



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

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si SCHOTTKY BARIYER DİYOTLARIN  
ODA SICAKLIĞINDA ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ENGİN YAĞLIOĞLU**

**EYLÜL 2014**

**DÜZCE**

## **KABUL VE ONAY BELGESİ**

Engin YAĞLIOĞLU tarafından hazırlanan “Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si Schottky Bariyer Diyotların Oda Sıcaklığında Elektriksel Karakterizasyonu” isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 15/09/2014 tarih ve 2014/821 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye  
(Tez Danışmanı)  
Yrd. Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN  
Düzce Üniversitesi

Üye  
Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL  
Gazi Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Oğuz KÖYSAL  
Düzce Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Muharrem GÖKÇEN  
Düzce Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN  
Düzce Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 22/09/2014

### **ONAY**

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Engin YAĞLIOĞLU’nun Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **BEYAN**

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

22 Eylül 2014

Engin YAĞLIOĞLU

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında beni destekleyen anabilim dalı başkanımız Doç. Dr. Oğuz KÖYSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Hem ders hem de tez çalışmalarım esnasında değerli bilgilerini her zaman benimle paylaşan anabilim dalı hocalarım Doç. Dr. Muharrem GÖKÇEN ve Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda her türlü desteğini benden esirgemeyen, tezimin bu aşamaya gelmesinde her zaman bana yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Mert YILDIRIM'a çok teşekkür ederim.

Tezimin deneylerinin tasarlanması ve yapılması aşamasında verdiği desteklerden dolayı Zuhâl KÖSEMEN, Arif KÖSEMEN ve Ahmet DEMİR'e çok teşekkür ederim.

Her zaman beni destekleyen ve yüksek lisans yapmam konusunda beni teşvik eden ağabeyim Yrd. Doç. Dr. Deniz YAĞLIOĞLU'na ve çok değerli eşi Sinem YAĞLIOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca yardımlarını ve desteklerini benden esirgemeyen babam Mehmet Ömer YAĞLIOĞLU ve annem Selma YAĞLIOĞLU'na; ayrıca çok değerli arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

22 Eylül 2014

Engin YAĞLIOĞLU

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR SAYFASI .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİL LİSTESİ .....	iv
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	1
ABSTRACT .....	2
EXTENDED ABSTRACT .....	3
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. METAL-YARIİLETKEN (MY) KONTAK TEORİSİ .....</b>	<b>11</b>
1.1.1. İdeal Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi .....	11
1.1.2. Schottky Engel Alçalması.....	15
1.1.3. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları .....	17
1.1.3.1. Termiyonik Emisyon Teorisi (TE).....	18
1.1.3.2. Difüzyon Teorisi.....	20
1.1.3.3. Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED).....	21
1.1.3.4. Engel İçinde Tünelleme.....	23
<b>1.2. ORGANİK YARIİLETKENLER .....</b>	<b>24</b>
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>26</b>
2.1. GİRİŞ .....	26
2.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI .....	28
2.3. KULLANILAN ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ .....	30
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>32</b>
3.1. AKIM-VOLTAJ ( <i>I-V</i> ) KARAKTERİSTİKLERİ .....	32

<b>3.2. KAPASİTANS-VOLTAJ (<math>C-V</math>) ve İLETKENLİK-VOLTAJ (<math>G/\omega-V</math>)</b>	
<b>KARAKTERİSTİKLERİ .....</b>	<b>47</b>
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>57</b>
<b>5. KAYNAKLAR .....</b>	<b>59</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>65</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Metal/n-tipi yarıiletken kontakta, $\Phi_m > \Phi_s$ için elektron enerji band diyagramı: (a) birbirinden ayrılmış nötral materyaller, (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.	12
Şekil 1.2.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji band diyagramı: (a) ısıl denge, (b) doğru beslem, (c) ters beslem durumu.	15
Şekil 1.3.	Metal yarıiletken doğrultucu kontakta Schottky etkisinden kaynaklanan potansiyel engel alçalması.	16
Şekil 1.4.	Metal-yarıiletken kontaklarda doğru beslem altında akım-iletim mekanizmaları.	18
Şekil 1.5.	Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda (a)doğru beslem altında, (b) ters beslem altında tünelleme akımı enerji band diyagramı.	24
Şekil 2.1.	(a) P3HT, (b) PCBM ve (c) F4-TCNQ kimyasal yapıları.	27
Şekil 2.2.	(a) Omik (b) doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır (Cu) maskeler.	30
Şekil 2.3.	MPY SBD yapısının şematik gösterimi (a) Ag omik kontak ( $\sim 2500\text{\AA}$ ) (b) n-Si yarıiletken ( $350\pm 25\mu\text{m}$ ) (c) P3HT:PCBM:F4-TCNQ organik ara tabaka ( $\sim 100\text{nm}$ ) (d) Au doğrultucu kontak ( $\sim 2500\text{\AA}$ ).	30
Şekil 2.4.	<i>I-V</i> ölçümleri için kullanılan Keithley 4200 SCS akım-voltaj kaynağı.	31

Şekil 2.5.	<i>C-V</i> ve <i>G/ω-V</i> ölçümleri için kullanılan HP4192A LF empedans analizörü.	31
Şekil 3.1.	Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0,%1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı doğru ve ters beslem <i>I-V</i> karakteristikleri.	33
Şekil 3.2.	Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0,%1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı diyot direncinin voltaja bağlı değişimi.	36
Şekil 3.3.	Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı doğru beslem çift logaritmik <i>I-V</i> karakteristikleri.	37
Şekil 3.4.	Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının (a) %0, (b) %1 ve (c) %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı iki eksenli $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	41
Şekil 3.5.	Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı $F(V)-V$ eğrileri.	42
Şekil 3.6.	Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının (a) %0, (b) %1 ve (c) %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) arayüzey durum enerjilerine ( $E_c-E_{ss}$ ) karşı grafikleri.	45



- Şekil 3.7. Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $C-V$  karakteristikleri. 48
- Şekil 3.8. Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $G/\omega-V$  karakteristikleri. 48
- Şekil 3.9. Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $R_s-V$  karakteristikleri. 50
- Şekil 3.10. Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $C^{-2}-V$  karakteristikleri. 51
- Şekil 3.11. Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının iki eksenli  $\Phi_b$  ve  $N_D$ 'nin frekansa bağlı değişim grafiği. 54
- Şekil 3.12. Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının iki eksenli  $R_s$  ve  $N_{ss}$ 'in frekansa bağlı değişim grafiği. 56

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Çizelge 1.1. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre kontak yapısı.	11
Çizelge 3.1. Farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip (%0, %1 ve %2) Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının <i>I-V</i> karakteristiklerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri.	35
Çizelge 3.2. %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının <i>C-V</i> ve <i>G/ω-V</i> karakteristiklerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri.	56

## SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Doğrultucu kontak alanı
AC	Doğru akım
AE	Alan emisyonu
Ag	Gümüş
Au	Altın
Å	Angstrom
A*	Etkin Richardson sabiti
C	Kapasitans
Cu	Bakır
CH <sub>3</sub> OH	Metil alkol
C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	Trikloretilen
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	Aseton
C-V	Kapasitans-voltaj
d	Arayüzey tabakanın kalınlığı
DC	Alternatif akım
D <sub>n</sub>	Elektron difüzyon sabiti
E <sub>C</sub>	İletkenlik band kıyısı enerjisi
E <sub>F</sub>	Fermi enerjisi
E <sub>g</sub>	Yasak band aralığı
E <sub>m</sub>	Maksimum elektrik alan
E(x)	Schottky bölgesindeki elektrik alan
F(V)	Norde fonksiyonu
G	İletkenlik
G/ω-V	İletkenlik-voltaj
HF	Hidroflorik asit
HNO <sub>3</sub>	Nitrik asit
Hz	Frekans birimi (Hertz)
h	Planck sabiti
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Hidrojen peroksit

$H_2SO_4$	Sülfürik asit
I	Akım
$I_0$	Doyum akımı
I-V	Akım-voltaj
$J_{sm}$	Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu
$J_{ms}$	Metalden yarıiletkene doğru akım yoğunluğu
$J_n$	Toplam akım yoğunluğu
$J_{SD}$	Doyum akım yoğunluğu
$J_0$	Ters doyum akımı
k	Boltzmann Sabiti
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
MPY	Metal/Polimer/Yarıiletken
MY	Metal-Yarıiletken
MYY	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
$m_e^*$	Elektronun etkin kütlesi
$m_0$	Serbest elektron kütlesi
n	İdealite faktörü
n(V)	Voltaja bağlı idealite faktörü
$N_2$	Kuru azot
n(x)	Elektron yoğunluğu
$N_C$	İletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu
$N_D$	Donör atomların yoğunluğu
$N_{ss}$	Arayüzey durum yoğunluğu
OFET	Organik alan etkili transistörler
OLED	Organik ışık yayan diyotlar
OPDS	Organik fotodiyotlar
q	Elektron yükü
$qV_i$	Yarıiletkenden metale geçen elektronların aşması gereken potansiyel engeli
$R_s$	Seri direnç
$R_{sh}$	Şant direnç
SCLC	Sınırlandırılmış serbest uzay yükü bölgesi akımı
SBD	Schottky bariyer diyot

Si	Silisyum
T	Mutlak sıcaklık
TAE	Termiyonik Alan Emisyonu
TE	Termiyonik Emisyon Teorisi
TED	Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi
V	Voltaj
$V_D$	Difüzyon potansiyeli
$V_F$	Doğru beslem
$V_i$	Kontak potansiyel farkı
$V_R$	Ters beslem
$V_{th}$	Eşik voltaj değeri
$\beta$	Engel yüksekliğinin voltaj ile değişim katsayısı
$\Delta\Phi_B$	Schottky engel alçalması
$\epsilon_0$	Boşluğun dielektrik sabiti
$\epsilon_i$	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
$\epsilon_s$	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$\chi_s$	Elektron yakınlığı
$W_D$	Tüketim tabakasının genişliği
$\Phi_B$	Potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_{B0}$	Bariyer yüksekliği
$\Phi_m$	Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_n$	n-tipi bir yarıiletkende iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
$\Phi_s$	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\mu_e$	Elektron mobilitesi
$\xi$	Dış elektrik alan
$\pi$	Pi sayısı
$\Omega$	Ohm

## ÖZET

### Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si SCHOTTKY BARIYER DİYOTLARIN ODA SICAKLIĞINDA ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Engin YAĞLIOĞLU

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

Eylül 2014, 66 sayfa

Bu tezde, Au/poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester:2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane/n-tipi silisyum (Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si) metal-polimer-yarıiletken (MPY) Schottky bariyer diyot (SBD) yapılarının temel elektriksel parametreleri F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun (%0, %1 ve %2) etkisine bağlı olarak incelenmiştir. İdealite faktörü ( $n$ ), bariyer yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), seri direnç ( $R_s$ ), şant direnç ( $R_{sh}$ ) ve arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) gibi temel elektriksel parametreler, F4-TCNQ konsantrasyonuna bağlı olarak, karanlıkta ve oda sıcaklığındaki ileri ve ters beslem akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) karakteristiklerinden tanımlanmıştır. Bununla birlikte, karanlıkta ve oda sıcaklığındaki kapasitans-voltaj ( $C$ - $V$ ) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ - $V$ ) ölçümleri, %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu kullanılmış Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için 10kHz - 2MHz frekans aralığında ve -7,0V - +7,0V aralığında çalışılmıştır.  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  ölçümlerin sonucunda, difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), Fermi enerji seviyesi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), donör taşıyıcı yoğunluğu ( $N_D$ ), maksimum elektrik alan ( $E_m$ ), Schottky engel alçalması ( $\Delta\Phi_B$ ) ve arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) gibi temel elektriksel parametreler frekansa bağlı olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürde yapılmış diğer çalışmalarla karşılaştırılarak bulunan değerlerin literatürle uyumluluğu incelenmiştir. Bütün bu sonuçlar göstermiştir ki en ideal elektriksel parametreler %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu kullanılan diyot için elde edilmiştir. Diğer yandan, %1 F4-TCNQ katkı ile karşılaştırıldığında, elektronlar ve deşiklerin oluşumundaki düzensizlik ve katkı kaynaklı uygunsuzluk dolayısıyla yüksek F4-TCNQ katkı (%2) durumu ideal diyot değerlerinden uzaktır. Bu sonuçlar, MPY yapısının elektriksel özelliklerinin F4-TCNQ katkılanmasına ve P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik tabakasının katkı konsantrasyonuna önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik tabakasındaki düşük F4-TCNQ katkı konsantrasyonu (%1), Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının elektriksel özelliklerini belirgin bir biçimde geliştirerek yüksek kaliteli elektronik ve optoelektronik cihazlar üretilebilmesine olanak sağlayacaktır.

**Anahtar sözcükler:** Schottky bariyer diyot, Organik yarıiletkenler, P3HT:PCBM:F4-TCNQ polimer karışımı, Elektriksel karakterizasyon

## ABSTRACT

### ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si SCHOTTKY BARRIER DIODES AT ROOM TEMPERATURE

Engin YAĞLIOĞLU

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

September 2014, 66 pages

In this thesis, the main electrical parameters of the gold/poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester:2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane/n-type silicon (Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si) metal-polymer-semiconductor (MPS) Schottky barrier diodes (SBDs) were investigated in terms of the effects of F4-TCNQ concentration (0%, 1% and 2%). The electrical parameters, such as ideality factor ( $n$ ), barrier height ( $\Phi_{B0}$ ), series resistance ( $R_s$ ), shunt resistance ( $R_{sh}$ ), and density of interface states ( $N_{ss}$ ) were determined from the forward and reverse bias current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristics in the dark and at room temperature, which were studied dependent to F4-TCNQ concentration. Moreover, capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) and conductance-voltage ( $G/\omega$ - $V$ ) analysis in the dark at room temperature were studied for 1% F4-TCNQ doping concentration used Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBD in the frequency range of 10kHz - 2MHz and between -7.0V - +7.0V. As a result of  $C$ - $V$  and  $G/\omega$ - $V$  measurements, the basic electrical parameters, such as diffusion potential ( $V_D$ ), Fermi energy level ( $E_F$ ), depletion layer width ( $W_D$ ), barrier height ( $\Phi_B$ ), density of donor atoms ( $N_D$ ), maximum electrical field ( $E_m$ ), Schottky barrier lowering ( $\Delta\Phi_B$ ) and  $N_{ss}$ , were obtained depending on frequency. All these results have compared and investigated with order study of literature. The results show that the most ideal values of electrical parameters were obtained for 1% F4-TCNQ used diode. On the other hand, the hard doping (2%) becomes far away from the ideal diode values due to the unbalanced generation of holes/electrons and doping-induced disproportion when compared by 1% F4-TCNQ doping. These results show that the electrical properties of MPS diodes strongly depend on the F4-TCNQ doping and doping concentration of interfacial P3HT:PCBM:F4-TCNQ organic layer. Moreover, the soft F4-TCNQ doping concentration (1%) in P3HT:PCBM:F4-TCNQ organic layer significantly improves the electrical characteristics of the Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs, which enables the fabrication of high-quality electronic and optoelectronic devices.

**Keywords:** Schottky barrier diode, Organic semiconductors, P3HT:PCBM:F4-TCNQ polymer blend, Electrical characterization

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si SCHOTTKY BARRIER DIODES AT ROOM TEMPERATURE**

Engin YAĞLIOĞLU

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

September 2014, 66 pages

#### **1. INTRODUCTION:**

In the last few decades, the polymeric organic materials have been a subject of intensive research, particularly in electronic devices. Organic materials have been widely investigated due to their attractive applications in microelectronic and optoelectronic devices, such as organic field effect transistor (OFETs), organic thin film transistors (OTFTs), organic light emitting diodes (OLEDs), Schottky diodes, organic solar cells and organic photodetectors. The advantages of polymeric organic materials, which are including low-temperature processing, flexibility, low cost, good film forming properties, easy fabrication techniques and large area processing, allow the variety of large application fields. Recently, electronic systems are moving to the ultimate scale of molecular entities, as demonstrated by the growing interest in understanding transport through polymeric organic molecular bridging two metal contacts and metal/polymeric organic material/semiconductor (MPS) structure. Schottky barrier diodes (SBDs) are the most widely used diodes in electronic devices because of their low forward voltage drop, which allows lower power loss than ordinary silicon pn junction diodes. The properties of MPS SBDs are mainly controlled by their organic interfacial layer on semiconductors.

Interpenetrating conjugated polymer:fullerene (donor-acceptor) networks is a very promising approach for the improvement of the device performances. The interpenetrating networks provide increased charge carrier-generating interfaces, as compared to only polymer used devices. Among polymer:fullerene (donor-acceptor)



networks, poly(3-hexylthiophene) (P3HT) and [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) blend is promising and well-studied. This blend is usually used for photovoltaic devices due to its efficiency, which is as high as ~6.5%.

The electrical characteristics of optoelectronic devices can be improved by using dopant molecules. Molecular doping process is quite critical in tuning the injection properties at metal-semiconductor interfaces, which lead to full control over device parameters. Therefore, the control of the electrical properties of diodes can be controlled by doping process. Small molecule 2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4-TCNQ) is one of the most effective p-type doping reagents for polymer/dopant systems due to its strong electron affinity. F4-TCNQ molecules easily accept the electrons from P3HT backbones to form charge-transfer complexes. The conductivity of polymer can be increased with F4-TCNQ. This may improve the electrical parameters of MPS SBDs. On the other hand, understanding the effects of F4-TCNQ dopant concentration on the electrical properties could be important to control the device performance.

By manipulating the F4-TCNQ concentration in P3HT:PCBM:F4-TCNQ interfacial organic layer, the electrical properties of MPS SBDs can be developed when compared by those of only P3HT:PCBM interfacial organic blend film used diode.

However, to the best of our knowledge, there is no report regarding the investigating the F4-TCNQ doping effect on the performance of MPS SBDs. In this study, the effects of different F4-TCNQ doping concentration on the electrical properties of the Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs were investigated. Various F4-TCNQ doping concentration values in the range of 0-5% was used to fabricate the Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs. However, among the all diodes, 0%, 1% and 2% F4-TCNQ doping concentration used diodes significantly show the effects of F4-TCNQ doping concentration on the electrical parameters of diodes. Current-voltage ( $I$ - $V$ ) measurements in the dark and at room temperature were carried out to figure out the basic electrical parameters of the Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs as a function of 0%, 1% and 2% F4-TCNQ doping concentration in P3HT:PCBM:F4-TCNQ interfacial organic layer. The critical electrical parameters, which determine the performance of the SBDs and are ideality factor ( $n$ ), barrier height ( $\Phi_{B0}$  and  $\Phi_B$ ), series resistance ( $R_s$ ), shunt resistance ( $R_{sh}$ ), electron mobility ( $\mu_e$ ) and the density of interface states ( $N_{ss}$ ) at the metal/polymer (M/P) interfacial layer and polymer/semiconductor (P/S) interface, were

derived from *I-V* analysis.

## 2. MATERIAL AND METHODS:

Poly(3-hexylthiophene) (P3HT), [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) and 2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4-TCNQ) organic compounds were purchased from Sigma-Aldrich Ltd. and used without further purification. Three concentrated solutions of P3HT (25mg/mL), PCBM (25mg/mL) and F4-TCNQ (0.01mg/mL) were separately prepared in 1,2-dichlorobenzene and stirred at 60°C for 3h. P3HT and PCBM were mixed to form P3HT:PCBM blend solution with a weight ratio of 1:1 (10mg/mL:10mg/mL). Then, various amount of F4-TCNQ solution was added into the P3HT:PCBM solution to obtain separate P3HT:PCBM solutions with F4-TCNQ concentrations of 1% and 2% (wt.-%). Subsequently, the blend solution was stirred overnight before spin casting. Additionally, P3HT:PCBM blend solution without F4-TCNQ was fabricated as a reference of the undoped P3HT:PCBM (i.e., 0%) organic interfacial layer.

After surface cleaning of n-Si wafer, silver (Ag) metal with the thickness of  $\sim 2500\text{\AA}$ , which was used as the low-resistivity ohmic back contact, was evaporated onto the whole back side of chemical cleaned Si substrate by thermal evaporation system. Immediately, the P3HT:PCBM (1:1) solutions with F4-TCNQ concentrations of 1% and 2% (F4-TCNQ to polymer ratio) and without F4-TCNQ doping (0%) were spin-coated onto the n-Si surface at 1500rpm/s for 30s resulting in a  $\sim 1000\text{\AA}$  -thick continuous P3HT:PCBM:F4-TCNQ films. After the spinning process of organic blend layer, circular-shaped gold (Au) rectifying contacts with 99.999% purity in a diameter of 1mm were evaporated on the P3HT:PCBM:F4-TCNQ organic layer surface of the wafer through a metal shadow mask by thermal evaporator vacuum system with the pressure of  $\sim 1 \times 10^{-6}$  mbar.

The *I-V* characteristics of Au/P3HT:PCBM/n-Si SBDs with different F4-TCNQ concentrations of 0%, 1% and 2% were determined using a Keithley 4200 SCS in dark at room temperature. The capacitance-voltage (*C-V*) and conductance-voltage (*G/ω-V*) characteristics of Au/P3HT:PCBM/n-Si SBDs with F4-TCNQ concentrations of 1% were determined using a HP4192A LF impedance analyser in dark at room temperature. Moreover, IEEE-488 AC/DC converter card connected to computer was used for *C-V* and

$G/\omega$ - $V$  measurements while recording the  $C$ - $V$  and  $G/\omega$ - $V$  data to computer was performed by GPIB data transfer card.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS:

The forward and reverse bias semi-logarithmic  $I$ - $V$  curves of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs with different F4-TCNQ concentrations of 0%, 1% and 2% in dark at room temperature is given. The applied voltage was varied from -5.0V to +5.0V during  $I$ - $V$  measurements and the forward bias semi-logarithmic  $I$ - $V$  plots have a linear region in low voltage regions and a deviation considerably from linearity in enough high voltage regions especially due to the effect of  $R_s$  and interfacial polymer layer for all diodes. Additionally, the slope of the linear portion of the forward bias  $\ln I$ - $V$  plots changes as dependent to F4-TCNQ concentration, which results different  $n$  values for different F4-TCNQ concentrations. The value of rectification ratio can be defined as a ratio of forward to reverse bias current at fixed voltage ( $\pm 5$ V). The values of rectification ratio for different F4-TCNQ concentration used Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs are  $0.2 \times 10^3$ ,  $4.2 \times 10^3$  and  $0.4 \times 10^3$  for 0%, 1% and 2% concentration values of F4-TCNQ, respectively. The concentration of F4-TCNQ has a great influence on the values of diode parameters of  $\Phi_{B0}$ ,  $n$  and  $I_0$ , which were improved by the doping. It is noted that the value of barrier height, which is the contact potential barrier and exists at the interface between the organic layer and metals, decreases from 0.77eV to 0.71eV with 1% F4-TCNQ doping and becomes almost the same with 2% F4-TCNQ doping when compared the diode without F4-TCNQ doping. On the other hand, there is a  $\sim 10$  times enhancement in the value of  $I_0$  by adding the 1% F4-TCNQ, whereas the values of  $n$  and  $\Phi_{B0}$  become lower. However, the  $n$  and  $\Phi_{B0}$  increase while  $I_0$  decreases for 2% F4-TCNQ used diodes when compared with 1% F4-TCNQ used diodes. The improvement in electrical parameters was obtained in the case of soft F4-TCNQ doping (1%) while hard doping (2%) decreases in the value of parameter.

The values of  $R_s$  and  $R_{sh}$  approach to a constant value in forward bias region and reverse bias region, respectively. The values of  $R_s$  are 427.1 $\Omega$ , 46.1 $\Omega$  and 197.4 $\Omega$  while the values of  $R_{sh}$  are 0.2M $\Omega$ , 0.7M $\Omega$  and 0.4M $\Omega$  for 0%, 1% and 2% F4-TCNQ used SBDs, respectively. The lowest  $R_s$  and high  $R_{sh}$ , which show the more ideal diode, was obtained for 1% F4-TCNQ used diode.

The value of electron mobility can be calculated by using double log  $I$ - $V$  plot. The values of  $3.88 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $6.71 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  and  $6.07 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  were found for 0%, 1% and 2% F4-TCNQ used SBDs, respectively. The main electrical parameters were calculated by using different methods, such as  $\ln I$ - $V$  plot, Cheung's method and Norde method. It is found that the values of parameters deduced from different methods are in good agreement.

The acceptor type  $N_{ss}$  is in effect near the valance band while the donor type  $N_{ss}$  is in effect near the conductance band. The shapes of the density distribution of the interface states are in the range of  $E_c - 0.42 \text{eV}$  to  $E_c - 0.65 \text{eV}$  for 0% F4-TCNQ used diode and  $E_c - 0.36 \text{eV}$  to  $E_c - 0.67 \text{eV}$  for 1% F4-TCNQ used diode while that is in the range of  $E_c - 0.40 \text{eV}$  to  $E_c - 0.68 \text{eV}$  for 2% F4-TCNQ used diode. Values of  $N_{ss}$  without taking account the  $R_s$  is higher than those calculated by considering the effect of  $R_s$  in  $N_{ss}$ . These results show that the value of  $R_s$  should be considered in the calculation of  $N_{ss}$ . On the other hand, when the effect of F4-TCNQ doping concentration on the  $N_{ss}$  profile of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs is considered in  $E_c - 0.45 \text{eV}$ , the magnitude of  $N_{ss}$  is  $1.4 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ,  $7.5 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  and  $1.7 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  for 0%, 1% and 2% F4-TCNQ used diodes, respectively.

Besides,  $C$ - $V$  and  $G/\omega$ - $V$  measurements have examined in Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBD structure for the sample which has %1 F4-TCNQ doping concentration, at room temperature and dark, within the frequency range of 10kHz - 2MHz and in the voltage range of -7.0V to +7.0V.

The results show that the values of capacitance increases while the frequency decreases. Furthermore, the electrical parameters, such as diffusion potential ( $V_D$ ), doping concentration of donor atoms ( $N_D$ ), Fermi energy level ( $E_F$ ), depletion layer width ( $W_D$ ), maximum electric field ( $E_m$ ), barrier height ( $\Phi_B$ ), Schottky barrier lowering ( $\Delta\Phi_B$ ), were determined from the analysis of frequency dependent capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) and conductance-voltage ( $G/\omega$ - $V$ ) measurements. As a result of this study, the basic electrical parameters of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes deduced from frequency dependent  $C$ - $V$  and  $G/\omega$ - $V$  analysis are improved due to the P3HT:PCBM:F4-TCNQ interfacial organic layer when compared with those of Au/n-Si (MS) Schottky barrier diodes.

#### 4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

As a result of  $I$ - $V$  characteristics, it is found that all these basic parameters strongly depend on the F4-TCNQ doping of interfacial organic blend layer in Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs. There is an improvement of basic electrical parameters for F4-TCNQ doping used Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) SBD by resulting lower ideality factor, higher rectification ratio, lower series resistance and higher shunt resistance values. The improvement of basic electrical parameters with the doping of F4-TCNQ can be concluded that the conductivity of MPS SBDs increased dramatically with F4-TCNQ doping since the doping of semiconductors leads to enhancement of the electric field at the metal/semiconductor interface which gives rise to a reduction in the injection barrier due to image force lowering. On the other hand, the significant improvement in electrical parameters was obtained in the case of soft F4-TCNQ doping (1%) while hard doping (2%) improves the diode parameters slightly compared by without doping. The main electrical parameters were calculated by using different methods, such as  $\ln I$ - $V$  plot, Cheung's method and Norde method. It is found that the values of parameters deduced from different methods are in good agreement. Moreover, the decrease of  $N_{ss}$  with 1% F4-TCNQ doping was obtained. This may be due to the lower barrier height at metal/polymer (M/P) interface and increased velocity and mobility of charge carriers for 1% F4-TCNQ used MPS SBDs. On the other hand, the increase in F4-TCNQ doping concentration results higher  $N_{ss}$  since high doping level creates additional traps at M/S interface, which reduce the carrier injection and conductivity. Finally, it can be concluded that the soft (1%) F4-TCNQ doping concentration of P3HT:PCBM organic blend significantly improves the quality of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) SBDs.

The  $C$ - $V$  and  $G/\omega$ - $V$  measurements of these samples is made in the direction of results which has been obtained for metal-polymer-semiconductor (MPS) Schottky barrier diode (SBD) which is one of the  $I$ - $V$  characteristics having %1 F4-TCNQ doping concentration. These measurements have been carried out 10kHz - 2MHz range of frequency and -0.7V - +0.7V range of voltage. While frequency value of the structure of %1 F4-TCNQ doping concentration increases, the increment of diffusion potential ( $V_D$ ), Fermi energy level ( $E_F$ ), depletion layer width ( $W_D$ ) and barrier height ( $\Phi_B$ ) values has been seen. Besides, it has been determined that while the value of frequency increases, the value of doping concentration of donor atoms ( $N_D$ ), maximum electric field ( $E_m$ ) and Schottky

barrier lowering ( $\Delta\Phi_B$ ), decreases. It has been come to conclusion that P3HT:PCBM:F4-TCNQ interface organic layer which has %1 F4-TCNQ doping concentration has developed basic electrical parameters for diode when the whole parameters are compared with the one which are obtained for MPS SBD structure from the analysis of  $C-V$  and  $G/\omega-V$  which has %1 F4-TCNQ doping concentration and the one which is produced without using interface organic layer for Au/n-Si (MPS) SBD.

## 1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MY) kontaklar arasındaki elektrik iletiminin 1874 yılında Braun tarafından keşfedildiği bilinmektedir [1]. 1930'lu yıllara gelindiğinde yarıiletkenlerin iletim teorisinin katıların band teorisine göre düzenlenerek metal-yarıiletken kontaklarda uygulandığı ve aynı dönemde doğrultma mekanizmasının anlaşılması ile ilk çalışmaların yine bu dönemlerde yapıldığı literatürde görülmüştür [2]. 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalarda Schottky diyotların üretimi ile metal-yarıiletken (MY) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) yapıların akım-iletim mekanizmaları ve termal özellikleri anlaşılmıştır [3,4].

Yarıiletken teknolojisinin günümüzde geldiği endüstriyel nokta, elektronik veya optoelektronik cihazlarla katıhal fiziğinin en önemli ticari uygulamalarından biri olmasıdır. MY, MYY, metal-polimer-yarıiletken (MPY) kontaklar (diyotlar) günümüz yarıiletken teknolojisinin temelini oluşturmaktadır.

Bir MY kontak Schottky bariyer diyot yapısındadır ve metalin iş fonksiyonu, band aralığı, yarıiletken tipi ve konsantrasyonu gibi etkiler özelliklerini belirlemektedir. Bununla birlikte MYY ve MPY olarak adlandırılan metal ve yarıiletken arasına yalıtkan bir yüzey veya polimer bir tabakanın varlığı ile de Schottky bariyer diyotu (SBD) oluşmaktadır.

Özellikle MPY tipi SBD'ler ile ilgili son zamanlarda teorik ve deneysel çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Elektronikte kullanılan organik yarıiletkenler inorganik yarıiletkenlerle karşılaştırıldığında kolay üretim süreçleri, düşük maliyetli oluşları ve geniş kullanım alanlarına sahip olması yani endüstriyel uygulamaları nedeniyle metal-polimer-yarıiletken (MPY) yapılar, metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) yapılara göre daha çekici hale geldiği bilinmektedir [5,6]. Bütün bu avantajlar organik ışık yayan diyotlar (OLED), organik alan etkili transistörler (OFET), organik fotodiyotlar (OPDS), güneş pilleri ve Schottky diyotlar gibi elemanların da elektronikte kullanımını çekici hale getirmiştir [5,6].

MPY Schottky bariyer diyotlarının performansını incelemek için elektriksel özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde MY kontakların tarihsel gelişiminden, bu temel yapıları anlamak için akım-iletim

mekanizmalarından ve bu çalışmanın temeli olan organik yarıiletkenlerin temel özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde ise bu çalışmada kullanılan MPY yapılarının hazırlanması ve elektriksel karakterizasyonları için kullanılan ölçüm düzenekleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, deneysel veriler kullanılarak elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara konsantrasyonun etkisi şekiller ve çizelgelerle verilmiştir. Dördüncü bölümde ise elde edilen tüm sonuçların mevcut literatürle kıyaslamalı olarak karşılaştırılması yapılmıştır ve yorumlanmıştır.

## 1.1. METAL-YARIİLETKEN (MY) KONTAKLARIN TEORİSİ

Bir MY kontak Schottky bariyer diyot yapısındadır ve metal-yarıiletken kontaklar, doğrultucu kontak ve omik kontak olarak ikiye ayrılırlar. Kontakın doğrultucu veya omik olmasını belirleyen unsur, kullanılan metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonudur.  $\Phi_m$  metalin,  $\Phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonu olarak ifade edilirse; metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için  $\Phi_m > \Phi_s$  olması halinde doğrultucu kontak  $\Phi_s > \Phi_m$  olması halinde ise omik kontak oluşur, benzer şekilde metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için  $\Phi_s > \Phi_m$  olması halinde doğrultucu kontak  $\Phi_m > \Phi_s$  olması halinde ise omik kontak oluşur.

**Çizelge 1.1.** Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre kontak yapısı.

	n-tipi yarıiletken	p-tipi yarıiletken
Doğrultucu Kontak	$\Phi_m > \Phi_s$	$\Phi_s > \Phi_m$
Omik Kontak	$\Phi_s > \Phi_m$	$\Phi_m > \Phi_s$

### 1.1.1. İdeal Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi

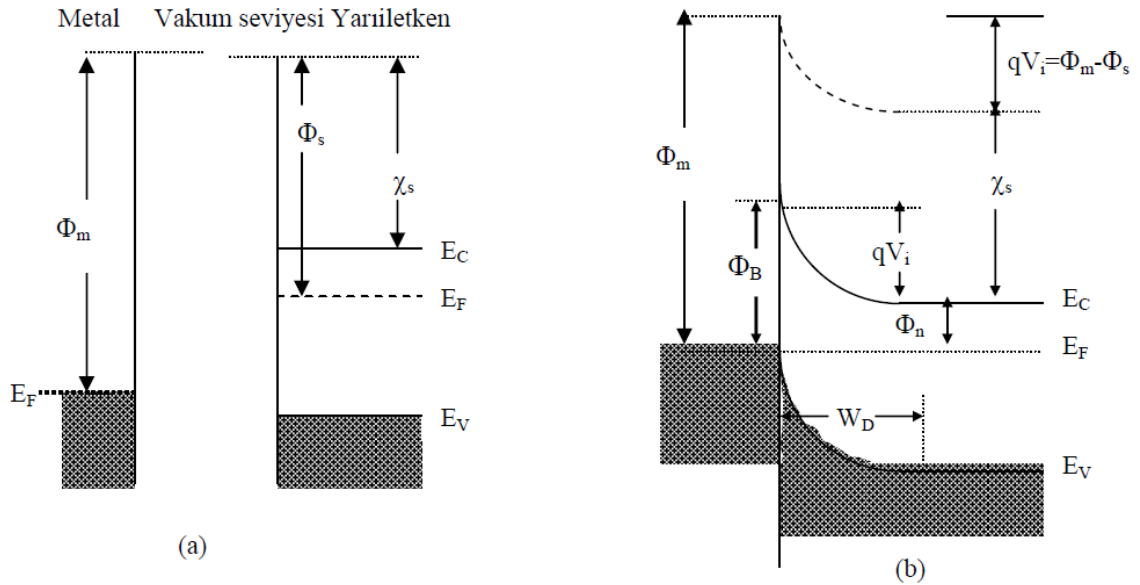
Schottky-Mott Teorisine göre, bir metal ile yarıiletken kontak edildiğinde metal-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engel yüksekliği oluşur. Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey bölgesi hareketli yüklerden arınmış yüksek dirençli bir bölgedir.

Schottky-Mott Modeli'ne göre potansiyel engeli iki maddenin iş fonksiyonları arasındaki farklılıktan dolayı oluşmaktadır [4]. Şekil 1.1'de iş fonksiyonu  $\Phi_m$  olan metal ile iş fonksiyonu  $\Phi_s$  olan n-tipi bir yarıiletkenin, doğrultucu kontak ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) durumundaki



enerji band diyagramı gösterilmiştir. Vakum seviyesi olarak Şekil 1.1(a)'da metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi referans alınmıştır. Metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$  de benzer şekilde tanımlanır. Burada önemli nokta yarıiletkenin Fermi seviyesi katkı atomlarının yoğunluğuna göre değişen bir niceliktir. Yarıiletkende katkı atomlarının konsantrasyonuna bağlı olmayan önemli bir parametre Şekil 1.1(a)'da  $\chi_s$  ile gösterilen elektron yakınlığıdır ve iletkenlik bandının en üst noktasından bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır.

Şekil 1.1(a)'da yarıiletken yüzey durumları içermediğinden yüzeyin band yapısı yarıiletken gövde (bulk) band yapısı ile aynıdır yani bandlarda bir bükülme yoktur.



**Şekil 1.1.** Metal/n-tipi yarıiletken kontakta,  $\Phi_m > \Phi_s$  için elektron enerji band diyagramı: (a) birbirinden ayrılmış nötral materyaller, (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.

Şekil 1.1(b), metal ile yarıiletken kontak yapıldıktan sonra dengedeki durumun enerji band diyagramıdır. Metal yarıiletkenle kontak edildiğinde, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar yarıiletkenden metale doğru akarlar. Bu durumun sonucu olarak yarıiletkenin sınırında serbest elektron konsantrasyonu azalacağından yarıiletkendeki Fermi seviyesi yasak enerji aralığının

ortasına doğru kayacaktır. Yani iletkenlik band kıyısı  $E_C$  ve Fermi seviyesi  $E_F$  arasındaki fark, elektron konsantrasyonunun azalması ile artar ve termal dengedeki  $E_F$  sabit kaldığı için iletkenlik ve valans band kenarları Şekil 1.1(b)'deki gibi bükülürler. Yarıiletkenden metale geçen iletkenlik band elektronları, arkalarında pozitif yüklü verici iyonları bırakırlar. Böylece metale yakın yarıiletken bölgesinde hareketli elektronlar tükenmiş olur ve arayüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yükler, metal tarafında da yarıiletkenden gelen elektronlar sayesinde ince bir negatif yük tabakası oluşur. Bunun sonucunda yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan oluşur.

Termal dengede, engel yüksekliğini belirlemek için, geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekliliği sağlanmış olur ve band bükülme miktarı ( $qV_i$ ) iki vakum seviyesi arasındaki farka eşittir. Bu fark aynı zamanda metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktır.

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (1.1)$$

Burada  $qV_i$  yarıiletkenden metale geçen elektronların aşması gereken potansiyel engeldir, buna karşın metal tarafından gözükten engel yarıiletken tarafından gözükten engelden farklıdır ve

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (1.2)$$

eşitliği ile verilir.  $\Phi_s$  ise

$$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n \quad (1.3)$$

olduğundan,

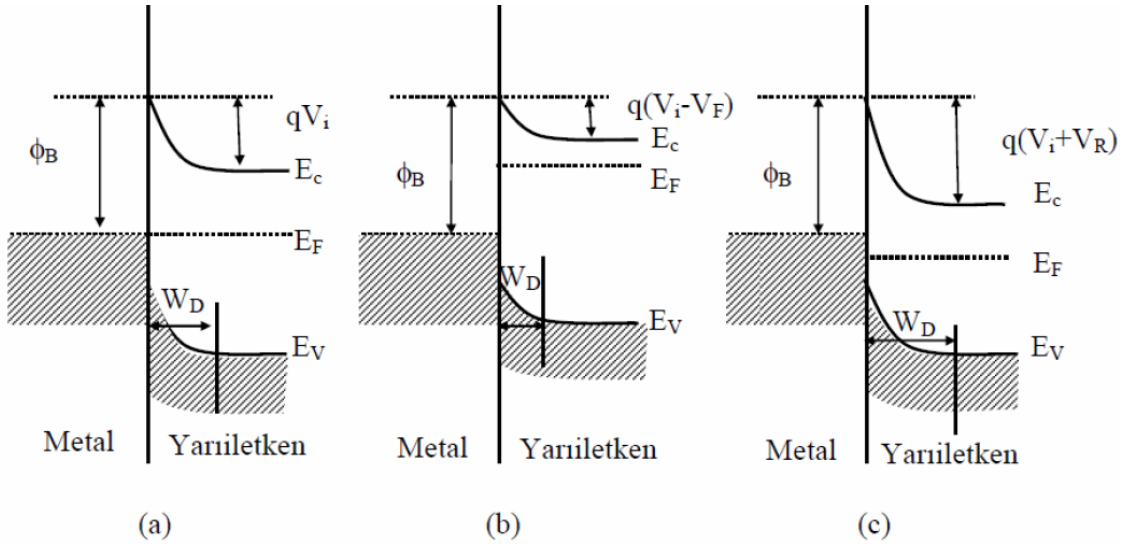
$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (1.4)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\Phi_n (= E_C - E_F)$  Fermi seviyesinin yasak bandın ne kadar içerisinde olduğunu ifade etmektedir. Denklem (1.2), birbirlerinden bağımsız olarak 1938 yılında Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir [7].

$\Phi_B$  potansiyeli,  $kT/q$  termal enerji değerinden büyüktür ve yarıiletkenin uzay yükü bölgesi hareketli yüklerden yoksun, yüksek dirençli bir bölge durumuna gelir. Buradan da Şekil 1.1(b)'nin doğrultucu kontak olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 1.2'de metal ile yarıiletken kontak edildikten sonra termal dengede, doğru ve ters beslem enerji band diyagramlarını göstermektedir. Şekil 1.1(a)'da termal dengede yarıiletkenden metale geçen elektronlar, metalden yarıiletkene geçen elektronlarla dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim bölgesi az sayıda hareketli taşıyıcı içerdiği için bu bölgenin direnci metalin direnci ve yarıiletkenin nötral bölgesinin direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir. Bundan dolayı uygulanan dış gerilimin tamamı neredeyse bu bölgeye düşer. Yapıya uygulanacak doğru veya ters bir gerilim voltajı termal denge durumundaki enerji band diyagramını değiştirecektir. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletken tarafı metale göre negatif olacak şekilde bir  $V = V_F$  gerilimi uygulandığında tüketim bölgesinin genişliği azalır. Şekil 1.2(b)'de gösterildiği gibi bölgenin engel yüksekliği  $qV_i$  den  $q(V_i - V_F)$  ye düşer. Bu durumun sonucu olarak yarıiletkendeki elektronlar azalmış bir engelle karşılaşacak ve yarıiletkenden metale elektron akımı termal denge değerine göre artarken metalden yarıiletkene doğru olan elektron akımı değişmeyecektir. Söz konusu durum, metalde herhangi bir gerilim düşmesi olmadığından ve  $\Phi_B$ 'nin uygulanan gerilimden etkilenmemesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak yarıiletken taraf negatif, metal taraf pozitif olacak şekilde kontakta bir gerilim uygulandığında, yarıiletkenden metale doğru net bir akım meydana gelir. Bu durumda kontakın doğru beslemde olduğu söylenir ve doğru beslem akımı, uygulanan  $V_F$  doğru beslem gerilimi ile üstel olarak artar [7].

Kontakın ters beslem durumundaki enerji band diyagramı Şekil 1.2(c)'de verilmiştir. Yarıiletken metale göre pozitif olacak şekilde  $V = -V_R$  gerilimi uygulandığında tüketim bölgesindeki engel yüksekliği bu kez  $qV_i$  den  $q(V_i + V_R)$  ye yükselir ve sonuç olarak yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge durumuna göre azalma gösterir. Metalden yarıiletkene elektron akımı ise pratik olarak termal dengedeki akımın aynısıdır. Yarıiletkenden metale doğru olan akım doğru beslem ile kıyaslandığında daha küçüktür ve bu kontak tek yönde akım ileten doğrultucu kontak olur. Şekil 1.2(b) ve Şekil 1.2(c) enerji band diyagramları denge şartlarında değildir ve tek bir Fermi seviyesi yoktur. Elektronların gittiği bölgenin Fermi enerji seviyesi, elektronların geldiği bölgenin Fermi enerji seviyesinden daha yüksektir.



**Şekil 1.2.** Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji band diyagramı: (a) ısıl denge, (b) doğru beslem, (c) ters beslem durumu.

### 1.1.2. Schottky Engel Alçalması

Bir metal vakum sisteminde, metalin yüzeyinden  $x$  kadar uzakta bulunan bir elektron düşünülürse, metalin yüzeyinden  $x$  kadar arkada pozitif değerli bir hayali yük oluşur [2]. Bu durumda Coulomb Denkleminde göre elektronu metale çeken kuvvet [1],

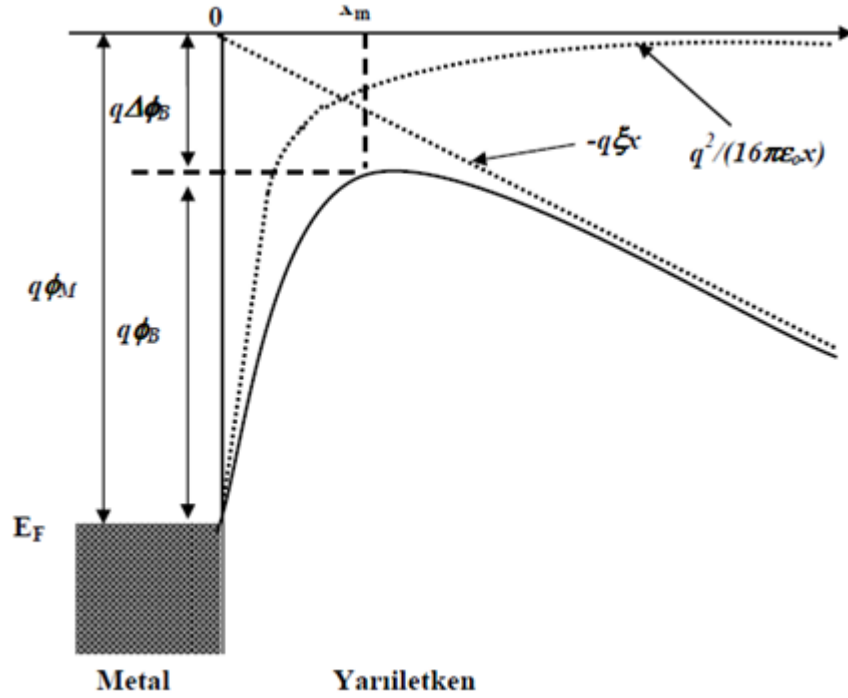
$$F = -\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)\left(\frac{q}{2x}\right)^2 \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\epsilon_0$ , boşluğun dielektrik geçirgenliği olup değeri  $8.85 \times 10^{-14}$  F/cm dir. Bu Coulomb kuvvetinin  $+\infty$  ile  $x$  arasında integrali alınırsa,

$$\int_{\infty}^x F dx = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (1.6)$$

elde edilir. Metal-yarıiletken Schottky kontaklar için bu metalden vakuma doğru olan emisyon, metalden yarıiletkene doğru emisyon şeklinde düşünülebilir [8]. O halde, yarıiletken içinde metalden  $x$  kadar uzakta bir elektron dikkate alınırsa, metal yüzeyinden  $x$  kadar uzakta pozitif değerli bir hayali yük oluşur. Schottky engelini uygulanan elektrik

alan ve görüntü yük etkisiyle  $q\Delta\phi_B$  kadar azalmasına Schottky engel alçalması denir.



**Şekil 1.3.** Metal yarıiletken doğrultucu kontakta Schottky etkisinden kaynaklanan potansiyel engel alçalması.

Yarıya bir dış elektrik alan ( $\xi$ ) uygulandığında uzaklığın fonksiyonu olarak toplam potansiyel enerji,

$$U(x) = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} - q\xi x \quad (1.7)$$

ile verilir. Schottky engel alçalması metal yüzeyinden  $x_m$  kadar uzakta potansiyel enerji değişiminin  $dU(x)/dx = 0$  olduğu noktada meydana gelir. Denklem (1.7)'nin  $x$ 'e göre türevi alınıp sifıra eşitlendiğinde,

$$x_m = \left( \frac{1}{16\pi\epsilon_0 \xi} \right)^{1/2} \quad (1.8)$$

elde edilir. Bu değer Denklem (1.7)'de yerine yazılırsa

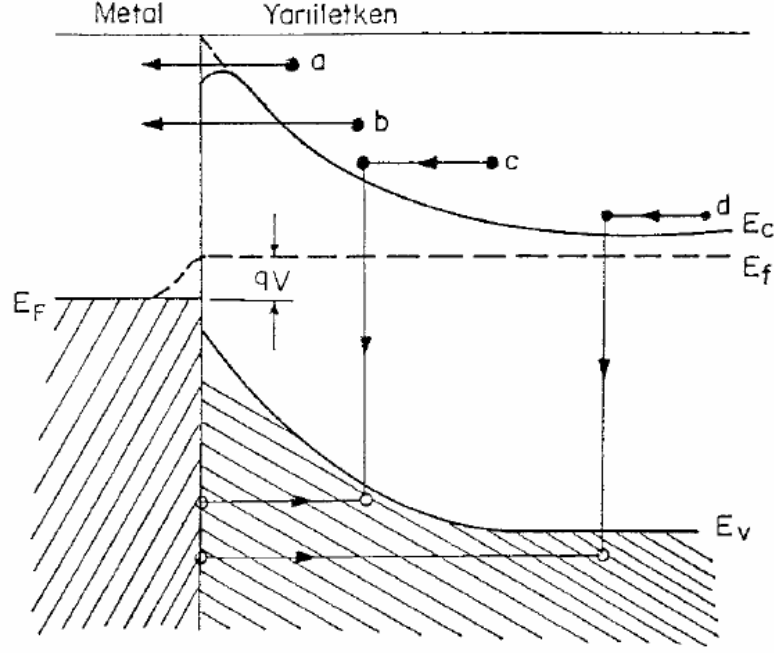
$$\Delta\Phi_B = \left( \frac{q\xi}{4\pi\epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (1.9)$$

ifadesi elde edilir.

### 1.1.3. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi, başlıca çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır. Metal-yarıiletken yapıların bir dış gerilim altında akım-iletim mekanizmalarının tayini oldukça önemlidir. Kontakta arayüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerin Schottky diyotlarda etkisi dikkate alınarak, hangi durumda hangi iletim mekanizmasının oluştuğunun belirlenmesi sonuçların doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Metal-yarıiletken ve metal-yalıtkan-yarıiletken yapıları kontaklarda başlıca akım-iletim mekanizmaları şunlardır [1,4]:

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme
- Termiyonik Alan Emisyonu (TAE)
- Alan Emisyonu (AE)
- Çok Katlı Tünelleme
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon,
- Deşik enjeksiyonu
- $T_0$  etkili akım iletimi



**Şekil 1.4.** Metal-yarıiletken kontaklarda doğru beslem altında akım-iletim mekanizmaları.

Doğru beslem altında metal/n-tipi yarıiletkende dört temel akım iletim mekanizması Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Burada (a); potansiyel engelin tepesi üzerinden yarıiletkenden, metalin içine doğru elektronların iletimidir (Termiyonik Emisyon), (b); elektronların engel içinden doğrudan kuantum mekaniksel tünellemesidir, (c); uzay yük bölgesinde yeniden birleşimdir, (d); doğal bölgede metalden yarıiletkenedeşik enjeksiyonudur.

#### 1.1.3.1. Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)

Metal-yarıiletken kontaklarda engeli aşmaya yetecek kadar termal enerji kazanan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmeleri Termiyonik Emisyon (TE) olarak bilinir [9]. Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda bu mekanizma elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda ise bu mekanizma holler tarafından sağlanır [1,2]. Bethe'nin metal-yarıiletken kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu TE Teorisinin varsayımları şunlardır [1,2]:

- Potansiyel engelinin yüksekliği, termal enerjiden,  $kT/q$  enerjisinden, çok büyüktür.

- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır.

- Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte ve engelin biçimi önemsiz olmakla birlikte akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

Yarıiletken den metale doğru olan akım yoğunluğu ( $J_{sm}$ ), ancak eklemdeki potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızı ile ifade edilir.

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (1.10)$$

Hızları  $v$  ile  $v+dv$  arasında olan elektronların birim hacim başına sayısını veren ifade;

$$dn = 2 \left( \frac{m^*}{h} \right)^3 \exp\left(-\frac{qV_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{m^* v^2}{2kT}\right) (4\pi v^2 dv) \quad (1.11)$$

eşitliği ile verilir. Denklem (1.11), Denklem (1.10)'da yerine yazılırsa ve  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$  dönüşümü ile  $4\pi v^2 dv = dv_x dv_y dv_z$  dönüşümü yapılırsa;

$$J_{sm} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^* v_{ox}^2}{2kT}\right) \quad (1.12)$$

elde edilir.  $v_{ox}$  engeli  $x$  yönünde geçmek için gerekli minimum hızdır. Denklem (1.12)'de bu düzenlemeler yapıldığında akım ifadesi;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (1.13)$$

olarak bulunur. Burada  $A^*$ , TE teorisi için etkin Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene doğru giden elektronlar için engel yüksekliği değişmediğinden yarıiletkene akan akım, uygulanan voltajdan etkilenmez ve denge durumunda yarıiletken den metale geçen akıma eşit olmalıdır.  $V = 0$  yazılarak Denklem (1.13) düzenlenirse;



$$J_{ms} = -A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (1.14)$$

olarak bulunur. Toplam akım ifadesi için Denklem (1.13) ve Denklem (1.14) birleştirilirse;

$$J_n = \left[ A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.15)$$

$$J_n = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.16)$$

elde edilir. Burada  $J_0$  doyum akım yoğunluğudur ve uygulanan voltajdan bağımsız olması beklenirken Schottky etkisinden dolayı uygulanan voltaja bağlı bir miktar değişim gösterir. Schottky etkisi burada uygulanan voltajdan dolayı engel yüksekliğinin  $q\Delta\Phi_B$  kadar alçalmasıdır.

#### 1.1.3.2. Difüzyon Teorisi

Yoğunluk farkı bulunan bölgelerde, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru yük geçişine difüzyon denir. Düşük mobiliteli yarıiletkenlerde, akım iletimi için Difüzyon Teorisi uygulanabilir. Schottky tarafından ortaya konulan Difüzyon Teorisi bazı varsayımları şunlardır [1,2,4]:

- Potansiyel engelinin yüksekliği, termal enerjiden,  $kT/q$  enerjisinden, çok büyüktür.
- Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma ihtimalleri dikkate alınmıştır.
- $x = 0$  ve  $x = W_D'$  deki taşıyıcı konsantrasyonları termal denge değerlerine sahiptirler ve akımdan etkilenmezler.
- Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere olmamıştır yani katkı atomları yoğunluğu değiştirmez.

Tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılmalıdır. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için bu eşitlikler;

$$J_x = J_n = q \left[ n(x) \mu_n E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (1.17)$$

ve

$$J_n = q D_n \left[ \left( -\frac{q n(x)}{kT} \right) \frac{\partial V(x)}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (1.18)$$

şeklindedir. Burada  $n(x)$  elektron yoğunluğu,  $\mu$  elektron mobilitesi,  $E(x)$  tüketim bölgesindeki elektrik alan,  $D_n$  elektron difüzyon sabitidir. Buradan Difüzyon Teorisine göre akım yoğunluğu;

$$J_n = J_{SD} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.19)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $J_{SD}$  doyum akım yoğunluğudur ve

$$J_{SD} = \left( \frac{q^2 N_C D_n}{kT} \right) \left[ \frac{2q(V_D - V) N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (1.20)$$

şeklindedir. Burada  $N_C$  iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu,  $V_D$  difüzyon voltajı,  $N_D$  verici yoğunluğu,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir.

Difüzyon Teorisi ve TE teorisinden elde edilen akım yoğunluğu ifadeleri temelde birbirlerine benzemektedir [1,2]. Doyma akım yoğunluğunun, Difüzyon Teorisi ele alındığında voltaja bağlı çabuk değiştiği fakat sıcaklığa bağlı değişiminin TE teorisinden çok daha düşük olduğu görülmektedir.

### 1.1.3.3. Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)

Crowell ve Sze, metal yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmalarını açıklayan Difüzyon Teorisi ile TE teorisini tek bir modelde Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisinde (TED) birleştirmişlerdir [2]. Bu teori metal-yarıiletken arayüzeyi yakınında tanımlanan termiyonik rekombinasyon hızı  $V_r'$  nin sınır şartlarından yararlanılarak kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde (bulk) arasına uygulanan bir voltaj ( $V$ ), metale

doğru bir elektron akışına neden olur.

Elektron potansiyel enerjisi  $q\psi(x)$  ve kuasi-Fermi seviyesi  $q\Phi(x)$  olmak üzere  $x_m$  ile  $W_D$  arasındaki bölgenin her yerinde akım yoğunluğu,

$$J_n = -qn\mu_n \left( \frac{d\Phi_B}{dx} \right) \quad (1.21)$$

şeklindedir burada  $n$  herhangi bir  $x$  noktasındaki elektronun yoğunluğudur ve

$$n_e = N_c \exp\left(-\frac{q(\Phi_B - \Psi)}{kT}\right) \quad (1.22)$$

eşitliği ile verilir. Teoriye göre elektronların metal-yarıiletken arayüzeyinden optik fononlarla etkileşimsiz potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değerleri göz önüne alınarak Richardson sabiti  $A^*$  yerine  $A^{**}$  etkin Richardson sabiti kullanılır ve en genel akım yoğunluğu-gerilim ifadesi;

$$J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1.23)$$

şeklindedir. Burada  $J_0$  ters doyum akımı olup,

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (1.24)$$

eşitliği ile verilir. İdeal bir Schottky diyotunda ideal sapmaları belirlemek amacı ile bir  $n$  ideal diyot çarpanı tanımlanırsa akım yoğunluğu ifadesi,

$$J = J_0 \exp\left[\left(\frac{qV}{nkT}\right)\right] \quad (1.25)$$

şekline dönüşür. Bu denklemde  $n$  idealite faktörüdür.

#### 1.1.3.4. Engel İçinde Tünelleme

Kuantum mekaniksel tünelleme, metal yarıiletken kontaklarda taşıyıcıların engel içerisinden karşı tarafa geçmeleri olarak bilinir. Yüksek katkılı yarıiletkenlerde veya çok düşük sıcaklıklarda engel genişliği azalır düşük enerjili elektronların engel içerisinden tünelleme ihtimali artacağından, engel içinde tünelleme, yüksek katkılı veya düşük sıcaklıklarda etkili bir akım iletim mekanizması olarak bilinir. Tünelleme olayı alan emisyonu (AE) ve termiyonik alan emisyonu (TAE) olmak üzere ikiye ayrılır.

Alan emisyonu (AE); aşırı katkılanmış ( $N_D \geq 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) dejenere yarıiletken ve düşük sıcaklık durumunda doğru beslem yönündeki akımın, yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesine yakın olan elektronların tünellenmesi ile artması olayıdır. TAE ise sıcaklık yükseltildiğinde elektronların daha yüksek enerji seviyelerine uyarılması ve tünelleme ihtimalleri artması ile doğru beslem yönündeki akımdaki artış olarak bilinir. Tünelleme ihtimalinin artması elektronların gördükleri engel genişliğinin azalmasından kaynaklanır.

Schottky engeli boyunca tünelleme, teorik olarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir ve bu analizlere göre doğru beslemde alan emisyonu, çok düşük doğru beslem voltajları dışında yalnızca dejenere yarıiletkenlerde meydana gelmektedir [4]. Tünelleme akımı,

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \quad (1.26)$$

eşitliği ile verilir. Burada  $E_0$  idealite faktörü  $n$  ile ilişkili olarak,

$$E_0 = \frac{q}{nkT} = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (1.27)$$

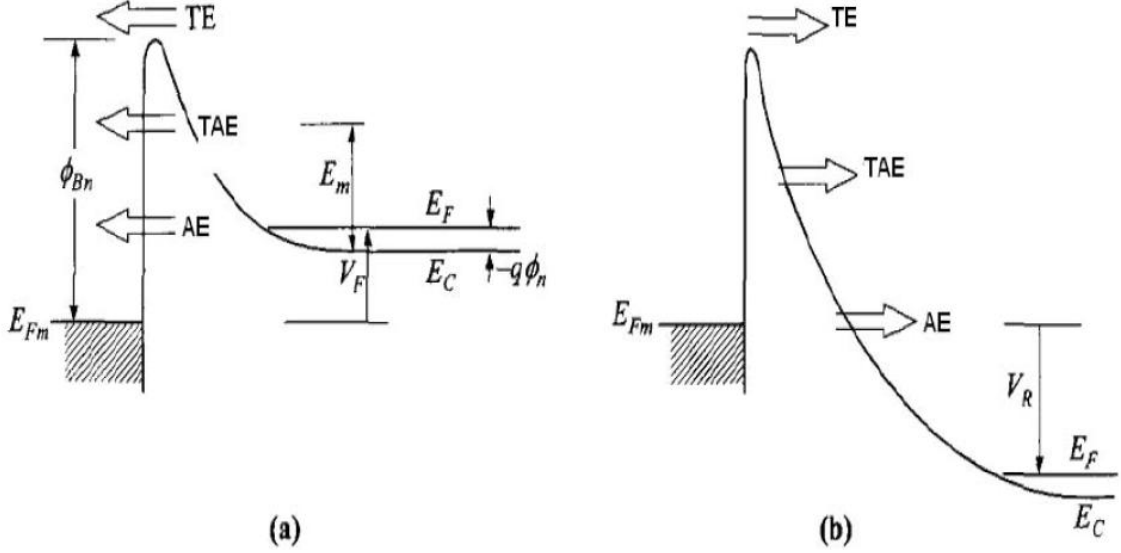
şeklindedir. Burada  $E_0$  ve  $E_{00}$  enerji boyutunda kıyas parametreleridir [10,11].  $E_{00}$  parametresi,

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \left(\frac{N_D}{m^* \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (1.28)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $h$  Planck sabiti,  $m^*$  elektronun etkin kütlesi,  $N_D$  katkılanan

verici atomlarının yoğunluğu ve  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

Denklem (1.26)'da bulunan  $I_s$  engel yüksekliğine, yarıiletken parametrelerine ve sıcaklığa bağlı karmaşık bir fonksiyondur, aynı zamanda voltaja zayıf bir şekilde bağlıdır.



**Şekil 1.5.** Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda (a) doğru beslem altında, (b) ters beslem altında tünelleme akımı enerji band diyagramı.

$E_{00}$  tünellemenin önemli bir parametresi olmakla birlikte  $kT/E_{00}$  termiyonik emisyonun ve tünellemenin bağlı ölçüsüdür. Düşük sıcaklıklarda  $E_0 \approx E_{00}$  olur ve  $\ln I-V$  grafiğinin eğimi sıcaklığa bağımlı olmayan bir sabittir. Bu durum Alan Emisyonu için geçerlidir. Yüksek sıcaklıklarda  $E_0$ ,  $kT$  ye eşittir ve  $\ln I-V$  grafiğinin eğimi termiyonik emisyonuna uygun bir şekilde  $q/kT$  ye eşittir. Sıcaklığın farklı ara değerleri için bu kez eğim  $q/nkT$  olur ve burada  $n$ ,

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (1.29)$$

şeklinde verilir.

## 1.2. ORGANİK YARIİLETKENLER

Elektronik ve optoelektronik teknolojisinde kullanılan organik elektronik aygıtlar, günümüzde inorganik malzemelerle hazırlanan aygıtlara göre oldukça dikkat

çekmektedir. Kristal olarak bilinen inorganik malzemeler, elektronik aygıtlarda (ışık yayan diyotlar (LED), Si tabanlı alan etkili transistörler, vb.) aktif malzeme olarak kullanılmaktadır [2]. Organik yarıiletkenler, inorganik yarıiletkenlerle kıyaslandığında bazı üstün özellikleri göze çarpmaktadır. Kolay üretim süreçleri, düşük maliyetli oluşları ve geniş kullanım alanlarına sahip olması bunun en basit örneğidir.

Son yıllarda avantajlarından dolayı organik yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronik teknolojilerinde kullanımı oldukça hız kazanmıştır. Bu aygıtlardan bazıları organik ışık yayan diyotlar (OLED), organik alan etkili transistörler (OFETs), organik fotodiyotlar (OPDS), organik güneş pilleri ve Schottky diyotlardır.

Organik malzemeler aygıtın uygulamasına göre farklı özelliklerde sentezlenebilir, örneğin moleküler ağırlığı, yasak enerji aralığı, moleküler orbital enerji seviyeleri, yapısal özellikler ve katkılama gibi malzemeye ait birçok özellik ve parametreleri değiştirilebilir [12].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. GİRİŞ

İnorganik yarıiletkenlerle kıyaslandığında birçok avantajı bulunan organik yarıiletkenlerin, elektronik ve optoelektronik teknolojisinde geniş kullanım alanına sahip olmalarından dolayı bu tez çalışmasında organik arayüzey malzemeleri kullanılmıştır.

Metal-yarıiletken (MY) kontak Schottky bariyer diyot yapısındadır ve metal ile yarıiletken arasında ince bir polimer tabakanın varlığında da metal-polimer-yarıiletken (MPY) Schottky bariyer diyotu (SBD) oluşur. Schottky bariyer diyotların üretiminde kullanılan farklı yarıiletkenler ve arayüzey tabakası olarak kullanılan organik veya inorganik malzemeler elde edilen elektronik cihazın elektriksel karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [13,14]. Elektronik cihazların elektrik ve dielektrik özellikleri, malzemenin arayüzey durumlarına ve MPY yapılarda polimerik arayüzey tabakasına önemli ölçüde bağlıdır [15]. Literatürdeki çalışmalarda metal-yarıiletken (M/Y) arayüzeyine polyvinyl alcohol [16], perylene [17], rhodamine-101 [18], chitin [19] gibi organik malzemeler eklenerek MPY Schottky diyotları oluşturulmuştur.

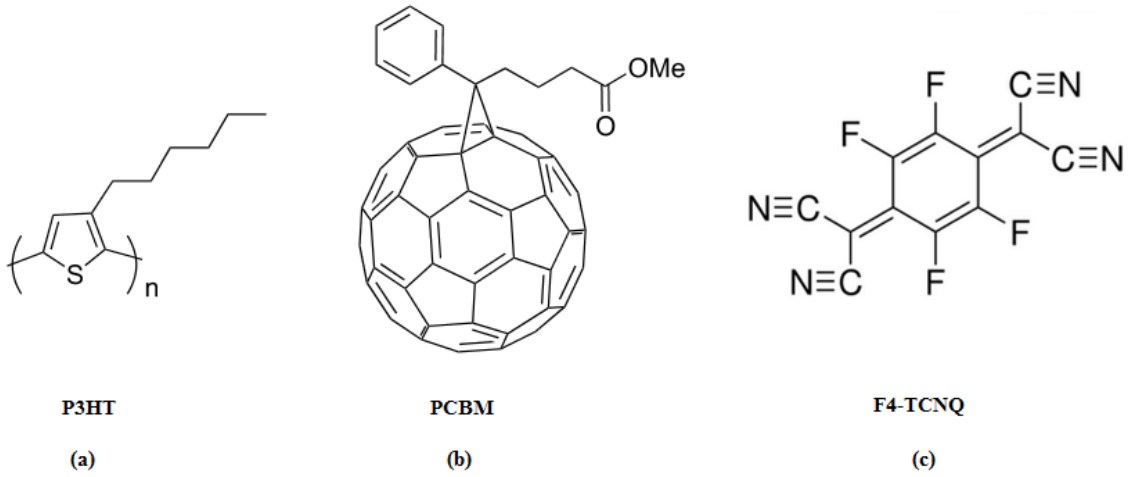
Çeşitli organik polimer malzemeler arasında yüksek kristallenebilirlik ve nispeten yüksek iletkenliğinden dolayı poly(3-hexylthiophene) (P3HT) elektronik cihazlarda oldukça fazla kullanılmaktadır (Şekil 2.1(a)) [20]. P3HT'nin elektronik yapısı güçlü bir elektron verici eklenerek değiştirilebilir ve [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) (Şekil 2.1(b)), P3HT ile karıştırıldığında mükemmel bir uyum sağladığı bilinmektedir [21]. Bunlara ek olarak P3HT:PCBM kullanılarak üretilen organik güneş hücrelerinde yaklaşık %6,5 gibi yüksek verimlilik değerlerine ulaşılmıştır [22]. Optoelektronik aygıtların elektriksel karakteristikleri katkı molekülleri kullanılarak geliştirilebilir ve katkılama miktarının ayarlanması bu konuda oldukça önemlidir [23].

2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4-TCNQ) güçlü elektron eğilimi nedeniyle polimer-katkı sistemleri için etkili bir p-tipi katkılama reaktiflerinden birisidir (Şekil 2.1(c)) [24]. F4-TCNQ molekülleri basit bir şekilde P3HT moleküllerinden gelen elektronları kabul ederek yük-transfer komplekslerini oluştururlar [25]. Yük-transfer

kompleksleri moleküler yönelimi hızlandırarak P3HT ve F4-TCNQ arasında güçlü bir elektrostatik kuvvet sağlamaktadır [26]. Polimerin iletkenliği F4-TCNQ ile arttırılabilir bu da MPY SBD yapısının elektriksel parametrelerini geliştirebilir. Diğer yandan F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun MPY SBD yapısının elektriksel özellikleri üzerine etkisini anlamak cihaz performansını denetlemek için önemli olabilir.

Bu tezde ilk olarak P3HT:PCBM arayüzey organik film tabakalı diyot üretilmiş, daha sonra F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik tabakalı MPY SBD yapısının elektriksel özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Arayüzey organik tabakalı farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip örnekler için geçerli olan akım-iletim mekanizmalarının anlaşılması MPY SBD cihazın performansını geliştirmek için oldukça önemlidir. Literatürde, şimdiye kadar hem Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapının elektriksel karakterizasyonu hem de F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun elektriksel özellikleri üzerine etkilerinin araştırıldığı herhangi bir çalışma yapılmamıştır. İlk kez bu tezde yapılan çalışmalar ile Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının elektriksel özelliklerine farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun diyotun elektriksel özelliklerine etkileri araştırılmıştır.



**Şekil 2.1.** (a) P3HT, (b) PCBM ve (c) F4-TCNQ kimyasal yapıları.

Akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik tabaka içerisinde F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının temel elektriksel parametrelerinin ayrıntılı olarak incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. SBD



performansının belirlenmesi için önemli elektriksel parametreler olan idealite faktörü ( $n$ ), bariyer yüksekliği ( $\Phi_{B0}$  ve  $\Phi_B$ ), seri direnç ( $R_s$ ), şant direnç ( $R_{sh}$ ), elektron mobilitesi ( $\mu_e$ ) ve arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ )  $I-V$  analizinden elde edilmiştir.

Frekansa bağlı kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega-V$ ) ölçümleri yine oda sıcaklığında ve karanlıkta incelenmiştir.  $C-V$  ölçümleri, incelenen numunenin  $I-V$  karakteristiklerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak seçilen en iyi numune üzerinden geniş bir voltaj aralığında (-7,0V - +7,0V) ve geniş bir frekans aralığında (10kHz - 2MHz) gerçekleştirilmiştir.  $C-V$  ölçümleri sonucunda, incelenen numunenin seri direnç ( $R_s$ ), difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), donör taşıyıcı yoğunluğu ( $N_D$ ), Fermi enerjisi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ), maksimum elektrik alan ( $E_m$ ), potansiyel bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ), Schottky engel alçalması ( $\Delta\Phi_B$ ) gibi temel parametreleri frekansa bağlı olarak elde edilmiştir.

## 2.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Poly(3-hexylthiophene) (P3HT), [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) ve 2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4-TCNQ) organik bileşikleri Sigma-Aldrich Company Ltd'den satın alınmıştır. P3HT (25mg/mL), PCBM (25mg/mL) ve F4-TCNQ (0.01mg/mL) çözeltileri ayrı ayrı klorobenzen içerisinde hazırlanarak 3 saat boyunca 60°C'de karıştırılmıştır. P3HT:PCBM çözeltisi P3HT ve PCBM kütlece 1:1 (10mg/mL:10mg/mL) oranında karıştırılarak elde edilmiştir.

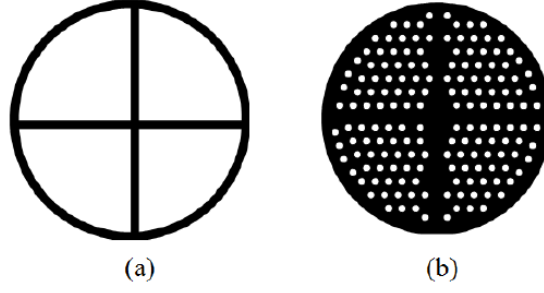
Daha sonra, %0 - 5 aralığında çeşitli F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip çözeltiler Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için hazırlanmış ve farklı konsantrasyonlarda F4-TCNQ, P3HT:PCBM çözeltisi içerisine ilave edilmiştir. Ardından karışım çözeltileri spin kaplamadan önce bir gece boyunca karıştırılmıştır. Bununla birlikte, F4-TCNQ katkılanması yapılmayan P3HT:PCBM (%0 için) karışım çözeltisi referans olması açısından üretilmiştir. Bu çalışmada F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun diyotun elektriksel parametreleri üzerine etkisinin net bir şekilde gözlemlendiği, %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip, üç farklı numune kullanılmıştır.

Farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD üretimi için n-tipi (Fosfor katkılı) <100> yönelime sahip tek kristal Si yapraklar alttaş olarak kullanılmıştır. Si yaprak kalınlığı  $350 \pm 25 \mu\text{m}$  ve öz direnci  $4,8 \Omega\text{cm}$  olup bir

tarafı fabrikasyon olarak parlatılmıştır. Si kristalinin temizlenmesi sırasında tüm işlemler ultrasonik banyo içerisinde gerçekleştirilmiş ve yüksek özdirençli (~18 MΩcm) deiyonize su kullanılmıştır. Si yapraklar, RCA olarak adlandırılan ve burada ayrıntılı olarak açıklanan bir kimyasal temizleme yöntemi ile temizlenmiştir. Si yapraklar önce eşit oranlarda kullanılan trikloretilen (C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>), aseton (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) ve metil alkol (CH<sub>3</sub>OH) karışımı içerisinde 3 dakika ultrasonik olarak temizlenmiştir. Daha sonra deiyonize suda 5 dakika kadar yıkanmıştır. Bu işlem, eşit oranlarda sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlenme ve tekrar deiyonize suda 5 dakika yıkanma ile devam etmiştir. Bu işlemin hemen sonrasında yine eşit oranlarda hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımı içerisinde 3 dakika yine ultrasonik olarak temizlenmiştir. Ardından sırasıyla nitrik asit (HNO<sub>3</sub>):hidroflorik asit (HF):hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) hacimce 3:1:5 oranında elde edilen karışımda 5 dakika ultrasonik olarak temizlenmiştir ve Si yapraklar 10 dakika ultrasonik olarak deiyonize suda yıkanmıştır. Son olarak Si yapraklar, kimyasal olarak temizlenmiş yüzeylerinde oksitlenme oluşması istenmediğinden kuru azot (N<sub>2</sub>) ile kurutulmuştur ve vakum ortamına alınmıştır.

Kimyasal olarak temizlenmiş Si yaprakların tüm arka yüzeyine (parlatma işlemi uygulanmamış yüzey) düşük özdirençli omik kontak oluşturulması için Şekil 2.2(a)'da gösterilen bakır maskeler vasıtasıyla,  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında, üzerinden akım geçirilen Tungsten flaman ile termal buharlaştırma sistemi kullanılarak,  $\sim 2500 \text{Å}$  kalınlığında ve %99,999 saflıktaki gümüş (Ag) metali buharlaştırılmıştır. Daha sonra Ag metalinin Si alttaşıyla iyi bir omik kontak oluşturması için N<sub>2</sub> akışı altında 30 dakika boyunca 450°C'de termal tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Omik temasın oluşmasından sonra n-Si yaprağın üzerinde oluşabilecek ince bir oksit tabakanın temizliği için ön yüzeyi %50 HF çözeltisi ile temizlenmiştir.

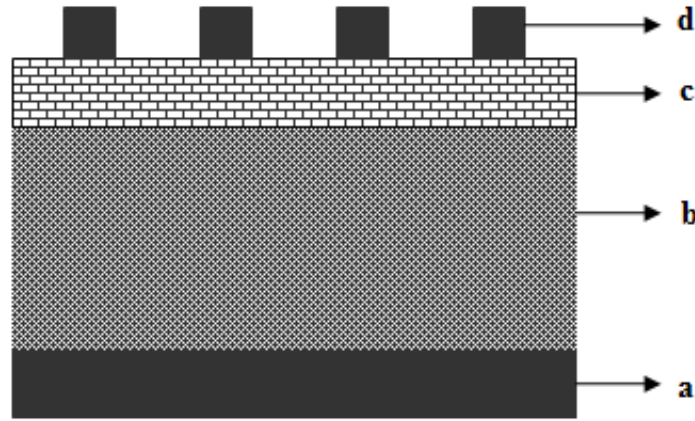
Bu işlemlerin ardından P3HT:PCBM:F4-TCNQ %1 ve %2 konsantrasyonlarında (%1 ve %2 F4-TCNQ polimer oranı) hazırlanmış çözeltileri ile F4-TCNQ katkısı olmaksızın hazırlanan (%0) çözeltilerin tamamı 1500rpm/s, 30s boyunca spin kaplama tekniğiyle n-Si üzerine  $\sim 1000 \text{Å}$  organik filmleri kaplanmıştır. Daha sonra kuru ve çözücüleri buharlaştırılmış numuneler sıcak bir plaka üzerinde 15 dakika boyunca 150°C tavlansmıştır.



**Şekil 2.2.** (a) Omik (b) doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır (Cu) maskeler.

Doğrultucu kontak oluşturmak için vakum sistemiyle elde edilen  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında, üzerinden akım geçirilen Tungsten flaman yardımıyla, %99,999 saflıktaki altın (Au) metali, bakır (Cu) maskeler yardımıyla 1mm çapında daireler şeklinde organik tabakaların üzerine buharlaştırılmıştır (Şekil2.2(b)). Dairesel biçimli Au kontaktların kalınlığı  $\sim 2500\text{Å}$  olarak dijital kuvars kristal kalınlık monitörü tarafından ölçülmüştür.

Burada her bir üretim aşaması ayrıntılı olarak açıklanan Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının şematik gösterimi Şekil 2.3’de verilmiştir.



**Şekil 2.3.** MPY SBD yapısının şematik gösterimi (a) Ag omik kontak ( $\sim 2500\text{Å}$ ) (b) n-Si yarıiletken ( $350 \pm 25\mu\text{m}$ ) (c) P3HT:PCBM:F4-TCNQ organik ara tabaka ( $\sim 1000\text{Å}$ ) (d) Au doğrultucu kontak ( $\sim 2500\text{Å}$ ).

### 2.3. KULLANILAN ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD yapısının farklı F4-TCNQ konsantrasyonları (%0, %1 ve %2) kullanılarak oda sıcaklığında ve karanlıkta gerçekleştirilen akım-voltaj ( $I-V$ ) karakteristikleri için Şekil 2.4’de gösterilen Keithley 4200 SCS marka akım-voltaj

kaynağı kullanılmıştır.

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (%1 F4-TCNQ katkılı) MPY SBD yapısının kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) ve iletkenlik voltaj ( $G/\omega-V$ ) karakteristikleri de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüştür. Bu ölçümler HP4192A LF empedans analizörü (Şekil 2.5) ile 10kHz - 2MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümlerini bilgisayara kaydetmek için bilgisayara bağlı IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart kullanılmıştır.



Şekil 2.4.  $I-V$  ölçümleri için kullanılan Keithley 4200 SCS akım-voltaj kaynağı.



Şekil 2.5.  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümleri için kullanılan HP4192A LF empedans analizörü.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. AKIM-VOLTAJ ( $I$ - $V$ ) KARAKTERİSTİKLERİ

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının doğru ve ters beslem akım-voltaj ( $\ln I$ - $V$ ) karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlıkta farklı F4-TCNQ konsantrasyonları (%0, %1 ve %2) için Şekil 3.1'de verilmiştir.

Schottky diyotlarda akım-voltaj ilişkisi  $V \geq 3kT/q$  için Termiyonik Emisyon (TE) Teorisine göre aşağıdaki şekilde verilir [1,2].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

ve

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Burada  $V$  diyota uygulanan gerilim  $R_s$  seri direnç,  $IR_s$  terimi diyotun seri direnç üzerine düşen voltajı,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklık,  $q$  elektron yükü ve  $n$  ise idealite faktörüdür. Ayrıca  $A$  diyotun doğrultucu kontak alanı,  $A^*$  etkin Richardson sabiti (n-tipi Si için değeri  $120 \text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  [1,27]),  $I_0$  ters doyum akımı ve  $\Phi_{B0}$  metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır beslem potansiyel engel yüksekliğidir ve değeri aşağıdaki eşitlikle elde edilir:

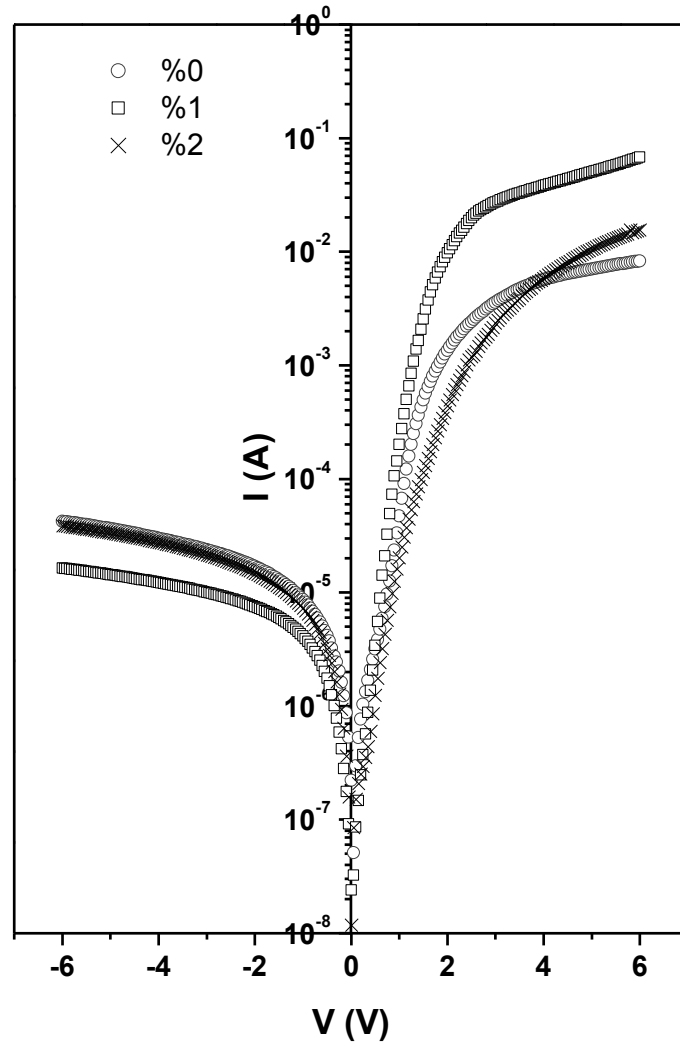
$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) \quad (3.3)$$

İdealite faktörü, TE Teorisine göre doğru beslem yarı-logaritmik  $I$ - $V$  karakteristiklerinin eğiminden Denklem (3.1) kullanılarak

$$n = \frac{q}{kT} \frac{d(V - IR_s)}{d(\ln I)} \quad (3.4)$$

ifadesi olarak tanımlanabilir.

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının doğru ve ters beslem akım-voltaj ( $\ln I$ - $V$ ) karakteristikleri için oda sıcaklığında ve karanlıkta farklı F4-TCNQ konsantrasyonlarına (%0, %1 ve %2) sahip numunelere -5,0V ile +5,0V arasında gerilim uygulanmıştır ve bu karakteristikler Şekil 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı doğru ve ters beslem akım-voltaj ( $I$ - $V$ ) karakteristikleri.

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi doğru beslem yarı-logaritmik  $\ln I-V$  eğrileri düşük voltaj bölgelerinde geniş bir alanda lineer olmasına rağmen yüksek voltaj bölgesinde diyotun arayüzey polimertabakasından ve seri direnç ( $R_s$ ) etkisinden dolayı lineerlikten sapmaktadır. Buna ek olarak farklı F4-TCNQ konsantrasyonlarının grafiklerin eğimini değiştirdiği dolayısıyla  $n$ , idealite faktörünü etkilediği görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.1'de bulunan bütün MPY SBD yapısının  $I-V$  karakteristikleri arayüzeyde bir potansiyel bariyerle iyi doğrultma özelliği sergilemişlerdir. Bu davranış Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD arayüzeyinde bir uzay yükü tabakasından oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Diyotların doğrultma davranışları, doğrultma oranlarının analizleri ile anlaşılır. Doğrultma oranı değerleri doğru ve ters beslemin sabit uç değerlerinde ( $\pm 5,0V$ ) akım değerlerinin oranı ile hesaplanmaktadır. Farklı F4-TCNQ konsantrasyonlarına sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için doğrultma oranları sırasıyla %0, %1 ve %2 için  $0,2 \times 10^3$ ,  $4,2 \times 10^3$  ve  $0,4 \times 10^3$  olarak hesaplanmıştır. Elektronik uygulamalar için önemli olan doğrultma oranı [28], %1 katkılı örneğimizde en yüksek değerde görülmektedir. Doğrultma oranları %2 F4-TCNQ katkılı diyot ile %1 F4-TCNQ katkılı diyot için kıyaslandığında %1 F4-TCNQ katkılı diyotun doğrultma oranının neredeyse 10 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Dahası katkısız yani %0 F4-TCNQ katkılı örneğimizle karşılaştırıldığında %1 F4-TCNQ katkılı örneğin 20 kat daha doğrultma özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Farklı katkılı yapılar ( $\%0$ , %1 ve %2 F4-TCNQ) hazırlanan yapıların morfolojik özelliklerinin SBD özelliklerini etkileyerek bu duruma yol açtığı söylenebilir. Literatürde yapılan çalışmalarda F4-TCNQ katkı konsantrasyonundaki artışın yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı gözlenmiştir [24]. Bu bağlamda daha yüksek yani %2 F4-TCNQ katkılı diyot, %1 F4-TCNQ katkılı diyot ile kıyaslandığında daha pürüzlü yapısından dolayı daha düşük doğrultma oranına sahip olduğu söylenebilir.

F4-TCNQ katkısının farklı konsantrasyonları için Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının TE teorisine göre  $\Phi_{B0}$  ve  $n$  değerleri  $\ln I-V$  karakteristiklerinden (Şekil 3.1) grafiğin doğru beslem bölgesinde fit edilmesiyle elde edilen lineer doğrunun eğimi ve  $y$ -ksenini kestiği nokta kullanılarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak MPY SBD için  $I_0$  değerleri Denklem (3.2) kullanılarak  $\ln I-V$  grafiğinde doğru beslem bölgesinde lineer doğrunun  $V=0$  değerinde  $y$ -ksenini kestiği noktadan elde edilmiştir. Hesaplanan

$\Phi_{B0}$ ,  $n$  ve  $I_0$  değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip (%0, %1 ve %2) Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri.

F4-TCNQ Katkı Konsantrasyonu	$\ln I$ - $V$			$H(I)$ - $I$		$dV/d(\ln I)$ - $I$		$F(V)$ - $V$	
	$n$	$I_0$ (A)	$\Phi_{B0}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_{B0}$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$n$	$\Phi_B$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )
%0	7,53	$1,18 \times 10^{-8}$	0,77	380,5	0,76	380,5	8,73	0,81	393,99
%1	4,70	$1,16 \times 10^{-7}$	0,71	46,9	0,72	44,3	6,68	0,77	54,39
%2	6,49	$2,08 \times 10^{-8}$	0,75	183,4	0,74	183,7	7,72	0,79	157,91

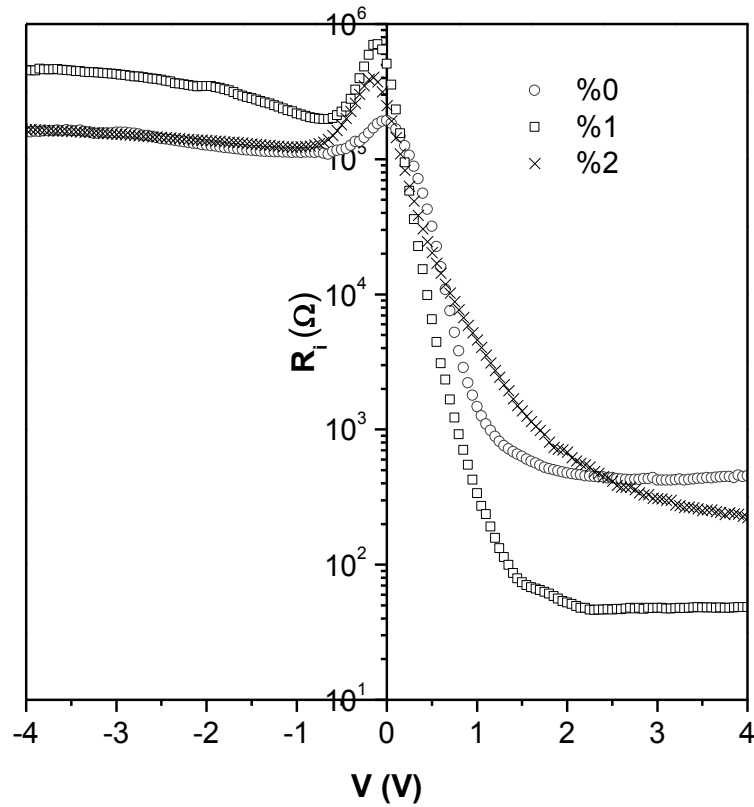
Çizelge 3.1'de diyot parametreleri olan  $\Phi_{B0}$ ,  $n$  ve  $I_0$  üzerinde F4-TCNQ katkılamının etkisi açıkça görülmektedir. Çizelge 3.1'de bulunan idealite faktörü olan  $n$  değerlerinin yüksek çıkması metal/polimer (M/P) arayüzeyindeki yüksek arayüzey durum yoğunluğuna, yüksek  $R_s$  değerlerine, homojen olmayan bariyer etkisine, elektron ve deşiklerin deplasyon bölgesinde rekombinasyonuna ve tünellemenin varlığına atfedilmektedir [29,30]. Yine Çizelge 3.1'de bariyer yüksekliği değerlerine bakıldığında %1 F4-TCNQ katkılı olduğu durum ile katkısız durum yani %0 F4-TCNQ kıyaslandığında 0,77eV olan bariyer yüksekliğinin katkılama ile 0,71eV değerine düştüğü fakat %2 F4-TCNQ katkılanmış durum ile katkısız %0 F4-TCNQ kıyaslandığında sonucun hemen hemen değişmediği görülmektedir. P3HT:PCBM:F4-TCNQ organik karışımındaki farklı konsantrasyonlarda bulunan F4-TCNQ, Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının arayüzeyindeki elektriksel parametreleri değiştirerek uzay yükü bölgesini etkilemektedir ve  $\Phi_{B0}$  değerinin değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca %1 F4-TCNQ konsantrasyonunda elektronların kolay geçiş sağlamasından dolayı daha düşük bariyer yüksekliğine sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca sonuçlar göstermektedir ki katkısız yani %0 F4-TCNQ verileriyle %1 F4-TCNQ katkılı numuneye ait verilere bakıldığında  $n$  ve  $\Phi_{B0}$  değerlerindeki düşüşün yanı sıra  $I_0$  değeri yaklaşık 10 kat artışa sahiptir. Ancak yüksek katkılı %2 F4-TCNQ ile düşük katkılı %1 F4-TCNQ karşılaştırıldığında  $n$  ve  $\Phi_{B0}$  değerleri yüksek katkılı durumda artış göstermekte  $I_0$  değeri ise azalmaktadır. Yani düşük katkılı (%1) durumda elektriksel parametrelerin diyot uygulamaları için daha uygun sonuçlar verirken, yüksek katkılı durumda (%2) parametrelerin ideal değerlerinden uzaklaştığı görülmektedir. Yüksek katkılama durumlarında genellikle elektriksel



parametrelerde zayıflama görülmektedir ve yüksek katkılı durumun yüzey pürüzlülüğünü artırarak bu duruma yol açtığı söylenebilir [24].

SBD yapılarında seri direnç  $R_s$  ve şant direnç  $R_{sh}$  diyotun  $I$ - $V$  karakteristiklerini etkilemektedir ve SBD için  $R_s$  ve  $R_{sh}$  diyotun performansının belirlenmesinde oldukça önemlidir. İdeal diyotlarda  $R_s$  değerini çok düşük ( $\approx 0\Omega$ ) beklenirken  $R_{sh}$  değeri çok yüksek ( $M\Omega$ ) beklenmektedir.  $R_{sh} = \left. \frac{\partial V}{\partial I} \right|_{V=0}$  hesaplanırken orijindeki dinamik direnç

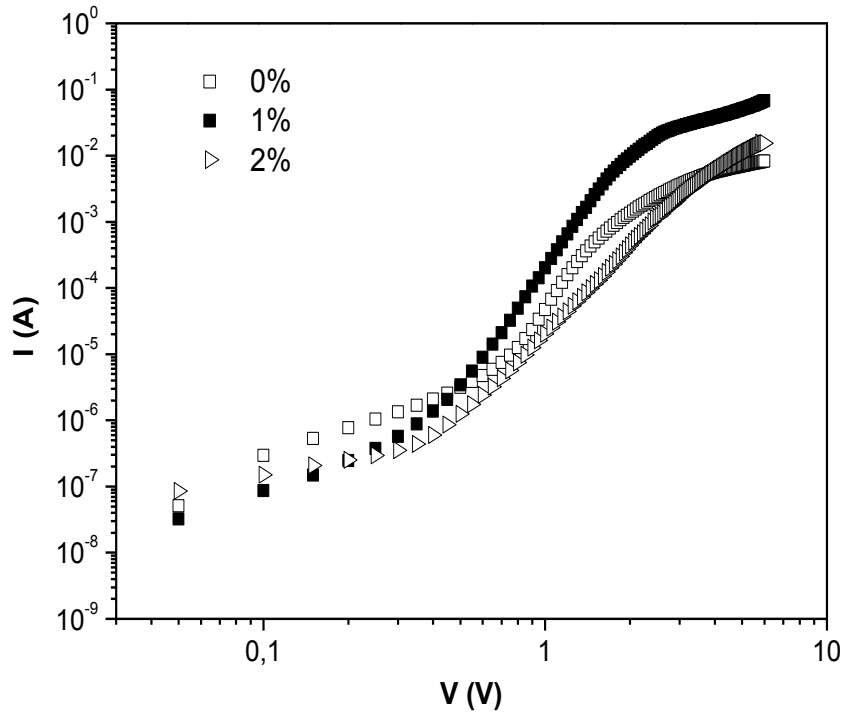
olarak tanımlanır [31].  $R_{sh}$  akımdaki sızıntıyı göstermektedir. SBD yapısının direnci ( $R_i$ ), ters beslem ve doğru beslemde tanımlanmaktadır. İdeal diyotlarda doğru beslemde  $R_i = (\partial V / \partial I)$  değeri sıfıra yaklaşmaktadır. Ancak deplasyon bölgesinde taşıyıcıların rekombinasyonu ve mükemmel olmayan omik kontaklar bu durumu etkilemektedir. Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ /n-Si (MPY) SBD yapısının F4-TCNQ katkılanmasına bağlı  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri Şekil 3.2'de görülen  $R_i$ - $V$  grafiğinden hesaplanmaktadır.



**Şekil 3.2.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0,%1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı diyot direncinin voltaja bağlı değişimi.

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi sırasıyla %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkıli numunelerin  $R_s$  değerleri 427,1 $\Omega$ , 46,1 $\Omega$  ve 197,4 $\Omega$ ,  $R_{sh}$  değerleri ise 0,2M $\Omega$ , 0,7M $\Omega$  ve 0,4M $\Omega$  olarak bulunmuştur. Bu verilerden de anlaşılacağı gibi en ideale yakın diyot, diğerlerine kıyasla elektronik aygıt için en uygun  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerleri ile %1 F4-TCNQ katkıli olan diyot olduğu görülmektedir.  $R_s$  değerindeki azalma ve  $R_{sh}$  değerindeki artış durumu katkılama ile  $\Phi_{B0}$ ,  $n$  ve  $I_0$  değerlerinde gözlenen değişim ile oldukça uyumludur. Bu durum uygulanan voltajla birlikte organik arayüzey tabakasındaki katkılamanın  $R_s$  ve  $R_{sh}$  değerlerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılabilir. Ancak yüksek katkıli durumda (%2)  $R_s$  değerindeki artış göze çarpmaktadır. Bunun nedeni artan katkı konsantrasyonu ile birlikte aktif tabaka ile anot arasında yalıtkan bir tabaka oluşmasından kaynaklanmış olabilir.

Doğru beslemede çift logaritmik  $I-V$  karakteristiklerinin analizi hangi akım iletim mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 3.3, Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının F4-TCNQ konsantrasyonuna bağlı (%0, %1 ve %2), oda sıcaklığında ve karanlıkta çift logaritmik  $I-V$  karakteristiklerini göstermektedir.



**Şekil 3.3.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0,%1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı doğru beslem çift logaritmik akım-voltaj ( $I-V$ ) karakteristikleri.

Şekil 3.3'de F4-TCNQ konsantrasyonuna bağlı olarak farklı akım-iletim mekanizmalarını temsil eden 3 bölgenin varlığından sözedilebilir. Her bir bölgenin ayrı ayrı her bir numune için farklı eğimleri vardır. Bu bölgelerde  $I\alpha V^m$  oranıtısı söz konusudur ve burada  $m$  bulunduğu bölgenin eğimini temsil etmektedir ve akım-iletim mekanizmasını tanımlar [32,33].

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi düşük voltaj bölgesinde ( $<0,3V$ ) akım gerilimle doğru orantılıdır ( $I\alpha V$ ). Uygulanan voltajla akım değeriindeki artış hızlı bir şekilde eşik voltaj ( $V_{th}$ ) değerine ulaşılmasını sağlar. Bütün numuneler için  $0,3V$  ile  $2,0V$  arasında uygulanan voltaj ile akımın değıştiğı bölgede  $I\alpha V^m$  ve  $m>2$  oranıtısı bulunmaktadır. Bu nedenle bütün numunelerde  $0,3V - 2,0V$  arasındaki orta voltaj bölgesi değeriinde tuzak kontrollü sınırlandırılmış serbest uzay yükü bölgesi akımı (SCLC) akım-iletim mekanizması baskındır [34]. Uygulanan gerilim yeterince yüksek olduğunda ( $>2,0V$ ), eğim tüm numuneler için 2'ye yakın değerler alır ( $I\alpha V^2$ ) ve bu durum tuzaksız kare kuvveti yasası bölgesine işaret eder;  $m>2$  olduğunda ise bu durum tuzakların dolu olduğu limit (trap-filled-limit) (TFL) bölgesine karşılık gelir. Artan voltajla Fermi seviyesi elektron tuzaklama seviyesinin üstüne çıkar ve bu enjekte olmuş serbest taşıyıcıların yoğunluğunu artırır [35]. TFL tuzaklanmış  $I-V$  karakteristiklerinden tuzaksız  $I-V$  karakteristiklerine geçiş için olan durumdur. Tüm tuzaklar dolduktan sonra enjekte olmuş taşıyıcıların organik filmlere doğru geçiş yapacağı ve böylece akımın SCLC akımına doğru hızlıca artacağı tasavvur edilebilir.

Şekil 3.3'de görülebileceği gibi  $0,3V - 2,0V$  aralığında en yüksek  $m$  değerine %1 F4-TCNQ katkılı diyot sahiptir. Bu durum polimer içerisindeki taşıyıcıların difüzyonuna ve yüksek hareketliliğe yol açabilir ve Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için %1 F4-TCNQ katkılamanın polimer filmin düzensizliğini azaltmasına atfedilebilir [36]. Şekil 3.3'de verilen grafik SCLC akım-iletim mekanizmasıyla modellenerek orta voltaj bölgesinde,  $0,3V - 2,0V$  aralığında, Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının  $\ln I - \ln V$  karakteristiklerinden elektron mobilitesinin hesabı için akım ifadesi aşağıdaki ifade ile verilir [32].

$$I = \frac{9}{8} \epsilon_0 \epsilon_s \mu_e \frac{A}{d^3} V^2 \quad (3.5)$$

Burada  $\epsilon_0$  serbest uzayın dielektrik sabiti,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti  $d$  arayüzey organik tabakanın kalınlığı,  $\mu_e$  ise arayüzey organik tabakadaki elektronun mobilitesidir. Elektronun mobilitesi Denklem (3.5) yardımıyla hesaplanmıştır ve sırasıyla %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkılı numunler için değerleri  $3,88 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $6,71 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  ve  $6,07 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Bu mobilite değerleri ile diğer organik yarıiletkenler karşılaştırıldığında oldukça uyumlu değerlere sahip olduğu görülmektedir [37,38]. Bu sonuçlara göre F4-TCNQ katkılanmamış diyotun mobilitesi  $3,88 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  iken arayüzeyin %1 F4-TCNQ ile katkılanması sonucunda mobilite  $6,71 \times 10^{-5} \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  değerine yükselmiştir. Bu durum, düşük (%1) F4-TCNQ katkılanması ile taşıyıcıların hareketliliğinde önemli bir artış olabileceğini göstermiştir. Bu artış, düşük F4-TCNQ katkılanmanın P3HT zincirlerinin molekül konumlandırmasını etkileyerek kristal düzenini arttırmasıyla açıklanabilir [39]. Diğer taraftan, %2 F4-TCNQ katkılanmış durum %1 F4-TCNQ katkılanmış durum ile kıyaslandığında mobilite değerinde meydana gelen düşüş  $R_s$  değerindeki artışa benzer şekilde iletkenlikteki düşüş durumu ile açıklanabilir.

Şekil 3.1'de diyotların F4-TCNQ konsantrasyonuna (%0, %1 ve %2) bağlı  $\ln I$ - $V$  karakteristikleri göz önüne alındığında her bir numune için lineer tek bir bölgeden TE teorisine göre temel diyot parametreleri elde edilmiştir. Bu lineer bölge, seri direnç ( $R_s$ ) etkisi, organik arayüzey tabakası ve arayüzey durumlarından dolayı oldukça sınırlı bir bölge halini almaktadır. Düşük voltaj bölgesinde yeniden birleşmenin katkısı ve yüksek voltaj bölgesinde seri direnç etkisinden dolayı diyotun üzerine düşmesi gereken gerilim seri direnç üzerine düşeceğinden lineerlik bozulduğundan bu aralıkta TE teorisine göre bulunan  $\Phi_B$  ve  $n$  değerleri tek başına geçerli olmayacaktır. Bu tezde  $R_s$ ,  $\Phi_B$  ve  $n$  değerleri için farklı bir karakterizasyon tekniği olan Cheung-Cheung metodu kullanılmıştır [40]. Schottky diyot için yeterince büyük doğru beslem değerlerinde ( $V > 3kT/q$ ) Cheung fonksiyonları aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmaktadır [36]:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (3.6)$$

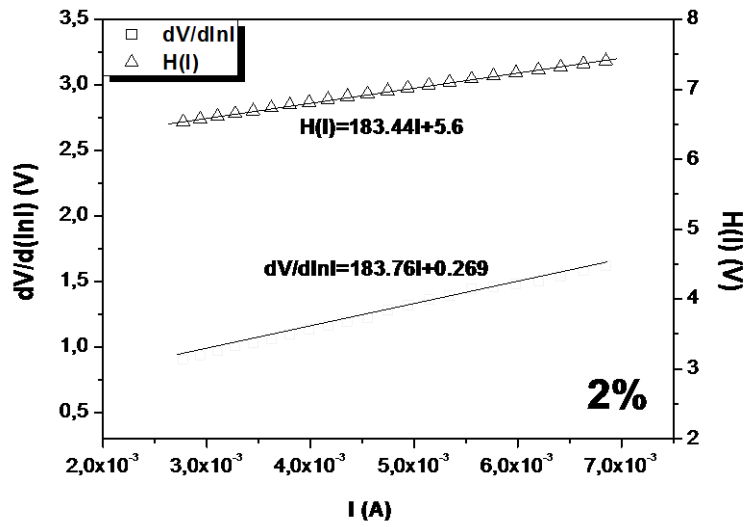
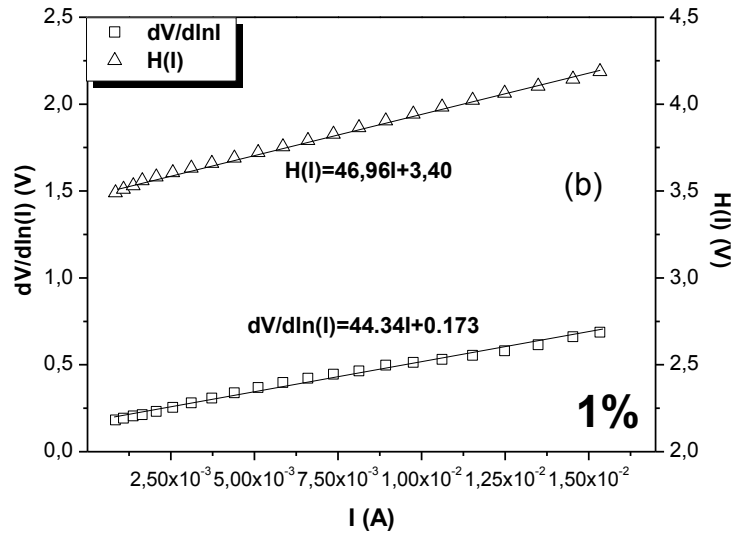
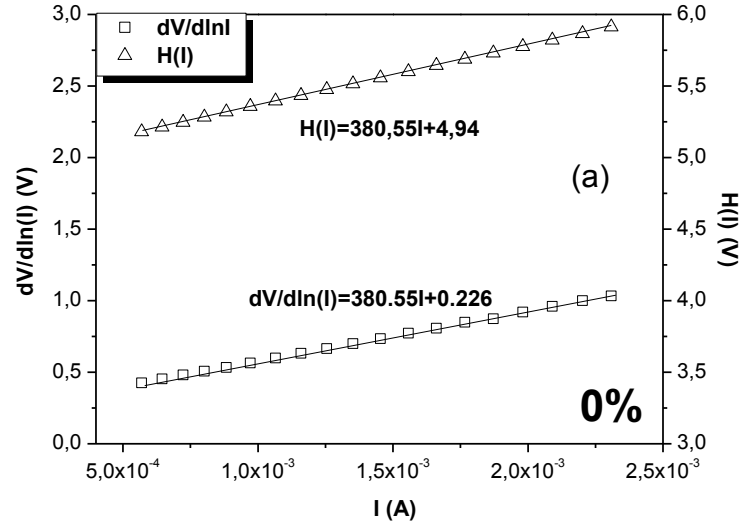
$$H(I) = V - \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.7)$$

ve

$$H(I) = IR_s + n\Phi_B \quad (3.8)$$

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için oda sıcaklığında ve karanlıkta F4-TCNQ konsantrasyonuna bağlı iki eksenli  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri Şekil 3.4 (a), (b) ve (c) için sırasıyla %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkılanmış durum için ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 3.4'de, Denklem (3.6) ve Denklem (3.8) ile hesaplanan doğru beslem  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  lineer davranış sergileyen grafikleri görülmektedir.

Denklem (3.7) ifadesine göre  $dV/d(\ln I)$ - $I$  grafiğinde lineer bölgenin eğimi  $R_s$  değerini, koordinat ekseninde  $y$ -eksenini kestiği nokta ise  $n$  değerini vermektedir. Bununla birlikte bu yaklaşımın uyumluluğu için  $R_s$  değeri  $H(I)$ - $I$  grafiğinin eğiminden ayrıca hesaplanmıştır.  $\Phi_{B0}$  değeri ise yine  $H(I)$ - $I$  grafiği ile Denklem (3.6)'dan bulunan  $n$  değeri yardımıyla Denklem (3.8)'den hesaplanmıştır.  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiklerinin analizinden elde edilen  $R_s$ ,  $n$  ve  $\Phi_{B0}$  değerleri %0, %1 ve %2 F4-TCNQ konsantrasyonlarında hazırlanan MPY diyot için ayrı ayrı Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelge 3.1'de idealite faktörü  $n$  değerleri dikkate alınırsa  $dV/d(\ln I)$ - $I$  hesabından bulunan değerler  $\ln I$ - $V$  grafiğinden hesaplanan değerden farklılık gösterdiği göze çarpmaktadır. Doğru beslem  $\ln I$ - $V$  grafiğinden bulunan değerler  $dV/d(\ln I)$ - $I$  grafiği ve Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunan  $n$  değerlerinden daha düşüktür. Arayüzey dipolleri, üretim kaynaklı bozukluklar, arayüzeyde P3HT:PCBM:F4-TCNQ organik tabakanın varlığı bu idealite faktörünün farklılığına neden olabilir [41]. Çizelge 3.1'de görüleceği gibi Cheung fonksiyonlarından elde edilen  $R_s$  değerleri hemen hemen aynıdır ve bu durum Cheung fonksiyonlarının tutarlılığını göstermektedir. Dahası F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı olarak Cheung fonksiyonları yardımıyla hesaplanan  $\Phi_{B0}$  değerlerinin yine  $I$ - $V$  karakteristiklerinden TE teorisine göre hesaplanan  $\Phi_{B0}$  değerleri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_{B0}$  değerleri P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik tabakasında F4-TCNQ konsantrasyonuna bağlılığı önem arz etmektedir. Cheung fonksiyonlarına göre yine en iyi diyot özelliği gösteren düşük  $n$ , düşük  $R_s$  ve düşük  $\Phi_{B0}$  değerleri ile %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip numune olmuştur.

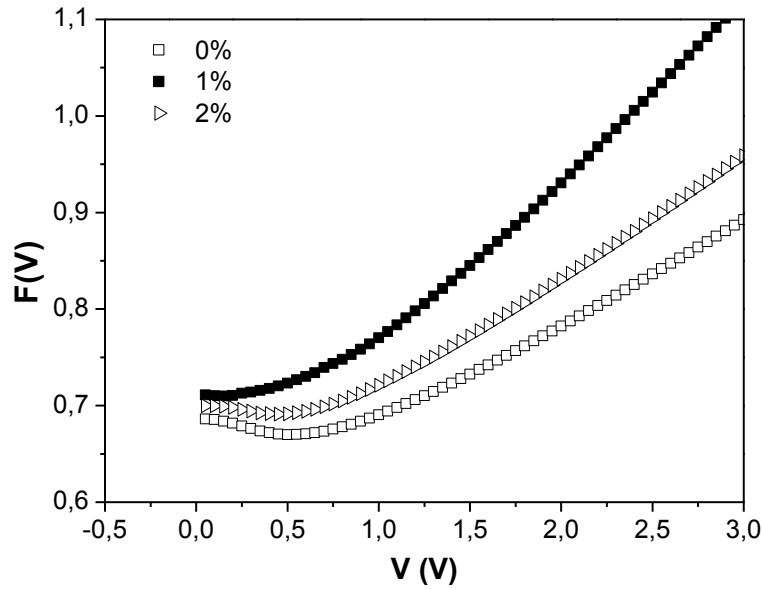


**Şekil 3.4.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının (a) %0, (b) %1 ve (c) %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı iki eksenli  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri.

Seri direnç etkisi ve idealite faktörünün birden farklı ( $n>1$ ) olması durumunda seri direnç hesabı ve bariyer yüksekliğinin doğru değerlendirilebilmesi için Norde metodu kullanılabilir [42]:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (3.9)$$

Burada  $\gamma$ ,  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü,  $n$ , değerinden büyük ilk tamsayı olan keyfi bir sabittir ( $1 < n < \gamma$ ). Norde metodu ile Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı eklem parametreleri olan  $\Phi_B$  ve  $R_s$  değerleri hesaplanmıştır. Denklem (3.9) kullanılarak elde edilen  $F(V)$ - $V$  grafiği Şekil 3.5'de verilmiştir.



**Şekil 3.5.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı  $F(V)$ - $V$  eğrileri.

Norde metodu kullanılarak bariyer yüksekliği  $\Phi_B$  değeri ise aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır:

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (3.10)$$

Burada  $F(V_0)$ ,  $F(V)$ 'nin en küçük değeridir ve  $V_0$ , grafikte  $F(V_0)$ 'a karşılık gelen voltaj değeridir. Norde metoduna göre  $R_s$  değerinin ifadesi:

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (3.11)$$

şeklindedir. Burada  $I_0$  ile verilen akım değeri  $F(V_0)$  değeri ile bulunan  $V_0$  değerine karşılık gelen akım değeridir. Denklem (3.11)'de verilen yaklaşım yalnızca yüksek  $R_s$  değerleri için geçerlidir [43]. Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı ölçümlerin Norde metodu ile hesaplanan  $\Phi_B$  ve  $R_s$  değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Cheung fonksiyonlarından bulunan  $\Phi_B$  ve  $R_s$  değerlerinin Norde metodu ile bulunan değerlerle gayet uyumlu olduğu Çizelge 3.1'de görülmektedir. Diğer yandan  $R_s$  değerlerinin  $I$ - $V$  metodu ile bulunan değerlerden daha yüksek olduğu farkedilmelidir. Bu Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için seri direncin bir akım sınırlayıcı olduğu anlamına gelmektedir.  $R_s$ 'nin etkisi genellikle diyotun ve direncin seri bağlı hali ile modellenir ve diyot boyunca olan voltaj düşmesi, diyot ve direnç boyunca olan toplam voltaj düşmesi cinsinden belirlenir [44]. Ayrıca tüm numuneler için Norde fonksiyonlarından elde edilen  $\Phi_B$  değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilenlerden biraz daha yüksektir. Bu durum Cheung fonksiyonları diyotun  $\ln I$ - $V$  karakteristiklerinin yalnızca yüksek voltaj bölgesinde uygulanırken Norde fonksiyonlarının tüm doğru beslem bölgesinde uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Norde metodu bir kez daha F4-TCNQ katkı konsantrasyonu SBD yapısına ait  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_B$  değerlerini değiştirecek etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Burada Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısında P3HT:PCBM arayüzey organik tabakasının F4-TCNQ katkı konsantrasyonunu uzay yükü bölgesini etkileyerek bariyer yüksekliğini değiştirmektedir.

Arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) MPY SBD kalitesinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Daha önce hiçbir çalışmada F4-TCNQ konsantrasyonunun Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının arayüzey durumlarına etkisi araştırılmamıştır. Arayüzey durum yoğunluğu için idealite faktörünün voltaja bağlı değerleri ( $n(V)$ ) [30]:



$$n(V) = \frac{q}{kT} \frac{(V - IR_s)}{\ln(I/I_0)} \quad (3.12)$$

olmak üzere

$$n(V) = 1 + \frac{d}{\varepsilon_i} \left[ \frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir [30,45]. Burada  $\varepsilon_i$  ( $=3,8\varepsilon_0$ ) ve  $\varepsilon_s$  ( $=11,8\varepsilon_0$ ) sırasıyla arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri,  $d$  arayüzey organik tabakanın kalınlığı ve  $W_D$  uzay yükü bölgesinin genişliğidir. Denklem (3.13) kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu  $N_{ss}$  aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[ \frac{\varepsilon_i}{d} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (3.14)$$

Arayüzey durumlarının enerjisi n-tipi yarıiletkenler için  $E_{ss}$  ve yarıiletkenin yüzeyinin iletim bandının alt ucu arasındaki enerji farkı [30]:

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (3.15)$$

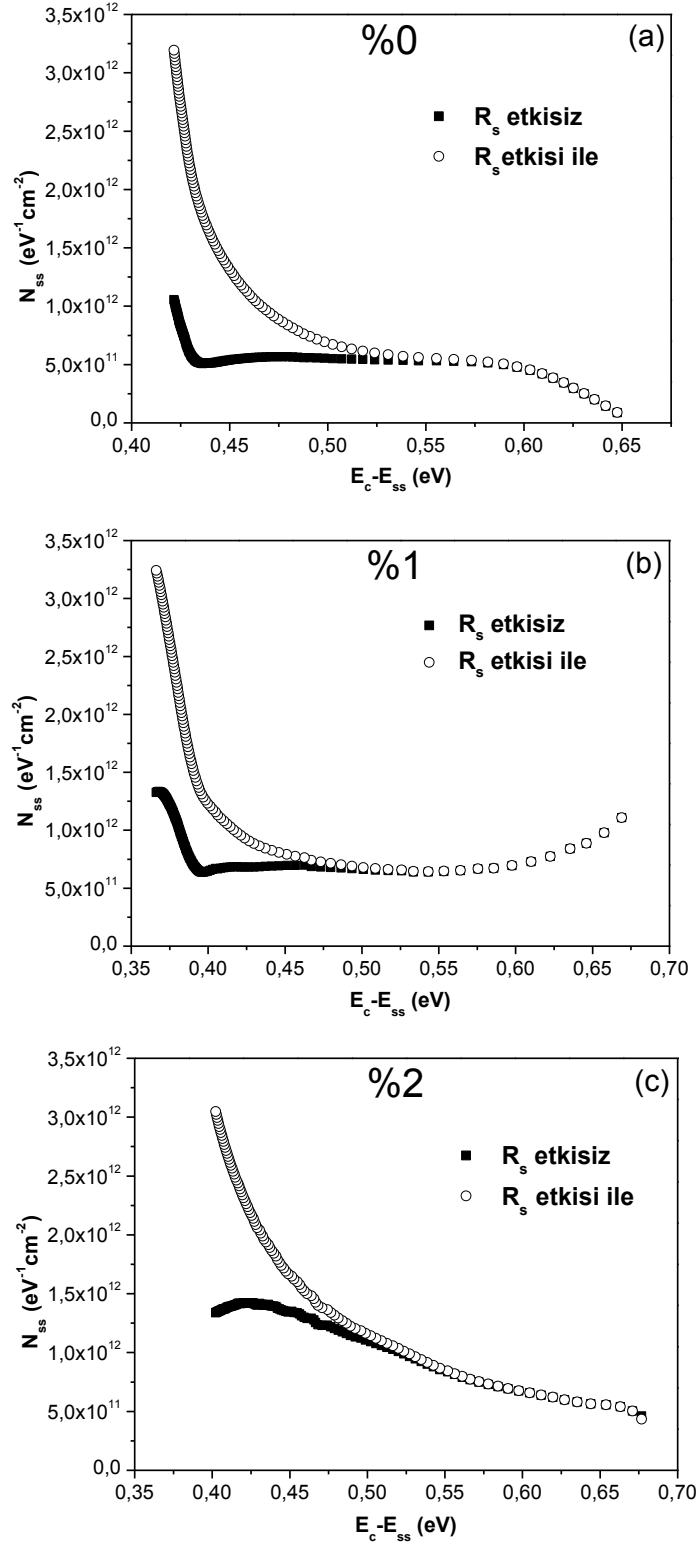
şeklinde verilir. Burada  $\Phi_e$  etkin bariyer yüksekliğidir. Voltaja bağlı  $\Phi_e$  etkin bariyer yüksekliği, voltaja bağlı idealite faktörü  $n(V)$  ile şu şekilde ifade edilir:

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \beta(V - IR_s) = \Phi_{B0} + \left( 1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V - IR_s) \quad (3.16)$$

Engel yüksekliğinin uygulanan voltaja bağımlılığı göz önüne alınarak burada  $\beta$  engel yüksekliğinin voltaj ile değişim katsayısıdır.

%0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkılı diyotlar için Denklem (3.14)'den hesaplanan arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ), Denklem (3.15)'den hesaplanan arayüzey durumlarının enerjilerine karşı ( $E_c - E_{ss}$ ) grafiği Şekil 3.6'da seri direnç ( $R_s$ ) etkisi dikkate alınarak ve

seri direnç etkisi ihmal edilerek verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının (a) %0, (b) %1 ve (c) %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) arayüzey durum enerjilerine ( $E_c - E_{ss}$ ) karşı grafikleri.

Şekil 3.6'dan arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımı %0 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip diyot için  $E_c-0,42\text{eV}$  ile  $E_c-0,65\text{eV}$  aralığında, %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip diyot için  $E_c-0,36\text{eV}$  ile  $E_c-0,67\text{eV}$  aralığında, %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip diyot için  $E_c-0,40\text{eV}$  ile  $E_c-0,68\text{eV}$  aralığında bulunmuştur. Ek olarak, sonuçlar  $N_{ss}$  yoğunluğunun kuvvetlice uygulanan voltaja bağlı olduğunu ve Si bant boşluğundaki bir konuma karşılık gelecek şekilde uygulanan voltajdaki artışla birlikte arttığını göstermektedir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi  $R_s$  etkisi dikkate alınmadığında, %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip diyotlar için  $N_{ss}$  değerleri daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar bize  $N_{ss}$  hesabı yapılırken  $R_s$  etkisinin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı,  $E_c-0,45\text{eV}$  enerjisindeki,  $N_{ss}$  değerlerinin büyüklükleri sırasıyla %0, %1 ve %2 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu için  $1,4 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ,  $7,5 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  ve  $1,7 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  olarak bulunmuştur. Buradaki  $N_{ss}$  değerleri dikkate alındığında %1 F4-TCNQ katkılı diyot ile katkısız (%0 F4-TCNQ) diyot karşılaştırıldığında %1 F4-TCNQ katkılı diyotun  $N_{ss}$  değerinin iki kat daha düşük olduğu görülmektedir. %1 F4-TCNQ katkılı Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının  $N_{ss}$  değerindeki bu düşüş metal-polimer arayüzeyindeki düşük bariyer yüksekliği ve yük taşıyıcılarının hareketliliğinin (mobilitésinin) yüksek olmasından kaynaklanıyor olabilir. Diğer yandan yüksek katkılı durumda (%2 F4-TCNQ katkılı durumda)  $N_{ss}$  değerindeki artışın sebebi M/Y arayüzeyinde taşıyıcı enjeksiyonu ve iletkenliği azaltan ek tuzakların (traps) oluşmasıdır.

*I-V* karakteristiklerinden elde edilen sonuçlar farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı ile Ref. [46]'da verilen Au/n-Si (MY) SBD yapısı ile karşılaştırıldığında P3HT:PCBM:F4-TCNQ organik arayüzey tabakanın MPY SBD yapısının diyot özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

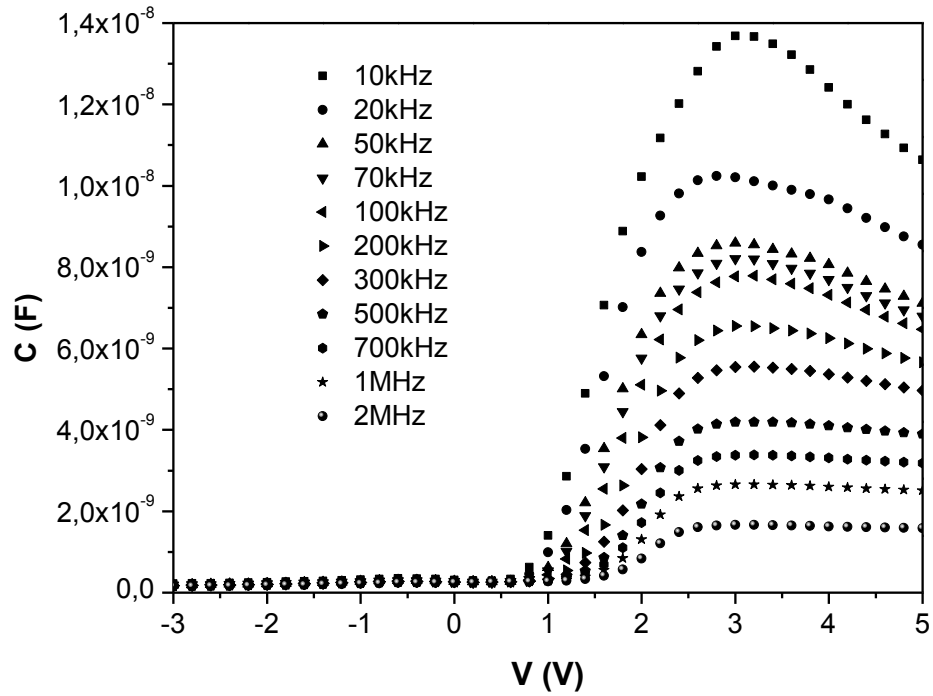
Sonuçlar bir kez daha arayüzey organik tabakadaki F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun MPY SBD yapısının özelliklerini etkilediğini göstermektedir. Ayrıca P3HT:PCBM organik karışımında düşük F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun (%1) idealite faktörünü düşürerek, seri direnci azaltarak, bariyer yüksekliğini düşürerek, mobilitéyi arttırarak ve arayüzey durum yoğunluğunu azaltarak Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının kalitesini arttırdığı sonucuna varılabilir.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu kullanılması durumunda Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için en iyi temel elektriksel parametreler elde edilmiştir. Bu durum, F4-TCNQ için en ideal katkılama oranının %1 olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, tezin bundan sonraki bölümünde incelenecek olan kapasitans ( $C$ ) ve iletkenlik ( $G/\omega$ ) analizlerinde sadece %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı kullanılmıştır.

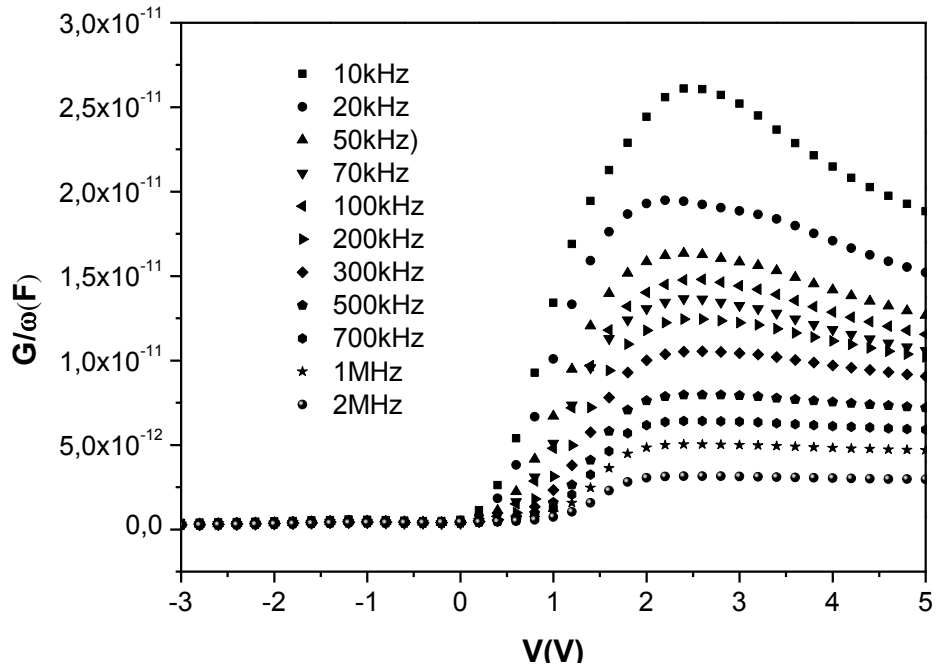
### **3.2. KAPASİTANS-VOLTAJ ( $C-V$ ) ve İLETKENLİK-VOLTAJ ( $G/\omega-V$ ) KARAKTERİSTİKLERİ**

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega-V$ ) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta HP4192A LF empedans analizörü ile geniş bir voltaj (-7,0V - +7,0V) ve geniş bir frekans (10kHz - 2MHz) aralığında gerçekleştirilmiştir. Frekansa bağlı yapılan  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümleri kullanılan diyotun elektriksel özellikleri hakkında önemli bilgiler vermektedir ve bununla ilgili literatürde farklı çalışmalar mevcuttur [47,48]. Bununla birlikte bu çalışma ile ilk kez Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümleri ayrıntılı olarak analiz edilmektedir.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının 10kHz - 2MHz frekans aralığında  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  grafikleri sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı C-V karakteristikleri.



**Şekil 3.8.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı G/omega-V karakteristikleri.

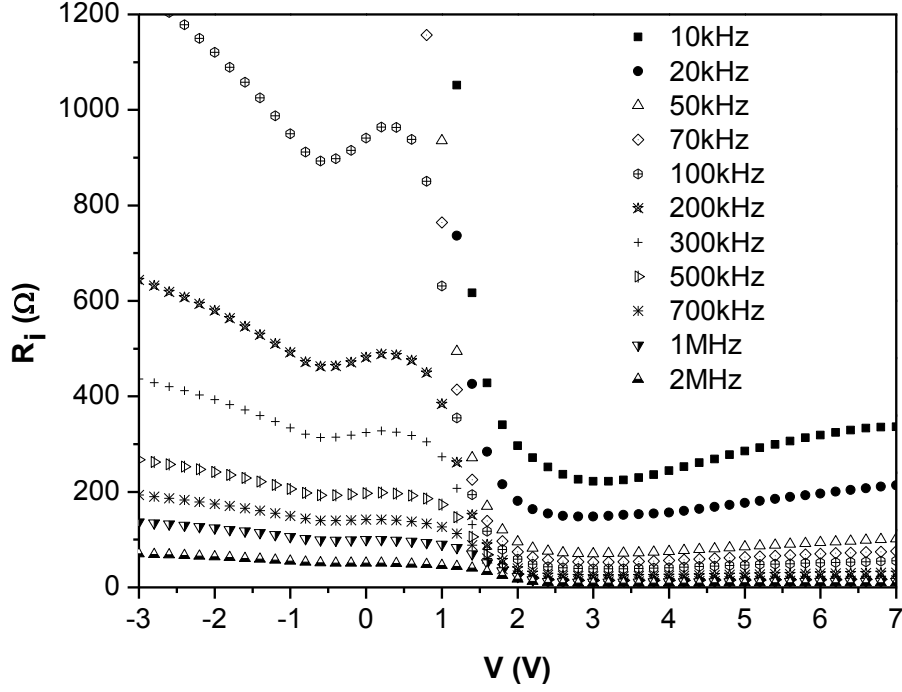
Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den ters beslem bölgesinde ( $-3,0V < V < 0$ )  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerinde hemen hemen hiç değişim olmadığı yani uygulanan gerilim bu bölgede  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerini etkilemediği görülmektedir. Ayrıca tükenim ve yığılma bölgesinde  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerinin frekansa bağlılığı Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'den açıkça görülmektedir. Bu bölgelerde  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerinin artan frekansla azalması arayüzey durumlarına atfedilmektedir [49,50]. Yüksek frekanslarda  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerinin voltaja bağlı eğrileri  $T = 1/\omega$  periyoduna sahip olacaktır ve bu süre artan frekansla daha da azalacağından arayüzey durumundaki taşıyıcılar a.c. sinyalini takip edemeyeceklerdir. Bu yüzden kapasitans ve iletkenlik değerleri incelenirken frekansa bağlı ölçümlerin yapılması oldukça önemlidir.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $C$  ve  $G/\omega$  değerleri kullanılarak  $R_s$  değerleri hesaplanırken aşağıdaki denklem kullanılmıştır [48,49]:

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3.17)$$

Burada  $G_m$  ve  $C_m$  değerleri güçlü yığılma bölgesinde ölçülen sırasıyla iletkenlik ve kapasitans değerleri  $\omega$  ise açısal frekans değeridir.

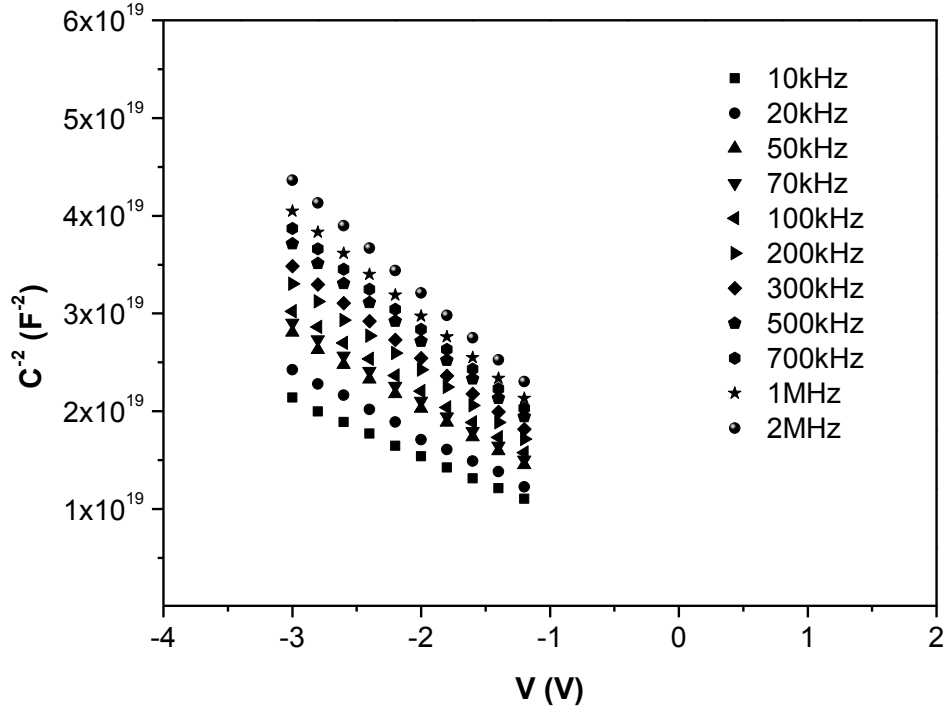
Şekil 3.9'da %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $C$  ve  $G/\omega$  değerleri kullanılarak seri direnç ( $R_s$ ) değerleri bulunmuş ve bu değerlerin uygulanan voltaja bağlı değişimi verilmiştir.



**Şekil 3.9.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $R_s$ - $V$  karakteristikleri.

Şekil 3.9'da açıkça görülmektedir ki özellikle düşük frekanslarda, arayüzey durumlarından kaynaklı  $R_s$  değerlerinde pik şiddetleri oldukça büyüktür [48,49]. Frekans değeri artıkça piklerin şiddeti azalmakta hatta 500kHz değerinden sonra pikler hemen hemen kaybolmaktadır. Bunun nedeni daha önce ifade edildiği gibi arayüzey durumundaki taşıyıcıların düşük frekanslarda a.c. sinyalini takip ederken yüksek frekanslarda a.c. sinyalini takip edememeleri ve böylece  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerine katkıda bulunmamalarıdır. Bu yüzden  $R_s$  değerlerinin güvenilirliği için yüksek frekanslarda ölçüm yapılması ve bu ölçümlerden elde edilen  $C$  ve  $G/\omega$  değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Aynı zamanda, diyot uygulamaları için ideal durum olan düşük  $R_s$  değeri Şekil 3.9'da gösterildiği gibi  $R_s$  değerleri uygulanan voltaj ve frekanstaki artışla sağlanmaktadır.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının farklı frekans değerlerine ait  $C^{-2}$ - $V$  karakteristikleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



**Şekil 3.10.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının frekansa bağlı  $C^2$ - $V$  karakteristikleri.

Grafikten görülebileceği gibi MPY SBD yapısının 10kHz - 2MHz aralığındaki farklı frekans değerleri için çizilen  $C^2$ - $V$  grafiğinden  $-1,0V < V < -6,0V$  aralığında birbirine hemen hemen paralel doğrular elde edilmiştir. Her bir frekans değeri için bu doğruların eğim çizgileri çizilip doğru denklemleri elde edildiğinde doğruların voltaj eksenini kestiği noktadaki değerleri yani kesişim voltajı ( $V_0$ ) değerini vermektedir. Elde edilen ( $V_0$ ) değerleri kullanılarak difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ) ve her bir doğrunun eğiminden donör taşıyıcı yoğunluğu ( $N_D$ ) değerleri her bir frekans değeri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. İncelediğimiz diyotun difüzyon potansiyeli aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (3.18)$$

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için  $N_D$  aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunmuştur:



$$C^{-2} = \frac{2}{(q\epsilon_s N_D A^2)} (V_0 + V) \quad (3.19)$$

Burada  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $A$  diyotun doğrultucu kontak alanı ( $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ),  $N_D$  donör taşıyıcı yoğunluğudur.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının oda sıcaklığında Fermi enerjisi  $E_F$ ;

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_C}{N_D} \right) \quad (3.20)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada  $N_C$  iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur bu durumda,

$$N_C = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} \left( \frac{m_e^*}{m_o} \right)^{3/2} \quad (3.21)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $m_e^*$  elektronların etkin kütlesi,  $m_o$  ise elektronun kütlesidir [51]. İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu olan  $N_C$  Denklem (3.21) kullanılarak hesaplandıktan sonra Denklem (3.20)'de yerine yazılarak Fermi enerjisi  $E_F$  bulunmuştur.

Tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ) ise

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_D}{q N_D}} \quad (3.22)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Maksimum elektrik alan  $E_m$ ,

$$E_m = \sqrt{\frac{2q N_A V_D}{\epsilon_s \epsilon_0}} \quad (3.23)$$

ifadesi ile elde edilir. Denklem (3.23)'den bulunan  $E_m$  değeri kullanılarak Schottky engel alçalması  $\Delta\Phi_B$ ,

$$\Delta\Phi_B = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (3.24)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Potansiyel engel yüksekliği ise Denklem (3.18)'den elde edilen  $V_D$ , Denklem (3.20)' den elde edilen  $E_F$  ve Denklem (3.24)'den elde edilen Schottky engel alçalmasına bağlı olarak,

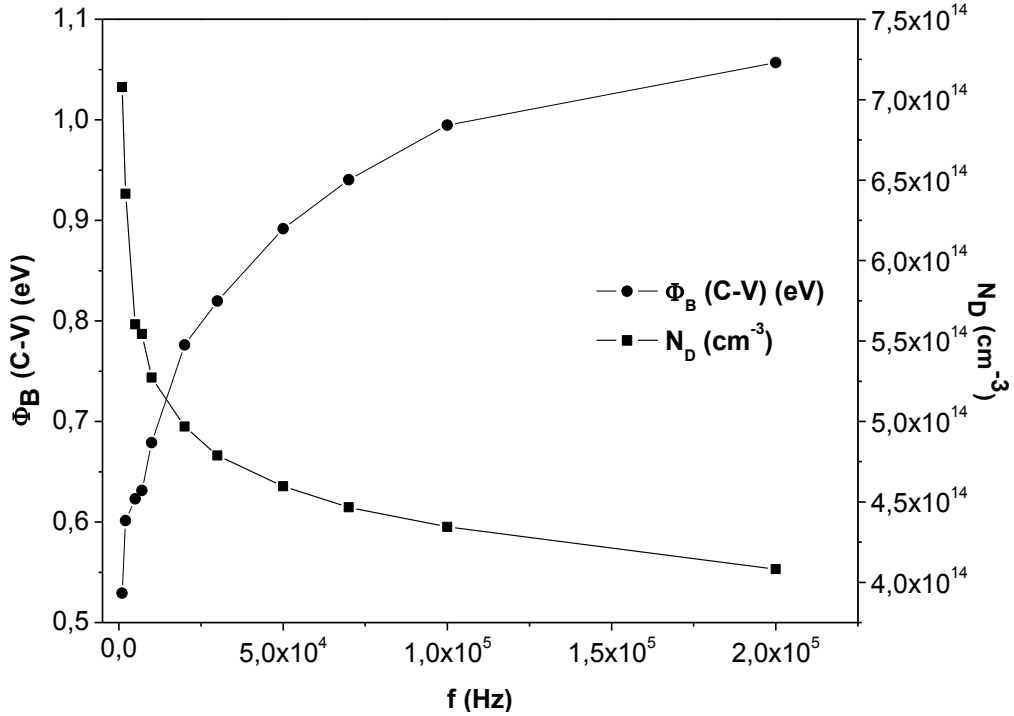
$$\Phi_B = V_D + E_F - \Delta\Phi_B \quad (3.25)$$

ile bulunmuştur.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için oda sıcaklığında ve karanlıkta 10kHz - 2MHz aralığında değişen frekans değerleri için elde edilen tüm parametreler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının 10kHz - 2MHz frekans aralığındaki değerlerinde, frekans değeri artarken difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), Fermi enerjisi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ) ve potansiyel bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ) değerlerinin arttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra artan frekans değerleri ile donör taşıyıcı yoğunluğu ( $N_D$ ), maksimum elektrik alan ( $E_m$ ) ve Schottky engel alçalması ( $\Delta\Phi_B$ ) değerlerinin ise azaldığı belirtilmiştir. Frekansa bağlı olarak elde edilen ve Çizelge 3.2'de verilen tüm bu elektriksel parametreler daha önce yapılmış benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında sonuçların literatüre uygun olduğu görülmüştür [52,53]. Ayrıca  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  analizlerinden %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için elde edilen tüm bu parametreler, Ref. [46]'da sonuçları verilen, arayüzey organik tabakası kullanılmadan üretilen Au/n-Si SBD için bulunan parametrelerle karşılaştırılabilir. Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD (bu çalışma) ve Au/n-Si SBD (Ref. [46]) için elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik

tabakasının MPY SBD için  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  analizlerinden elde edilen temel elektriksel parametrelerini oldukça olumlu yönde geliştirdiği sonucuna varılabilir.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için Denklem (3.19) ve Denklem (3.25) kullanılarak elde edilen sırasıyla  $\Phi_B$  ve  $N_D$  değerlerinin frekansa bağlı değişimi Şekil 3.11'de verilmiştir.



**Şekil 3.11.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının iki eksenli  $\Phi_b$  ve  $N_D$ 'nin frekansa bağlı değişim grafiği.

Şekil 3.11, bize potansiyel engel yüksekliğinin ( $\Phi_B$ ) artan frekansla arttığını göstermiştir. Bunun yanı sıra donör taşıyıcı yoğunluğu ( $N_D$ ) artan frekansla üstel olarak azalmaktadır. Bu beklenen bir durum olup arayüzey durumlarına atfedilmektedir [54,55].

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) bulunması için güvenilir bir yöntem olan Hill-Coleman metodu kullanılmıştır [56]. Bu metoda göre arayüzey durum yoğunluğu ifadesi

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{\left( \left( (G_m / \omega)_{\max} / C_{ox} \right)^2 + \left( 1 - C_{\max} / C_{ox} \right)^2 \right)} \quad (3.26)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $C_{\max}$  ölçülen kapasitans değerleri için  $C-V$  karakteristiklerinde (Şekil 3.7) pik değerine karşılık gelen değer,  $(G_m/\omega)_{\max}$  ölçülen iletkenlik değerleri için  $G/\omega-V$  karakteristiklerinde (Şekil 3.8) pik değerine karşılık gelen değerdir,  $C_{ox}$  ise yalıtkan tabakanın kapasitansı olmakla birlikte teorik olarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$C_{ox} = C_{ma} \left[ 1 + \left( \frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] \quad (3.27)$$

Burada  $C_{ma}$  ve  $G_{ma}$  değerleri sırasıyla kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir.

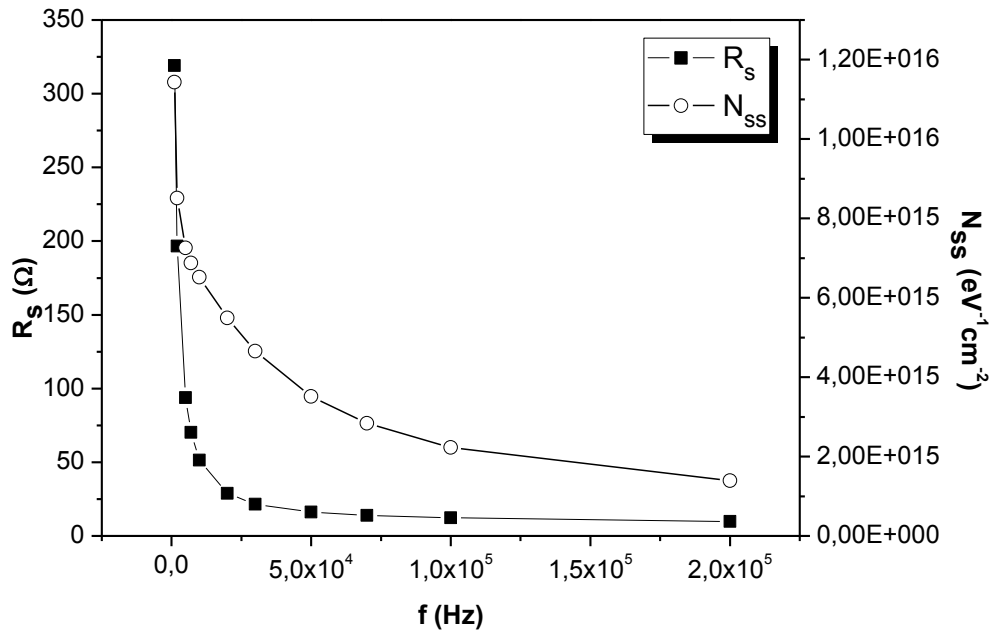
Denklem (3.27) kullanılarak Denklem (3.26)'dan elde edilen arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 3.12'de gösterilmiştir ve Çizelge 3.2'de her bir frekansa karşılık gelen değeri ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca yine Şekil 3.12'de her bir frekans aralığı için 6,0V değerine karşılık gelen seri direnç değerleri de görülmektedir.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının doğru beslem 6,0V değeri için elde edilen seri direnç ( $R_s$ ) değerleri Şekil 3.12'de görülmektedir. Şekil 3.12'de gösterildiği gibi yeterince yüksek frekanslarda seri direnç frekanstan bağımsız hale gelmektedir ve  $N_{ss}$  a.c. sinyalini takip edemeyeceğinden kapasitansa katkıda bulunamayacağı söylenebilir.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD oda sıcaklığında ve karanlıkta geniş frekans (10kHz - 2MHz) ve geniş bir voltaj (-7,0V - +7,0V) aralığında gerçekleştirilen  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümlerinden elde edilen değerleri (Çizelge 3.2) için Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısında bulunan arayüzey organik tabakanın (P3HT:PCBM:F4-TCNQ), Au/n-Si (MY) SBD yapısı ile kıyaslandığında, malzemenin yapısını ve kalitesini önemli ölçüde değiştirerek yapının elektronik uygulamalarının daha avantajlı olabileceği sonucuna varılmıştır.

**Çizelge 3.2.** %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  karakteristiklerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri.

$f$ (kHz)	$V_D$ (eV)	$N_D(\times 10^{15})$ ( $cm^{-3}$ )	$E_F$ (eV)	$W_D(\times 10^{-5})$ (cm)	$E_m(\times 10^4)$ ( $Vcm^{-1}$ )	$\Phi_B$ (eV)	$\Delta\Phi_B(\times 10^{-2})$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )
10	0,28	0,71	0,248	7,21	7,98	0,53	0,98	$1,14 \times 10^{16}$
20	0,35	0,64	0,250	8,45	8,49	0,60	1,02	$8,51 \times 10^{15}$
50	0,37	0,56	0,254	9,27	8,13	0,62	0,99	$7,26 \times 10^{15}$
70	0,38	0,55	0,254	9,42	8,18	0,63	1,00	$6,88 \times 10^{15}$
100	0,42	0,52	0,255	10,24	8,45	0,68	1,02	$6,52 \times 10^{15}$
200	0,52	0,49	0,257	11,68	9,08	0,78	1,05	$5,49 \times 10^{15}$
300	0,56	0,47	0,258	12,38	9,28	0,82	1,06	$4,65 \times 10^{15}$
500	0,63	0,46	0,259	13,40	9,65	0,89	1,08	$3,52 \times 10^{15}$
700	0,68	0,44	0,260	14,10	9,86	0,94	1,10	$2,84 \times 10^{15}$
1000	0,73	0,43	0,260	14,85	10,10	0,99	1,11	$2,23 \times 10^{15}$
2000	0,79	0,40	0,262	15,94	10,19	1,06	1,11	$1,39 \times 10^{15}$



**Şekil 3.12.** Oda sıcaklığında ve karanlıkta %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının iki eksenli  $R_s$  ve  $N_{ss}$ ' in frekansa bağlı değişim grafiği.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının F4-TCNQ konsantrasyonuna bağlı (%0, %1 ve %2) akım-voltaj ( $I-V$ ) karakteristikleri için oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçümler yapılmıştır.  $\ln I-V$  grafiğinden %1 F4-TCNQ konsantrasyonuna sahip olan diyot ile katkısız (%0 F4-TCNQ) ve %2 F4-TCNQ katkılı diyotlar ile kıyaslandığında %1 F4-TCNQ konsantrasyonuna sahip olan yapının, en iyi doğrultma özelliğinde olduğu sonucuna varılmıştır. Temel elektriksel parametreler olan idealite faktörü ( $n$ ), seri direnç ( $R_s$ ), bariyer yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ) ve arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ) değerleri  $I-V$  karakteristiklerinden F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı olarak elde edilmiştir. Tüm bu elektriksel parametrelerin Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının arayüzey organik tabakası olan P3HT:PCBM:F4-TCNQ karışımında F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Au/P3HT:PCBM /n-Si (MPY) SBD yapısı ile F4-TCNQ katkılı Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı karşılaştırıldığında, F4-TCNQ katkılamanın; yüksek doğrultma oranına, idealite faktörü ( $n$ ) değerini düşürdüğüne, seri direnç ( $R_s$ ) değerinin azaldığı, şant direnç ( $R_{sh}$ ) değerinin yükseltmesini sağladığı sonucuna varılarak elektriksel parametrelerini geliştirdiği söylenebilir. F4-TCNQ katkı konsantrasyonunun MPY SBD yapısının metal/yarıiletken arayüzeyi içerisinde iletkenliği arttırarak temel elektriksel parametrelerini geliştirdiği sonucuna varılabilir ve %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip numunenin mobilitesindeki artış görülmüştür. Yüksek katkılama durumu (%2 F4-TCNQ) katkısız (%0 F4-TCNQ) ile karşılaştırıldığında sonuçların daha iyi fakat düşük katkılama durumundaki (%1 F4-TCNQ) değerlerden daha kötü olduğu görülmüştür. Yani yüksek katkılama durumunda (%2 F4-TCNQ) ideal diyot parametrelerinden uzaklaştığı yorumu yapılabilir. Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının temel elektriksel parametreleri farklı yöntemler kullanılarak da (Cheung-Cheung ve Norde metodları) bulunmuş ve bu farklı yöntemlerle bulunan elektriksel parametrelerin birbirleri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bunların yanı sıra %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip numune de arayüzey durum yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Bu durumun %1 F4-TCNQ katkılı MPY SBD yapısı için metal/polimer arayüzeyindeki

düşük bariyer yüksekliği ve yüksek mobiliteden dolayı gerçekleşmiş olduğu yorumu yapılabilir.  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen tüm bu sonuçlar P3HT:PCBM arayüzey organik karışımının düşük katkı konsantrasyonu (%1 F4-TCNQ) ile Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının temel elektriksel özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen sonuçlar farklı F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının Au/n-Si (MY) SBD yapısı ile karşılaştırıldığında P3HT:PCBM:F4-TCNQ organik arayüzey tabakanın MPY SBD yapısının diyot özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

%1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu kullanılması durumunda Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD için en iyi temel elektriksel parametreler elde edilmiştir. Bu durum, F4-TCNQ için en ideal katkı oranının %1 olduğunu göstermiştir. Kapasitans ( $C$ ) ve iletkenlik ( $G/\omega$ ) analizlerinde sadece %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonu kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı kullanılmıştır.  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için elde edilen sonuçlar doğrultusunda  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  ölçümleri bu numune üzerinden 10kHz - 2MHz frekans aralığında ve -7,0V - +7,0V voltaj aralığında gerçekleştirilmiştir. %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısının 10kHz - 2MHz frekans aralığındaki değerlerinde, frekans değeri artarken difüzyon potansiyeli ( $V_D$ ), Fermi enerjisi ( $E_F$ ), tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ) ve potansiyel bariyer yüksekliği ( $\Phi_B$ ) değerlerinin arttığı görülmüştür. Bunun yanı sıra artan frekans değerleri ile donör taşıyıcı yoğunluğu ( $N_D$ ), maksimum elektrik alan ( $E_m$ ) ve Schottky engel alçalması ( $\Delta\Phi_B$ ) değerlerinin ise azaldığı tespit edilmiştir.  $C$ - $V$  ve  $G/\omega$ - $V$  analizlerinden %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPY) SBD yapısı için elde edilen tüm bu parametreler, arayüzey organik tabakası kullanılmadan üretilen Au/n-Si (MY) SBD yapısı için bulunan parametrelerle karşılaştırıldığında %1 F4-TCNQ katkı konsantrasyonuna sahip P3HT:PCBM:F4-TCNQ arayüzey organik tabakasının diyot için temel elektriksel parametrelerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

## 5. KAYNAKLAR

- 
- [1] Rhoderick E.H., Williams R.H., *Surfaces, Interfaces and Schottky Barriers, Metal-Semiconductor Contacts 2nd Ed.*, Clarendon Press, Oxford, (1988).
- [2] Sze S.M., *Physics of Semiconductor Devices 2nd Ed.*, John Wiley & Sons, New York, (1981).
- [3] Wilson A., *The Theory of Electronic Semiconductors*, Proceeding of the Royal Society A, (1931).
- [4] Sharma B.L., *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press, New York and London, (1984).
- [5] Özdemir A.F., Aldemir D.A., Kökçe A., Altındal S., Electrical properties of Al/conducting polymer (P2ClAn)/p-Si/Al contacts, *Synthetic Metals*, 159 (2009) 1427-1432.
- [6] Demirezen S., Altındal Ş., Possible current-transport mechanisms in the (Ni/Au)/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>N/AlN/GaN Schottky barrier diodes at the wide temperature range, *Current Applied Physics*, 10 (2010) 1188-1195.
- [7] Rhoderick E.H., Williams R.H., *Metal-Semiconductor Contacts 2nd Ed.*, Oxford University Press, Oxford, (1988).
- [8] Milness A.G., Feucht D.L., *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Contacts*, Academic Press, New York and London, (1972).
- [9] Crowell C.R., Sze S.M., Current transport in metal-semiconductor barriers, *Solid State Electronics*, 9 (1966) 1035-1048.
- [10] Padavoni F.A., Stratton P., Field and thermionic-field emission in Schottky barriers, *Solid State Electronics*, 9 (1966) 695-707.
- [11] Crowell C.R., Rideout V.L., Normalized thermionic-field emission in metal-semiconductor barriers, *Solid State Electronics*, 12 (1969) 89-105.



- 
- [12] So F., *Organic Electronics; Materials, Processing, Devices and Applications*, CRC Press, Boca Raton. (2010).
- [13] Yakuphanoglu F., Determination of electronic properties of Al/p-Si/composite organic semiconductor (MIOS) junction barrier by current-voltage and capacitance-voltage methods, *Synthetic Metals*, 158 (2008) 108-112.
- [14] Park J.S., Lee B.R., Lee J.M., Kim J.S., Kim S.O., Song M.H., Efficient hybrid organic-inorganic light emitting diodes with self-assembled dipole molecule deposited metal oxides, *Applied Physics Letters*, 96 (2010) 243306.
- [15] Gökçen M., Tunç T., Altındal Ş., Uslu İ., The effect of PVA (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped) interfacial layer and series resistance on electrical characteristics of Au/n-Si (110) Schottky barrier diodes (SBDs), *Current Applied Physics*, 12 (2012) 525-530.
- [16] Demirezen S., Sönmez Z., Aydemir U., Altındal Ş., Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V and G/ω-V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature, *Current Applied Physics*, 12 (2012) 266-272.
- [17] Zeyrek S., Acaroğlu E., Altındal Ş., Birdoğan S., Bülbül M.M., The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C-V and G/ω-V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes, *Current Applied Physics*, 13 (2013) 1225-1230.
- [18] Cakar M., Yıldırım N., Karatas S., Temirci C., Turut A., Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Sn/rhodamine-101/n-Si and Sn/rhodamine-101/p-Si Schottky barrier diodes, *Journal of Applied Physics*, 100 (2006) 074505.
- [19] Akkılıç K., Aydın M.E., Uzun I., Kılıçoğlu T., The calculation of electronic parameters of an Ag/chitin/n-Si Schottky barrier diode, *Synthetic Metals*, 156 (2006) 958-962.
- [20] Prosa T.J., Winokur M.J., McCullough R.D., Evidence of a novel side chain structure in regioregular poly(3-alkylthiophenes), *Macromolecules*, 29 (1996) 3654-3656.
- [21] Burkhard G.F., Hoke E.T., Scully S.R., McGehee M.D., Incomplete exciton harvesting from fullerenes in bulk heterojunction solar cells, *Nano Letters*, 9 (2009) 4037-4041.

- 
- [22] Kim J.Y., Lee K., Coates N.E., Moses D., Nguyen T.-Q., Dante M., Heeger A.J., Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing, *Science*, 317 (2007) 222-225.
- [23] Chan C.K., Zhao W., Kahn A., Hill I.G., Influence of chemical doping on the performance of organic photovoltaic cells, *Applied Physics Letters*, 94 (2009) 203306.
- [24] Han X., Wu Z., Sun B., Enhanced performance of inverted organic solar cell by a solution-based fluorinated acceptor doped P3HT:PCBM layer, *Organic Electronics*, 14 (2013) 1116-1121.
- [25] Aziz E.F., Vollmer A., Eisebitt S., Eberhardt W., Pingel P., Neher D., Koch N., Localized charge transfer in a molecularly doped conducting polymer, *Advanced Materials*, 19 (2007) 3257-3260.
- [26] Liang M.A., Effect of dopant properties on the microstructures and electrical characteristics of poly(3-hexylthiophene) thin films, *Chinese Physics Letters*, 27 (2010) 117301.
- [27] Dökme İ., Altındal Ş., Tunç T., Uslu İ., Temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni, Zn-doped)/n-Si Schottky diodes, *Microelectronics and Reliability*, 50 (2010) 39-44.
- [28] Braun D., Heeger A.J., Visible-light emission from semiconducting polymer diodes, *Applied Physics Letters*, 58 (1991) 1982-1984.
- [29] Fang Y., Chen S.A., Chu M.L., Effect of side-chain length on rectification and photovoltaic characteristics of poly(3-alkylthiophene) Schottky barriers, *Synthetic Metals*, 52 (1992) 261-272.
- [30] Card H.C., Rhoderick E.H., Studies of tunnel MOS diodes I. interface effects in silicon Schottky diodes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4 (1971) 1589-1601.
- [31] Tabbert B., Goushcha A., *Optical Detectors*, in: F. Träger (Ed.), Springer Handbook of Lasers and Optics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2012).
- [32] Leeuw D.M., Lous E.J., Metal-insulator-semiconductor Schottky-type diodes of doped thiophene oligomers, *Synthetic Metals*, 65 (1994) 45-53.

- 
- [33] Yakuphanoglu F., Shah M., Farooq W.A., Electrical and interfacial properties of p-Si/P3HT organic-on-inorganic junction barrier, *Acta Physica Polonica A*, 120 (2011) 558-562.
- [34] Abkowitz M., Facci J.S., Rehm J., Direct evaluation of contact injection efficiency into small molecule based transport layers: influence of extrinsic factors, *Journal of Applied Physics*, 83 (1998) 2670-2676.
- [35] Chiu F.-C., A review on conduction mechanisms in dielectric films, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 (2014) 578168.
- [36] John J., Sivaraman S., Jayalekshmy S., Anantharaman M.R., Investigations on the mechanism of carrier transport in plasma polymerized pyrrole thin films, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71 (2010) 935-939.
- [37] Yakuphanoglu F., Photovoltaic properties of hybrid organic/inorganic semiconductor photodiode, *Synthetic Metals*, 157 (2007) 859-862.
- [38] Gundlach D.J., Pernstich K.P., Wilckens G., Gruter M., Haas S., Batlogg B., High mobility n-channel organic thin-film transistors and complementary inverters, *Journal of Applied Physics*, 98 (2005) 064502.
- [39] Liang M.A., Effect of dopant properties on the microstructures and electrical characteristics of poly(3-hexylthiophene) thin films, *Chinese Physics Letters*, 27 (2010) 117301.
- [40] Cheung S.K., Cheung N.W., Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, *Applied Physics Letters*, 49 (1986) 85-87.
- [41] Padma R., Reddy V.R., Electrical properties of Ir/n-InGaN/Ti/Al Schottky barrier diode in a wide temperature range, *Advanced Materials Letters*, 5 (2014) 31-38.
- [42] Norde H., A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance, *Journal of Applied Physics*, 50 (1979) 5052-5053.
- [43] Prokopyev A.I., Mesheryakov S.A., Restrictions of forward I-V methods for determination of Schottky diode parameters, *Measurement*, 33 (2003) 135-144.

- 
- [44] Reddy M.S.P., Kwon M.-K., Kang H.-S., Kim D.-S., Lee J.-H., Reddy V.R., Jang J.-S., Influence of series resistance and interface state density on electrical characteristics of Ru/Ni/n-GaN Schottky structure, *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 13 (2013) 492-499.
- [45] Altındal Ş., Kanbur H., Yıldız D.E., Parlak M., Current conduction mechanism in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures, *Applied Surface Science*, 253 (2007) 5056-5061.
- [46] Alialy S., Tecimer H., Uslu H., Altındal Ş., A comparative study on electrical characteristics of Au/n-Si Schottky diodes, with and without Bi-doped PVA interfacial layer in dark and under illumination at room temperature, *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 4 (2013) 1000167.
- [47] Tataroğlu B., Altındal Ş., Tataroğlu A., The C–V–f and G/ω–V–f characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures, *Microelectronic Engineering*, 83 (2006) 2021-2026.
- [48] Tataroğlu A., Altındal Ş., Bülbül M.M., Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) structure, *Microelectronic Engineering*, 81 (2005) 140-149.
- [49] Nicollian E.H., Brews J.R., *Experimental Evidence for Interface Trap Properties, MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology*, John Wiley & Sons, New York, (1982).
- [50] Schroder D.K., *Semiconductor Material and Device Characterization 2nd Ed.*, John Wiley & Sons, New York, (1998).
- [51] Jaros M., *Physics and Applications of Semiconductor Microstructures*, Carlendon Press, Oxford, (1989).
- [52] Demirezen S., Sönmez Z., Aydemir U., Altındal Ş., Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V and G/ω-V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature, *Current Applied Physics*, 12 (2012) 266-272.

- 
- [53] Zeyrek S., Acaroğlu E., Altındal Ş., Birdoğan S., Bülbül M.M., The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C-V and  $G/\omega$ -V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes, *Current Applied Physics*, 13 (2013) 1225-1230.
- [54] Bohlin K.E., Generalized Norde plot including determination of the ideality factor, *Journal of Applied Physics*, 60 (1986) 1223-1224.
- [55] Parlaktürk F., Altındal Ş., Tataroğlu A., Parlak M., Agasiev A., On the profile of frequency dependent series resistance and surface states in Au/Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>/SiO<sub>2</sub>/n-Si(MFIS) structures, *Microelectronic Engineering*, 85 (2008) 81-88.
- [56] Hill W.A., Coleman C.C., A single-frequency approximation for interface state density determination, *Solid-State Electronics*, 23 (1980) 987-993.

---

## ÖZGEÇMİŞ

### ***Kişisel Bilgiler***

Soyadı, adı : YAĞLIOĞLU, Engin

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 21.07.1986 / Ankara

Telefon : 0 (539) 247 59 39

e-mail : enginyaglioglu@gmail.com

### ***Eğitim***

<b>Derece</b>	<b>Eğitim Birimi</b>	<b>Mezuniyet tarihi</b>
Lisans	Ondukuz Mayıs Üniversitesi /FizikBölümü	2011
Lise	Bolu Atatürk Lisesi	2004

### ***İş Deneyimi***

<b>Yıl</b>	<b>Yer</b>	<b>Görev</b>
2011-2012	Sinop Birey Dershanesi	Fizik Öğretmenliği

### ***Yayınlar***

- Yağlıoğlu E.**, Tüzün Özmen Ö., F4-TCNQ concentration dependence of the current-voltage characteristics in the Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si (MPS) Schottky barrier diode, *Chinese Physics B*, 23 (2014) 117306.
- Tüzün Özmen Ö., **Yağlıoğlu E.**, Electrical and interfacial properties of Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26 (2014) 448-454.
- Yağlıoğlu E.**, Tüzün Özmen Ö., Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky bariyer diyotun bazı elektriksel parametrelerinin frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri ile incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2 (2014) 227-234.

---

4. **Yağlıoğlu E.**, Tüzün Özmen Ö., Effects of F4-TCNQ concentration on current-voltage characteristics of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si structures, *International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2014)*, (2014) Antalya, Turkey.

5. **Yağlıoğlu E.**, Tüzün Özmen Ö., Au/P3HT:PCBM/n-Si diyotların oda sıcaklığında akım-voltaj ve arayüzey karakterizasyonu, *Turkish Physical Society 30th International Physics Conference*, (2013) İstanbul, Turkey.