



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE AYDINLATMA ALTINDA
OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Onur ONGUN

20152108006

2019

GİRESUN

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE AYDINLATMA ALTINDA
OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ONGUN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serkan EYMUR

Temmuz 2019

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

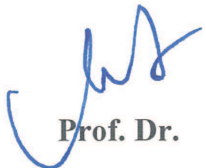
ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE AYDINLATMA ALTINDA
OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

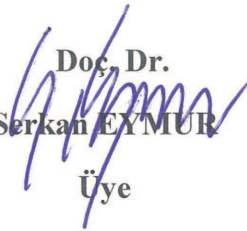
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur ONGUN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu tez 04/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Nihat TUĞLUOĞLU
Jüri Başkanı

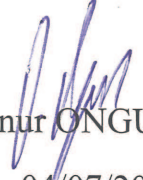

Doç. Dr.
Serkan EYMUR
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Derya BAL ALTUNTAŞ
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.


Onur ONGUN

04/07/2019

TEŞEKKÜR

“Organik Tabanlı Fotodiyotların Hazırlanması ve Aydınlatma Altında Optoelektronik Özelliklerinin İncelenmesi” konulu yüksek lisans tezimin her safhasında hiçbir konuda desteğini esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Serkan EYMUR’a ve Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU’na, organik malzemenin sentezlenme aşamasındaki destekleri için Doç. Dr. Mustafa EMRULLAHOĞLU’na, bilgi birikimi ve görüşleri ile katkı sağlayan Doç. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL’e, Doç. Dr. Osman PAKMA’ya ve değerli çalışma arkadaşlarım Ali Osman TEZCAN’a ve Nazmiye BÖREKÇİ’ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam sırasında her konuda olduğu gibi maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eşim Hamide ÖLMEZ ONGUN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. İletkenlik	4
2.1.1. İletkenler	4
2.1.2. Yalıtkanlar.....	4
2.1.3. Yarıiletkenler.....	5
2.1.3.1. N-tipi yarıiletkenler	5
2.2. Metal/Yarıiletken Kontaklar	6
2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	6
2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	9
2.2.3. Metal/organik tabaka/n-tipi yarıiletken/metal yapısı	10
2.3. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım İletimi.....	11
2.3.1. Termiyonik emisyon teorisi	12
2.4. Arayüzey Durum Yoğunluğu.....	14
2.5. Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	16
2.6. Cheung Metodu Yardımı İle Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	17

2.7. Metal/Yarıiletken Fotodiyotlar	18
2.8. Fotovoltaik Parametreler	20
2.8.1. Kısa devre akımı	20
2.8.2. Açık-devre voltajı.....	20
2.8.3. Maksimum akım	21
2.8.4. Maksimum voltaj	21
2.8.5. Maksimum güç.....	21
2.8.6. Doldurma faktörü	21
2.9. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği	21
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. BOD-Pyr Organik Malzemesinin Hazırlanması Ve Sentezi	24
3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi	25
3.3. Metal/Organik Tabaka/Yarıiletken/Metal Diyot Yapısının Oluşturulması	26
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	27
4.1. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım Voltaj Karakteristikleri.....	27
4.2. Cheung Metoduyla Seri Direnç Hesaplanması	29
4.3. Organik Arayüzey Tabakası Kalınlığının Hesaplanması	32
4.4. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması	33
4.5. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri	34
 BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	39
 KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	44

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

A^*	: Richardson sabiti
A_j	: Eklemin yayıldığı alan
E_C	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi
ε_i	: Arayüzey tabakası geçirgenlik sabiti
ε_S	: Yarıiletkenin geçirgenlik sabiti
ε_0	: Boşluğun geçirgenlik sabiti
FF	: Doldurma faktörü
I	: Akım
I_0	: Ters doyma akımı
I_{SC}	: Kısa devre akımı
J	: Akım yoğunluğu
J_{SC}	: Kısa devre akım yoğunluğu
K	: Kelvin cinsinden sıcaklık
k	: Boltzmann sabiti

n	: İdealite faktörü
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
q	: Elektrik yükü
RR	: Doğrultma oranı
R_c	: Kontak direnci
R_s	: Seri direnç
T	: Mutlak sıcaklık
V_{OC}	: Açık devre voltajı
W_D	: Tüketim tabakasının genişliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_b	: Engel yüksekliği
δ	: Arayüzey tabakası kalınlığı
Ω	: Ohm

Kısaltmalar

MS	: Metal/Yarıiletken
MOS	: Metal/Organik Tabaka/Yarıiletken
BODIPY	: 4,4' -difloro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indasen
BOD-Pyr	: 4,4'-difloro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indasen-piridin

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.a) İletkenlere, b) yalıtkanlara, c) $T = 0$ K'de yarıiletkenlere ve d) $T > 0$ K'de yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramı	5
Şekil 2.2.Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın a)kontakdan önce b)kontakdan sonra enerji bant diyagramları.....	7
Şekil 2.3.Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın a)termal dengede b)düz beslemde ve c) ters beslemde enerji bant diyagramları	9
Şekil 2.4.Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın a)kontakdan önce b)kontakdan sonra enerji bant diyagramları	9
Şekil 2.5.Bir MOS yapısının şematik gösterimi	11
Şekil 2.6.Düz beslem altında metal/yarıiletken kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı	12
Şekil 2.7.Bir metal/yarıiletken kontağın aydınlatma altındaki şematik görünümü....	19
Şekil 2.8.Fotodiyotun şematik görüntüsü	20
Şekil 2.9.Fotodiyotun karanlıkta ve aydınlatma altında akım-voltaj karakteristikleri	22
Şekil 3.1.BOD-Pyr bileşiğinin sentezi	24
Şekil 4.1.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj karakteristiği.....	27
Şekil 4.2.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin ışık şiddeti ile değişimleri.....	28
Şekil 4.3.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $dV/d\ln I - I$ grafiği.....	30
Şekil 4.4.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $H(I) - I$ grafiği.....	31
Şekil 4.5.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun 1 MHz'de Kapasite-Voltaj grafiği	32
Şekil 4.6.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $N_{SS} - E_C - E_{SS}$ grafiği	33

Şekil 4.7.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği.....	35
Şekil 4.8.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği	36
Şekil 4.9.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki V_{OC} - J_{SC} -P grafiği.....	37
Şekil 4.10.Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki P_{max} -FF-P grafiği	38



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun n , I_0 , ϕ_b değerleri.....	28
Tablo 4.2. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan R_s değerleri.....	31
Tablo 4.3. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altında V_{OC} ve J_{SC} değerleri.....	36
Tablo 4.4. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki V_{max} , I_{max} , P_{max} ve FF değerleri.....	38

ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE AYDINLATMA ALTINDA OPTOELEKTRONİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, spin kaplama yöntemi kullanılarak n-tipi Si altlık üzerine BOD-Pyr organik malzemesi ince film olarak büyütülmüştür. Üretilen Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun oda sıcaklığında, karanlıkta ve aydınlatma altında I-V ölçümleri alınarak ana elektriksel karakteristikleri ve Cheung&Cheung metodundan yararlanılarak seri direnç değerleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda karanlık ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla, 2,84 ve 0,751eV, 1,55 ve 0,871eV bulunmuştur. Aydınlatma şiddetindeki artışın idealite faktöründe azalmaya, engel yükseliğinde ise artışa sebep olmaktadır. Seri direnç değerleri ise karanlık ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında sırasıyla 5019 Ω ve 2671 Ω olarak bulunmuştur. Son olarak diyotun 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri 0,26 V ve 0,017 mA bulunmuştur. Bulduğumuz bu sonuçlar dikkate alındığında üretmiş olduğumuz Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun ışığa duyarlı olup fotovoltaiik davranış gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Organik yarıiletken, Schottky diyot, Cheung ve Cheung, Fotodiyot

PREPARATION OF ORGANIC BASED PHOTODIODES AND EXAMINATION OF OPTOELECTRONIC PROPERTIES UNDER ILLUMINATION

SUMMARY

In this study, BOD-Pyr organic material was grown as thin film on the n-type Si substrate by using the spin coating method. The main electrical characteristics of the produced Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diode at room temperature, in the dark and under illumination, examined by I / V measurements and the series resistance values were examined by using the Cheung & Cheung method. As a result of the investigations, the ideality factor and barrier height were found as 2,84 and 0,751eV, 1,55 and 0,871eV respectively under darkness and 100 mW/cm² illumination intensity. The increase in illumination intensity leads to a decrease in the ideality factor and an increase in the barrier height. Series resistance values were found as 5019 Ω and 2671 Ω under darkness and 100 mW/cm² illumination intensity, respectively. Finally, the diode has open circuit voltage and short circuit current values of 0,26 V and 0,017 mA under 100 mW/cm² illumination intensity. When these results were taken into consideration, it was observed that the produced Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diode was photovoltaic and sensitive to light.

Keywords: Organic semiconductor, Schottky diode, Cheung & Cheung, Photodiode

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Diyotlar, yarıiletken devre elemanlarıdır ve akımı tek yönde iletirler. Diyotlar, N tipi ve P tipi maddelerin birleşmesiyle oluşur. P kutbuna “Anot” ve N kutbuna “Katot” adı verilir. Akımın tek yönde iletilmesinden ötürü, mekanik sistemlerdeki valfin elektrik analogları olduğu düşünülmektedir. Bu sebepten ilk üretilen diyotlar valf olarak adlandırılmaktadır. Diyotların çalışma prensipleri aynı olmasına rağmen, farklı uygulamalar için değişik diyot tipleri tasarlanmıştır. Zener diyot, ışık yayan diyot, değişken sızalı diyot, tünel diyot, fotodiyot ve Schottky diyot sık kullanılan diyot çeşitleridir.

Metal-yarıiletken kontaklar yarıiletken teknolojisinde yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Metal-yarıiletken kontakların arayüzeyinde bir potansiyel engel bulunduğunu ortaya ilk kez atan Schottky olmuştur. Bu sebeple metal-yarıiletken doğrultucu kontaklar Schottky diyotlar olarak da adlandırılmaktadır [1].

Schottky diyotlar, bir metal ile bir yarıiletkenin kontaklanması ile oluşturulmaktadır [2]. Schottky diyotların oluşturulmaları kolaydır ve elektriksel karakteristikleri diyotun arayüzey durumları ile kontrol edildiği bilinmektedir ve engel yüksekliği, idealite faktörü gibi parametrelerle de elektronik özellikleri karakterize edilmektedir. Bu özelliklerinden ötürü önemleri her geçen gün artmaktadır. Schottky diyotlar, güneş pilleri, detektörler, mikrodalga sistemler, varaktörler (kondansatör), hızlı anahtar uygulamaları, bilgisayarlar, radyo frekans devreleri vb. alanlarda kullanılmaktadır [2].

Son yapılan çalışmalarla birlikte, metal-yarıiletken arasında oluşan arayüzeylerin son derece kompleks bölgeler olduğu ve yüzeyin oluşturulmasındaki şartların kontakların fiziksel özelliklerini değiştirdiği gözlenmektedir. Bilinmeyen kirlilikler bulunan kontaklarda arayüzey durumları oluşmakta ve bu arayüzey durumlarının diyotun özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir. Diyotun hazırlanmasında hassas davranılmaması durumunda metal ile yarıiletken arasında bir

oksit tabakası oluşacak ve bu tabaka metal-yarıiletken yapısının metal-yalıtkan-yarıiletken yapısında dönüşmesine sebep olacaktır [3].

Yarıiletken ile metal arasında bulunan bu arayüzey durumları diyot parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır ve Schottky diyotların arayüzey durumları akım-gerilim ve admittance (kapasite ve iletkenlik ölçümleri) gibi tekniklerle belirlenmektedir [4].

Organik yarıiletkenler, üretiminin kolay olması, düşük maliyetli olması, uygulamaya özgün üretilebilmesi ve yararlı elektronik özelliklerinin olması sebebiyle yapılan çalışmalarda büyük ilgi görmektedir [5].

Organik yarıiletkenlerin ince film teknolojisi uygulamalarında yeri çok geniştir. Son yıllarda, organik yarıiletkenler ve türevleri ile yeni Schottky diyotlar hazırlanıp, karakterizasyonları yapılmaktadır [6,7].

BODIPY, emisyonunun görünür bölgede olması ve yüksek kuantum verimine sahip olması nedeniyle organik yarıiletkenler arasında umut verici malzemelerden biridir. Işığa duyarlı floresans maddelerden olup geniş bir uygulama alanına sahiptir. BODIPY çekirdeğine donör/akseptör özelliğine sahip fonksiyonel gruplar bağlanarak birçok BODIPY türevi sentezlenebilmektedir. Bu BODIPY türevleri akıllı devre anahtarları, boyar madde ile duyarlaştırılmış güneş pilleri, polimerler, ışık toplama sistemleri, lazer boyaları, enerji transfer kasetleri ve OLED uygulamalarında kullanılmaktadır [8].

Daha önce yapılan çalışmalarda, organik yarıiletken kullanılarak yapılan Schottky diyotların karanlıkta yapılan elektriksel ölçümleri fazla olmasına rağmen, farklı ışık şiddetleri altındaki elektriksel karakteristikleri üzerinde çok durulmamıştır. Halbuki bu tip diyotların farklı ışık şiddeti altında gösterdiği elektriksel karakteristikler karanlıktakinden çok farklıdır [9].

Fotodiyotlar, ışığa duyarlı yarıiletken diyotlardır. Bir p-n eklemi veya bir metal-yarıiletken kontağıyla oluşturulurlar [10]. Anot ve katot olan iki elektriksel kontağı bulunur. Doğru beslemede normal diyot özellikleri gösterirler. Ters besleme altında üzerine düşen ışıkla orantılı olacak şekilde ters akımları değişir. Üzerine

düşen ışık şiddeti arttığında eklem yüzeyindeki direnç azalır ve fotodiyot üzerinden geçen akım artar, ışık şiddeti azaldığında eklem yüzeyindeki direnç artar ve fotodiyot üzerinden geçen akım azalır. Fotodiyotlar, bu prensibe dayanarak yapılırlar. Fotodiyotlar, ışık şiddetini elektriksel işarete çevirmede en etkili olanıdır ve bu çevrim işlemi fotodiyodun karakteristiğine bağlıdır [11,12]. Fotodiyotlar ışığa karşı hassas olmaları sebebiyle bilgisayarlar, elektronik devreler, fotoğraf makineleri, uzaktan kumandalar, alarm sistemleri vb. kontrol devrelerinde kullanılmaktadır [13,14].

Bu çalışmadaki amacımız, floresans özelliğe sahip olduğu bilinen BOD-Pyr organik bileşiğini uygun metotlarla sentezlenmek. Sentezlenen BOD-Pyr organik bileşiğini n-tipi silisyum üzerine spin kaplama yöntemi ile büyüterek Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunu hazırlamak. Hazırlanan diyotun karanlıkta ve farklı aydınlatmalar altında akım-voltaj ölçümleri yapmak ve Schottky kontakların karakteristik özellikleri ortaya çıkarmak. Bu karakteristik parametrelerden akım-voltaj ölçümlerini kullanarak seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi elektriksel parametre değerlerini ve kısa devre akımı, açık devre voltajı, maksimum akım, maksimum voltaj, maksimum güç ve doldurma faktörü gibi optoelektronik parametre değerlerini bulmaktır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. İletkenlik

Malzemelerin elektron bant yapıları ve elektronların hareketleri elektriksel özelliklerini belirler. Elektronların manyetik alan, elektriksel alan, radyasyon ve sıcaklık etkileri altında ki davranışları elektriksel özelliklerini oluşturur. Bu etkileşimde valans ve iletim bantlarının durumu önem arz etmektedir. Malzemeler bu valans ve iletim bantlarının durumuna göre iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere 3'e ayrılmaktadır [15]. İletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramları Şekil 2.1'de verilmiştir.

2.1.1. İletkenler

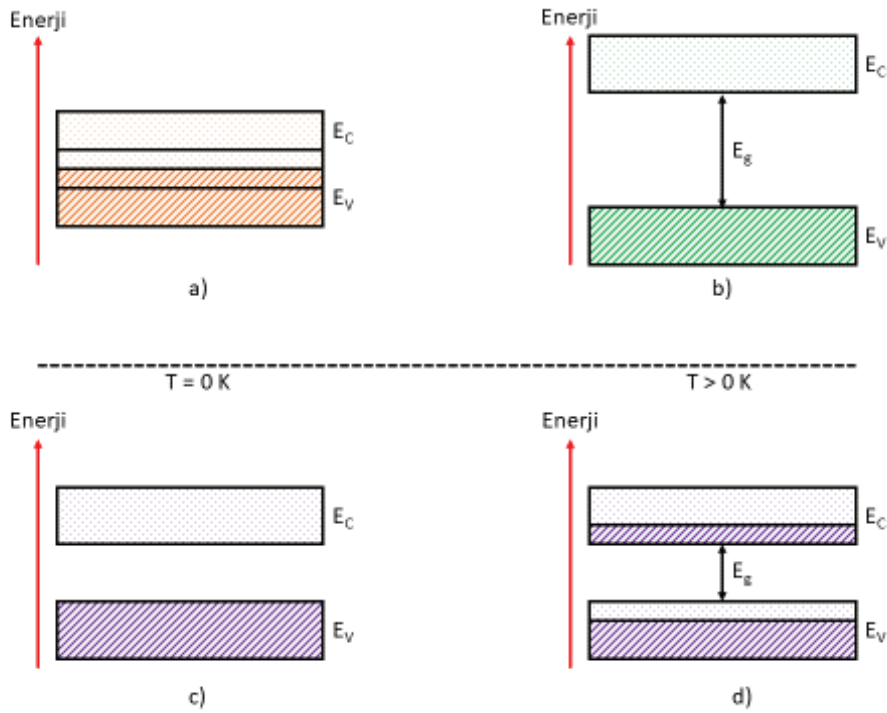
Elektrik akımını direnç göstermeden ileten maddelerdir. Akım iletimi, iyonik ve elektronik geçişli olmak üzere iki şekildedir. Akım iletiminin, iyonlar tarafından yapılması durumunda iyonik geçişli, elektronlar tarafından yapılması durumunda elektronik geçişli olmaktadır. Bir maddenin iletkenliğini belirleyen en önemli etken valans bandındaki elektron sayısıdır. İletkenlerde valans bandındaki elektronlar atoma zayıf olarak bağlıdır. Isı, ışık ve elektriksel bir etkiyle kolayca atomdan ayrılabilir. Valans bandında bulunan elektron sayısına göre iyi yada kötü iletken olarak aralarında gruplara ayrılırlar. Bir elektrona sahip olanlar iyi, iki veya üç elektrona sahip olanlar kötü olarak adlandırılır.

2.1.2. Yalıtkanlar

Yalıtkan maddelerde valans bandı elektronca doludur. Bu şekildeki bantların elektron alıp verme istekleri yoktur. Bu sebeple yalıtkanlarda akım iletimi gerçekleşmemektedir. Yalıtkan malzemelerde 5-9 eV arasında bir yasak enerji bant aralığı bulunmaktadır ve oda sıcaklığındaki ısı valans bandındaki elektronu iletim bandına çıkarmaya yetmemektedir.

2.1.3. Yarıiletkenler

Elektrik akımının belirli bir değere kadar olmadığı ve bu değerden sonra sonsuza giden küçük direnç gösteren maddelerdir. İletkenlikleri, iletken maddeler ve yalıtkan maddeler arasındadır. Yarıiletkenlerde yasak enerji bant aralığı 2 eV'dan küçüktür. Normal halde yalıtkan olan bu maddeler; ısı, ışık, manyetik etki yada voltaj altında valans bandındaki elektronların serbest duruma geçmesi sonucu iletkenlik özelliği kazanırlar [16].



Şekil 2.1. a) İletkenlere, b) yalıtkanlara, c) $T = 0 \text{ K}$ 'de yarıiletkenlere ve d) $T > 0 \text{ K}$ 'de yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramı

2.1.3.1. N-tipi yarıiletkenler

Yarıiletkenin kendisine uygun olarak seçilmiş yabancı bir atom ile katkılanması, yarıiletkenin elektriksel ve optik özelliğini önemli ölçüde değiştirmektedir. Yarıiletken malzeme içine katkılanan atomlar kendi bant yapılarını bozarak, yarıiletken içerisinde kendilerine özgü enerji seviyeleri oluşturmaktadır. Bu durumda katkılanan atom yarıiletkene elektron vererek iyonlaşır ise oluşan yeni yapıya n-tipi yarıiletken adı verilmektedir ve n-tipi yarıiletkenlerde iletkenlik

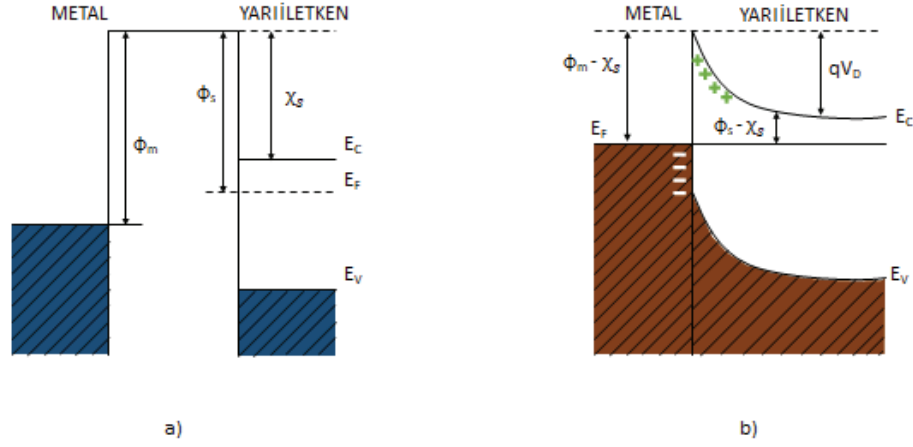
elektronlar ile sağlanmaktadır [17]. Örnek olarak IV. Gruptaki elementlerden biri olan silisyum kristaline V. grup elementlerinden biri olan fosfor katkılanması sonucunda n-tipi silisyum elde edilebilmektedir. Silisyumun son yörüngesinde dört serbest elektron bulunurken katkı maddesi olarak kullanılan fosfor elementinde beş serbest elektron bulunmaktadır. Kristal yapıda bulunan fosfor elementinin dört elektronu silisyumun dört elektronu ile kovalent bağ oluştururken fosfor elementinin beşinci elektronu zayıf bir elektriksel kuvvetle fosfor elementine bağlanır. Bu sebeple küçük bir enerjiyle fosfor elementi iyonlaşabilmekte ve bu elektron silisyum kristalinin iletkenlik bandına çıkabilmektedir. N-tipi yarıiletkenlerde elektron yoğunluğunun fazla olmasından ötürü elektronlar elektriksel iletkenliğe boşluklardan daha fazla katkıda bulunmaktadır.

2.2. Metal/yarıiletken Kontaklar

Bir metal ile bir yarıiletkenin, kontak edilmesi sonucu oluşan yapıya metal-yarıiletken kontağı adı verilir. Kontaklanan malzemelerin fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar aralarında yük alışverişi olur. Oluşacak kontak türünü metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonu belirlemektedir. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda metalin iş fonksiyonunun (ϕ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) büyük olması durumunda doğrultucu kontak, küçük olması durumunda omik kontak oluşmaktadır. Metal/p-tipi yarıiletkenlerde ise $\phi_m > \phi_s$ durumunda omik kontak, $\phi_m < \phi_s$ durumunda doğrultucu kontak oluşmaktadır [18-20].

2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğunda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Doğrultucu kontaklarda akım bir yönden diğerine kolayca iletilirken diğer yönde iletim potansiyel engelinden ötürü zorlaşmaktadır [21]. Bir metal ile yarıiletkenin kontak öncesi ve kontak sonrası durumu Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2.Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın a)kontakdan önce b)kontakdan sonra enerji bant diyagramları

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kontak öncesinde yarıiletkenin fermi seviyesi ile metalin fermi seviyesi arasında $\phi_m - \phi_s$ kadar bir fark bulunmaktadır. Kontak oluşturulduğunda yarıiletkenin iletkenlik bandında bulunan, enerjileri metaldeki elektronlardan yüksek olan elektronlar kontak bölgesine girerler. Metalin ve yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar olay devam eder. Yarıiletkende elektron yoğunluğu azalır ve iletkenlik bandı ile fermi enerji seviyesi arasındaki mesafe termal dengeye ulaşılan kadar artar. Yarıiletkenin yasak enerji aralığı kontaklanmadan sonra değişmeyeceğinden E_V ve E_C vakum seviyesiyle birlikte aşağıya bükülür [22]. Şekil 2.2b’de gösterildiği üzere band bükülmelerinin miktarı iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir ve bu eşitlik,

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

şeklinde verilir. Metal tarafındaki potansiyel engelin yüksekliği ise,

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

şeklindedir.

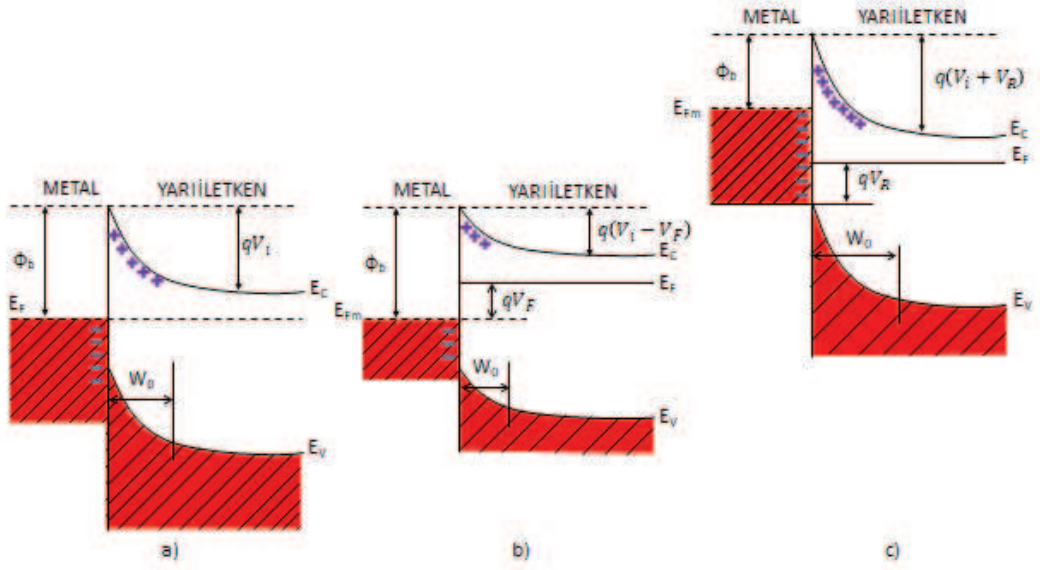
Termal uyarılma sonucu metalin yeterli enerjiye sahip bazı elektronları yarıiletkenin içine, yarıiletkenin bazı elektronları da metalin içine girerler. Denge

kurulduğunda eşit ve zıt yönlü I_0 akımları oluşur. Yarıiletken $-V$ voltajı uygulandığında metalden yarıiletken gidecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez. Bundan ötürü yarıiletken metale karşı gelen akım da değişmeyecektir.

Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın termal denge, düz beslem, ters beslem altındaki enerji band diyagramları Şekil 2.3’de verilmiştir. Düz beslemde yani yarıiletken tarafına negatif voltaj uygulandığında tükenim bölgesinin genişliği azalır ve potansiyel engel yüksekliği qV_i , $q(V_i - V_F)$ şeklinde değişir. Yarıiletken metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği azalacağından elektronların yarıiletken metale doğru olan akımı termal denge durumuna göre artış gösterecektir. Metalde herhangi bir voltaj azalması olmayacağından ve engel yüksekliği değişmeyeceğinden, elektronların metalden yarıiletken doğru olan akımında değişiklik olmayacaktır. Ters beslemde yani yarıiletken tarafına pozitif voltaj uygulandığında tükenim bölgesi üzerine düşen engel yüksekliği qV_i , $q(V_i + V_R)$ şeklinde artış gösterecektir. Yarıiletken metale doğru olan akım termal denge durumuna göre azalır. Metalden yarıiletken doğru olan akım termal denge durumundaki akıma eşittir. Termal denge durumunda kontakta tek bir fermi enerji seviyesi bulunurken ters ve düz beslem durumunda metal ve yarıiletken tarafında iki farklı fermi enerji seviyesi bulunmaktadır [5]. Bu durumda diyotun akım-voltaj ilişkisi,

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

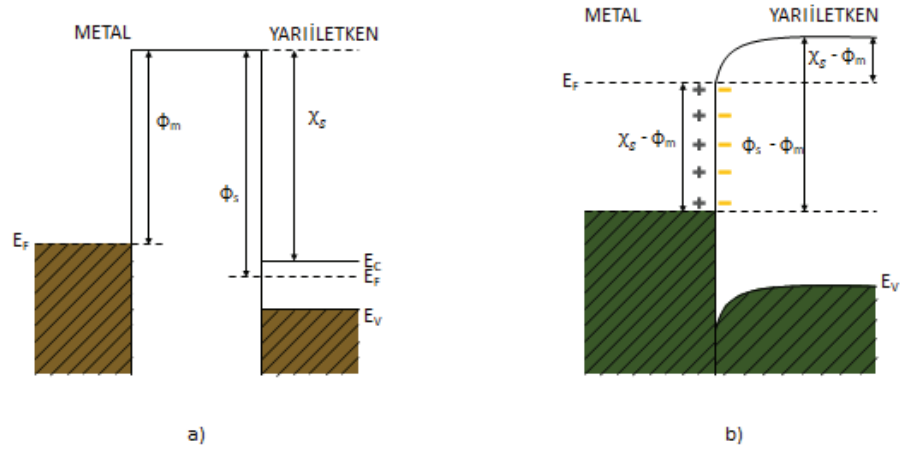
şeklindedir. Burada I_0 , ters doyma akımı; q , taşıyıcı yükü; V , uygulanan voltaj; k , Boltzman sabitini; T , Kelvin cinsinden sıcaklığı ve n , idealite faktörünü belirtmektedir. İdeal diyotlar için $n = 1$ değerini almaktadır [23].



Şekil 2.3.Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın a)termal dengede b)düz beslemde ve c) ters beslemde enerji bant diyagramları

2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olduğu durumda metal/n-tipi yarıiletken omik kontak oluşur. Metal ile yarıiletkenin kontak öncesi ve kontak sonrası durumu Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4.Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın a)kontakdan önce b)kontakdan sonra enerji bant diyagramları

Şekil 2.4'den görüldüğü üzere kontak öncesinde yarıiletkenin fermi enerji seviyesi ile metalin fermi enerji seviyesi arasında $\phi_s - \phi_m$ kadar bir fark bulunmaktadır. Kontak oluşturulduğunda metaldeki elektron yoğunluğunun yarıiletkendeki elektron yoğunluğundan fazla olması nedeniyle elektronlar metalden yarıiletkene doğru akacaktır. Bu durum metal ile yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar devam eder. Akan bu elektronlar gerilerinde pozitif yüklü boşluklar bırakacak ve yarıiletken yüzeyinde negatif yüklü bir yüzey tabakası oluşturacaklardır. Sonuç olarak E_V ve E_C vakum seviyesiyle birlikte yukarıya bükülür [5].

2.2.3. Metal/organik tabaka/n-tipi yarıiletken/metal yapısı

Bir metal/yarıiletken yapının, doğrultucu kontak metali ile yarıiletken arasına organik bir malzeme kaplandığında yeni oluşacak yapı metal/organik/yarıiletken (MOS) şeklinde olur. Bu organik arayüzey tabakasının varlığı metal ile yarıiletkeni birbirinden yalıtırken aynı zamanda aralarındaki yük geçişlerini de düzenler. Metal/organik/yarıiletken diyot üzerine uygulanan voltaj organik arayüzey tabaka, yapının seri direnci ve diyotun kendisi tarafından bölüşülür. Bu sebeple MOS yapıların akım-iletimi MS yapıdaki diyotlardan farklı olmaktadır [24]. Karadeniz ve arkadaşları Rubren arayüzey kullanarak Al/rubrene/p-Si Schottky diyot üretmişlerdir ve kullanılan bu arayüzey tabakasının idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin değiştiğini gözlemlemişlerdir [25]. Pakma ve arkadaşları tarafından Koronen arayüzey kullanılarak Al/Coronene/n-Si üretilmiştir ve eklenen arayüzey tabakasının diyot parametrelerinde değişikliğe sebep olduğu gözlenmiştir [26]. Bir MOS yapısının şematik gösterimi Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bir MOS yapısının şematik gösterimi

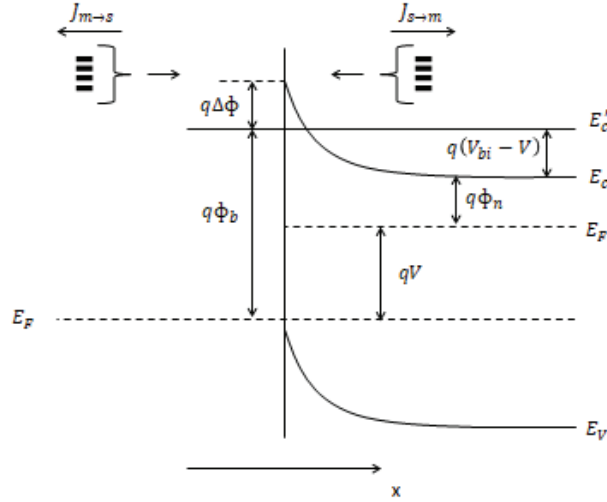
2.3. Metal/yarıiletken Kontaklarda Akım İletimi

Metal/yarıiletken kontaklarda akım iletimi çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlanır [27]. Bu yapıların dış voltaj altında akım iletim mekanizmaları iyi tayin edilmelidir. Arayüzey durumları, seri direnç, sıcaklık, yarıiletkenin tipi, uygulanan voltajın yönü vb. faktörlerin yapıya etkisi göz önüne alınarak akım iletim mekanizması belirlenmektedir [28]. Bir MS veya MOS yapı için akım iletim mekanizmaları şunlardır;

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Termiyonik Alan Emisyonu (TAE)
- Alan Emisyonu (AE)
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Çok katlı tünelleme
- Deşik enjeksiyonu
- T_0 etkili akım iletimi

2.3.1. Termiyonik emisyon teorisi

Termiyonik emisyon teorisi sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların salınması olayına denilmektedir. Metal/yarıiletken diyotlarda termiyonik emisyon teorisi, yeterli termal enerji kazanan taşıyıcıların metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engeli aşarak metalden yarıiletkene yada yarıiletkenden metale geçmesi olayıdır. Termal denge durumunun etkilenmemesi için Maxwell-Boltzman yaklaşımı uygulanır. Buna göre metal/yarıiletken kontağın potansiyel engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmaları çok küçüktür [29]. Metal/yarıiletken kontağın düz beslemdeki imaj azalma etkisine ait enerji-band diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6.Düz beslem altında metal/yarıiletken kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji-band diyagramı

Yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu, $J_{s→m}$ engel yüksekliğini aşabilecek büyüklükteki hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun x yönündeki bir fonksiyonudur ve

$$J_{s→m} = q \int_{E_C}^{\infty} V_x dn \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Eşitlikte E_c : metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, V_x : x yönündeki taşıyıcı hızıdır. dn : artan elektron konsantrasyonudur ve

$$dn = g_c(E)f(E)dE \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikte $g_c(E)$: iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f(E)$: Fermi-Dirac ihmaliet fonksiyonudur. Elektron konsantrasyonu Maxwell-Boltzman yaklaşımı uygulanarak

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{2/3}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E - E_c)}{kT}\right] dE \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlikteki $E - E_c$ ifadesi serbest elektronun kinetik enerjisi olarak kabul edilirse

$$(E - E_c) = \frac{1}{2}m_n^*V^2 \quad (2.7)$$

$$dE = m_n^*VdV \quad (2.8)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = V \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.9)$$

olur. Denklem 2.6 bu sonuçlar kullanılarak yeniden düzenlendiğinde

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h}\right)^3 \exp\left(\frac{-q\Phi_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{-m_n^*V^2}{2kT}\right) 4\pi V^2 dV \quad (2.10)$$

elde edilir. Bu eşitlik hızları V ile $V + dV$ aralığında hacim başına elektron sayısını verir. Hız, bileşenlerine ayrıldığında $V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$ olur. Gerekli değiştirmeler yapıp çözüldüğünde;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3}\right) T^2 \exp\left(\frac{-q(\Phi_n + V_{bi})}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.11)$$

ifadesi elde edilir. $\Phi_n + V_{bi} = \Phi_b$ olarak yazılıp eşitlik yeniden düzenlendiğinde

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3}\right) T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.12)$$

olur. Uygulanan voltaj sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile $J_{m \rightarrow s}$ birbirine eşit olur ve Denklem 2.13'deki eşitlik ile ifade edilir.

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_b}{kT} \right) \quad (2.13)$$

Metal/yarıiletken kontağın net akım yoğunluğu

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Akım yoğunluğu pozitif olarak tanımlandığında net elektron akım yoğunluğu

$$J = A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_b}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada A^* Richardson sabitidir ve

$$A^* = \left(\frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Genel net elektron akım yoğunluğu

$$J = J_0 \exp \left(\frac{qV}{kT} - 1 \right) \quad (2.17)$$

ifadesiyle verilir. Burada J_0 ters doyum akımı yoğunluğudur ve

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_b}{kT} \right) \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir.

ϕ_b , Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti sebebiyle azaldığı ve $\phi_b = \phi_{b0} - \Delta\phi$ şeklinde verildiği dikkate alınarak Denklem 2.18 yeniden düzenlenirse

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_b}{kT} \right) \exp \left(\frac{q\Delta\phi}{kT} \right) \quad (2.19)$$

olur [29].

2.4. Arayüzey Durum Yoğunluğu

Arayüzey durumları, metal/yarıiletken arayüzeyinde yasak band aralığındaki girilebilen bir enerji seviyesini ifade eder [30]. Arayüzey durumları alıcı yada verici

tipinde olabilir. Alıcı, enerji seviyesi dolu olduğunda negatif yüklü, boş olduğunda yüksüzdür. Verici ise enerji seviyesi dolu olduğunda yüksüz, boş olduğunda pozitif yüklüdür. Bir voltaj uygulandığında Fermi enerji seviyesi geride sabit kalırken arayüzey tuzak seviyeleri, valans ve iletkenlik bantlarıyla aşağıya ve yukarıya hareket ederler. Arayüzey durumları genellikle arayüzeye çok yakın yerlerdedir. Arayüzey durum yoğunluğu, engel yüksekliğinin doğru beslemde I-V ölçümlerindeki değerleri dikkate alınarak, enerjinin ($E_C - E_{SS}$) bir fonksiyonu olarak elde edilir. Yarıiletken ile organik tabaka arasında ortaya çıkan bu arayüzey tabakası diyot parametrelerini etkilemekte ve ideallikten sapmalara sebebiyet vermektedir. Metal/yarıiletken kontaklarda, arayüzey tuzakları genellikle metalle dengededir. Ancak, metal ile yarıiletken arasına kalınlığı 30 μm 'den daha büyük olan bir arayüzey tabaka kaplandığında arayüzey tuzakları yarıiletken ile dengede olmaktadır [31].

İdealite faktörü değerinin arayüzey durum yoğunluğu ve arayüzey tabakasının kalınlığı ile değişimi

$$n = 1 + \frac{\frac{\delta}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{sb} \right)}{1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} q^2 N_{sa}} \quad (2.20)$$

şeklindedir. Burada N_{sa} metalle dengedeki arayüzey durum yoğunluğunu, N_{sb} yarıiletkenle dengedeki arayüzey durum yoğunluğunu, W_D tükenim tabakasının genişliğini, q elektron yükünü, δ arayüzey tabakası kalınlığını, ϵ_i arayüzey tabakasının geçirgenlik sabitini, ϵ_s ise yarıiletkenin geçirgenlik sabitini ifade etmektedir.

İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri voltaj ile değiştiğinden etkin engel yüksekliği

$$\phi_e = \phi_{Bo} + \alpha V = \phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) V \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada α engel yükseliğinin voltaj katsayısıdır. Denklem 2.20'de verilen voltaja bağlı idealite faktörü, voltaja bağlı N_{SS} değerlerinin bir fonksiyonu olarak düzenlendiğinde

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{w_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (2.22)$$

eşitliği elde edilir.

Denklem 2.22'den metal/organik tabaka/yarıiletken kontaklar için arayüzey durum yoğunluğu

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{w_D} \right) \quad (2.23)$$

şeklinde elde edilir.

N tipi yarıiletkenlerde enerji farkı eşitliği ise

$$E_C - E_{ss} = q(\phi_b - V) \quad (2.24)$$

şeklinde verilir.

2.5. Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Metal/yarıiletken bir Schottky diyotun niteliklerini idealite faktörü, engel yüksekliği gibi karakteristik parametreler belirler. Schottky kontaklar için doğru beslem voltajı çok yüksek olmadığı sürece termiyonik emisyon teorisine göre akım-voltaj bağıntısı,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

denklemini ile verilir. $V > 3kT/q$ için denklem,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad (2.26)$$

şeklini alır. Burada I , diyottan geçen akım, I_0 ise

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_b}{kT} \right] \quad (2.27)$$

ifadesiyle verilen ters doyma akımıdır. Bu denklemde A diyotun kontak alanı, A^* Richardson sabiti (n-Si için $A^* = 120 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$), T Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ve k Boltzman sabitidir.

Bir Schottky diyot için engel yüksekliği, Denklem 2.27'ün logaritması alınarak ϕ_b 'ye göre çözüldüğünde,

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.28)$$

ifadesiyle verilir.

Denklem 2.26'ün logaritması alınıp sonrasında V'ye göre türevi alındığında,

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.29)$$

denklemini ile verilen idealite faktörü bulunur.

2.6. Cheung Metodu Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

İdeal Schottky diyotlar için akım-gerilim karakteristikleri Denklem 2.26 ve Denklem 2.27'de verilmiştir. Fakat seri direncin etkisi göz önüne alındığında hesaplanan değerlerde farklılıklar gözlenmektedir. Bu problemin çözümlenebilmesi için Schottky diyotların akım-voltaj karakteristikleri yardımı ile idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç parametrelerinin belirlenmesinde Cheung ve Cheung tarafından farklı bir metod sunulmuştur. Denklem 2.26 ve Denklem 2.27 birlikte düzenlenerek,

$$I = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_b}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \right] \quad (2.30)$$

haline gelir. Uygulanan voltajın IR_s kadarlık bir kısmı diyotun seri direnci üzerine düşer. Bu durumda akım azalacağı için denklem

$$I = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_b}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT} \right) \right] \quad (2.31)$$

elde edilir. Her iki tarafın logaritması alındığında;

$$\ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = \ln \left[\exp \left(-\frac{q\phi_b}{kT} \right) \right] + \ln \left[\exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT} \right) \right] \quad (2.32)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.33)$$

eşitliği elde edilir. İki tarafında $\ln I$ 'ya göre türevi alındığında;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{q} \right) + IR_s \quad (2.34)$$

elde edilir. Bu denkleme 1. Cheung&Cheung Fonksiyonu denir. $dV/d\ln(I)$ 'nın I 'ya göre grafiği bir doğru olup eğiminden seri direnç ve düşey eksenini kestiği noktadan da idealite faktörü bulunur [32].

Denklem 2.33'daki $(n\phi_b + IR_s)$ ifadesi $H(I)$ şeklinde bir fonksiyon olarak düşünüldüğünde;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.35)$$

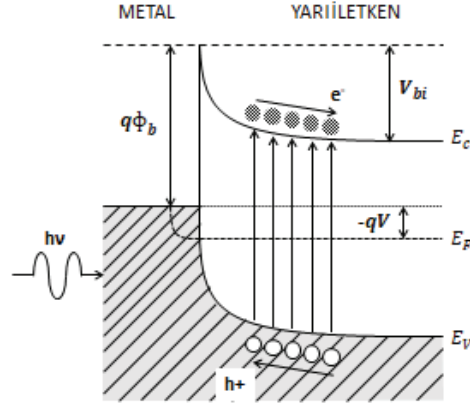
olur ve Denklem 2.33 ve Denklem 2.34 birlikte düşünülürse;

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.36)$$

eşitliği elde edilir. Elde edilen bu denklem 2.Cheung&Cheung Fonksiyonu olarak adlandırılır. $H(I)$ 'nın I 'ya göre grafiğinden oluşan doğrunun eğiminden seri direnç düşey eksenini kestiği noktadan ise 1. fonksiyondan bulunan idealite faktörü değeri kullanılarak engel yüksekliği bulunur [32].

2.7. Metal/yarıiletken Fotodiyotlar

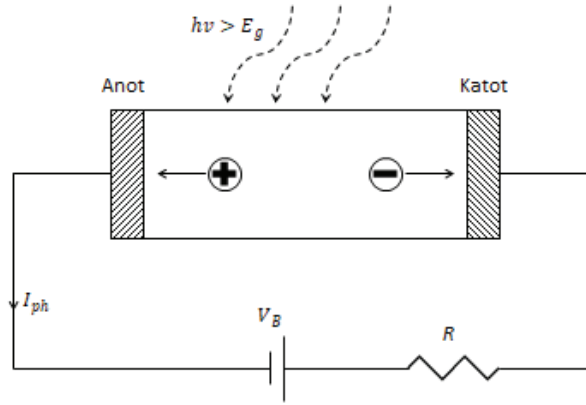
Fotodiyotlar, ışığa karşı duyarlı diyotlardır. Fotodiyotların, boşaltılmış yarıiletken bölgesinde serbest yük taşıyıcıları bulunur ve elektriksel işlem yapıldığında optik sinyaller üreten sensörlerdir. Tüketime bölgesinde oluşan foto taşıyıcılar, yüksek alan varlığı nedeniyle malzemenin uç kısmına birikirler. Bir metal/yarıiletken kontakın aydınlatma altındaki şematik görünümü Şekil 2.7'de verilmiştir [13].



Şekil 2.7. Bir metal/yarıiletken kontakın aydınlatma altındaki şematik görünümü

Fotodiyotlar, kontak içindeki foto taşıyıcıların yer değiştirmesi prensibine göre çalışır. Doğrultucu kontakta ışık geldiğinde, enerjisi yeterli olan fotonlar soğurulur. Oluşan fazlalık elektronlar ve boşluklar diyotun farklı alanlarında toplanırlar. Bu durumda diyot bir dış yüke bağlandığında soğurulan fotonların ve taşıyıcıların sayısıyla orantılı bir akım oluşur [13].

Yarıiletkenin band aralığından daha yüksek enerji ile gelen fotonlar, yarıiletken tabaka içinde soğurulduğunda ve kontaklara bir ters besleme voltajı uygulandığında, yarıiletken karşısında bir elektrik alanı oluşur. Elektronlar ve boşluklar zıt yönlerde sürüklenirler ve bu işlem dış devrede bir akım meydana getirir. Bu akıma fotoakım denilmektedir. Bir fotodiyotun şematik görüntüsü Şekil 2.8’de gösterilmiştir [13].



Şekil 2.8. Fotodiyotun şematik görüntüsü

2.8. Fotovoltaik Parametreler

Fotodiyotların yük özellikleri fotovoltaik parametrelerinin analiz edilmesi sonucu bulunur. Bu parametreler kısa devre akımı, açık-devre voltajı, doldurma faktörü, maksimum güç noktasındaki voltaj, maksimum güç noktasındaki akım ve maksimum çıkış gücü durumlarıdır.

2.8.1. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı, ideal durumda (R_s etkisi yok) uygulanan voltaj ile aydınlatma altında oluşur. Bu akım aydınlatma şiddetiyle ve gelen foton sayısı ile orantılıdır [33].

2.8.2. Açık-devre voltajı

Açık-devre voltajı, aydınlatma altında diyotun akım-voltaj karakteristiğinde eğrinin voltaj ekseninin kestiği noktaya denilmektedir [33]. Akımın sıfıra eşit durumda belirlenmekte ve

$$V_{OC} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\frac{I_{SC}}{I_S} + 1 \right] \quad (2.37)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Her zaman geçerli olmamak şartıyla yüksek n değerleri ile yüksek açık-devre voltajı elde edilebilir. Çünkü yüksek n değerleri, I_S 'nin yüksek değerleri ile mümkün olmaktadır [33].

2.8.3. Maksimum akım

Maksimum akım değeri, akım-voltaj grafiğinde maksimum güç noktasının akım eksenine denk gelen noktasıdır ve I_{max} ile ifade edilmektedir [33].

2.8.4. Maksimum voltaj

Maksimum voltaj değeri, akım-voltaj grafiğinde maksimum güç noktasının voltaj eksenine denk gelen noktasıdır ve V_{max} ile ifade edilmektedir [33].

2.8.5. Maksimum güç

Maksimum akım ve maksimum voltaj değerleri ile bulunur ve

$$P_{max} = I_{max}V_{max} \quad (2.38)$$

şeklinde ifade edilir [33].

2.8.6. Doldurma Faktörü

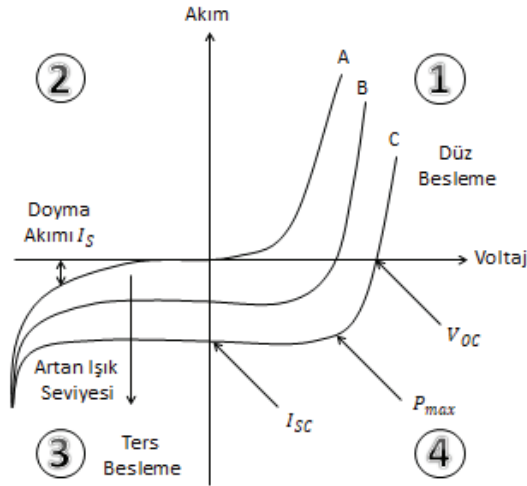
Doldurma faktörü, maksimum akım ile maksimum voltaj noktalarının oluşturduğu alanın, kısa devre akımı ve açık-devre voltajı noktalarının oluşturduğu alana oranıdır ve

$$FF = \frac{I_{max}V_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (2.39)$$

şeklinde ifade edilir [33].

2.9. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotların akım-voltaj karakteristiği diyotun eklemine bulunan akım taşıma mekanizmaları ile belirlenir. Metal/yarıiletken eklemler ve p-n eklemlerine bağlı farklı akım taşıma mekanizmaları meydana gelebilir. Fotodiyotların akım-voltaj karakteristikleri şekil olarak normal bir diyot gibidir [10]. Bir fotodiyotun karanlıkta ve aydınlatma altındaki akım-voltaj karakteristiği Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Fotodiyotun karanlıkta ve aydınlatma altında akım-voltaj karakteristikleri

Işığın fotodiyotun duyarlı yüzeyine düşmediği yani karanlıkta iken fotodiyot üzerinden geçen akım, azınlık taşıyıcıların termal yolla oluşturduğu akımdır ve bu akıma karanlık akım denir. Şekil 2.9'daki A,B,C eğrileri sırasıyla karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım-voltaj karakteristiklerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere fotodiyotun akım-voltaj karakteristiği dört farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge akımın ve voltajın pozitif olduğu bölgedir. Fotodiyot bu bölgede doğru beslenmektedir. Bu bölgede fotodiyot normal bir diyot gibi davrandığından bu bölge fotodiyot uygulamalarına uygun değildir. Fotodiyotun ikinci bölgede cevabı yoktur. Üçüncü bölgede fotodiyot üzerinden yalnızca çok küçük bir I_s akımı geçmektedir. Fotodiyotun aktif alanı üzerine gelen ışık şiddeti arttırıldığında bu bölgedeki eğrilerin bütünü, negatif akım yönünde aşağıya değişir. Eğrilerin $V = 0$ eksininde akım eksenini kestiği noktalar I_{sc} 'yi, $I = 0$ ekseninde voltaj eksenini kestiği noktalar ise V_{oc} 'yi verir [10]. Ters besleme voltajı çok yüksek olduğunda akım hızlıca artmakta ve diyotun bozulması söz konusu olmaktadır. Bu bölge ters bozulma bölgesidir. Bu sebeple üçüncü bölge, ters beslem voltajı uygulanan ve ışığı algılamak için uygun olan bölgedir. Dördüncü bölge ise fotodiyotun fotovoltaiik bölgesidir [10].

Fotodiyotlar akım-voltaj karakteristiği, kuantum verimi karakteristiği ve band çalışma karakteristiği olarak üç ana karaktere sahiptir ve diyotun performansı

bu üç karakterizasyon ile belirlenir. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı diyot eklem kalitesinin iki göstergesidir. Aydınlatmasız ve ters besleme altında diyot içinden geçen akım düşük karanlık akımıdır ve daha yüksek duyarlılık anlamına gelmektedir [10].

Bir fotodiyota, yeterince ters besleme voltajı uygulanırsa diyot bozulma bölgesinde çalışır. Bu ters beslem voltaj bozulma voltajıdır ve fotodiyotun çalışması için gereken ters beslem voltaj sınırını belirler [34].

Fotodiyot yeterli ışık aldığında çalışmaya başlayan bir akım kaynağıdır. Işık, fotodiyot içerisinde zayıf bir akım oluşmasına neden olur. Fotodiyota bir voltaj uygulandığında, devrede dış devre direncinin toplamı olan bir yük direnci bulunduğundan fotodiyot üzerinde bir fotoakım meydana gelir. Bu sebepten ötürü, fotodiyotlar akım veya voltaj kaynağı olarak kullanılabilirler [34].

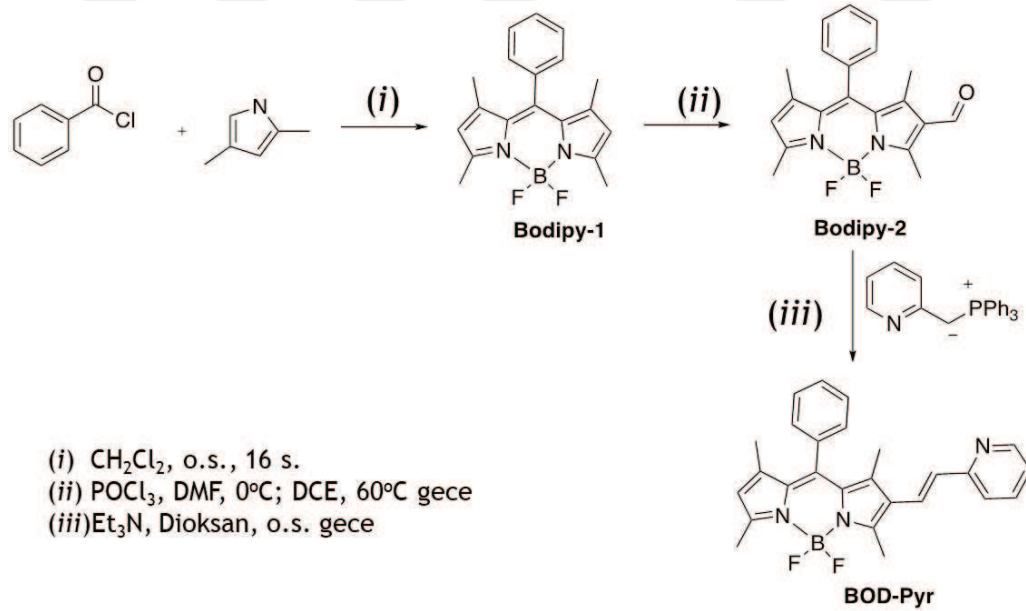
Bir Schottky fotodiyotunun $V = 0$ 'da doğru beslem akımı fit edilerek I_0 ve ϕ_b değerleri bulunabilir. Doğru beslemdeki I-V eğrisinin $(dV / d\ln I)$ eğimi ile de idealite faktörü belirlenir [10].

BÖLÜM 3. MATERYALVE YÖNTEM

Bu çalışmada yarıiletken altlık olarak, çapı 2'', kalınlığı 500 µm, öz direnci 20 Ω-cm ve (100) yönelimli bir n-tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Silisyum kristaline önce bir kimyasal temizleme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra termal buharlaştırma ve spin kaplama yöntemi kullanılarak diyot oluşturulmuştur. Oluşturulan diyotun elektriksel karakteristiğini belirlemek ve diyot parametrelerini hesaplamak amacıyla karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır.

3.1. BOD-Pyr Organik Malzemesinin Hazırlanması ve Sentezi

BOD-Pyr bileşiğinin sentezi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Öncelikle literatüre uygun metotlarla Bodipy-1 ve Bodipy-2 bileşikler sentezlenmiştir [35]. Elde edilen Bodipy-2 bileşiği Wittig reaksiyonu ile BOD-Pyr bileşiği elde edilmiştir.



Şekil 3.1. BOD-Pyr bileşiğinin sentezi

Bodipy-2 (100 mg, 0.285 mmol) bileşiğinin 10 mL dioksan içindeki çözeltisine 389 mg (0.896 mmol) trifenil(2-piridilmetil)fosfonyum klorür hidroklorür

eklenmiştir. Daha sonra, 250 µl trietilamin bileşiği damla damla eklenerek elde edilen karışım oda sıcaklığında gece boyu karıştırılmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra çözücüsü vakum altında uzaklaştırılmış ve kalan kısım diklormetan ile 3 kez ekstrakte edilmiştir. Organik faz sodyum sülfat üzerinden kurutulmuş ve çözücüsü düşük basınç altında uzaklaştırılmıştır. Silika jel kolon kromatografisi ile BOD-Pyr saflaştırılmış ve yeşil renkli katı halinde elde edilmiştir. Verim: 68.1mg, %56 olarak hesaplanmıştır. Erime noktası 267-269 °C olarak bulunmuştur. ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ: 8.56 (ikili, *J* = 4.0 Hz, 1H), 7.62 (ikilinin üçlüsü, *J* = 8.0, 1.6 Hz, 1H), 7.52-7.50 (çoklu, 3H), 7.46 (tekli, 1H), 7.32-7.29 (çoklu, 2H), 7.28 (tekli, 1H), 7.12-7.09 (çoklu, 1H), 6.72 (ikili, *J* = 16.0 Hz, 1H), 6.01 (tekli, 1H), 2.76 (tekli, 3H), 2.58 (tekli, 3H), 1.51 (tekli, 3H), 1.38 (tekli, 3H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃) δ: 156.3, 155.9, 154.9, 149.6, 143.8, 141.8, 139.3, 136.5, 135.0, 132.0, 131.0, 129.5, 129.2, 129.1, 128.1, 127.8, 123.9, 121.8, 121.8, 14.7, 14.5, 14.1, 12.9.

¹H-NMR ve ¹³C-NMR spektroskopisi ile elde edilen bu NMR verileri literatürde yer alan verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir [35].

3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada kullandığımız silisyum kristaline, kirliliklerin temizlenmesi ve var olan oksit tabakasının yok edilmesi amacıyla kimyasal temizleme işlemi uygulanmıştır. Uygulanan bu işlem;

- a) Ultrasonik temizleme cihazı içerisinde trikloretilen ile beş dakika yıkanmıştır.
- b) Deiyonize su ile beş dakika temizlenmiştir.
- c) Ultrasonik temizleme cihazı içerisinde alkol ile beş dakika yıkanmıştır.
- d) Deiyonize su ile beş dakika temizlenmiştir.
- e) Ultrasonik temizleme cihazı içerisinde aseton ile beş dakika yıkanmıştır.
- f) Deiyonize su ile beş dakika temizlenmiştir.
- g) 1:10 HF çözeltisi ile beş dakika temizlenmiştir.
- h) Deiyonize su ile beş dakika temizlenmiştir ve kuru azot ile kurutulmuştur.

3.3. Metal/Organik Tabaka/Yarıiletken/Metal Diyot Yapısının Oluşturulması

Silisyum kristalinin kimyasal temizleme işlemi yapıldıktan sonra kristalin mat yüzeyine İndiyum metali Nanovak marka termal buharlaştırma cihazı kullanılarak 100 nm kalınlığında buharlaştırılmış ve OTF-1200X markalı fırında sıcaklığın 350 °C olduğu vakum ortamında 30 saniye süreyle tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemin ardından aynı yüzey üzerine 100 nm daha İndiyum metali buharlaştırılarak diyotun omik kontağı oluşturulmuştur.

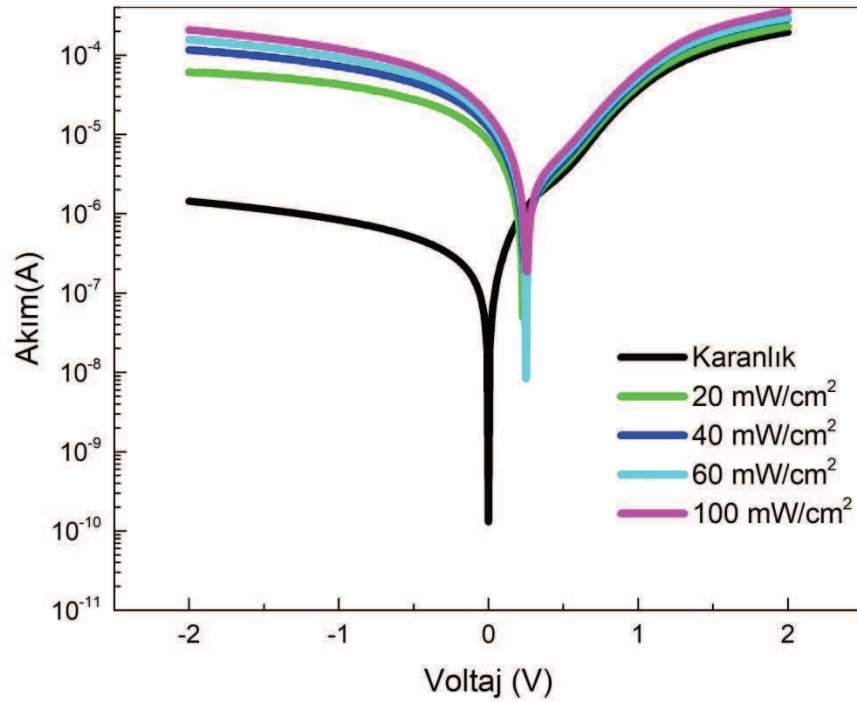
BOD-Pyr organik malzemesinin 10 mg'ı 1 ml kloroform çözücüsünde çözülerek silisyum kristalinin parlak yüzeyine ilk 30 saniyede 500 rpm hızda sonraki 30 saniyede 1200 rpm hızda spin kaplama yöntemi ile 3×10^{-6} cm büyütülmüş ve kurumaya bırakılmıştır. BOD-Pyr ince filminin kalınlığı yüksek frekansta kapasite-voltaj ölçümüyle hesaplanmıştır.

BOD-Pyr kaplanmış yüzey üzerine 1 mm yarıçaplı metal maske yerleştirilmiştir. Termal buharlaştırma cihazı ile 1 mm yarıçaplı Altın metali 150 nm kaplanarak doğrultucu kontak oluşturulmuştur. Doğrultucu kontakın oluşturulmasıyla Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyot yapısı oluşturulmuştur.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım Voltaj Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlamış olduğumuz Schottky diyotun elektriksel karakterizasyonunu incelemek için farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için oda sıcaklığında Keithley 2401 (Sourceter) Cihazı kullanılmıştır. Silisyum altlık üzerine yapılan Schottky diyotlara -2 V ile +2 V arasında voltaj uygulanarak akım ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda diyotun ana parametreleri olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyma akımı değerleri Denklem 2.27, Denklem 2.28 ve Denklem 2.29 kullanılarak hesaplanmıştır.



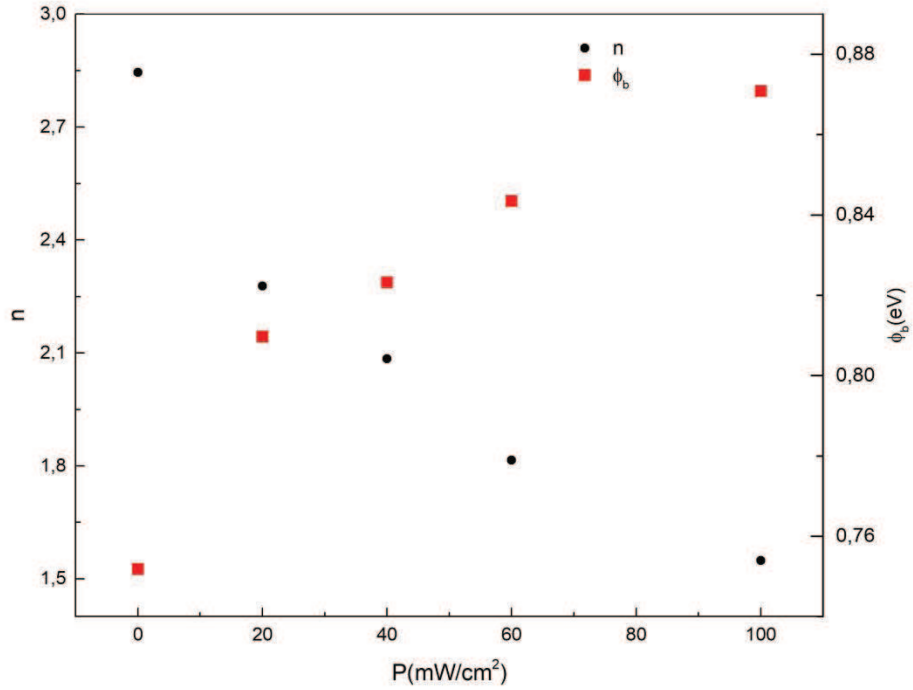
Şekil 4.1. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj karakteristiği

Şekil 4.1’de verilen grafikten yararlanılarak idealite faktörü, doyma akımı ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun n , I_0 , ϕ_b değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	n	I_0 (A)	ϕ_b (eV)
0	2.84	7.61×10^{-8}	0.751
20	2.27	8.14×10^{-9}	0.809
40	2.08	4.82×10^{-9}	0.823
60	1.81	2.20×10^{-9}	0.843
100	1.55	7.66×10^{-10}	0.871

Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altında idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin değişimi Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin ışık şiddeti ile değişimleri

Şekil 4.2’de aydınlatma şiddetinin artması ile idealite faktörü azalırken, engel yüksekliğinin ise arttığı görülmektedir. İdeal diyotların idealite faktörü değeri 1 olmaktadır. İdealite faktörü değerinin 1’den büyük bulunması diyotun ideallikten saptığını göstermektedir. Bu sapmaya seri direnç etkisi ve arayüzey durumları sebep olmaktadır. Literatürde daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçlar çıktığı görülmektedir. Tataroğlu ve arkadaşlarının oluşturduğu Au/Ru(II) complex/n-Si diyotu karanlık ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında yapmış olduğumuz diyot ile benzer özellik göstermektedir [36]. İdealite faktörü ve engel yüksekliği karanlıkta ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında sırasıyla 3.51 ve 0.88 eV, 3.22 ve 0.91 eV bulunmuştur. Ersöz ve arkadaşlarının oluşturduğu Au/PPY/n-Si diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri karanlıkta ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında sırasıyla 5.41 ve 0.75 eV, 4.89 ve 0.77 eV olarak bulunmuştur [37].

Metal yarıiletken kontaklarda doğrultma davranışı yük taşıyıcılarının bir yöne diğer yönden daha kolay iletildiği durumları ifade etmek için kullanılır. Doğru ve ters beslem akımlarının oranına doğrultma oranı denilmektedir. İdeal diyotlar için bu oran 10⁸-10¹⁰ civarındadır.

Doğrultma oranı (RR),

$$RR = \frac{I_F}{I_R} \quad (4.1)$$

olarak ifade edilir ve burada I_F doğru beslem akımı, I_R ters beslem akımıdır. Bu ifadeye göre Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun doğrultma oranı ± 2 V’da $1,35 \times 10^2$ bulunmuştur.

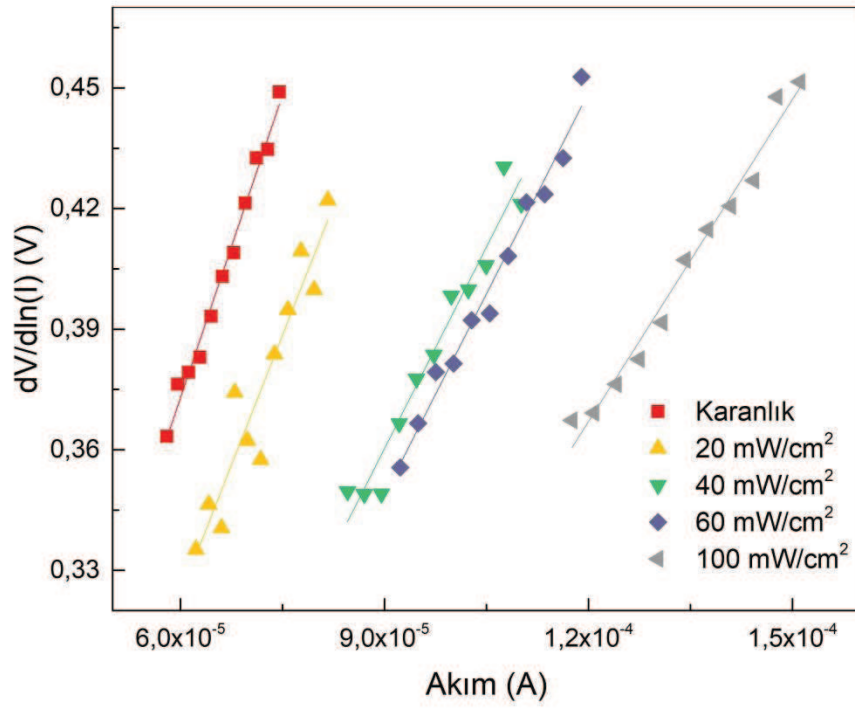
4.2. Cheung Metoduyla Seri Direnç Hesaplanması

Üretilen Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotun, farklı aydınlatma şiddetleri uygulanarak ve Cheung fonksiyonları kullanılarak seri direnç değerleri hesaplanmıştır. İlgili fonksiyonlar Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 de belirtilmiştir.

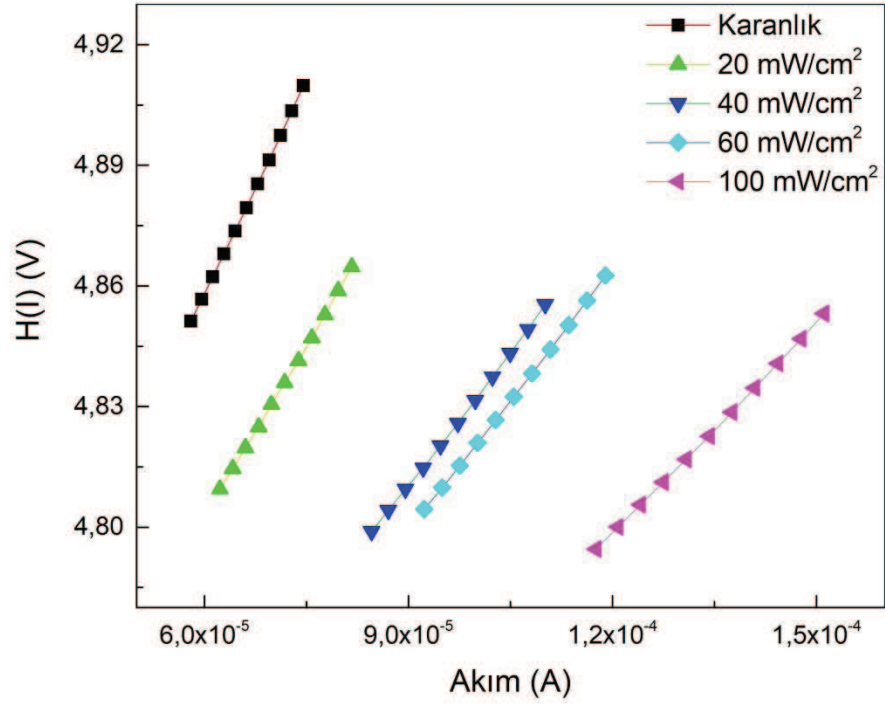
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_S \quad (4.2)$$

$$H(I) = n\phi_b + IR_S \quad (4.3)$$

Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında Denklem 4.2 ve Denklem 4.3'e göre oluşturulan $dV / d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Hesaplanan sonuçlar Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $dV / d(\ln I) - I$ grafiği



Şekil 4.4. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $H(I) - I$ grafiği

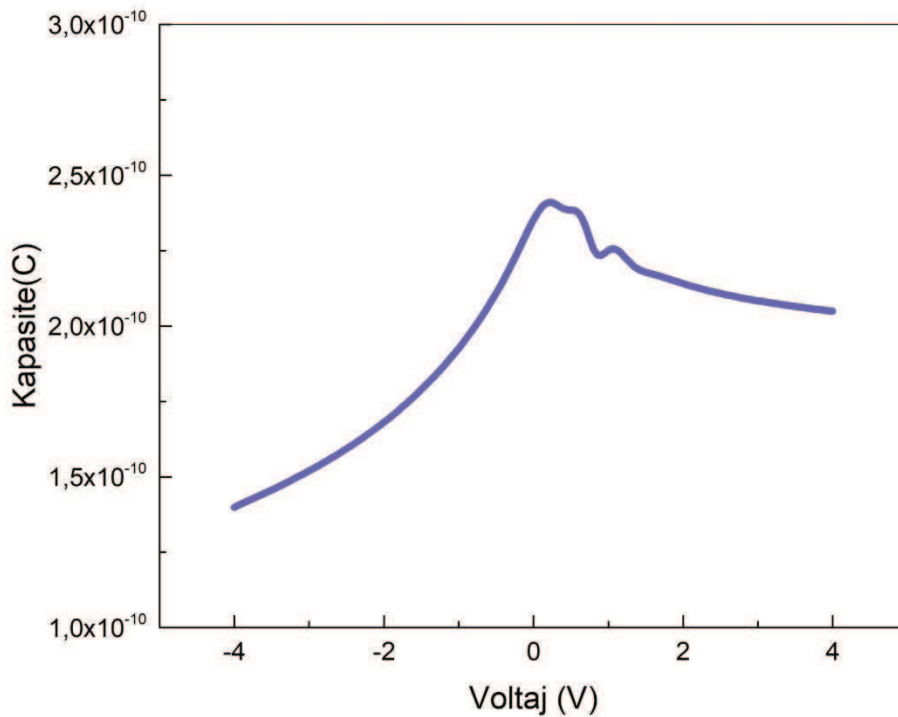
Tablo 4.2. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan R_S değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	$dV/d(\ln I) - I$	$H(I) - I$
	R_S (k Ω)	R_S (k Ω)
0	5.019	3.533
20	4.298	2.845
40	3.344	2.205
60	3.335	2.180
100	2.671	1.743

Yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan seri direnç değerleri incelendiğinde artan aydınlatma şiddetine karşı seri direnç değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. Daha önce yapılan benzer çalışmalara bakıldığında seri direnç değerlerinin artan aydınlatma şiddeti karşısında benzer değişimler gösterdiği görülmektedir. Tataroğlu ve arkadaşlarının oluşturmuş olduğu Au/Ru(II) complex/n-Si diyotu için R_s değerleri karanlıkta $dV / d(\ln I) - I$ için $2.62 \text{ k}\Omega$, $H(I) - I$ için $2.63 \text{ k}\Omega$ ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında $dV / d(\ln I) - I$ için $2.57 \text{ k}\Omega$, $H(I) - I$ için $2.59 \text{ k}\Omega$ bulunmuştur [36]. Ersöz ve arkadaşlarının oluşturduğu Au/PPY/n-Si diyotunun R_s değerleri karanlıkta $1 \text{ k}\Omega$ ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında $0.9 \text{ k}\Omega$ bulunmuştur [37].

4.3. Organik Arayüzey Tabakası Kalınlığının Hesaplanması

1 MHz frekansta Kapasite-Voltaj (C-V) ölçümü şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun 1 MHz’de Kapasite-Voltaj grafiği

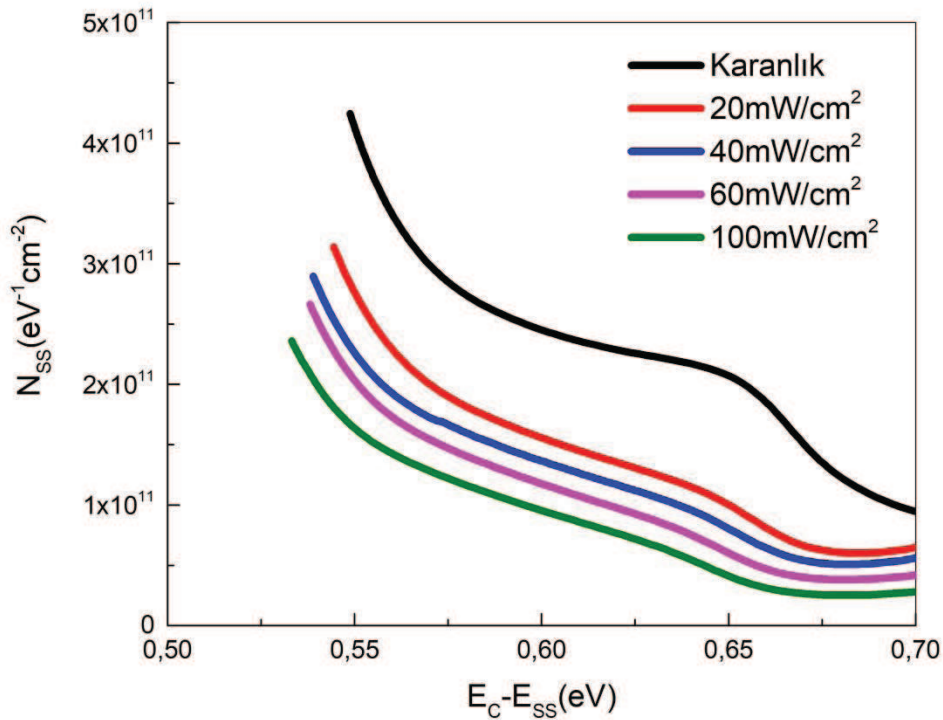
Yarıiletken ile doğrultucu kontak arasında büyütülen organik arayüzey tabakasının kalınlığı denklem 4.4’de verilen eşitlik kullanılarak bulunmuştur.

$$C_{org} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 A}{\delta} \quad (4.4)$$

Denklemde, ε_i arayüzey tabakasının geçirgenlik sabitini, ε_0 boşluğun geçirgenlik sabitini, δ organik arayüzey tabakasının kalınlığını ve A ise etkin yüzey alanını ifade etmektedir. Arayüzey tabakasının kalınlığı $C_{org} = 2.41 \times 10^{-10}$ alınarak 3.46×10^{-5} (346 nm) olarak hesaplanmıştır.

4.4. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması

Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotuna ait karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki arayüzey durum yoğunluğu ve enerji farkı Denklem 2.21 ve Denklem 2.22 kullanılarak hesaplanmış ve $N_{SS} - (E_C - E_{SS})$ grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.

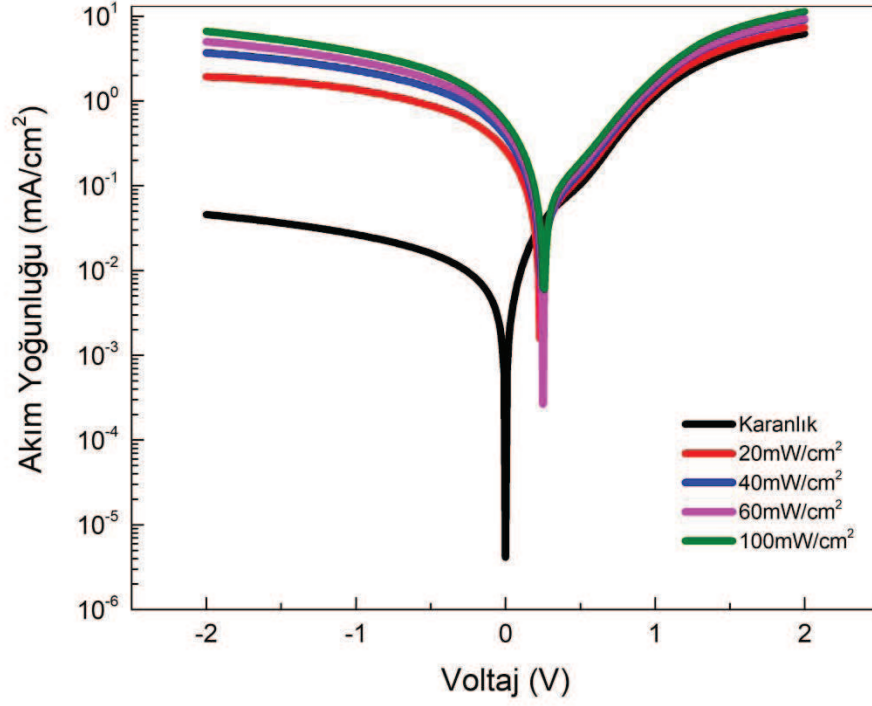


Şekil 4.6. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $N_{SS} - (E_C - E_{SS})$ grafiği

Şekil 4.6 grafiğine göre yapılan hesaplamalar sonucu Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun N_{SS} değerleri karanlıkta $4.25 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ile $9.38 \times 10^{10} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında, 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında ise $2.36 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ile $2.81 \times 10^{10} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında değişmektedir. Şekil 4.6’da N_{SS} değerlerinin yarıiletkenin valans bandından yasak enerji bandının ortalarına doğru eksponansiyel olarak azaldığı görülmektedir. Bu hesaplamalar dikkate alındığında aydınlatma şiddetinin artması arayüzey durumlarında azalmaya sebep olduğu gözlenmektedir. Ersöz ve arkadaşlarının oluşturduğu Au/PPY/n-Si diyotunun N_{SS} değerleri karanlık için $1.7 \times 10^{13} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ile $6.0 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında, 100 mW/cm^2 için ise $1.5 \times 10^{13} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ile $4.2 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ arasında değişmekte ve yaptığımız çalışma ile benzerlik göstermektedir [37].

4.5. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri

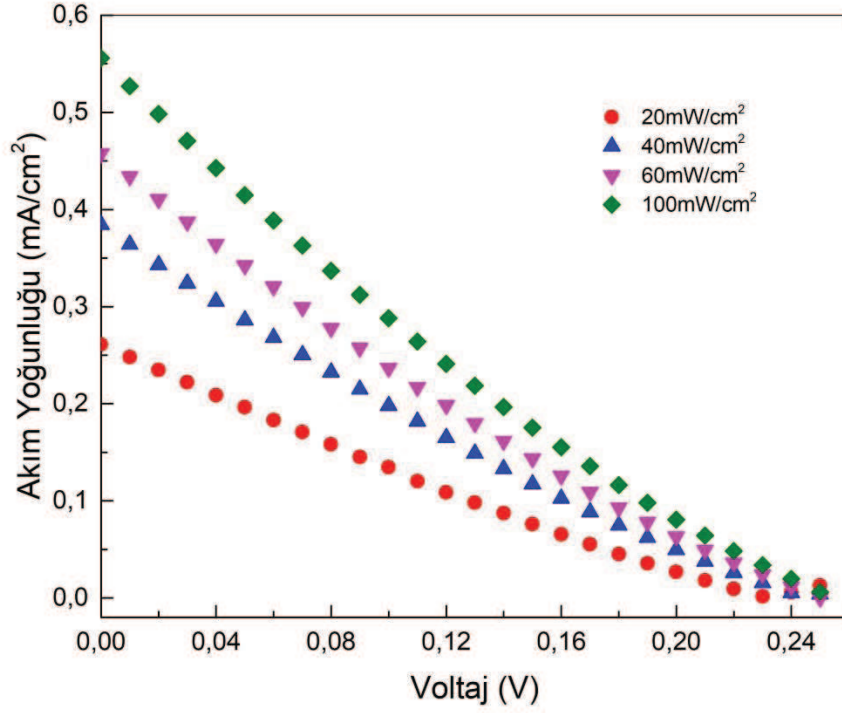
Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun parametreleri incelenmiş ve ölçülen akım değerleri doğultucu kontağın alanıyla oranlanarak akım yoğunluğu (J) değerlerine dönüştürülmüştür. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotuna ait akım yoğunluğu-voltaj(J-V) grafiği Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği

Diyotun karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki doğrultma davranışı ve ışığa karşı duyarlılığı Şekil 4.7’de görülmektedir. Artan ışık şiddeti ile ters beslemdeki akımın artması da literatüre uygun bir fotodiyot davranışını göstermektedir.

Farklı aydınlatma şiddetleri altında Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotuna ait kısa devre akım yoğunluğu (J_{SC}) ve açık devre voltajı (V_{OC}) Şekil 4.8’de verilen akım yoğunluğu-voltaj grafiği yardımıyla hesaplanmış ve hesaplanan değerler Tablo 4.3’de gösterilmiştir.



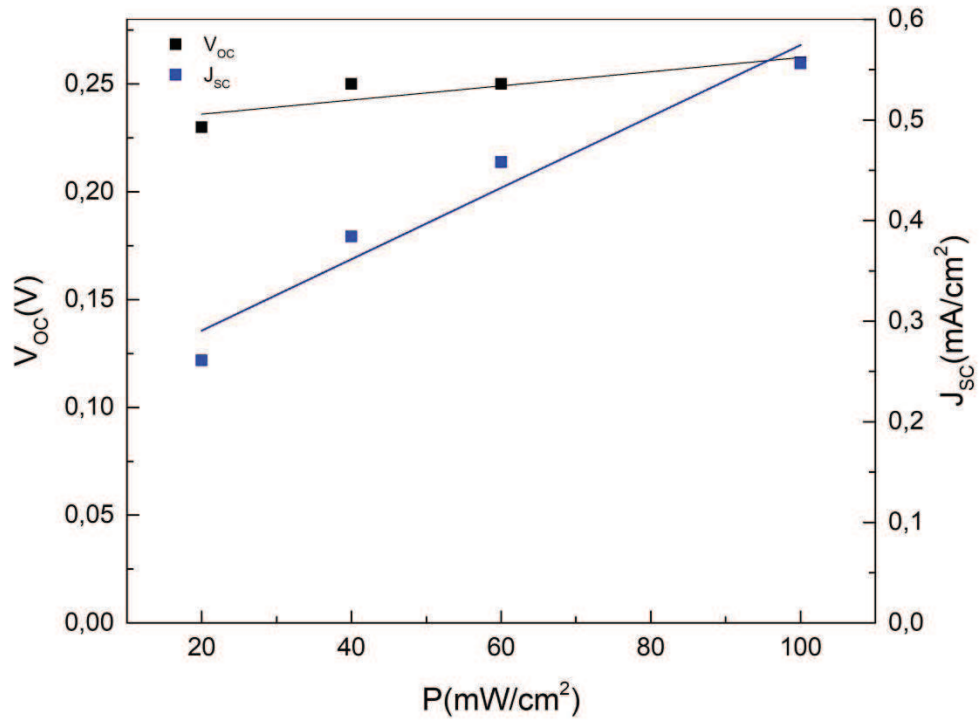
Şekil 4.8. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği

Tablo 4.3. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altında V_{OC} ve J_{SC} değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm^2)	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm^2)
20	0.23	0.261
40	0.25	0.384
60	0.25	0.458
100	0.26	0.556

Tablo 4.3’de verilen değerler grafiğe dökülerek Şekil 4.9’da gösterilmiş ve artan aydınlatma şiddetinin V_{OC} ve J_{SC} değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum artan aydınlatma şiddetinin diyotta daha fazla taşıyıcıyı uyarması sonucu, diyodun fotoakım değerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Benzer çalışmalar incelendiğinde artan aydınlatma şiddetinin açık devre gerilim ve kısa devre akımı değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. İkrar Orak’ın ZnO kullanarak

yapmış olduğu Al/ZnO/p-Si diyodunun V_{OC} ve J_{SC} değerlerini 50 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında sırasıyla 0.092 V ve 30.76 mA/cm^2 olarak bulunmuştur [38]. Mustafa Yıldız ise oc-ZnPc bileşiği kullanarak oluşturduğu Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun $40, 60$ ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında V_{OC} ve I_{SC} değerlerini sırasıyla 0.345 V ve 0.0103 mA , 0.385 V ve 0.0265 mA , 0.406 V ve 0.0727 mA olarak bulunmuştur [39].

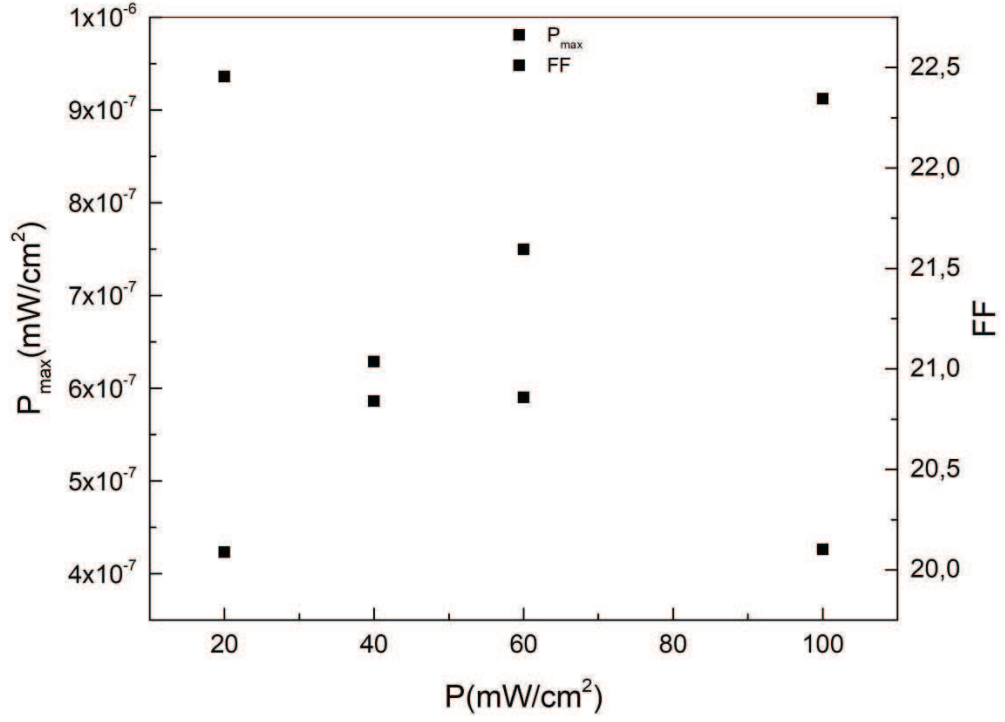


Şekil 4.9. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki V_{OC} - J_{SC} -P grafiği

Maksimum akım ve maksimum voltaj Şekil 4.8'den belirlenmiş ve maksimum çıkış gücü ($P_{max} = I_{max} * V_{max}$) hesaplanmıştır. Ayrıca Denklem 4.12'de verilen eşitlik ile doldurma faktörü bulunmuştur.

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (4.12)$$

Farklı aydınlatma şiddetleri altında hesaplanan $P_{\max}$ ve FF değerleri Şekil 4.10'da gösterilmiş ve $I_{\max}$, $V_{\max}$, $P_{\max}$ ve FF değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $P_{\max}$ -FF-P grafiği

Tablo 4.4. Au/BOD-Pyr/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $V_{\max}$, $I_{\max}$, $P_{\max}$ ve FF değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	$V_{\max}$ (V)	$I_{\max}$ (mA)	$P_{\max}$ (W)	FF
20	0.10	4.23×10^{-6}	4.23×10^{-7}	22.45
40	0.11	5.72×10^{-6}	6.29×10^{-7}	20.84
60	0.11	6.81×10^{-6}	7.50×10^{-7}	20.86
100	0.11	8.29×10^{-6}	9.12×10^{-7}	20.10

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, BOD-Pyr bileşiği literatüre uygun yöntemlerle sentezlenmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. BOD-Pyr organik bileşiği kullanılarak Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotu üretilmiştir. Öncelikle üretilen bu diyotun elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi için oda sıcaklığında, karanlıkta ve 20-40-60-100 mW/cm² aydınlatma şiddetleri altında, -2V ile +2V aralığında I-V ölçümleri yapılmıştır. Üretilen diyotun, diyot parametreleri bu ölçüm sonuçlarına göre hesaplanmıştır.

Diyotun şekil 4.1'deki lnI-V grafiğinin, yüksek voltaj bölgesinde doğrusallıktan sapmalar olduğu ve doğrultma özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Diyotun lnI-V karakteristiklerinden termiyonik emisyon teorisi kullanılarak idealite faktörü, engel yüksekliği, doyma akımı parametreleri hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun karanlıkta ve 100mW/cm² aydınlatma şiddeti altında sırasıyla idealite faktörü 2.84 ve 1.55, engel yüksekliği 0.751eV ve 0.871eV, doyma akımı değerleri 7.61x10⁻⁸ mA ve 7.66x10⁻¹⁰ mA bulunmuştur. Hesaplanan idealite faktörlerinin 1'den büyük olması diyotun ideallikten saptığını göstermektedir. Bu durum arayüzey durumlarına, tükenim bölgesinde elektron-boşluk rekombinasyonuna, arayüzey tabakası varlığına ve seri direnç etkisine atfedilmiştir. Aydınlatma şiddetinin artırılmasıyla, diyotun doğru beslemdeki akım değeri değişmemekte fakat ters beslemdeki akım değeri artmaktadır. Bu durum üretilen diyotun fotovoltaik etkiye sahip olduğunu ve fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun, ideallikten sapma sebeplerinden biri olan seri direnç etkisi Cheung&Cheung metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda karanlıkta ve 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti altında seri direnç değerleri sırasıyla 5019 Ω ve 2671 Ω bulunmuştur. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte seri direnç değerleri azalmaktadır. Bu durum yarıiletkenin valans bandındaki yüklerin uyarılması sonucu iletkenliğin artmasıyla ilişkilidir.

Üretilen Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun enerji farkına göre arayüzey durum yoğunluğu karakteristiği karanlıkta ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda N_{SS} değerleri karanlık için $4.25 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $9.38 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında, 100 mW/cm^2 için ise $2.36 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $2.81 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişmektedir. Sonuçlara bakıldığında aydınlatma şiddetinin artmasının arayüzey durum yoğunluğunda azalmaya sebep olduğu görülmektedir.

Üretmiş olduğumuz Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun $\ln I-V$ grafiğindeki karanlık ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında ki akım değerleri sırasıyla 1.43×10^{-6} ve 2.07×10^{-4} bulunmuştur. Buda bize aydınlatma şiddetindeki artışın akım değerini arttırdığını göstermekte ve üretmiş olduğumuz diyotun fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun farklı aydınlatma şiddetlerinde fotodiyot parametreleri incelenmiştir. Diyotun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği çizilerek açık devre voltajı, kısa devre akımı, kısa devre akım yoğunluğu, maksimum voltaj, maksimum akım, maksimum güç ve doldurma faktörü değerleri hesaplanmıştır. Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti altında yapılan hesaplamaları sonucunda açık devre voltajı 0.26 V , kısa devre akımı 0.017 mA , kısa devre akım yoğunluğu 0.55 mA , maksimum voltaj 0.11 V , maksimum akım 0.0083 mA , maksimum güç 0.00091 mW ve doldurma faktörü $\%20.10$ olarak bulunmuştur. Aydınlatma şiddetinin artması ile açık devre voltajı, kısa devre akımı, kısa devre akım yoğunluğu, maksimum voltaj, maksimum akım ve maksimum güç değerleri artarken doldurma faktörünün ise azaldığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak üretmiş olduğumuz Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun karakteristikleri karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetleri altında incelenmiş ve diyot parametreleri hesaplanmıştır. Tüm bu gözlem ve hesaplamalar ışığında Au/BOD-Pyr/n-Si/In diyotunun fotodiyot olarak kullanılabileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Crowell, C.R., Sze, S.M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36: 3212-3220.
- [2] Sharma, B.L., Puroth, R.K., 1974. *Semiconductor Heterojunctions*, 1st edition. Pergamon Press.
- [3] Bolotnikov, A.E., Boggs, S.E., Hubert Chen, C.M., Cook Walter, R., Harrison, F.A. and Schindler, S.M., 2002. Properties of Pt Schottky type contacts on high-resistivity CdZnTe detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 482: 395-407
- [4] Okutan, M., Bařaran, E., Yakuphanoglu, F., 2005. Electronic and interface state density distribution properties of Ag/p-Si Schottky diode. *Applied Surface Science*, 252: 1966-1973
- [5] Brutting, W., 2005. *Physics of Organic Semiconductors*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [6] Stallinga, P., Gomes, H.L., Murgia, M., Mullen, K., 2002. Interface state mapping in a Schottky barrier of the organic semiconductor terrylene. *Organic Electronics*, 3: 43-51.
- [7] Lee, C.P., Li, C.T., Ho, K.C., 2017. Use of organic materials in dye-sensitized solar cells. *Materials Today*, 20: 267-283.
- [8] Benstead, M., Mehl, G.H., Boyle, R.W., 2011. 4-4'-Difluoro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indacens (BODIPYs) as components of novel light active materials. *67: 3573-3601*
- [9] Yıldırım, M., Tuğluoğlu, N., Yüksel, Ö.F., Erdoğan, A., Kuş, M., 2016. Electrical Characterization of Au/Fluorene-Carbazole (FC)/p-Si Schottky Barrier Diodes. *Materials Today: Proceedings*, 3: 1255-1261
- [10] Donati, S., 2000. *Photodetectors: Devices, Circuits And Applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey.
- [11] Singh, J., 2003. *Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*. Cambridge University Press, New York.

- [12] Boylestad, R., Nashelsky, L., 1994. Elektronik Elemanlar Ve Devre Teorisi. MEB, Ankara.
- [13] Dalla Betta, G.F., 2011. Advances in Photodiodes. Intech Open, New Delhi.
- [14] Crowel, C.R., Sze, S.M., 1966. Current Transport In Metal Semiconductor Barriers, Solid-State Electronics. 9: 1035-1048.
- [15] Bass, J., 2005. Encyclopedia of Condensed Matter Physics. İçinde: Conductivity-Electrical. Michigan State University, USA.
- [16] Poplavko, Y.M., 2019. Electronic Materials. İçinde: Semiconductors. Elsevier, USA.
- [17] Shan, B., Miao, Q., 2017. Molecular design of n-type organic semiconductors for high-performance thin film transistors. Tetrahedron Letters, 58: 1903-1911
- [18] Okutan, M., Yakuphanoglu, F., 2008. Analysis of interface states and series resistance of Ag/SiO₂/n-Si MIS Schottky diode using current-voltage and impedance spectroscopy methods. Microelectric Engineering, 85: 646-653
- [19] Alıtkan, F., 2009. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin I-V ve C-V Ölçüm Metotları İle İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [20] Tüzün, Ö., 2005. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Yapıdaki Gözenekli Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri. Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi .
- [21] Batra, I.P., Tekman, E., Ciraci, S., 1991. Theory of Schottky barrier and metallization, Progres in Surface Science. 36: 289-361
- [22] Card, H.C., Rhoderick, E., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. Journal Of Physics D: Applied Physics, 4: 1589-1601
- [23] Sze, S.M., 1981. Physics Of Semiconductor Devices. 2nd edition. Wiley, New York.
- [24] Butcher, J., 1983. MOS devices – Design and manufacture. Microelectronics Journal, 14: 73
- [25] Karadeniz, S., Barış, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., 2013. Analysis of electrical properties of Al/p-Si Schottky contacts with and without rubrene layer. Synthetic Metals, 168: 16-22

- [26] Pakma, O., Çavdar, Ş., Koralay, H., Tuğluoğlu, N., Yüksel, Ö.F., 2017. Improvement of diode parameters in Al/n-Si Schottky diodes with Coronene interlayer using variation of the illumination intensity. *Physica B*, 527: 1-6
- [27] Van der Ziel, A., 1976. *Solid State Physical Electronics*. Prentice Hall, New Jersey.
- [28] Nicollian, E.H., Brews, J.R., 2002. *MOS Physics and Technology*. Wiley-Interscience, New York.
- [29] Sharma, B.L., 1984. *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions And Their Applications*. Plenum Press, New York.
- [30] Chattopadhyay, P., 1996. Capacitance technique for the determination of interface state density of metal-semiconductor contact. *Solid-State Electronics*, 39: 1491-1493
- [31] Rhoederick, E.H., Williams, R.H., 1988. *Metal Semiconductor Contacts*. 2nd edition. Clarendon Pres, Oxford.
- [32] Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49: 85-88
- [33] Hovel, H.J., 1975. *Semiconductors and Semimetals*. Volume 11. Academic Press, New York .
- [34] Şafak, H., Şahin, M., Yüksel, Ö.F., 2002. Analysis of I-V measurements on Ag/p-SnS and Ag/p-SnSe Schottky barriers. *Solid-State Electron*, 46: 49-52
- [35] Üçüncü, M., Karakuş, E., Emrullahoğlu, M., 2015. A BODIPY/pyridine conjugate for reversible fluorescence detection of gold(III) ions. *New Journal of Chemistry*, 39: 8337
- [36] Tataroğlu, A., Ocaya, R., Dere, A., Dayan, O., Şerbetçi, Z., Al-Sehemi, A.G., Soylu, M., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F., 2018. Ruthenium(II) Complex Based Photodiode for Organic Electronic Applications. *Journal of Electronic Materials*, 47: 828-833
- [37] Ersöz, G., Yücedağ, İ., Bayrakdar, S., Altındal, Ş., Gümüş, A., 2017. Investigation of photo-induced effect on electrical properties of Au/PPy/n-Si (MPS) type Schottky barrier diodes. *Journal Of Material Science: Mater Electron*, 28: 6413-6420
- [38] Orak, İ., 2016. The performance photodiode and diode of ZnO thin film by atomic layer deposition technique. *Solid State Communications*, 247: 17-22

- [39] Yıldız, M., 2012. Çinko ftalosiyanın tabanlı heteroeklemin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.



ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Giresun’da doğdu. İlkokulu Yeşilgiresun İlköğretim okulunda, orta ve lise öğrenimini Hamdi Bozbağ Anadolu Lise’sinde tamamladı. 2005 yılında girdiği Dumlupınar Üniversitesi Kimya Bölümü’nden 2011 yılında mezun oldu. 2015 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans programına başladı. 2014 yılında Giresun Belediyesi’nde Kimyager olarak göreve başlamış olup halen görevine devam etmektedir.