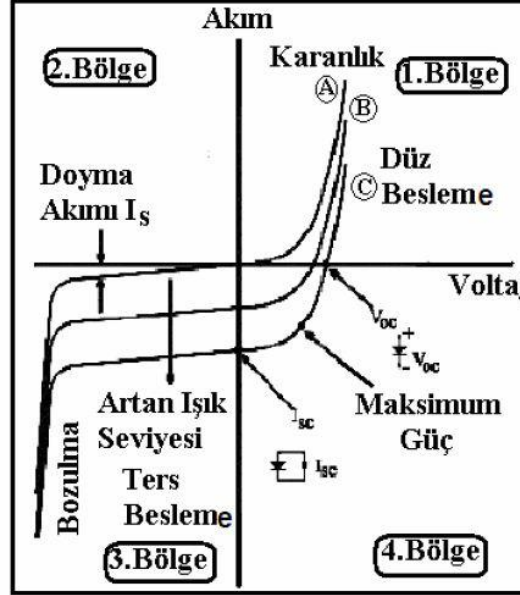


Şekil 2.6. Bir fotodiyotun yapısı [16]

2.6. Fotodiyotların Akım – Gerilim Karakteristiği

Bir fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış haldeki akım – gerilim karakteristiği Şekil 2.7’de gösterilmiştir. göstermektedir. Fotodiyotun hassas olduğu bölge karanlıkta ise fotodiyot üzerinden akan akım, termal yolla azınlık taşıyıcılarıyla oluşan akımdır. Bu akım karanlık akım olarak tarif edilir. Şekil 2.7’de A eğrisi fotodiyotun karanlık haldeki, B ve C eğrileri ise fotodiyotun ışıklandırılmış haldeki akım – gerilim karakteristiklerini gösterir. Akım – gerilim karakteristiği dört bölgeden oluşmaktadır. Akım ve gerilim değerleri birinci bölgede pozitifdir. Bu bölgede fotodiyota pozitif gerilim uygulanmıştır ve bu da fotodiyotun doğru beslem bölgesinde olduğunun belirtisidir. Birinci bölge fotodiyot uygulamaları için uygun değildir çünkü bu bölgede fotodiyot normal bir diyot gibi tepki vermektedir. Şekil 2.7’den de görüldüğü gibi ikinci bölgede fotodiyotun bir tepkisi yoktur. Üçüncü bölgede çok küçük bir I_s akımını akar. Fotodiyotun aktif alanı üzerine gelen ışığın şiddeti arttırıldığı zaman, bu bölgedeki eğriler bütünüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişecektir. $V = 0$ ekseninde akım ekseninde eğrilerin kesiştiği nokta kısa devre akımını (I_{sc}) verir. Sıfır akım noktalarında voltaj ekseninde eğrilerin kesiştiği nokta ise açık devre voltajını (V_{oc}) verir [14]. Yüksek ters beslem gerilimlerinde, diyotun akımının hızlıca artmasından kaynaklanacak bozulma ihtimali vardır. Bu bölge ters

bozulma bölgesidir. Üçüncü bölge negatif voltajın uygulandığı bölgedir ve ışığı algılamak için uygundur [15]. Dördüncü bölge ise fotovoltaiik bölgedir.



Şekil 2.7. Bir fotodiyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım – gerilim karakteristikleri [16]

Bir fotodiyotun performansı üç karakterizasyon ile ölçülür. Bu karakterizasyonlar akım – voltaj, kuantum verimi ve bant genişliğidir. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı, diyot eklem niteliğinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akımı, daha yüksek hassasiyet anlamına gelir ve aydınlatılmaksızın ve ters beslem altında diyot içinde akan akımdır.

Bir fotodiyota yeteri kadar yüksek ters besleme uygulandığı zaman, bozulma bölgesinde çalışır. Bu ters besleme geriliminin değeri bozulma voltajına denk gelmektedir ve fotodiyotun çalışması için uygulanacak ters beslem voltajının sınırını belirler [17].

Fotodiyot yeterli miktarda ışık aldığı zaman çalışmaya başlar. Işık fotodiyot içerisinde zayıf bir akım oluşturur. Fotodiyota bir voltaj uygulanması durumunda ve devrede bir yük direncinin bulunması nedeniyle fotoakım meydana gelir. Bu yük, dış devre direncinin toplamıdır. Fotoakımın küçük bir kısmı iç direnci üzerinde oluşurken büyük bir kısmı dış devre direnci üzerinde oluşmaktadır. Bu yüzden fotodiyot bir gerilim kaynağı veya bir akım kaynağı olarak kullanılabilir [18].

Schottky fotodiyotun doğru akımı analiz edilerek engel yüksekliği, ters doyma akımı, idealite faktörü, seri direnci gibi parametreleri belirlenebilir. İdealite faktörü (n) akım – gerilim eğrisinin lineer kısmının eğimi ile, I_0 ve ϕ_b $V = 0$ ’da düz besleme akımı fit edilerek bulunabilir.

2.7. Fotovoltaik Parametreler

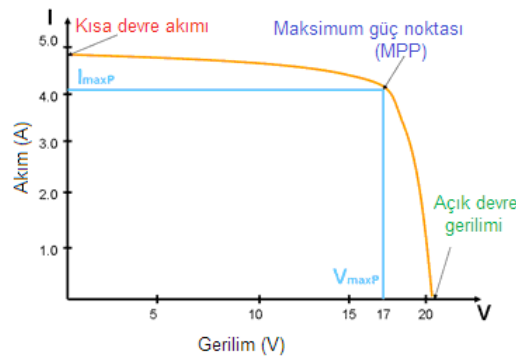
Fotodiyotların yük karakteristiklerinin belirlenmesiyle çeşitli parametreler analiz edilebilir. Bu parametreler; açık devre voltajı V_{oc} , kısa devre akımı I_{sc} , maksimum güç noktasındaki gerilim V_m , maksimum güç noktasındaki akım I_m , maksimum çıkış gücü P_m , dolum faktörü FF , seri direnç R_s ve arayüzey durumları N_{ss} ’dir.

2.7.1. Açık devre voltajı

Aydınlatma altındaki diyotun akım – voltaj karakteristiğinde eğrinin voltaj eksenini kestiği noktadaki değer açık devre voltajı V_{oc} ’dir. Akım değeri sıfır olduğu durumda belirlenmektedir. Açık devre voltajı;

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir [19]. Denklem (2.13)’den anlaşılabacağı gibi n değerinin yüksek olması durumunda yüksek açık devre voltajı elde edilir. Denklem (2.13)’e göre akım – voltaj grafiği Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Fotodiyotun akım – gerilim grafiği [20]

2.7.2. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı I_{sc} çıkış akımıdır ve seri direnç (R_s) olmadığı durumda (ideal durumda) uygulanan voltajda aydınlatma şiddeti altında oluşmaktadır. Kısa devre akımı aydınlatma şiddeti ve gelen foton sayısı ile doğru orantılıdır.

2.7.3. Maksimum akım – maksimum voltaj

Maksimum akım (I_{max}), akım yoğunluğu – gerilim grafiğinin altında kalan alanın maksimum olduğu yerin akım ekseninde denk geldiği noktadan bulunur. Maksimum voltaj (V_{max}) akım yoğunluğu – voltaj grafiğinin altında kalan alanın maksimum olduğu yerin gerilim ekseninde denk geldiği noktadan bulunur.

Maksimum güç (P_{max}), maksimum voltaj (V_{max}) ve maksimum akım (I_{max}) değeri ile hesaplanır. Maksimum güç;

$$P_{max} = I_{max}V_{max} \quad (2.14)$$

2.7.4. Dolum faktörü

Dolum faktörü FF ile ifade edilir ve aşağıda verilen Denklem (2.15) ile hesaplanır.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15) ve Şekil 2.8'den de anlaşıldığı gibi dolum faktörü FF , çizilen akım – gerilim grafiğindeki kare veya dikdörtgen ile ilgilidir.

2.7.5. Seri direnç

Metal kontakların ve altlık olarak kullanılan yarıiletkenin hacminin direnci fotodiyotun seri direnci olarak tanımlanır. Seri direnç, fotovoltaiik durumdaki fotodiyotun doğrusallığını tanımlamak için kullanılır. Doğrultucu kontak üzerinden ölçüm almak için kullanılan tel, kristalin arka yüzeyi üzerine yapılmış olan omik

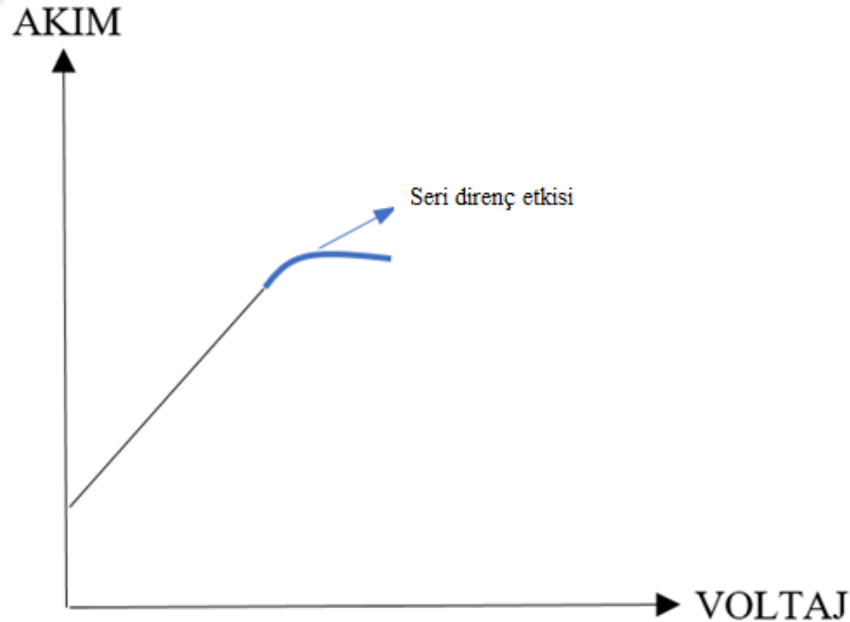
kontakt, kristal ile omik kontakt arasındaki gövde direnci, arayüzeyde oluşan oksit tabaka, kristalin doğrultucu kontakt tarafında bulunan tüketme tabakası seri direnç oluşmasına neden olan etmenlerdir [21].

Bir fotodiyotun seri direnci;

$$R_s = \frac{(W_0 - W_d)\rho}{A_j} + R_c \quad (2.16)$$

şeklinde hesaplanır. Bu denklemde W_0 altlık kalınlığı, W_d tükenim bölgesinin genişliği, ρ altlığın öz direnci, A_j eklem yayıldığı alan ve R_c ise kontakt direncidir. İdeal fotodiyotların seri dirence sahip olmaması gerektiği halde, 10 – 1000 Ω arasında değerlere sahip oldukları görülmüştür.

Metal – yarıiletken kontaklarda seri direncin eğrisi Şekil 2.9'daki grafik üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Metal – yarıiletken kontaklarda seri direncin etkili olduğu bölge [22]

Metal – yarıiletken kontaklarda seri direnç hesaplamak için Cheung&Cheung yöntemi, Norde, Lien – So ve Nicolet, Cibilis ve Buitrago, Bohlin, Lee – Fung –

Beling ve Au yöntemleri kullanılmaktadır. Biz bu çalışmamızda seri direnci bulmak için Cheung&Cheung yöntemini kullandık.

2.7.5.1. Cheung&Cheung metodu ile seri direnç hesabı

Seri direnç, diyot parametrelerinden olan engel yüksekliği (ϕ_b), idealite faktörü (n) gibi parametrelerin hesaplarını yapabilmek için kullanılan bir yöntem de Cheung&Cheung metodudur. Diyota uygulanan gerilimin artan değerlerinde akım – gerilim eğrisinde lineerlikten sapmaya neden olan seri direnç etkeni görülecektir. Seri direncin (R_s) etkisiyle denklem;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV - I R_s}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

halini alacaktır. $V > 3kT/q$ olduğu için denklem;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV - I R_s}{nkT} \right) \right] \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadenin doğal logaritması alındığında,

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{qV}{nkT} - \frac{qI R_s}{nkT} \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilir. Burada V , diyot eklem bölgesine düşen gerilimdir ve bu ifadeyi denklemde yalnız bırakırsak;

$$V = \frac{nkT}{q} \ln(I) + I R_s - \frac{nkT}{q} \ln(I_0) \quad (2.20)$$

şeklinde denklemi düzenleriz. Denklem (2.20)'de V 'nin $\ln(I)$ 'ya göre türevi alınır;

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = \frac{nkT}{q} + I R_s \quad (2.21)$$

şeklinde birinci Cheung fonksiyonunu elde etmiş oluruz. Denklem (2.21)'den de $dV/d \ln(I) - I$ grafiği belli bir kısımda bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi seri direnç R_s 'yi verir ve $dV/d \ln(I)$ ekseninde $I = 0$ için dikey eksen kesme noktasından idealite faktörü (n) hesaplanabilir. Diğer Cheung fonksiyonu ise I_0 yerine yazıldığı zaman elde edilir.

$$\ln(I) = \ln(AA^*T^2) - \frac{q\phi_b}{kT} + \frac{qV}{nkT} - \frac{qIR_s}{nkT} \quad (2.22)$$

Buradan V yalnız bırakılırsa;

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + I R_s \quad (2.23)$$

elde edilir. Bu denklemi de düzenlersek,

$$V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\phi_b + I R_s \quad (2.24)$$

ifadesi elde edilir. Böylece,

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\phi_b + I R_s \quad (2.25)$$

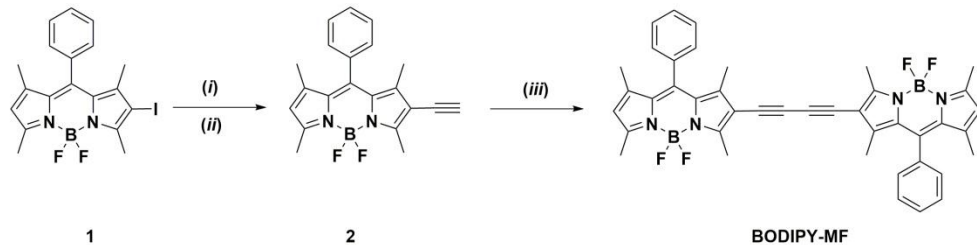
Cheung fonksiyonları elde edilir. $H(I) - I$ grafiğinden lineer bir çizgi elde edileceği açıktır. Elde edilen bu lineer çizginin eğim değeri seri direnç (R_s) değerini verecektir. Eğim çizgisinin $H(I)$ eksenindeki kesme noktası $I = 0$ için $n\phi_b$ değeridir. Birinci fonksiyonda bulunan idealite faktörü (n) diğer fonksiyonda $n\phi_b$ 'de yerine konulması halinde engel yüksekliği (ϕ_b) elde edilecektir.

BÖLÜM 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında çapı 2" olan, 500 µm kalınlıkta, (100) yönelimli ve 20 Ω-cm öz dirence sahip, fosfor (P) katkılı n tipi bir silisyum kristali, yarıiletken bir alt tabaka olarak kullanılmıştır. Oksitlenme durumlarından dolayı silisyum kristali temizlenmiştir. Silisyum kristalinin temizlenme işlemi bittikten sonra diyotun yapım aşamasına geçilmiştir. Diyot hazırlandıktan sonra diyotun elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi ve diyota ait belirli parametrelerin hesaplanması için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında (35 mW/cm^2 , 40 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 , 60 mW/cm^2 , 70 mW/cm^2 , 80 mW/cm^2 , 90 mW/cm^2 ve 100 mW/cm^2) akım – voltaj ölçümleri yapılmıştır.

3.1. Organik Yarıiletken Malzemenin Hazırlanması ve Sentezi

BODIPY-MF organik bileşiğinin sentezinde kullanılan basamaklar Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. BODIPY-MF literatüre uygun yöntemlerle sentezlenmiştir [23]. Sentezlendikten sonra saflaştırılan BODIPY-MF'nin kimyasal yapısı $^1\text{H} - \text{NMR}$ ve $^{13}\text{C} - \text{NMR}$ gibi yöntemlerle doğrulanmıştır ve elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



- (i) Trimetilsililasetilen, $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2$, PPh_3 , CuI , NEt_3 , 8 s.
(ii) $\text{NaOH}(\text{aq})$, THF/MeOH
(iii) 2, $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2$, PPh_3 , CuI , NEt_3 , 65°C , 8 s.

Şekil 3.1. BODIPY-MF organik bileşiğinin sentezi

3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada, kullanılan n tipi silisyum kristali, oksit tabakayı kaldırmak ve kristalin üzerinde bulunan kiri temizlemek için kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Silisyum kristalinin temizleme işlemi;

- İlk olarak trikloretilen ile 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- Ultrasonik yıkama işleminin ardından 5 dakika boyunca deiyonize su ile temizlenmiştir.
- Ardından alkol ile ultrasonik olarak 5 dakika yıkanmıştır.
- Alkolle yıkama işleminden sonra tekrar deiyonize su ile 5 dakika temizlenmiştir.
- Daha sonra aseton ile ultrasonik olarak 5 dakika yıkanmıştır.
- Aseton ile yıkama işleminden sonra tekrar deiyonize su ile 5 dakika temizlenmiştir.
- Bu işlemin ardından 1:10 HF çözeltisinde 5 dakika temizlenmiştir.
- Bu işlemin ardından kristal yine deiyonize su ile 5 dakika yıkanmıştır.
- Son olarak Si kristali kuru azot ile kurutulmuştur.

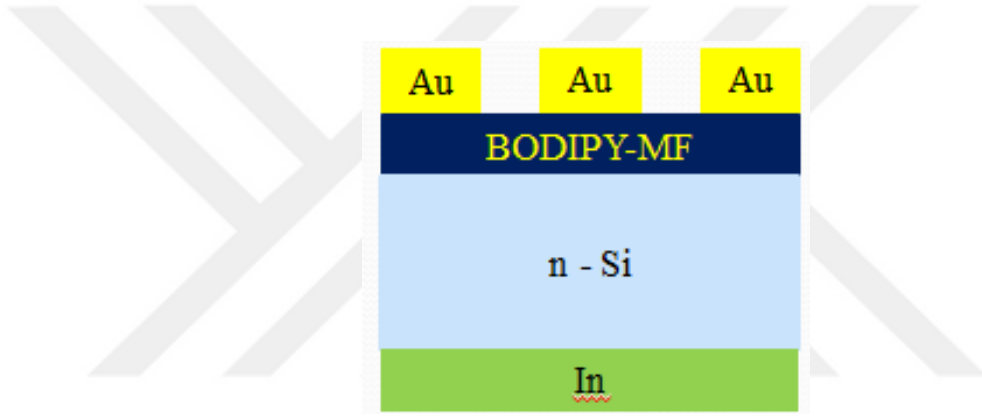
3.3. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Diyotunun Hazırlanması

Silisyum kristalinin kimyasal temizleme işlemi tamamlandıktan sonra silisyum kristalinin mat yüzeyine Nanovak marka termal buharlaştırma cihazı ile 100 nm kalınlığında %99,999 saflıkta Indiyum metali buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma işleminin ardından OTF – 1200X marka fırında, 350 C° sıcaklıkta, 30 saniye boyunca vakum ortamında tavlansmıştır. Daha sonra tekrar termal buharlaştırma cihazı ile Indiyum (In, %99,999) metali 100 nm daha buharlaştırılmıştır ve böylece diyotun omik kontak kısmı oluşturulmuştur.

Omik kontak oluşturulduktan sonra, BODIPY-MF organik yarıiletkeni kloroform çözücüsünde çözülüp spin kaplama cihazı ile silisyum kristalinin parlak yüzeyine BODIPY-MF ince filmi büyütülerek 229,6 nm büyütülerek kurutulmaya

bırakılmıştır. Bu kalınlık yüksek frekanslardaki kapasite – voltaj ölçümünden hesaplanmıştır. Spin kaplama işlemi, ilk 30 saniye 500 rpm hızda, daha sonraki 30 saniye ise 1200 rpm hızda gerçekleştirilmiştir.

Spin kaplama yönteminin ardından organik yarıiletkenin kaplanmış yüzeyine 1 mm yarıçaplı metal maske yerleştirilmiştir. 1 mm yarıçaplı Altın metali termal buharlaştırma cihazı 150 nm kaplanmıştır ve bu kaplama ile doğrultucu kontak oluşturulmuştur. (Buharlaştırma işlemleri yaklaşık olarak 10^{-6} Torr basınçla yapılmıştır). Doğrultucu kontak oluşturulduktan sonra Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotu oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun şematik gösterimi

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım – Voltaj Karakteristikleri

Hazırlanan Schottky diyotunun Akım (I) – Gerilim (V) ölçümleri “Keitley 4200 SCS” cihazı kullanılarak oda koşullarında yapılmıştır. Yapılan I –V ölçümü ile diyotun ana parametrelerinden olan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerleri elde edilmiştir.

Termiyonik emisyon teorisine göre Schottky diyotların I-V ilişkisi, idealite faktörü ve engel yüksekliği aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{n k T} \right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Termiyonik emisyon teorisine göre düz beslemede $V > 3kT/q$ bölgesinde hesaplama yapılmaktadır. Bu durumda denklemin ikinci kısmı ihmal olur ve denklem aşağıdaki şekilde kullanılır;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{n k T} \right) \right] \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de belirtilen I diyottan geçen akımı, I_0 ise ters doyma akımını temsil etmektedir. Ters doyma akımı I_0 ;

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_b}{kT} \right] \quad (4.3)$$

4.3’de belirtilen denklemde A diyotun doğrultucu kontak alanı, A^* Richardson sabiti, T ortam sıcaklığının Kelvin cinsinden değeri ($T=300K$ alınmıştır), k ise Boltzman sabitidir. ($k = 8,625 \times 10^{-5} eV/K$, n tipi silisyum için $A^* = 120 A/K^2 cm^2$ ’dir.)

İdealite faktörü (n) değerini hesaplamak için Denklem 4.2’den faydalanabiliriz. Bu denklemde her iki tarafın logaritması alınır ve V ’ye göre türevi alınır;

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

şeklinde bulunur.

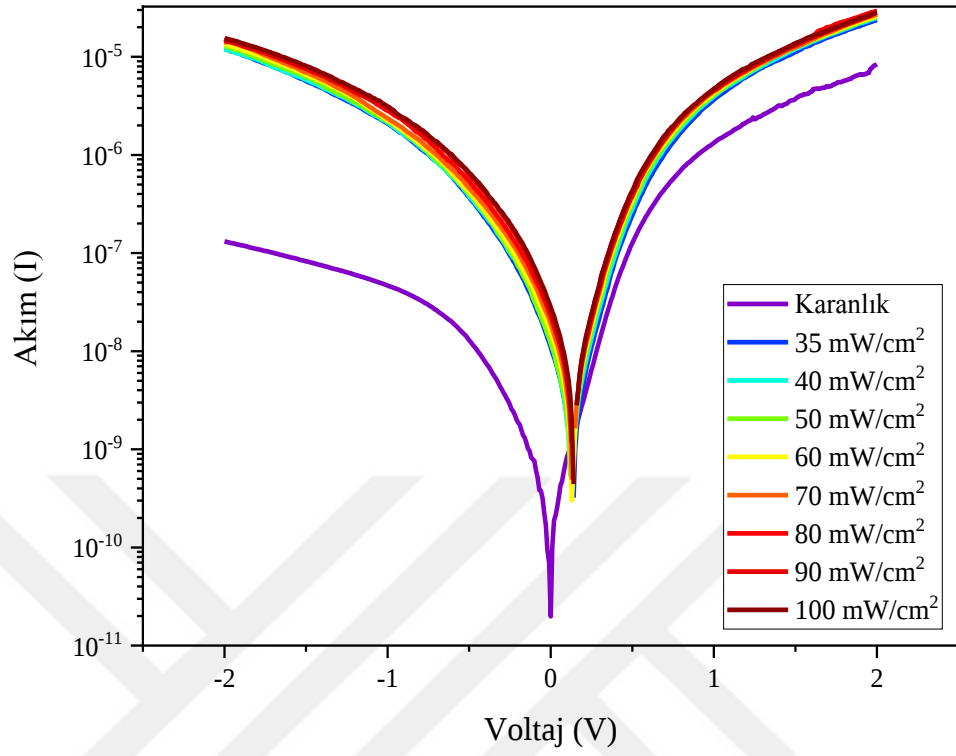
Engel yüksekliği ϕ_b değerini hesaplamak için Denklem 4.3’teki eşitliğin her iki tarafının logaritması alınır ve ϕ_b ’ye göre çözülürse;

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

şeklinde bulunur.

Hazırlanan Au/BODIY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki yarı logaritmik akım – voltaj grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.

Au/BODIY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun idealite faktörü (n) Şekil 4.1’deki grafiğin eğiminden hesaplanmıştır. I-V grafiğinin lineer bölgesinin sıfır voltajda I eksenini kestiği noktadan doyma akımı (I_0) bulunmuştur. Doyma akımını hesapladıktan sonra Denklem 4.5’ten yola çıkarak Schottky diyotunun engel yüksekliği (ϕ_b) diyotun kontak alanı (A) ve Richardson sabiti (A^*) değerleriyle hesaplanmıştır. Karanlık ortam ve çeşitli aydınlık şiddetlerinde ($35 mW/cm^2$, $40 mW/cm^2$, $50 mW/cm^2$, ... $100 mW/cm^2$) hesaplanan idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

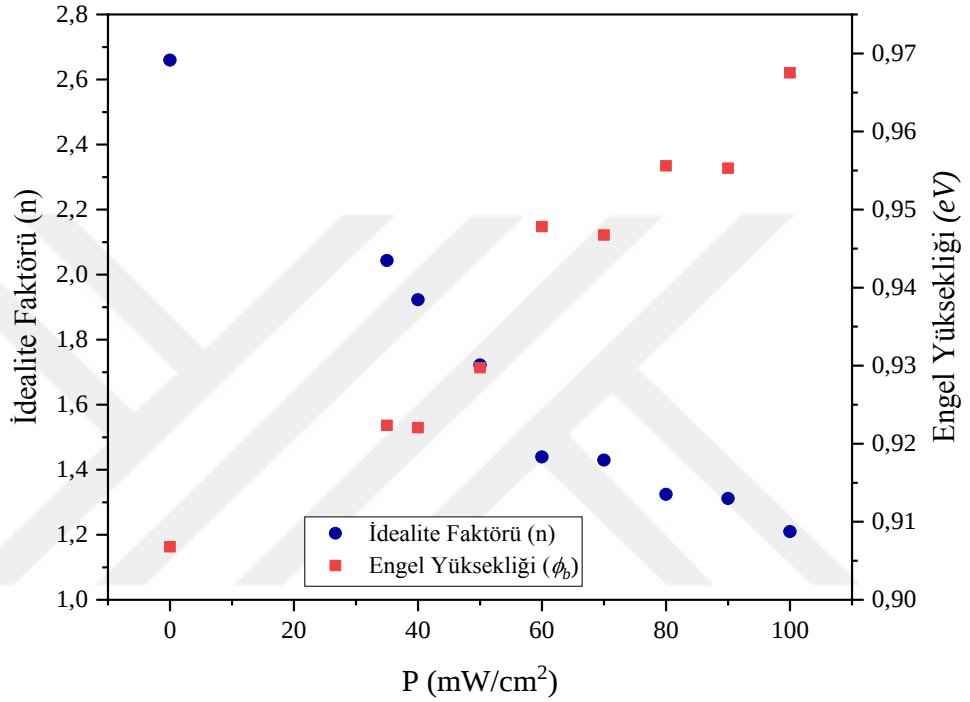


Şekil 4.1. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj grafiği

Tablo 4.1. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan n ve ϕ_b değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm^2)	İdealite Faktörü (n)	Engel Yüksekliği (eV) (ϕ_b)
Karanlık	2,66	0,906
35	2,04	0,922
40	1,92	0,922
50	1,72	0,929
60	1,44	0,947
70	1,43	0,946
80	1,32	0,955
90	1,31	0,955
100	1,21	0,967

Şekil 4.2’de Au/BODIY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ortam ve farklı ışık şiddetlerindeki (35 mW/cm^2 , 40 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 ,... 100 mW/cm^2) idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değişiminin grafiği gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte idealite faktörü (n) azalmakta, engel yüksekliği (ϕ_b) artmaktadır.



Şekil 4.2. Au/BODIY-MF/n-Si/In diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin ışık şiddetiyle değişimi

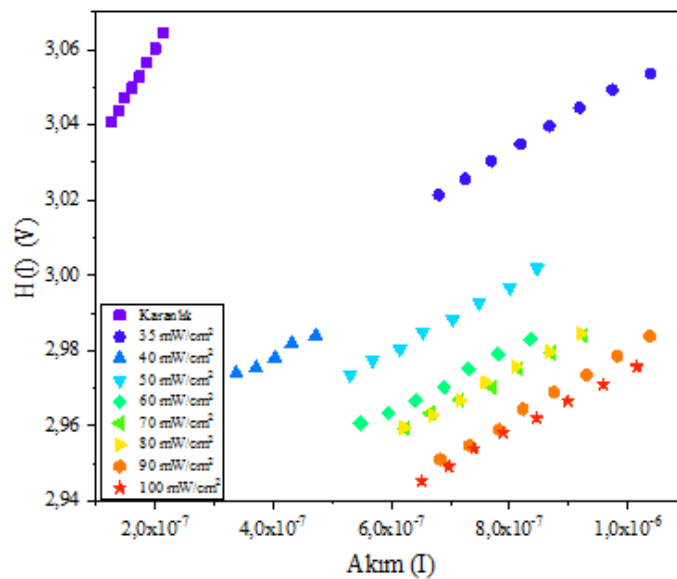
İdeal diyotlarda idealite faktörü 1’dir. İdealite faktörünün 1’den büyük olması diyotun ideallikten saptığını gösterir. Bu ideallikten sapmalar genel olarak ara yüzey durumlarına, ara yüzey tabakasının varlığına ve seri direnç etkisine atfedilmektedir [11,24,25]. Bazı araştırmacıların daha önce yaptığı çalışmalarda benzer sonuçlar görülmüştür. Tuğluoğlu ve arkadaşları Coronene organik ara yüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/Coronene/n-Si diyotunun idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerlerini karanlık için sırasıyla 2,81 ve 0,697 eV, 100 mW/cm^2 ışık şiddeti için ise sırasıyla 2,07 ve 0,755 eV bulmuşlardır [26]. Soylu ve arkadaşları da ara yüzey tabakası olarak Ru(II) bileşiğini kullanarak oluşturdukları Al/Ru(II)/n-Si diyotunun idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerlerini karanlık için

sırasıyla 3,51 ve 0,9 eV bulmuşlardır. 100 mW/cm^2 ışık şiddeti için 3,22 ve 0,91 eV bulmuşlardır [27]. Yakuphanoglu ve arkadaşları da ara yüzey tabakası olarak organik Novel Cyclotriphosphazene bileşiğini kullanarak oluşturdukları Al/NovelCyclotriphosphazene/p-Si diyotunun idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerlerini karanlık için sırasıyla 4,29 ve 0,82 eV, 100 mW/cm^2 ışık şiddeti için 3,95 ve 0,83 eV bulmuşlardır [28]. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunu yukarıdaki literatürlerle karşılaştırdığımızda daha yüksek engel yükseklikleri ve daha düşük idealite faktörlerine sahip metal/organik yarıiletken/inorganik yarıiletken Schottky yapısı elde edilmiştir.

4.2. Cheung Metodu Yardımı İle Seri Direnç Hesaplanması

Cheung fonksiyonu yardımıyla hazırlamış olduğumuz Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetleri altında (35 mW/cm^2 , 40 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 , ... 100 mW/cm^2) seri direnç (R_s) değerleri hesaplanmıştır. Cheung metoduna göre seri direnç (R_s) değeri I-V eğrisinin doğru beslemeye lineerleşmeye başladığı bölgede etkilidir.

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\phi_b + IR_s \quad (4.6)$$



Şekil 4.3. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $H(I) - I$ grafiği

Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $H(I) - I$ grafikleri Şekil 4.3.'de verilmiştir. Hazırlamış olduğumuz Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki seri direnç değerleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun seri direnç (R_s) değerleri

<i>Aydınlatma Şiddeti</i> (mW/cm^2)	<i>$H(I) - I$</i> (R_s)(Ω)
Karanlık	264.313
35	91.889
40	80.400
50	87.470
60	83.992
70	79.494
80	85.216
90	95.004
100	82.578

Tablo 4.2. değerlerine bakılacak olursa karanlık için (R_s) değerinin $100 mW/cm^2$ aydınlatma şiddetine göre azaldığı görülmektedir. Bazı araştırmacıların daha önceki çalışmalarına bakılacak olursa benzer sonuçların elde edildiği görülecektir. Yakuphanoglu ve arkadaşları ara yüzey tabakası olarak organik Novel Cyclotriphosphazene bileşiğini kullanarak Al/NovelCyclotriphosphazene/p-Si diyotunun seri direnç (R_s) değerini karanlık için 59220Ω , $100 mW/cm^2$ ışık şiddetinde ise 33590Ω olarak hesaplamışlardır [28]. Soylu ve arkadaşları ara yüzey tabakası olarak Ru(II) organik bileşiğini kullanarak oluşturdukları Au/Ru(II)/n-Si diyotunun seri direnç değerini karanlık için 2620Ω , $100 mW/cm^2$ ışık şiddeti için 2570Ω bulmuşlardır [27]. Araştırmacıların hesaplamış olduğu değerlere bakılırsa ışık şiddetinin artmasıyla seri direnç (R_s) değeri azalmıştır ve bu değer $k\Omega$ mertebesinde dir. Yapmış olduğumuz çalışmayı göz önüne alırsak hesaplamış olduğumuz seri direncin $k\Omega$ mertebesinde olduğunu görürüz ve bu bizim için uygun bir değerdir.

4.3. Organik Arayüzey Yoğunluğunun Hesaplanması

Arayüzey tabakası, yarıiletken ile yüzey tabakası arasında ortaya çıkmaktadır. Arayüzey durumları diyot parametrelerini etkilemektedir. İdealite faktörünün normalde 1 olması gerekir fakat arayüzey durumlarından dolayı idealite faktörü değerinde sapmalar meydana gelmektedir.

Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), doğru beslem $I - V$ ölçümlerinden, engel yüksekliğinin değerleri göz önüne alınarak, enerjinin ($E_c - E_{ss}$) bir fonksiyonu olarak elde edilir. Arayüzey durum yoğunluğu eşitliği;

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right) \quad (4.7)$$

Burada q elektron yükü, δ arayüzey tabaka kalınlığı, W_D tükenim tabakası genişliği, ε_i arayüzey tabakası geçirgenliği, ε_s ise yarıiletken geçirgenliğini ifade etmektedir. Enerji farkı eşitliği ise,

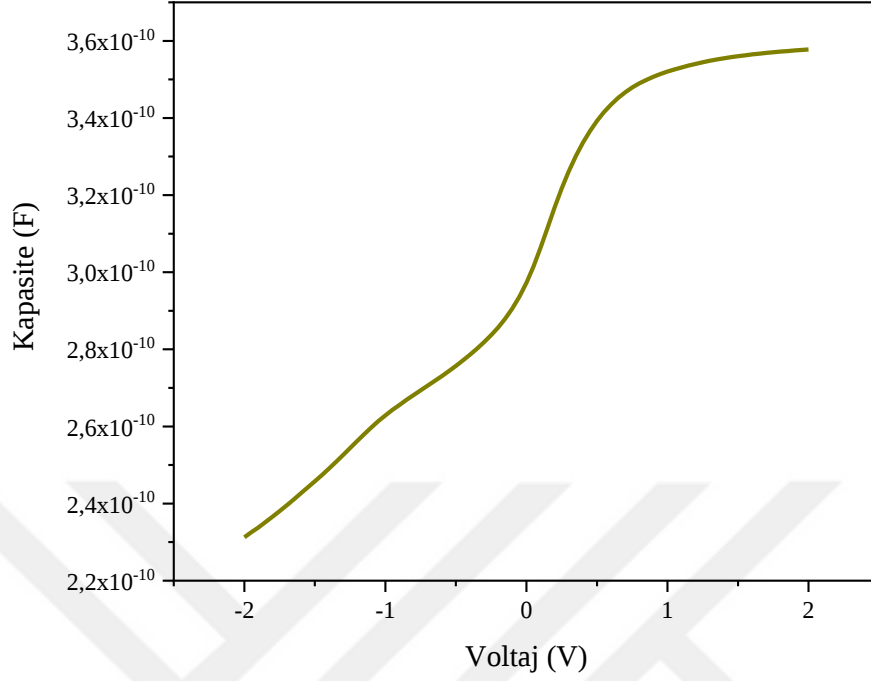
$$E_c - E_{ss} = q(\phi_b - V) \quad (4.8)$$

Arayüzey tabakasının kalınlığı Şekil 4.4 deki yüksek frekansta kapasite – voltaj ($C - V$) ölçümlerinden yararlanılarak Denklem 4.9'deki eşitlikten hesaplanmıştır.

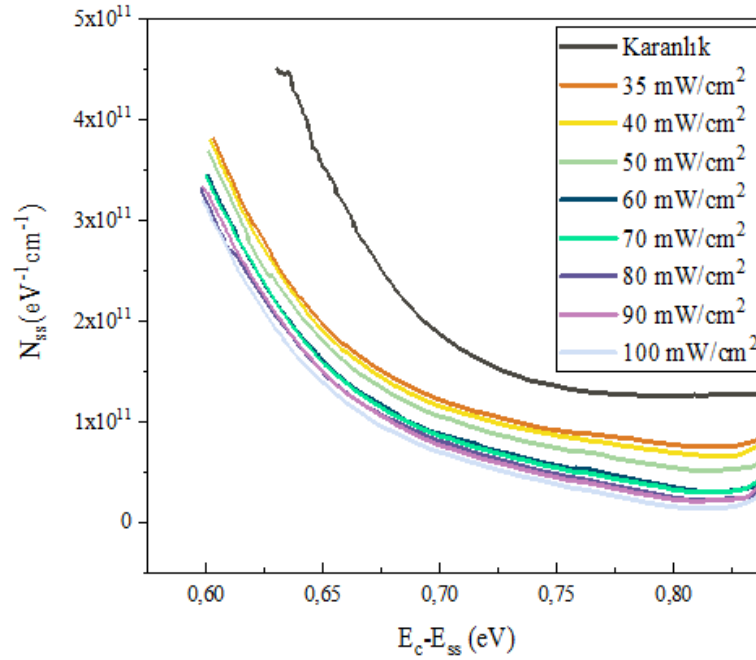
$$C_{org} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 A}{\delta} \quad (4.9)$$

Burada ε_i arayüzey tabakası geçirgenliği sabiti, ε_0 boşluğun geçirgenlik sabiti, δ arayüzey tabakasının kalınlığı, A ise etkin yüzey alanıdır. Arayüzey tabakasının kalınlığı Şekil 4.4'deki $C_{org} = 3,63 \times 10^{-10} F$ alınarak denklem 4.9'dan $2,296 \times 10^{-5}$ (229,6 nm) hesaplanmıştır.

Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotuna ait karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki $N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ grafiği Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky Diyotunun 1MHz’de kapasite voltaj grafiği



Şekil 4.5. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky Diyotunun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki $N_{ss} - E_c - E_{ss}$ grafiği

Şekil 4.5 grafiğine göre yapılan hesaplamalarda Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerleri karanlık için $4,05 \times$

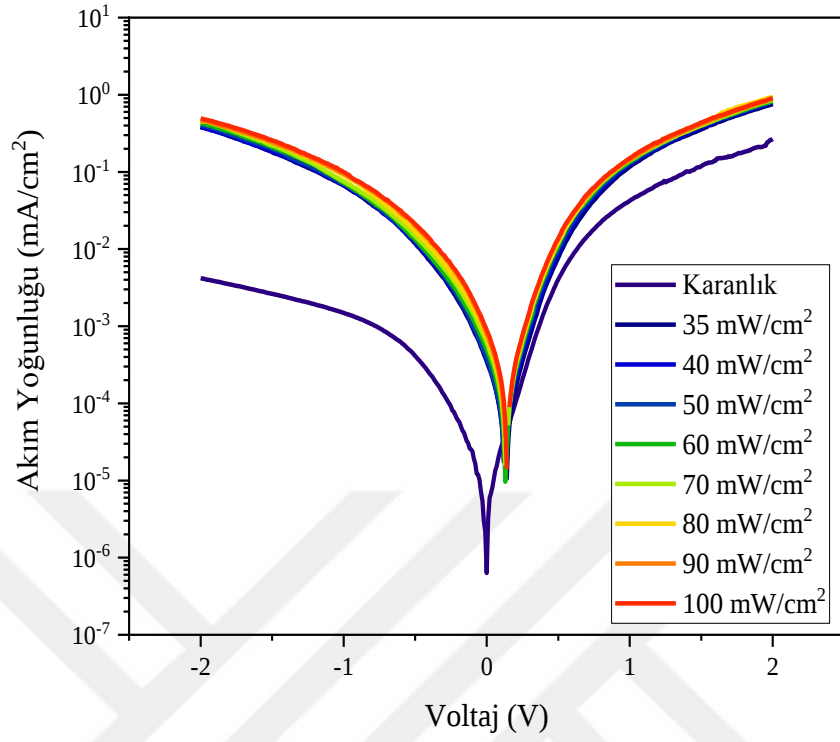
$10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $1,81 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında, 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddetinde ise $3,19 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $2,75 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değişmektedir. Hesaplamalar incelendiğinde arayüzey durum yoğunluğunun aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Tuğluoğlu ve arkadaşları Coronene organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/Coronene/n-Si diyotunun arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerlerinin karanlık için $4,76 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $1,32 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında, 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddetinde ise $3,15 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $5,04 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değişmekte olduklarını bulmuşlar [26].

4.4. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri

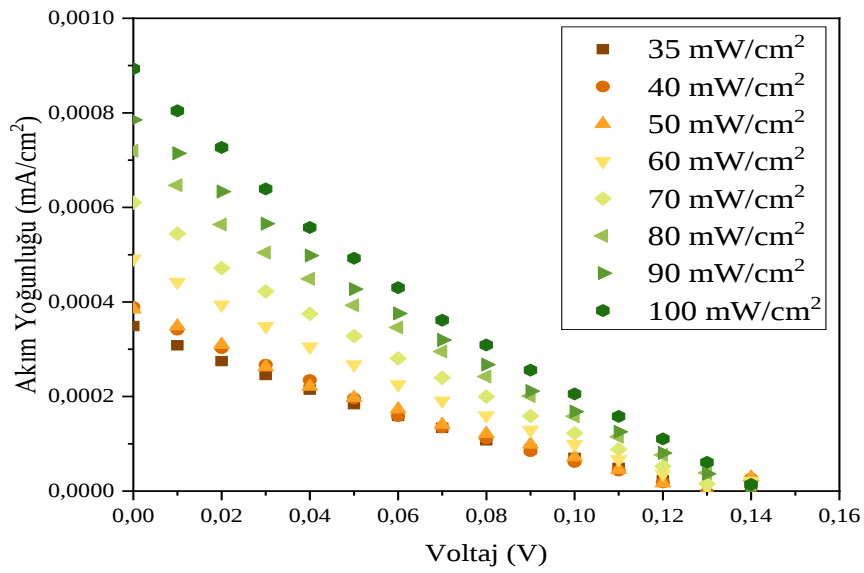
Hazırlamış olduğumuz Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun oda sıcaklığında karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki diyot parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Akım yoğunluğunu (J) belirlemek için ölçülen akım değerlerini doğrultucu kontak dairesinin alanına bölmek gerekir. Au/ BODIPY-MF /n-Si/In Schottky diyotuna ait akım yoğunluğu – voltaj (J – V) grafiği Şekil 4.4.’de verilmiştir.

Şekil 4.6.’de görüldüğü gibi Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotu karanlıkta ve çeşitli aydınlatma şiddeti altında (35 mW/cm^2 , 40 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 ,... 100 mW/cm^2) iyi bir doğrultma davranışı gösterdiğini ışığa karşı duyarlılığıyla belli etmektedir. Diyotun ters beslemdeki akımı ışığın şiddetiyle birlikte artış göstermektedir ve bu bizlere uygun bir fotodiyot davranışını göstermektedir.

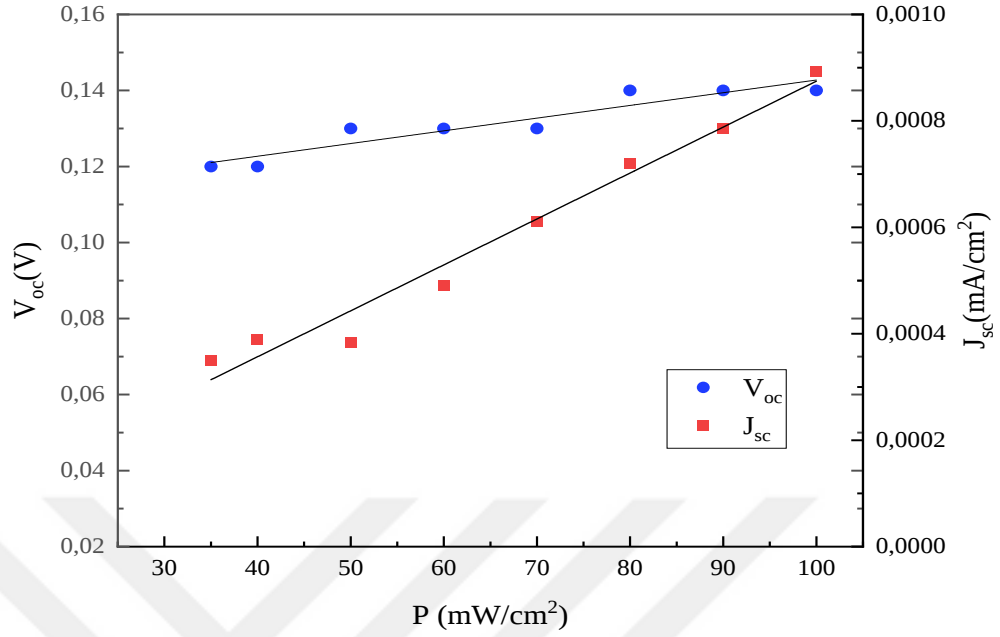
Au/ BODIPY-MF /n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetindeki akım yoğunluğu – voltaj (J - V) grafiği Şekil 4.7.’de verilmiştir. Kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve açık devre voltajı (V_{oc}) değerleri Tablo 4.3.’de gösterilmiştir. Şekil 4.8’da tüm aydınlatma şiddetindeki kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve açık devre voltajı (V_{oc}) grafiği verilmiştir.



Şekil 4.6. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği



Şekil 4.7. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği



Şekil 4.8. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun tüm aydınlatma şiddetlerine karşılık V_{oc} ve J_{sc} grafiği

Şekilde görüldüğü gibi aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte açık kısa devre voltajı (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) artmaktadır. Bu değerler Tablo 4.3.'de görülmektedir.

Tablo 4.3. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun V_{oc} ve J_{sc} değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm^2)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)
35	0,12	$3,50 \times 10^{-4}$
40	0,12	$3,90 \times 10^{-4}$
50	0,13	$3,84 \times 10^{-4}$
60	0,13	$4,91 \times 10^{-4}$
70	0,13	$6,10 \times 10^{-4}$
80	0,14	$7,20 \times 10^{-4}$
90	0,14	$7,85 \times 10^{-4}$
100	0,14	$8,93 \times 10^{-4}$

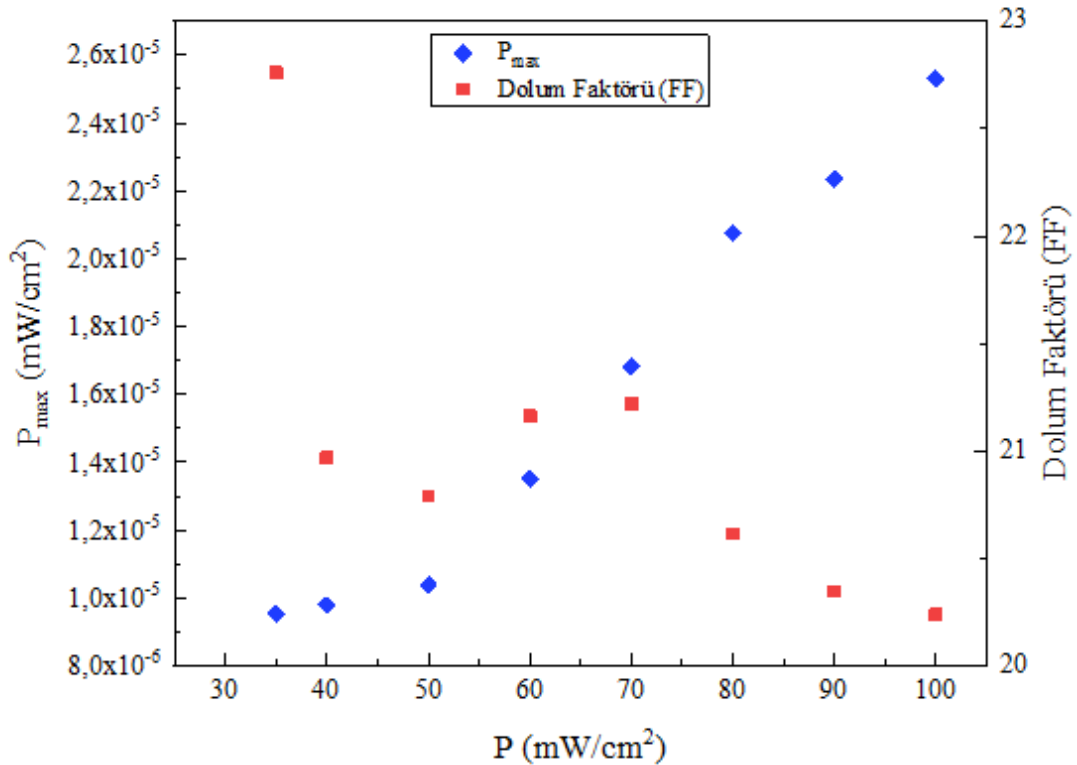
Maksimum akım (I_{max}) ve maksimum gerilim (V_{max}) değerlerinden yola çıkarak maksimum güç (P_{max}) değerini elde edebiliriz. Bu değerleri Şekil 4.5.'den yola

ıkarak hesaplayabiliriz. Bu değerler sayesinde dolum faktörü (FF) hesaplanabilir. Dolum faktörü eşitliği;

$$FF = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (4.10)$$

şeklinde bulunur. Burada I_{max} maksimum akım, V_{max} maksimum voltaj, I_{sc} kısa devre akımı, V_{oc} ise açık devre voltajını temsil etmektedir.

Farklı aydınlatma yoğunluklarına bağlı maksimum güç (P_{max}) ve dolum faktörü (FF) değerlerinin grafiği şekil 4.9.'de gösterilmiştir.



şekil 4.9. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun aydınlatma şiddetine karşılık FF ve P_{max} grafiği

şekilde görüldüğü gibi aydınlatma şiddeti değeri arttıkça P_{max} değeri artmış, FF değeri azalmıştır. Tablo 4.4'de aydınlatma şiddetine göre maksimum akım (I_{max}), maksimum voltaj (V_{max}), maksimum güç (P_{max}) ve dolum faktörü (FF) değerleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun aydınlatma şiddetine göre V_{max} , I_{max} , P_{max} ve FF değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm^2)	Maksimum Voltaj (V) (V_{max})	Maksimum Akım (mA) (I_{max})	Maksimum Güç (W) (P_{max})	Dolum Faktörü % (FF)
35	0,06	$1,59 \times 10^{-4}$	$9,536 \times 10^{-6}$	22,76
40	0,05	$1,96 \times 10^{-4}$	$9,793 \times 10^{-6}$	20,97
50	0,06	$1,73 \times 10^{-4}$	$1,039 \times 10^{-5}$	20,79
60	0,06	$2,25 \times 10^{-4}$	$1,351 \times 10^{-5}$	21,16
70	0,06	$2,81 \times 10^{-4}$	$1,683 \times 10^{-5}$	21,22
80	0,06	$3,46 \times 10^{-4}$	$2,077 \times 10^{-5}$	20,61
90	0,07	$3,20 \times 10^{-4}$	$2,237 \times 10^{-5}$	20,34
100	0,07	$3,62 \times 10^{-4}$	$2,531 \times 10^{-5}$	20,23

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada BODIPY-MF organik bileşiği spin kaplama yöntemi ile ince film olarak büyütülerek Au/ BODIPY-MF /n-Si/In Schottky diyotu oluşturulmuştur. n-Si kristali 500 μm kalınlıkta, (100) yüzey yönelimli, 20 $\Omega\text{-cm}$ öz dirence sahiptir.

Au/ BODIPY-MF /n-Si/In Schottky diyotunun oda sıcaklığında, karanlık ve çeşitli aydınlatma şiddetlerinde (35 mW/cm^2 , 40 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 , 60 mW/cm^2 , 70 mW/cm^2 , 80 mW/cm^2 , 90 mW/cm^2 ve 100 mW/cm^2) akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde voltaj -2 V ile +2 V aralığında alınmıştır.

lnI-V eğrisini incelediğimizde doğru beslem bölgesinde ideallikten sapmalar olduğunu, ters beslem bölgesinde ise bir doyuma sahip olduğu görülmüştür. Bu grafiğe göre Au/ BODIPY-MF /n-Si/In diyotunun doğrultucu özelliğe sahip olduğu görülmüştür.

Bir Schottky diyotu için önemli olan idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b), seri direnç (R_s), gibi parametreler termiyonik emisyon teorisinden faydalanarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun idealite faktörü (n) değeri karanlıkta ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddetinde sırasıyla 2,66 ve 1,21 bulunmuştur. Engel yüksekliği (ϕ_b) değeri aynı şekilde karanlık ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddetinde sırasıyla 0,9067 eV ve 0,9675 eV bulunmuştur. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal diyotun idealite faktörü (n) değeri 1 olmalıdır. Yapmış olduğumuz çalışmada hazırladığımız Schottky diyotunun idealite faktörünün 1'den büyük yani 1,21 olmasının nedeni arayüzey tabakasının varlığına, arayüzey durum dağılımlarına, istenmeden oluşan oksit tabakasına ve seri direnç etkisine atfedilmiştir. lnI-V eğrisinden hesaplanan değerlere göre aydınlatma şiddeti arttıkça idealite faktörü (n) azalmıştır, engel yüksekliği (ϕ_b)

artmıştır. Bu durum yapmış olduğumuz Schottky diyotunun ışığa karşı duyarlılığını ve fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermektedir [11].

Au/ BODIPY-MF /n-Si/In Schottky diyotunun seri direncin etkisiyle $\ln I$ - V grafiğinde yüksek voltaj bölgelerinde ideallikten sapmalar meydana gelmiştir. Yani lineer olması gerekirken parabolik bir değişim göstermiştir. Seri direnç (R_s) değerleri Cheung&Cheung metoduyla hesaplanmıştır. Bu çalışmada yapılan seri direnç hesaplamalarındaki değerler karanlık ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için sırasıyla 264313Ω ve 82578Ω olarak hesaplanmıştır. Hesaplardan da görüldüğü gibi aydınlatma şiddetinin artmasıyla seri direnç (R_s) değeri azalmıştır. Metal – yarıiletken doğrultucu kontakların seri direnci ne kadar düşük olursa diyotun kalitesi de aynı oranda artar.

Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun akım yoğunluğu voltaj grafiğinden maksimum akım (I_{max}), maksimum gerilim (V_{max}), maksimum güç (P_{max}), açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve dolum faktörü (FF) değerleri hesaplanmıştır. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla açık devre voltajı (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) artmıştır. Aynı şekilde aydınlatma şiddeti arttıkça maksimum akım (I_{max}), maksimum gerilim (V_{max}) değerleri de artmıştır. Maksimum akım (I_{max}) ve maksimum voltaj (V_{max}) değerlerinin artması da maksimum güç (P_{max}) değerinin artması demektir. Dolum faktörü (FF) değeri ise aydınlatma şiddetinin artmasıyla azalmıştır.

Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki davranışlarını inceledik, gerekli hesaplamaları yaptık ve sonuç olarak hazırladığımız Au/BODIPY-MF/n-Si/In Schottky diyotunun fotodiyot olarak kullanılabileceği yapılan hesaplamalardan, elde ettiğimiz değerlerden görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Nicollian, E.H., & Brews, J.R. Experimental evidence for interface trap properties, MOS (Metal – oxide – Semiconductor) Physics and Technology, John Willey and Sons, New York, 285 – 318, 1982.
- [2] Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, Wiley, New York, 1981.
- [3] Rhoderick, E.H., Metal – Semiconductor Contacts, Oxford University Press, Oxford, 1978.
- [4] Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş., & Türüt, A., Electrical characterization of The Al/new fuchsin/n-Si Organic – Modified Device, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 42, 1411 – 1416, 2010.
- [5] Lin, Ying – Chung, 2010, Modified BODIPY Probes to explore peroxisome function, Durham University. Available at Durham E – Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/647/>, 2010.
- [6] Hinkeldey, B., Schmitt, A., & Jung, G., Comparative photostability studies of BODIPY and fluorescein dyes by using fluorescence correlation spectroscopy, Chemphyschem, 9, 14, 2019 – 2027, 2008.
- [7] Card, H.C., & Rhoderick, E., Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes, Journal of Physics D: Applied Physics, 1589 – 1601, 1971.
- [8] Cowley, A.M., & Sze, S.M., Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems, Journal of Applied Physics, 36, 10, 3212 – 3221, 1965.
- [9] Sharma, B.L., Metal – Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Application, Plenum Press, New York, 1984.
- [10] Cafer, T., Katıhal Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basın – Yayın Merkezi, İstanbul, 2000.

- [11] Singh, A., Characterization of Interface States at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. Solid – State Electronics, 28, 223 – 232, 1985.
- [12] Akkal, B., Benamara, Z., Boudissa, A., Bouiadjra, N.B., Armani, M., Bideux, L., & Gruzza, B., Modelization and characterization of Au/InSb/InP Schottky systems as a function of temperature, Materials Science and Engineering: B, 55, 3, 162 – 168, 1998.
- [13] Rhoderick, E.H., & Williams, R.H., Metal – Semiconductor Contacts (Second Edition), Oxford, Clarendon Press, 1988.
- [14] Donati, S., Photodetectors: devices, circuits and applications, Prentice Hall, 1999.
- [15] Johnson, M., Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: McGraw – Hill Professiona Publishing, p. 14, 15, 2003.
- [16] Gündüz, B., Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2007.
- [17] Yüksel Ö. F., Temperature Dependence of Current-Voltage Characteristics of Al/p-Si (100) Schottky barrier diodes, Physica B: Condensed Matter, 404 2009.
- [18] Şafak H., Şahin M. & Yüksel Ö. F., Analysis of I-V Measurements on Ag/p-Sns and Ag/p-SnSe Schottky Barriers Solid – State Electronics, 46, 49, 2002.
- [19] Hovel, H.J., Solar Cells, Semiconductors and Semimetals, Vol. 11 (Eds., R.K. Willardson ve A.C. Beer), Academic Press, New York, 1975.
- [20] Öztürk, H.H., Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Adana.
- [21] Karadeniz, S., Al/SnO₂/p-Si/Al Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektroniksel İletkenliğe Etkisi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 2001.
- [22] Aydemir, U., Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) Yapılarının Hazırlanması ve Temel Elektriksel Özelliklerin Işık Altında İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 2014.

- [23] Wanhua W., Huimin G., Wenting W., Shaomin J., & Jianzhang Z., Organic Triplet Sensitizer Library Derived from a Single Chromophore (BODIPY) with Long-Lived Triplet Excited State for Triplet – Triplet Annihilation Based Upconversion, Dalian University of Technology, 2011.
- [24] Deng, X.Y., Zheng, L.P., Yu, G., & Cao, Y., Polymer heterojunction photodiodes with MEHPPV doped with organic acceptors, Synthetic Metals, 135 – 136, 823 – 824, 2003.
- [25] Cova, P., & Singh A., Temperature dependence of I – V and C – V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes, Solid – State Elec., 33, 11-19, 1990.
- [26] Pakma, O., Çavdar, Ş., Koralay, H., Tuğluoğlu, N., & Yüksel, Ö.F., Improvement of diode parameters in Al/n-Si Schottky diodes with Coronene interlayer using variation of the illumination intensity, Physica B: Condensed Matter, 527, 2017.
- [27] Tataroğlu A., Ocaya, R., Dere A., Dayan O., Serbetci Z., Al-Sehemi A.G., Soylu M., Al-Ghamdi A.A., & Yakuphanoglu, F., Ruthenium(II)Complex Based Photodiode for Organic Electronic Application, Journal Of Electronic Materials, 830, 2018.
- [28] Tataroğlu, A., Özen F., Koran K., Dere A., Görgülü A. O., Al-Senany N., Al-Ghamdi A., Farooq W. A., Yakuphanoglu F., Electrical and Photoresponse Properties of Si-based Diode with Organic Interfacial Layer Containing Novel Cyclotriphosphazene Compound, Silicon, 10, 3, 683 – 691, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Siirt'te doğdu. İlk, Orta ve Lise eğitimini Siirt'te tamamladı. 2012 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümüne yerleşti ve 2016 yılında mezun oldu. 2016 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

