



**T.C.**  
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**HİBRİT PTCDI-C8/P-Si**  
**ORGANİK-İNORGANİK HETEROEKLEM**  
**DIYOTUNUN FABRİKASYONU VE**  
**ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat ERDAL**

**Danışman**  
**Dr. Öğr. Üyesi Cihat ÖZAYDIN**

**Nisan-2022**  
**BATMAN**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Murat ERDAL tarafından hazırlanan “**Hibrit PTCDI-C8/p-Si organik-inorganik heteroeklem diyotun fabrikasyonu ve elektriksel karakterizasyonu**” adlı tez çalışması 19/04/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Cihat ÖZAYDIN

.....

#### Üye

Doç. Dr. Ahmet YILDIRIM

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Murat ERDAL

19/04/2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## HİBRİT PTCDI-C8P-Si ORGANİK-İNORGANİK HETEROEKLEM DİYOTUNUN FABRİKASYONU VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Murat ERDAL

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cihat ÖZAYDIN

2022, 51 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Doç. Dr. Ahmet YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Cihat ÖZAYDIN

PTCDI-C8, yüksek mobilite ve n-tipi yarıiletken özelliklere sahip elektronik ve optoelektronik cihazlar için çok önemli bir organik malzemedir. Organik-inorganik hibrit cihazların yaygın olarak kullanılması, organik molekülü yarı iletkenlerin farklı optoelektronik cihazlarda kullanılmasını ve elektriksel özelliklerinin ortaya çıkarılmasını önemli hale getirmiştir. Bu çalışmada, PTCDI-C8 yarı iletken organik molekülün ince bir filminin p-tipi silikon üzerinde sol-jel spin kaplama tekniği ile büyütülmesiyle PTCDI-C8/p-Si heteroeklemi oluşturulmuştur. Karşılaştırma için, aynı koşullar altında ara katmanı olmayan p-Si/Al metal-yarı iletken (MS) diyot da üretildi. PTCDI-C8/p-Si/Al heteroeklem ve p-Si/Al MS diyotun elektriksel özellikleri, oda sıcaklığında akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) ölçümleri ile araştırıldı. Her iki diyot da iyi doğrultucu özellikler gösterdi. PTCDI-C8/p-Si/Al heteroekleminin idealite faktörü (2.1), bariyer yüksekliği (0.74 eV) ve seri direnci (248 k $\Omega$ ) I-V karakteristiklerinden elde edildi. PTCDI-C8/p-Si/Al heteroeklem için elde edilen engel yüksekliği (BH), geleneksel Al/p-Si Schottky diyotu için elde edilenden daha yüksektir. PTCDI-C8 organik ince film tabakası, Al/p-Si Schottky diyotun etkin bariyer yüksekliğini değiştirerek Al metal ve p-Si arasında fiziksel bir bariyer oluşturdu. Cihazın fotovoltajik parametreleri de 100 mW/cm<sup>2</sup> ve AM1.5 aydınlatma koşulunda belirlenmiştir. PTCDI-C8/p-Si/Al heteroekleminin açık devre voltajı (Voc = 320 mV) ve kısa devre akımı (Isc = 1,91  $\mu$ A) ile bir fotodiyot davranışı sergiler.

**Anahtar Kelimeler:** Elektriksel Karakterizasyon, Fotovoltajik özellik, Heteroeklem, İnce film, PTCDI-C8, Sol-jel

## ABSTRACT

### MS THESIS

# PRODUCTION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF PTCDI-C8/P-Si HYBRID ORGANIC/INORGANIC HETEROJUNCTION DIODE

**Murat ERDAL**

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES OF  
BATMAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN PHYSICS DEPARTMENT**

**Advisor: Asst.Prof.Dr. Cihat ÖZAYDIN**

**2022, 51 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ**

**Assoc. Prof. Dr. Ahmet YILDIRIM**

**Asst. Prof. Dr. Cihat ÖZAYDIN**

PTCDI-C8 is a very important organic material for electronic and optoelectronic devices with high mobility, n-type semiconductor properties. The widespread use of organic-inorganic hybrid devices has made it important to use organic molecule semiconductors in different optoelectronic devices and to reveal their electrical properties. In this work, PTCDI-C8/p-Si heterojunction was formed by growing a thin film of PTCDI-C8 semiconductor organic molecule on p-type silicon by sol-gel spin coating technique. For comparison, p-Si/Al metal-semiconductor (MS) diode without interlayer was also produced under the same conditions. Electrical properties of PTCDI-C8/p-Si/Al heterojunction and p-Si/Al MS diode were investigated by current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements at room temperature. Both junctions showed good rectifying properties. The ideality factor (2.1), barrier height (0.74 eV) and series resistance (248 k $\Omega$ ) of the PTCDI-C8/p-Si/Al heterojunction were obtained from I-V characteristics. The barrier height obtained for the PTCDI-C8/p-Si/Al heterojunction is higher than that of obtained for the conventional Al/p-Si Schottky diode. PTCDI-C8 organic thin film layer formed a physical barrier between Al metal and p-Si, modifying the effective barrier height of the Al/p-Si Schottky diode. The photovoltaic parameters of the device have been also determined under 100 mW/cm<sup>2</sup> and AM1.5 illumination condition. The PTCDI-C8/p-Si/Alg heterojunction exhibits a photodiode behavior with open circuit voltage ( $V_{oc} = 320$  mV) and short circuit current ( $I_{sc} = 1.91$   $\mu$ A).

**Keywords:** Electrical characterization, heterojunction, PTCDI-C8, Photovoltaic property, Sol-gel, Thin film

## ÖNSÖZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans tez çalışmamda; yardımı ve emeği geçen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Cihat ÖZAYDIN'a, Batman Üniversitesi Fizik Anabilim Dalındaki diğer hocalarıma ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.



Murat ERDAL  
BATMAN-2022

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xii
ÇİZELGELER LİSTESİ .....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>4</b>
2.1. Metal-Yarıiletken Yapılar .....	8
2.1.1. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar .....	9
2.1.2. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar .....	11
2.2. Metal/Yarıiletken Yapılarda Akım-İletim Mekanizmaları .....	13
2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi .....	13
2.2.2. Difüzyon teorisi .....	15
2.3. Metal/Yarıiletken Schottky diyotların Kapasitesi.....	16
2.4. Schottky BH Üzerine Etkiler .....	17
2.4.1. Görüntü yük etkisi .....	17
2.4.2. Seri direnç etkisi .....	18
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>20</b>
3.1. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri .....	20
3.1.1. Silisyum .....	20
3.1.2. PTCDI-C8 .....	21
3.2. Diyotun Hazırlanması .....	22
3.2.1. Silisyum altlığın temizlenmesi.....	22
3.2.2. Omik kontak oluşturulması.....	23
3.2.3. PTCDI-C8 çözeltilisinin hazırlanması ve ince filmin oluşturulması .....	25
3.2.4. Doğrultucu kantağın oluşturulması .....	26
3.3. Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Gerilim (I-V) Özellikleri .....	28
3.3.1. Metal-yarıiletken kantağın engel yüksekliği .....	28
3.3.2. Cheung’s fonksiyonları .....	29
3.3.3. Norde fonksiyonu .....	30
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>33</b>

4.1. Akım-Gerilim Karakteristikleri ve Diyot Parametreleri .....	33
4.2. Kapasite-Gerilim Karakteristikleri ve Diyot parametreleri .....	40
4.3. Kondüktans-Gerilim Karakteristikleri .....	45
4.4. Seri Direnç-Gerilim Karakteristikleri .....	47
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>55</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$A$	:Etkin diyot alanı
$A^*$	:Richardson sabiti
AC	:Alternatif akım
$C$	:Kapasite
$C_{it}$	:Ara yüzey tuzak kapasitesi
$\Delta$	:Ara yüzey tabakası üzerindeki potansiyel
$\Delta\phi$	:Shottky engel düşmesi
DC	:Doğru akım
$D_n$	:Elektron için difüzyon sabiti
$D_{it}$	:Ara yüzey tuzaklarının hal yoğunluğu
$E_c$	:İletkenlik bandının taban enerji seviyesi
$E_{fs}$	:Yarı iletkenin fermi enerji seviyesi
$E_{fm}$	:Metalin fermi enerji seviyesi
$E_g$	:Yarı iletkenin yasak enerji bant aralığı
$E_v$	:Valans bandının tavan enerji seviyesi
eV	:Elektron-volt
$\epsilon_s$	:Yarı iletkenin bağıl dielektrik sabiti
$\epsilon_0$	:Boşluğun mutlak dielektrik sabiti
$\phi_0$	:Yüzey potansiyeli
$\phi_B$	:Kutuplamasız BH
$\phi_{bn}$	:Schottky BH
$\phi_n$	:İletkenlik bandı ile fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
$\phi_m$	:Metal iş fonksiyonu
$\phi_s$	:Yarıiletken iş fonksiyonu
$g_C(E)$	:İletim bandının durum yoğunluğu
$g_V(E)$	:Valans bandının durum yoğunluğu
$\chi_s$	:Yarıiletkenin elektron yakınlığı
$h$	:Planck sabiti

$I_0$	:Ters kutuplama saturasyon akımı
$I_{sc}$	:Kısa-devre akımı
$I_{ph}$	:Foto-akım
$J$	:Akım yoğunluğu
$I_{s \rightarrow m}$	:Yarıiletken den metale akım yoğunluğu
$I_{m \rightarrow s}$	:Metalden yarıiletkene akım yoğunluğu
$I_{SD}$	:Kutuplamadaki doyma akım yoğunluğu
$k$	:Boltzmann sabiti
$\lambda$	:Dalga boyu
$m_n^*$	:Elektron etkin kütlesi
$m_h^*$	:Boşluğun (hole) etkin kütlesi
$\mu_n$	:Elektron mobilitesi
$\mu_p$	:Boşluğun (Hole) mobilitesi
$n$	:İdealite faktörü
$N_A$	:Akseptör konsantrasyonu
$N_c$	:İletkenlik bandındaki akım taşıyıcı yoğunluğu
$N_d$	:Donör konsantrasyonu
$N_{ss}$	:Arayüzey durum yoğunluğu
$\nu$	:Frekans
$\delta$	:Yalıtkan tabaka kalınlığı
$q$	:Elektron yükü
$Q_m$	:Metal üzerindeki yüzey yük yoğunluğu
$Q_{sc}$	:Uzay yük yoğunluğu
$Q_{ss}$	:Yarıiletken yüzey yük yoğunluğu
$R_p$	:Paralel direnç
$R_s$	:Seri direnç
$S_{ph}$	:Foto-iletkenlik duyarlılığı
$T$	:Mutlak sıcaklık
UV	:Mor ötesi
$V$	:Uygulanan gerilim
$V_d$	:Difüzyon potansiyeli
$V_F$	:Doğru kutuplama gerilimi

$V_R$	:Ters kutuplama gerilimi
$V_{oc}$	:Açık devre gerilimi
$v_x$	:İletim yönündeki hız
$W_d$	:Deplasyon bölgesi genişliği

### Kısaltmalar

AFM	:Atomik kuvvet mikroskobu
BÜMER	:Batman Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi
BH	:Engel yüksekliği
C-V	:Kapasite-gerilim
G-V	:Kondüktans-gerilim
HF	:Hidroflorik asit
HCl	:Hidroklorik asit
I-V	:Akım-gerilim
ITO	:İndiyum katkılı kalay oksit
LED	:Işık yayan diyot
MS	:Metal/yarıiletken
MIS	:Metal/yalıtkan/yarıiletken
M-B	:Maxwell-Boltzman
n-Si	:n-tipi silisyum
p-Si	:p-tipi silisyum
SCLC	:Sınırlı uzay yükü akımı
SCS	:Yarıiletken karakterizasyon sistemi
SED	:Schottky engel diyot
Si	:Silisyum
TE	:Termiyonik emisyon
TED	:Termiyonik emisyon difüzyon
PTCDI-C8	: N, N'-dioktil-3,4: 9,10-perilen tetrakarboksilik diimid
VTB	:Vakum termal buharlaştırma
XRR	:X ışını reflaklometresi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak öncesi enerji bant diyagramı.....	10
Şekil 2.2. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak sonrası enerji bant diyagramı.....	10
Şekil 2.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontakın $V \neq 0$ olduğundaki enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.4. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak öncesi enerji bant diyagramı.....	12
Şekil 2.5. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak sonrası enerji bant diyagramı.....	12
Şekil 2.6. Metal p-tipi yarıiletken omik kontakın $V \neq 0$ olduğundaki enerji bant diyagramı .....	13
Şekil 2.7. Doğru kutuplamada metal yarıiletken Schottky kontakta imaj etkisine ait enerji-bant diyagramı.....	14
Şekil 2.8. Görüntü (imaj) kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme.....	18
Şekil 2.9. Seri direncin I-V karakteristiğine etkisi.....	19
Şekil 3.1. N, N'-dioktil-3,4: 9,10-perilen tetrakarboksilik diimid ( PTCDI-C8 ) molekül yapısı.....	21
Şekil 3.2. Vakum termal buharlaştırma cihazının fotoğrafı .....	24
Şekil 3.3. Tavlama için kullanılan tüp fırının fotoğrafı.....	24
Şekil 3.4. PTCDI-C8 organik maddesine Kloroform çözeltisi eklendiğindeki renk değişimi .....	25
Şekil 3.5. Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyot şeması.....	26
Şekil 3.6. Organik ara yüzeyli Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyotunun oda sıcaklığında $100 \text{ mW/cm}^2$ gücünde solar simülatörü ile ölçüm düzeneği.....	27
Şekil 3.7. Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının I-V ve C-V ölçümlerinin alındığı yarıiletken karakterizasyon sistemi (Keithley 4200-SCS).....	27
Şekil 4.1. Al/p-si referans diyotun oda sıcaklığındaki akım-gerilim grafiği.....	33
Şekil 4.2. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun oda sıcaklığındaki akım-gerilim grafiği.....	34
Şekil 4.3. Al/p-si referans diyotun $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -(I) grafiği.....	36
Şekil 4.4. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -(I) grafiği.....	37
Şekil 4.5. Al/p-si referans diyotun $F(V)$ -V grafiği.....	38
Şekil 4.6. Al/PTCDI-C8/p-Si referans diyotun $F(V)$ -V grafiği.....	39
Şekil 4.7. Al/p-si referans diyotun 10 kHz-1 MHz frekans aralığındaki C-V grafiği.....	41
Şekil 4.8. Al/p-si referans diyotun 500 kHz frekanstaki $C^{-2}$ -V grafiği.....	42
Şekil 4.9. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun 10 kHz-1 MHz frekans aralığındaki C-V grafiği.....	43
Şekil 4.10. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun 500 kHz frekanstaki C-V ve $C^{-2}$ -V grafiği.....	44
Şekil 4.11. Al/p-si referans diyotun Kondüktans-Gerilim (G-V) grafiği.....	45
Şekil 4.12. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun Kondüktans-Gerilim (G-V) grafiği.....	46
Şekil 4.13. Al/p-si referans diyotun Seri direnç-Gerilim ( $R_S$ -V) grafiği.....	47
Şekil 4.14. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun Seri direnç-Gerilim ( $R_S$ -V) grafiği.....	48

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Metal–yarıiletken kontaklarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için kontak türleri.....	9
<b>Çizelge 3.1.</b> Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	20
<b>Çizelge 3.2.</b> PTCDI-C8 maddesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	22
<b>Çizelge 4.1.</b> Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının I-V, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri (Diyot alanı $A=0,00785 \text{ cm}^2$ olarak alınmıştır).....	39
<b>Çizelge 4.2.</b> Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının kapasite-voltaj grafiklerinden elde edilen diyot parametreleri.....	45



## 1. GİRİŞ

Organik moleküller, bilim dünyasındaki şaşırtıcı ve önemli uygulama alanlarıyla malzeme biliminde yoğun bir araştırma alanına sahiptirler. Organik moleküller, ilginç optik ve yapısal özellikleri sayesinde yoğun ilgi görmekte ve birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Organik yarı iletken bileşikler, güneş pilleri, transistörler (OFET), diyotlar, sensörler, fotovoltaiik ince film ve diğer birçok optoelektronik cihaz ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu organik yarı iletkenler; küçük moleküller ve daha büyük molekül ağırlıklı polimerik yarı iletkenler şeklinde ayrılır. Organik yarıiletken bileşiklerden, perilen türevi olan N, N'-dioktil-3,4: 9,10-perilen tetrakarboksilik diimid (PTCDI) umut vaat eden küçük molekülü organik yarı iletkenler olarak gösterilebilir. Elektronik, optoelektronik ve fotonik gibi birçok uygulamada malzeme etkilerinin önemi PTCDI'yı aktif bir bileşik haline getirir. PTCDI molekülleri n-tipi malzemelerdir ve iyi termal ve foto-stabilite özelliklerine sahiptirler (Datar, 2006).

Elektron kabul eden bir fotoaktif molekül olan N, N'-dioktil-3,4: 9,10-perilen tetrakarboksilik diimid (PTCDI-C8), aromatik bir çekirdek ve her biri sekiz karbon atomundan oluşan karşılıklı iki alkil zinciri olan bir perilen bisimid türevidir. Hava ve ışık gibi etkilere karşı yüksek termal stabiliteye sahip olması, kırmızı boya / pigment olarak da geniş endüstriyel kullanım alanı bulmuştur. Perilen bisimidler; düzlemsel çekirdeğin  $\pi$ -elektron sistemi nedeniyle diğer atomlarla da bağ kurmak istemesi organik elektronik cihazlar için mükemmel bir aday ve  $1.7 \text{ cm}^2$ 'ye kadar elektron hareketliliği ile mevcut en iyi organik n tipi yarı iletkenlerden birini temsil ederler. PTCDI-C8, 488 nm, 523 nm ve 567 nm'de tepe noktaları olan görünür spektrumun (400-600nm) mavi bölümünde önemli bir absorpsiyon gösterdiğinden, organik güneş hücrelerinde akseptör malzeme olarak ilgi çekici bir malzemedir (Karak ve ark., 2009). PTCDI-C8'in eğik, yukarı-dik duran moleküllerden oluşan büyük kristalin alanlar oluşturduğu, böyle bir konfigürasyonda, yük aktarımının  $\pi$ -istifleme yönü boyunca alt tabakaya paralel taşıyıcı hareketinin baskın olmasını, dikey aktarım katmanlar arasında atlamalı sınırlandırılmasını beklenir (Turak ve ark., 2010). PTCDI-C8 transistörlerinde yapılan son araştırmalar, cihaz performansının tane / ada büyüklüğü ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermiştir (Han ve ark., 2008). Bununla birlikte, diyot tipi yapılar için yanal boyutun rolü hala bilinmemektedir. Ana yük taşıma mekanizması değişmese de, yan ada boyutunun cihaz performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür (Turak ve ark., 2010).

Son yıllarda, dört farklı çözücüyle (metanol, aseton, klorobenzen, kloroform) termal olarak buharlaştırılmış PTCDI-C8 ince filmler deneysel olarak araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada termal buharlaştırma yöntemiyle PTCDI-C8 heterojonksiyonlarının verimli bir verici / alıcı kombinasyonuna dayanan organik bir fotovoltaiik hücre üzerinde çalışarak PTCDI-C8'in cihazlarda absorpsiyon ve foto-akım etki spektrumunun, fotovoltaiik uygulamalar için C<sub>60</sub>'tan daha uygun bir alıcı malzeme seçeneği olabileceğini doğruladılar. Bu verici / alıcı kombinasyonu ile en umut verici noktanın, cihazın güneş spektrumunun görünür bölgesi boyunca verimli ışık hasadı sergilemesi ve cihaz performansının daha fazla iyileştirilmesi, imalat sonrası veya üretim öncesi tavlama işlemleriyle ve aktif katman kalınlığının optimize edilmesiyle elde edilebileceği sonucuna vardılar(Karak ve ark., 2009). ITO yüzeylerinde üretilen PTCDI-C8 diyotlarının organik optoelektronik cihazlarda ada boyutu etkilerini araştırmışlardır. ITO'da, PTCDI-C8'in ada boyutu, büyüme sırasında yüzey sıcaklığını değiştirerek kristalliği etkilemeden mikron uzunluk ölçekleri ile alt mikron tarafından ayarlanabildiğini, SiO<sub>2</sub> üzerinde gözlemlenene benzer şekilde ITO üzerindeki PTCDI-C8'in adalarda iyi tanımlanmış kristal tabakaların oluşumu ile moleküller için dik duran bir konfigürasyon gösterdiği sonucuna varmışlardır. Dikey taşınmanın baskınlığı, daha önce OTFT'lerde yanal taşıyıcı taşınmasını bozduğunu, filmde çatlakların varlığında bile yüksek yüzey sıcaklıklarında üretilen filmler için cihaz performansındaki iyileşme sağladığını ve bu sonuçların, performansın dikey yük taşıyıcı hareketinin hâkim olduğu diyot yapıları için bile, yanal ada boyutunun cihaz performansı üzerinde hala büyük bir etkiye sahip olabileceğini gösterdiğini söylemektedirler (Turak ve ark., 2010). PTCDI-C8 organik nano yapısının fotonik, spektroskopik özellikleri ve elektronik yapısını incelemiştirler. PTCDI-C8 küçük organik molekül, deneysel ve teorik teknikler kullanılarak araştırılarak farklı çözücü ortamları için deneysel molar yok olma katsayılarının maksimum noktasının teorik değerle uyumlu olduğu bulunmuştur. Kırılma indisi değerleri, çözücü ortamlarının metanolden kloroforma değişimine bağlı olarak artmakta ve artan dalga boyu ile azalmakta olduğunu, çözücü için tahmin edilen enerji aralığı değerlerinin de deneysel verilerle uyumlu olduğunu açıklamışlardır. PTCDI-C8 nano yapının, izin verilen optik bant boşluğunu doğrudan gösterir. Farklı pozisyonlardaki atomların yükleri, bazı karbon atomları için birbirleriyle farklı yük gösterdiği sonucuna varılmıştır( Gündüz ve Kurban, 2018).

Bu tez çalışmasında, sol-gel yöntemiyle elde edilen PTCDI-C8 ince filmleri, spin kaplama yöntemiyle inorganik yarıiletken (p-Si) altlık üzerine büyütülmesiyle

PTCDI-C8/p-Si heterokleminin fabrikasyonu yapılmış ve daha sonra PTCDI-C8/p-Si heterokleminin akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleriyle elektriksel özellikleri araştırılmıştır.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Organik moleküller ve organik yarıiletkenler optik ve yapısal özellikleri sebebiyle özellikle fotonik ve optoelektronik çalışmalarda son 10-20 yıl içerisinde çok fazla ilgi görmektedirler. Organik yarıiletkenler içerisinde perilen türevi olan küçük moleküllü ve yarıiletken olan PTCDI-C8 'in umut vaat eden bileşiklerdendir. PTCDI-C8 ile ilgili yapılan birtakım çalışmalar aşağıda paylaşılmıştır.

Karak ve ark., (2009); Pentasen / N, N'-dioktil-3,4: 9,10-perilen tetrakarboksilik diimid heterojonksiyonlarına dayalı organik fotovoltaiik cihazlarda foto akım spektrumları, % 60'lık maksimum harici kuantum verimliliği (EQE) ile görünür spektrum boyunca mükemmel ışık hasadı sergilediğini gözlemlemiş ve AM 1.5 aydınlatma altında yaklaşık % 1,2 güç dönüştürme verimliliği elde etmişlerdir.

Nguyen ve ark., (2010); Organik optoelektronik cihazlarda ada boyutu etkilerini incelerken ITO da PTCDI-C8'in ada boyutu substrat sıcaklığını değiştirerek büyüme sırasında mikron altında mikron uzunluk ölçeklerine ayrılabilceğini ve cihaz üzerinde büyük bir etkisinin olduğunu söylemişlerdir.

Rahimi ve ark. , (2013); organik güneş pili uygulamaları için termal olarak buharlaştırılmış PTCDI-C8 ince filmlerin optik ve morfolojik çalışmalarında, oda sıcaklığında vakumlu termal buharlaştırıcı ile SiO<sub>2</sub> / Si substratları üzerine bırakmıştır. Kalınlık değişiminin bu filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkisi AFM(Atomik kuvvet mikroskobu), XRR ( X ışını reflaklometresi) ve elipsometri kullanılarak araştırılmış. Sonuç olarak farklı kalınlıklarda PTCDI-C8 filmleri içerisinde çok yüksek moleküler düzeninin varlığını koruduğunu, bu katmanlı yapının bir 3D kristal yapının varlığına işaret ettiğini ve bu nedenle PTCDI-C8 bazlı organik yarı iletken cihazların olağanüstü optik ve elektriksel özellikleri bu filmler için de gözlemlenen yüksek derecede moleküler paketlemeye bağlanabildiğini söylemişlerdir.

Abhijith, (2015); Yarı iletken olan PTCDI-C8'in fotovoltaiik uygulamalar için tek boyutlu nano yapıların sentezi üzerinde çalışma yaparken, birkaç mikrometre uzunluğunda ve 100-200 nm genişliğinde ultra uzunlukta milyarlarca PTCDI-C8 i şerit üzerinde sentezlediğini gözlemledi.

Organik moleküllerin Al/p-si yapısında ince film ara yüzey tabakası olarak kullanılması ile ilgili de çok sayıda çalışma mevcuttur. Aşağıda tarihsel sıraya göre bu çalışmalardan bazıları verildi.

Gündüz ve ark. (2012), Al/p-Si/P3HT ve Al/p-Si/P3HT:MEH-PPV organik-inorganik heteroeklem aygıtlarının fabrikasyonunu yapıp elektriksel ve foto-iletkenlik I-

V ce C-V teknikleriyle özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelediler. Al/p-Si/P3HT ve Al/p-Si/P3HT:MEH-PPV heteroeklem diyotlarının idealite faktörü, BH, doğrultma oranı ve seri direnç gibi parametrelerini 303 °K'de sırasıyla  $n=1.51-1.53$ ,  $\phi_b = 0.649-0.771$  eV,  $RR=149.9-878.5$  ( $\pm 5V$ 'ta) ve  $R_s=3.328-0.841$  k $\Omega$  olarak hesapladılar. Sıcaklık arttıkça BH nin arttığını rapor ettiler.  $C^{-2}$ -V karakteristiğinden Al/p-Si/P3HT ve Al/p-Si/P3HT:MEH-PPV diyotları için 600 kHz'de akseptör taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve BH değerlerini sırasıyla  $N_A=1.817 \times 10^{19}-1.697 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>,  $V_d=0.621-1.25$  V ve  $\phi_{b(C-V)}=1.003-1.703$  eV olarak hesapladılar. Foto-iletkenlik parametrelerinden foto-akım ( $I_{ph}$ ) ve foto-iletkenlik duyarlılığını ( $S_{ph}$ ) (5V'ta) p-Si/P3HT/Al için  $I_{ph}=9.171 \times 10^{-5}$  A ve  $S_{ph}=0.37 \times 10^{-8}$  (Sm/W) ve p-Si/P3HT:MEH-PPV/Al için  $I_{ph}=23.34 \times 10^{-5}$  A ve  $S_{ph}=12.67 \times 10^{-8}$  (Sm/W) olarak hesapladılar.

Karadeniz ve ark. (2013), Rubrene organik ara tabakalı ve ara tabakasız Al/p-Si/Rubrene ve Al/ /p-Si diyotlarını ürettiler. Diyotun elektriksel özelliklerini incelemek için I-V ve C-V karakteristiklerini kullandılar. p-Si/Rubrene/Al ve p-si/Al diyotlarının idealite faktörü, BH gibi temel elektriksel parametrelerini sırasıyla  $n=1.22-1.51$  ve  $\phi_b = 0.649-0.771$  olarak hesapladılar. C-V metodundan Al/Rubrene/p-Si diyotu için BHni 0.82 eV olarak buldular. I-V karakteristiğinden p-Si/Rubrene/Al diyotunun ara yüzey durum yoğunluğu dağılımını  $8.72 \times 10^9$ 'dan  $2.43 \times 10^{11}$ , eksponansiyel artış olarak tespit ettiler.

Yücedağ ve ark. (2014), kobalt katkılı ara yüzey polivinil alkol (PVA) tabakalı Al/p-Si SED'in fabrikasyonunu yapıp elektriksel ve dielektrik özellikleri oda sıcaklığı koşullarında incelediler. Kapasite ve iletkenlik ölçümlerinden diyotun BHni, difüzyon potansiyelini ve seri direncini sırasıyla 300 kHz'de 1.05 eV, 0.90 V ve 5.62  $\Omega$  olarak hesapladılar. Elde ettikleri sonuçlardan ara yüzey tuzak kapasitesi ( $C_{it}$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve ara yüzey PVA tabaksının C-V ve G/w-V karakterizasyonunu büyük ölçüde etkilediğini ve ara yüzey PVA tabaksının Al/Co-doped PVA/p-Si MPS Schottky engel diyotunun elektriksel ve dielektrik özelliklerini belirgin şekilde değiştirdiğini rapor ettiler.

Bilkan ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada perylene (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>) organik molekülünü kullanarak spin kaplama yöntemiyle p-Si üzerine ince film tabakasını oluşturarak ara tabakalı Al/C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>/p-Si ve ara tabakasız Al/p-Si yapılarını oluşturdular. p-Si/C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>/Al ve p-Si/Al diyot yapılarının elektriksel karakteristiklerini I-V ve C-V ölçümleriyle inceleyip karşılaştırdılar. Al/p-Si için idealite faktörü, BH ve seri direnç

değerlerini sırasıyla 3.834, 0.707 eV ve 1.258 k $\Omega$  olarak ve p-Si/C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>/Al için idealite faktörü, BH ve seri direnç değerlerini de sırasıyla 2.765, 0.703 eV ve 628  $\Omega$  olarak hesapladılar. C<sup>-2</sup>-V karakteristiğinden p-Si/Al ve p-Si/C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>/Al diyot yapılarının BH değerini sırasıyla 0.707 eV ve 0.776 eV olarak elde ettiler. Elde ettikleri sonuçlardan perylene ince ara yüzey tabakasının p-Si/Al MS yapısının performansını iyileştirdiğini rapor ettiler.

Orak ve ark. (2015), Azure C organik molekülünü spin kaplama yöntemiyle p-Si üzerine oluşturarak Al/Azure C/p-Si heteroeklemini oluşturdu. Karşılaştırma amacıyla Al/p-Si diyotunu da ürettir. I-V ve C-V yöntemlerini kullanarak Azure C ara tabakalı ve ara tabakasız yapıların elektriksel ve fotovoltajik parametrelerini elde ettiler. Al/p-Si ve Al/Azure C/p-Si yapıları için BH, idealite faktörü ve seri direnç değerlerini sırasıyla 0.57-0.65 eV, 1.10-1.26 ve 49-252.3  $\Omega$  olarak hesapladılar. Al/p-Si ve Al/Azure C/p-Si yapıları için fotovoltajik parametrelerini sırasıyla  $I_{sc}$ =26-124  $\mu$ A ve  $V_{oc}$ =48-168 mV olarak hesapladılar.

Güllü, (2017) DNA molekülünü kullanarak Al/DNA/p-Si MIS yapısını oluşturdu ve bu yapının ara yüzey durumlarını kondüktans tekniği ile inceledi. Daha önce Güllü ve ark. (2008)'de aynı yapının elektriksel parametreleri BH, idealite faktörü, ve seri direnç değerlerini sırasıyla 0.76 eV, 2.86 ve 2.68 k $\Omega$  olarak hesapladılar. Bu çalışmada (Güllü, 2017), karanlıkta ve ışık altında 500 kHz frekanstaki C-V ölçümlerinden C<sup>-2</sup>-V karakteristiğinden yapının difüzyon potansiyelini, BH değerini ve akseptör taşıyıcı konsantrasyonunu sırasıyla karanlıkta ve 3000 lüks ışık altında  $V_d$ =0.99-0.48 V  $\phi_b$  (C-V)=1.23-0.70 eV ve  $N_A$ =9.85x10<sup>14</sup>-1.98x10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> olarak hesapladı. Kondüktans tekniğinden artan gerilimle ara yüzey durumlarının azaldığını rapor etti. Al/DNA/p-Si MIS yapısının fotovoltajik parametrelerini 3000 lüks ışık yoğunluğunda kısa-devre akımını 1 $\mu$ A ve açık-devre gerilimini 289 mV olarak tespit etti.

Bilkan ve ark. (2017), Al/CO<sub>3</sub>-PVA/p-Si yapısını üretilip 5 kHz-1 MHz frekans aralığında admitans tekniği kullanarak yapının yüzey durumlarını ( $N_{SS}$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) profilini elde ettiler. 500 kHz'de C<sup>-2</sup>-V karakteristiğinden Al/CO<sub>3</sub>-PVA/p-Si yapısı için fermi enerji seviyesi ( $E_F$ ), difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) ve BH ( $\phi_b$ ) değerlerini sırasıyla 0.226 V, 2.051 ve 0.981 eV olarak hesapladılar. Frekans arttıkça BH değerinin azaldığını gösterdiler.  $N_{SS}$  büyüklüğünün gerilimle 3x10<sup>10</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>, den 6.4x10<sup>11</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>,ye değiştiğini hesapladılar.

Marıl, (2021), ara tabakasız Al/p-Si ve PVP-Cu<sub>2</sub>Te ince tabakasını kullanarak ara tabakalı Al/PVP-Cu<sub>2</sub>Te/p-Si yapılarının fabrikasyonunu gerçekleştirdi. Oda sıcaklığında I-V ölçümlerinden Al/p-Si MS yapısı için BH ve  $n$  değerini 0.576 eV ve 2.38 olarak hesapladı. Al/PVP-Cu<sub>2</sub>Te/p-Si yapısı için idealite faktörü ve BH değerini de sırasıyla 1.85 ve 0.692 eV olarak hesapladı. Cheung's metoduna göre Al/p-Si MS yapısı için seri direnç, BH ve idealite faktörü değerlerini sırasıyla 2.31 k $\Omega$ , 0.538 eV ve 6.84 olarak, Al/PVP-Cu<sub>2</sub>Te/p-Si Metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapısı için sırasıyla seri direnç, BH ve idealite faktörü değerlerini 0.612 k $\Omega$ , 0.637 eV ve 3.55 olarak hesapladı. Bu çalışmada arayüzey tabakasının idealite faktörünü azalttığı, BH değerini artırdığı görüldü.

Pirghali-Givi ve ark., (2021) PVP-TeO<sub>2</sub>:Cd ince filmi Al/p-si yapısında ara yüzey tabakası olarak kullanarak Al/p-si ve Al/PVP-TeO<sub>2</sub>:Cd/p-si diyot yapılarını oluşturdular. Cd safsızlığının yapının I-V ve empedans-frekans (Z-f) ölçümleriyle incelenen elektrofiziksel parametreleri üzerine etkisini incelediler. Yapısal ve optik özellikleri XRD, FESEM, EDX ve UV-Vis teknikleriyle karakterize ettiler. Al/PVP-TeO<sub>2</sub>:Cd/p-Si diyotu için BH, idealite faktörü ve seri direnç değerlerini I-V datasından sırasıyla 0.54 eV, 4.83 ve 0.27 k $\Omega$ , ve Al/p-Si diyotu için ise 0.65, 5.60 ve 4.80 k $\Omega$  olarak elde ettiler. Ara yüzey tabakasının Al/p-Si diyotunun BH ve idealite faktörü gibi parametrelerini değiştirdiğini rapor ettiler.

Yeşildağ ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada pyrene-imine bazlı organik molekül kullanarak Al/C<sub>40</sub>H<sub>24</sub>N<sub>2</sub>/p-Si aygıtını oluşturdular. Aygıtın elektriksel ve fotovoltajik özelliklerini I-V ve farklı frekanslarda kapasite-kondüktans-gerilim (C-G-V) incelediler. Aygıtın idealite faktörü, BH ve seri direnç değerlerini Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi, Cheung's Metodu ve Norde Metodu ile hesapladılar. İdealite faktörünü TE'ye ve Cheung's Metoduna göre sırasıyla 2.04 ve 2.75 olarak, BH'ni TE teorisi, Cheung's metodu ve Norde metoduna göre sırasıyla 0.77, 0.82 ve 0.79 eV olarak hesapladılar. Seri direnç değerini Cheung's metoduna göre 6.36 k $\Omega$  ve Norde metoduna göre 0.67 k $\Omega$  olarak buldular. 1MHz frekansta C-V karakteristiğinden BHni 0.87 eV olarak elde ettiler.

## 2.1. Metal-Yarıiletken Yapılar

Elektronik cihazların imalatları sürecinde metal-yarıiletken kontaklar (MS) çok büyük öneme sahiptir. İki maddenin minimum dirençle (en ideali sıfır direnç) pürüzsüz, temiz yüzeyleri bir araya getirilerek kontak oluşturulur. Bir metal ile bir yarıiletken uygun şartlarda bir araya getirildiğinde metal-yarıiletken yapılar oluşur. Kontak haline gelmiş yapılar arasında yük paylaşımı olur. Bu sırada termal denge seviyesine ulaştığında fermi enerji seviyeleri de aynı seviyeye ulaşır. İki metal arasında da bu durum gerçekleşirken, metal ve yarıiletken (p-tipi ve n-tipi) arasında da bu olay gerçekleşebilir.

MS kontaklar; metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının değerlerine göre doğrultucu (Schottky) kontak ve omik kontak olmak üzere iki grupta incelenir. Omik ve doğrultucu kontakın yük ve potansiyel dağılımlarına bağlı fiziksel özellikleri ve akım iletim olayı katihal elektroniğinde önemli bir yer tutmaktadır. Elektronu sıfır kinetik enerjiyle Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli asgari enerji miktarına iş fonksiyonu denir. Metale veya yarıiletkene verilen enerji öncelikle iş fonksiyonuna harlandıktan sonra verilen enerji iş fonksiyonundan fazla ise kalan elektrona kinetik enerji olarak aktarılır. Akım taşıyıcıların hareketinin bir yönden diğerine kıyasla zor olduğu kontaklara doğrultucu kontak, her iki yönde de hareketin rahatlıkla meydana geldiği kontaklara da omik kontak denir. Fermi enerji seviyesi, iş fonksiyonu ve yarıiletkenin elektron yakınlığı bir katının temel parametreleridir.

- Fermi enerji seviyesi ( $E_f$ ); elektronların toplam kimyasal potansiyeli olarak tanımlanır ve 0 °K'de bir materyaldeki elektronun maksimum enerjisini temsil eder. Ayrıca Fermi enerji seviyesi bant aralığında olup elektronlarla işgal edilme ihtimali 1/2 olan bir enerji seviyesidir.
- İş fonksiyonu ( $\phi$ ); metalin veya yarıiletkenin Fermi enerji seviyesindeki bir elektronu sıfır kinetik enerjiyle vakum enerji seviyesine çıkarmak için gerekli enerjidir.
- Vakum enerji seviyesi; metal harici olan harekestiz bir elektron enerjisini ifade eder.
- Yarıiletkenin elektron yakınlığı ( $\chi_s$ ); iletkenlik bandının en alt enerji seviyesi ile vakum enerji seviyesi farkına denir.

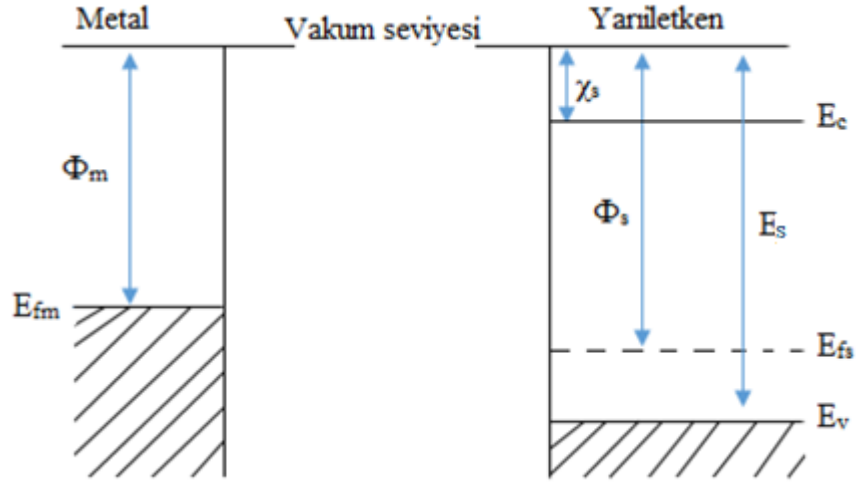
Bir metal ile bir yarıiletkenin birlikte oluşturdukları kontak çeşidinin doğrultucu veya omik olması, kullanılan metalin  $(\phi_m)$  ve yarıiletkenin iş fonksiyonu  $(\phi_s)$  ile birlikte yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi tipi olmasına bağlıdır. Metal-yarıiletken kontaklarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için olası kontak türleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Metal–yarıiletken kontaklarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için kontak türleri

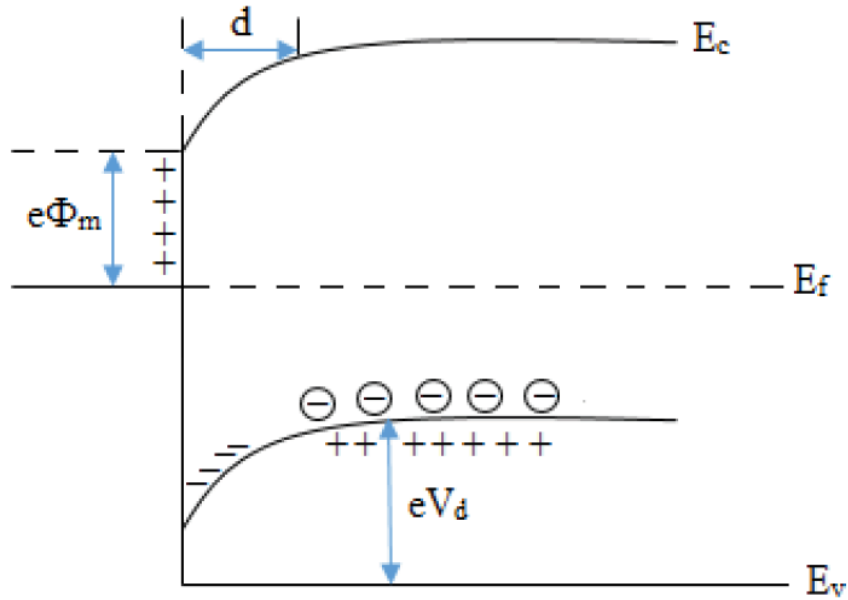
p-tipi yarıiletken	$(\phi_m) < (\phi_s)$	Doğrultucu kontak
	$(\phi_m) > (\phi_s)$	Omik kontak
n-tipi yarıiletken	$(\phi_m) > (\phi_s)$	Doğrultucu kontak
	$(\phi_m) < (\phi_s)$	Omik kontak

### 2.1.1. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Metal ile yarıiletken kontak için temas ettirilerek bir araya getirildiğinde bu iki materyal arasında yeniden yük dağılımı gerçekleşir. Metal-yarıiletken kontakta akım taşıyıcıları (boşluk/elektron) bir doğrultudan diğerine daha kolay geçiyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontak denilir. Bir p-tipi yarıiletken için, metal  $(\phi_m)$  ve yarıiletken iş fonksiyonuna  $(\phi_s)$  bağlı olarak  $(\phi_m) < (\phi_s)$  ise metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Kontakdan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden  $(\phi_s) - (\phi_m)$  kadar aşağıdadır (Şekil 2.1.) (Rhoderick, 1988). Kontakdan hemen sonra ise Şekil 2.2. de görüldüğü gibi metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar metalden yarıiletkene elektron akışı gerçekleşir. Böylece yarıiletken tarafındaki holler iyonize olmuş olurlar. Yarıiletken yüzeyindeki negatif yüklü iyonize olmuş bu akseptörler  $d$  kalınlığındaki bir uzay yükü oluştururlar (Akkılıç, 2002).



Şekil 2.1. Kontak öncesi metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) enerji bant diyagramı



Şekil 2.2. Kontak sonrası metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) enerji bant diyagramı (Evcil, 2019)

Yarıiletken tarafında enerji seviyeleri  $(\phi_s) - (\phi_m)$  kadar yükseldiği için,  $V_d$  difüzyon potansiyeli olmak üzere yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

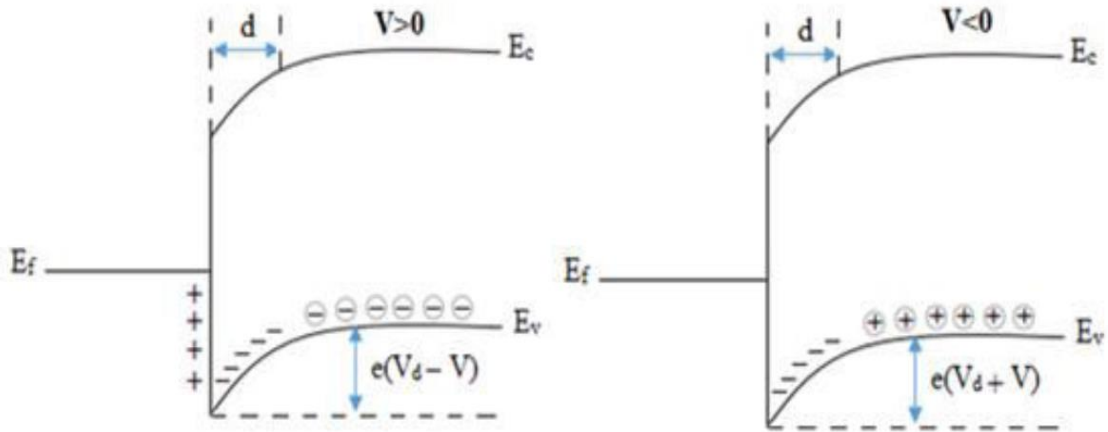
$$eV_d = (\phi_s) - (\phi_m) \quad (2.1)$$

olacaktır. Kontakın metal tarafındaki holler için BH ise;

$$e\phi_b = E_s - (\phi_m) \quad (2.2)$$

şeklinde olacaktır. Burada,  $E_s$ ; vakum üst seviyesi ile valans bandının tabanı arasındaki farkı ifade eder. Termal olarak uyarılan ve böylece potansiyel engelini aşacak enerjiye sahip olan metal ve yarıiletken tarafındaki bazı taşıyıcılar metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale geçebilirler. Buna bağlı olarak termal denge durumunda metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale zıt yönlü olan akımlar eşit olur. Yarıiletkene bir

$V > 0$  gerilimi uygulanırsa soldan sağa akan hol akımı değişmezken (şekil 2.2.), sağdan sola akan hol akımı  $\exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$  çarpanı kadar değişir (şekil 2.3.). Yarıiletkendeki enerji seviyeleri  $eV$  kadar düşer. Neticede yarıiletkenden metale geçen holler için BH  $eV$  kadar azalır (Uslu, 2011).



Şekil 2.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın  $V \neq 0$  olduğundaki enerji bant diyagramı Hollerin oluşturduğu akım pozitif kabul edilirse bir Schottky diyotta akım-gerilim ilişkisi;

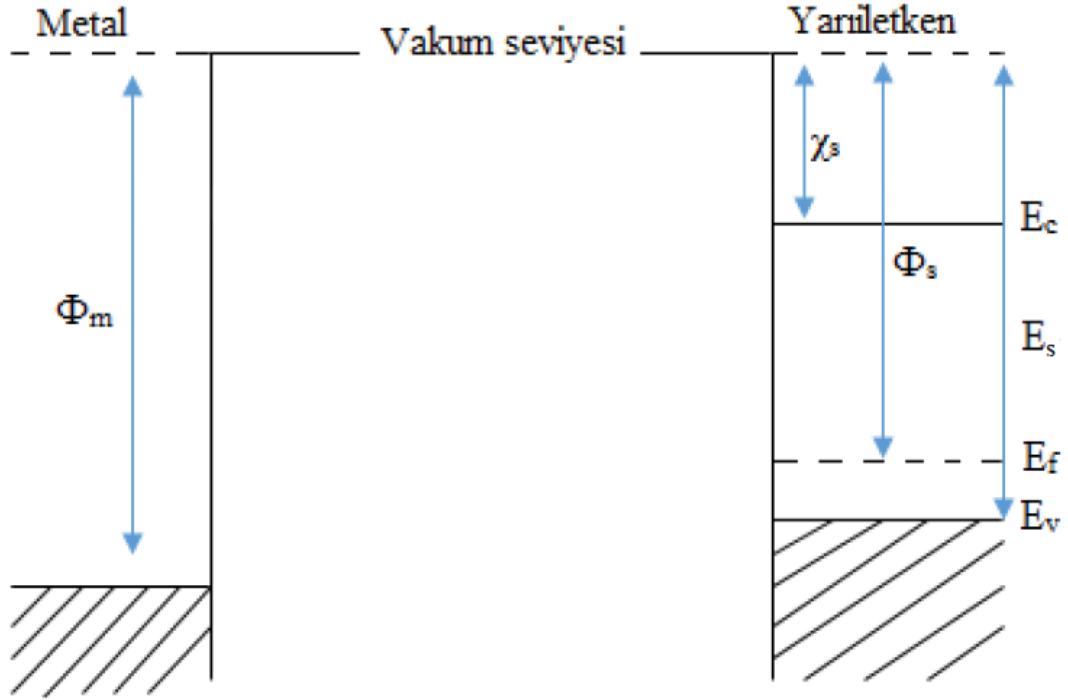
$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $e$  elektronun yükü,  $V$  diyota uygulanan gerilim,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  kelvin cinsinden sıcaklık,  $I_0$  ters kutuplamadaki doyma akımı ve  $n$  diyotun idealite faktörü olup ideal diyot için değeri 1 olan boyutsuz katsayısıdır.

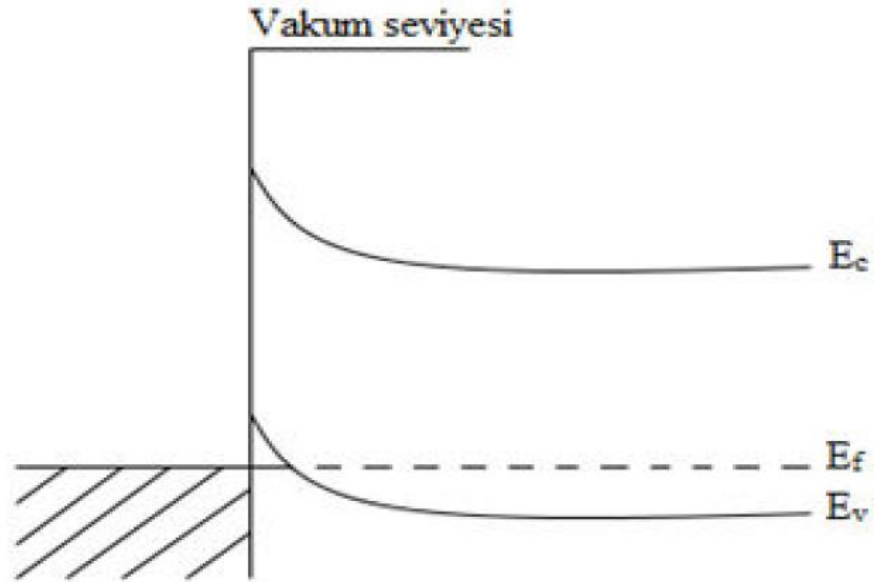
### 2.1.2. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontaklar

Omik kontak, metal/yarıiletken kontakların diğer bir tipi olup, polariteden bağımsız, düşük dirence sahip ve doğrultucu olmayan bir kontak türüdür. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarını incelediğimizde  $(\phi_m) > (\phi_s)$  durumunda Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi kontakta önce metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden  $(\phi_m) - (\phi_s)$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra yük alışverişi gerçekleşerek yarıiletkendeki elektronlar, hollerden dolayı geride bir pozitif yüzey yükünü bırakıp metal tarafına akarlar ve burada negatif bir yüzey yükünü oluştururlar. Bundan dolayı yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.5.'de görüldüğü gibi  $(\phi_m) - (\phi_s)$  kadar aşağı doğru kayar. Yarıiletken yüzeyinde boşluk (hol)

konsantrasyonunun artmasıyla yarıiletken yüzeyi daha fazla p-tipi özellik göstermiş olur.



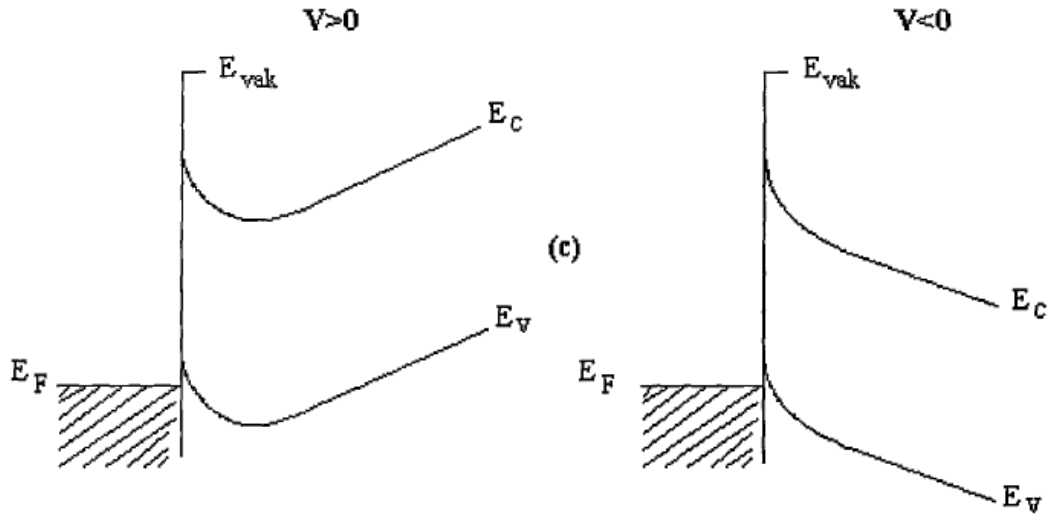
Şekil 2.4. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontak öncesi enerji bant diyagramı (Evcil, 2019)



Şekil 2.5. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontak sonrası enerji bant diyagramı

Elektronlar, metalden yarıiletkendeki boş pozisyonlara rahatlıkla geçebilirler. Yüklerin bu hareketi, hollerin yarıiletkenden metale doğru akmasına karşılık gelir. Metaldeki yüksek elektron konsantrasyonu nedeniyle metal tarafına geçen holler hemen nötr hale gelirler. Ters kutuplamada, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de rahatlıkla yarıiletken tarafına geçebilirler. İki taraftan da akımın bu şekilde

kolayca geçebildiği kontaklara omik kontak denilir (Temirci, 2000). Şekil 2.6.'da metal/p-tipi yarıiletken omik kantağın doğru kutuplama ( $V>0$ ) ve ters kutuplamadaki ( $V<0$ ) enerji bant diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Metal/p-tipi yarıiletken omik kantağın  $V \neq 0$  olduğundaki enerji bant diyagramı (Temirci, 2000)

## 2.2. Metal/Yarıiletken Yapılarda Akım-İletim Mekanizmaları

Metal/yarıiletken kontak ara yüzeyinde gerçekleşen akım iletiminde birçok mekanizma etkilidir. Schottky diyotlarda en olası durum Termiyonik Emisyon (TE) mekanizmasıdır. Diğer mekanizmalar ise, Termiyonik Alan Emisyonunu (TFE), Alan Emisyonu (FE), Engel boyunca tünelleme, Tükenim (deplasyon) bölgesinde generation ve nötral bölgede rekombinasyon mekanizmalarıdır (Rhoderick, 1988).

Metal-yarıiletken kontaklarda oluşan akım, genellikle çoğunluk taşıyıcılarla sağlanırken, p-n eklemine ise akım azınlık taşıyıcılarla sağlanır.

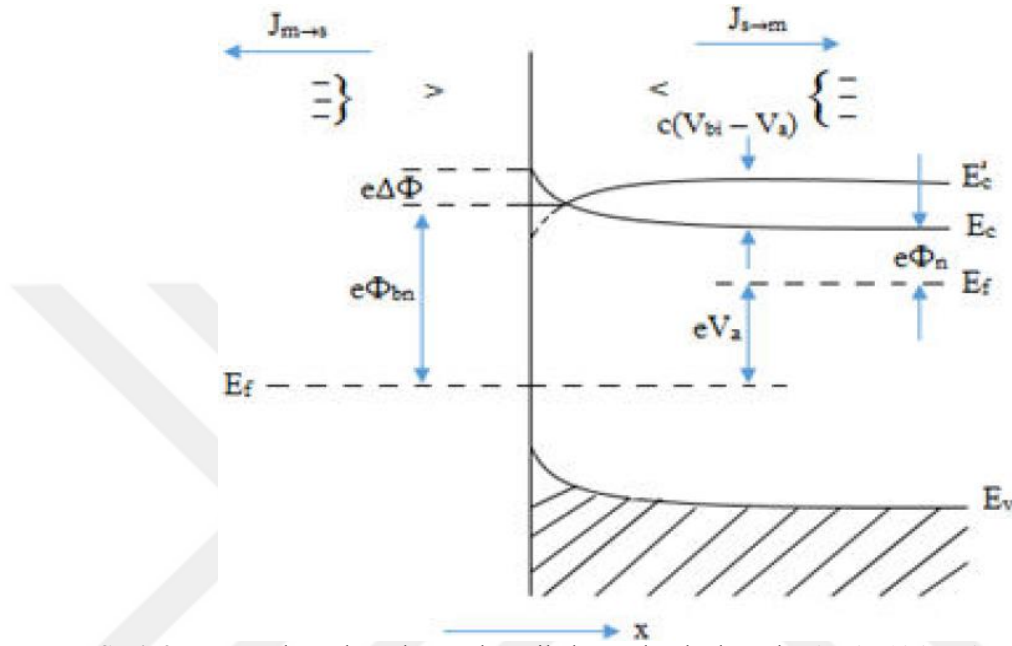
### 2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi

Termiyonik emisyon teorisi, metal-yarıiletken Schottky kontaklarda yeterli ısısal enerjiye sahip yük taşıyıcılarının (elektron veya boşluk) potansiyel engeli üzerinden taşınması süreci şeklinde açıklanmaktadır (Bethe, 1942). TE torisine göre Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Buna göre akım, p-tipi yarıiletken ile oluşturulan MS kontaklarda holler tarafından n-tipi yarıiletken ile oluşturulan MS kontaklarda ise elektronlar tarafından sağlanır (Rhoderick ve ark, 1988).

TE teorisine göre;

- $BH, kT/q$  enerji değerinden çok büyüktür ( $q\phi \gg kT$ ).

- Yük taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky tabaka kalınlığından daha büyüktür yani Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının çok az olduğu varsayılır.
- Görüntü (image) kuvvetlerinin etkisi ihmal edilmektedir ve akım akışı yalnızca BH değerine bağlı olup BH'nin biçimine bağlı değildir.



Şekil 2.7. Doğru kutuplamada metal-yarıiletken Schottky kontakta imaj etkisine ait enerji-bant diyagramı(Evcil, 2019)

TE teorisinde, Maxwell-Boltzman (M-B) yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun korunabilmesi için, doğrultucu kontakın potansiyel engelinin,  $kT$  enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmaların çok az olduğu kabul edilmektedir. Şekil 2.7 'de  $V_a$  büyüklüğünde doğru kutuplama gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak gösterilmektedir. Burada  $J_{s→m}$  ve  $J_{m→s}$  sırasıyla yarıiletkenden metale doğru ve metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur.  $J_{s→m}$  akım yoğunluğu, engeli aşabilecek hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonu olup  $x$ - yönündedir. Buna göre yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_{s→} = e \int_{E_c'}^{\infty} v_x dn \quad (2.4)$$

şeklinde yazılır. Burada  $E_c'$  metaldeki TE için gerekli olan minimum enerjidir,  $v_x$  ise iletim yönündeki hızıdır. Elektron konsantrasyonundaki değişim,

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

ile verilir. Burada  $g_c(E)$ , iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu ve  $f_F(E)$ , Fermi-Dirac olasılık fonksiyonudur. M-B yaklaşımı uygulanarak elektron için konsantrasyonu (2.5) ifadesi,

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

şeklinde ifade edilir.

### 2.2.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon, yoğunluğun fazla olduğu alandan daha az olduğu alana doğru bir yük geçişi olarak tanımlanır. Bu teoriyi Schottky'in bulduğu ileri sürülmekle beraber aşağıdaki şartları kabullenmek daha doğru olacaktır;

- $kT/q$  oranının BH'den çok daha küçük olmalıdır.
- Yük taşıyıcılarının tükenim (deplasyon) bölgesindeki çarpışmaları ihmal edilmez.
- Deplasyon bölgesinin sınırları içinde taşıyıcı konsantrasyonları dengede olup akım akışından etkilenmediği
- Yarı iletkendeki safsızlık atomlarının sayısı dejenere olacak kadar değildir (Sze 1981).

Bu postülatlar doğrultusunda tükenim bölgesinde akım, lokal alan ve konsantrasyon değişimine bağlı olduğundan tükenim bölgesinde akım yoğunluğu denklemi;

$$J_x = J_n = q \left( n\mu_n E + D_n \frac{dn}{dx} \right) = qD_n \left( \frac{n}{kT} \frac{dE_c}{dx} + \frac{dn}{dx} \right) \quad (2.7)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada  $n$  taşıyıcı yoğunluğu,  $\mu_n$  elektron mobilitesi,  $D_n$  elektron difüzyon sabiti ve  $E$  Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Buna göre difüzyon teorisine göre akım ifadesi,

$$j_x = J_{SD} \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \right] \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $J_{SD}$  doyum akım yoğunluğudur.

### 2.3. Metal/Yarıiletken Schottky diyotların Kapasitesi

Schottky diyotlarında yükten arınmış tükenim bölgesinin metal ve yarıiletken tarafı zıt yüklerle kutuplandığı için bir tür paralel plakalı kapasitör gibi davranır. İdeal durumda kapasite ve kondüktans eğrileri frekanstan bağımsızdır. Ancak metal-yarıiletken arasındaki ara yüzey tabakası, yarıiletken ara yüzeyindeki ve ara yüzey tabakadaki ara yüzey durumları, ideal olmayan omik kontaklar ve Schottky diyotun nötral bölgesi seri direnç etkisinden dolayı ideal durumdan sapmalar olur. Kapasite–gerilim karakteristiği ideal olmayan MS Schottky diyotların önemli özelliklerinden biridir. Diyotların ara yüzey durumları, seri direnç gibi elektriksel özelliklerinin C–V karakteristiği üzerine hassas ve güçlü etkisi vardır. Kapasitenin genellikle düşük frekanslarda artması ve yüksek frekanslarda azalması, yük taşıyıcılarının uygulanan AC sinyali takip edip, edememe yeteneğine bağlı olarak değişir. Yarıiletkenle dengede olan ara yüzeydeki yükler yüksek frekanslı AC sinyalini takip edemedikleri için yüksek frekanslarda kapasiteye katkıda bulunamaz (Bozkaplan, 2011). p–tipi bir yarıiletken ile oluşturulan MS kontağının kapasitesi

$$C = A \left( \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_a}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Denklemleri ile ifade edilir (Pakma, 2008). 2.9'deki ifade yeniden düzenlenirse (Rhoderick ve Williams 1988),

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_a} \quad (2.10)$$

yazılır. Burada  $V$  uygulanan gerilim,  $N_a$  yarıiletkenindeki akseptör katkı konsantrasyonudur. Çizilecek  $C^{-2}$ – $V$  grafiği ters kutuplamada doğrusal bir karakteristik verir. Bu doğrunun  $C^{-2}=0$  için gerilim eksenini kestiği noktadan  $V_d=V$  olarak difüzyon potansiyeli elde edilir.  $C^{-2}$ – $V$  karakteristiğinde yapılacak lineer uyumlama (fit) ile doğrunun eğimi bulunur. 2.10 denkleminde  $V$ 'ye göre türevi alınırsa eğim için,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_a} \quad (2.11)$$

bağıntısı elde edilir. Bu ifade  $N_a$  için yeniden düzenlenirse;

$$N_a = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (2.12)$$

Şeklinde elde edilir. p–tipi bir yarıiletkende termal dengede elektron konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.13)$$

ile verilmektedir. Burada  $N_V$ , termal dengede yarıiletkenin valans bandında etkin durumların konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alındığında, 2.13 ifadesi,

$$N_a = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_f}{kT}\right) \quad (2.14)$$

olarak yeniden yazılabilir. İletkenlik bandı referans seviye olarak alınıp ( $E_c=0$ ) bu son ifadenin doğal logaritması alınır;

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_V}{N_a}\right) \quad (2.15)$$

Fermi enerji seviyesi bulunmuş olur. Kapasite-gerilim karakteristiğinden engel yükseklikleri de`;

$$\phi_b(C - V) = E_f + C_2 V_d \quad (2.16)$$

şeklinde ile bulunabilir. Burada  $C_2=1/n'$ dir. (Rhoderick ve Williams 1988).

## 2.4. Schottky BH Üzerine Etkiler

### 2.4.1. Görüntü yük etkisi

İdeal bir MS kontakta BH,

$$\Phi_b = \Phi_m - X_s \quad (2.17)$$

ile verilir. Burada,  $\Phi_m$ , kontak metalin iş fonksiyonu,  $X_s$ , yarıiletkenin elektron ilgisidir. İmaj kuvvet etkisi 2.17'deki eşitlikte verilen Schottky BH'da sapma meydana getirebilir. Metalden  $x$  kadar uzaklıkta dielektrikteki bir elektron, elektrik alanı oluşturur. Oluşan bu elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine dik ve yönü metal yüzeyinden içeriye doğru  $x$  mesafede olan  $+e$  imaj yükü ile aynı olacaktır. Elektron üzerine görüntü yükü ile etkileşmeden dolayı etkiyen kuvvete imaj-kuvveti denir ve bu kuvvet;

$$F = \frac{-e}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE \quad (2.18)$$

ile ifade edilir. Potansiyel ise,

$$-\Phi(x) = + \int_x^\infty E dx = \int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_s 4(x)^2} dx = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.19)$$

olarak bulunabilir. Dış elektrik alan sıfırken potansiyel, denklem (2.19) ile verilmiştir. Dış elektrik alan sıfırdan farklı olduğunda denkleme bir terim daha eklenir ve böylece 2.19 denklemini;

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} - Ex \quad (2.20)$$



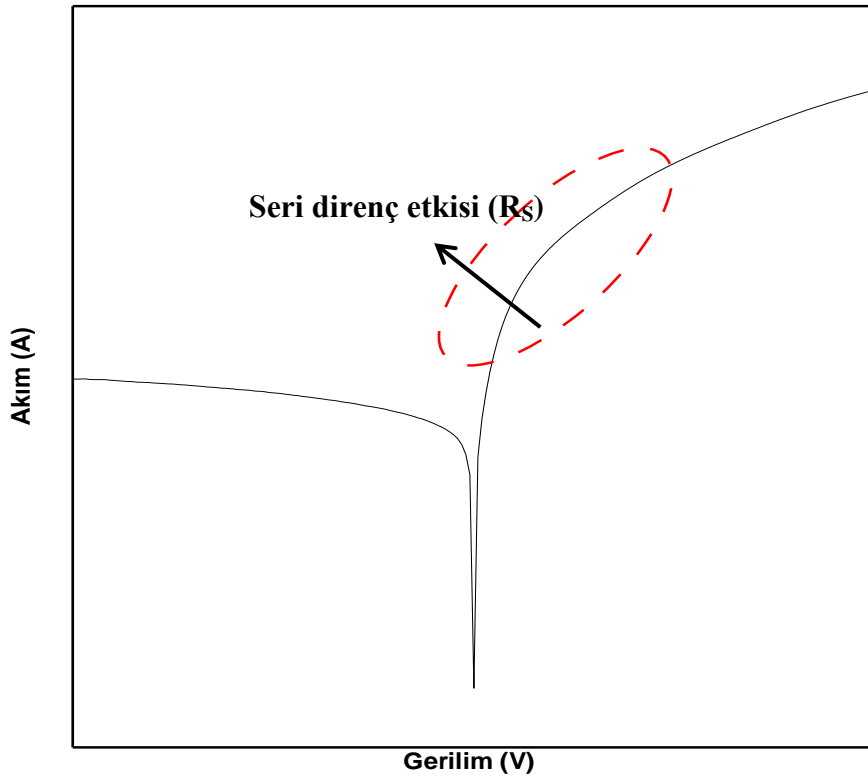
yariletken yüzeyi kıyısında bulunan tüketim tabakası ve arka kontak arasındaki gövde direnci ve (vi) yariletken içerisindeki düzgün olmayan katkı dağılımı olabilir. Seri direnç etkisi diyotun doğru kutuplamadaki nispeten büyük gerilim bölgesinde baskın olmaya başlar ve bu gerilimlerde diyot akımının artış hızının düşmesine neden olarak akım eğrisinde lineerlikten sapma (bükülme) olarak kendini gösterir. Şekil 2.9, bir metal-yariletken diyotta görece büyük gerilim değerlerinde seri direnç etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir. MS yapıların doğru kutuplama akım-gerilim karakteristiklerinin yardımı ile diyot parametrelerinin hesaplanmasında deneysel ve hesaplamalı olmak üzere birçok metot bulunmaktadır. TE teorisi gözönüne alındığında bir diyottan geçen akımın denklemi;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (2.23)$$

olarak ifade edilir. Nötral bölgenin üzerinde seri dirençten dolayı uygulana gerilimde  $IR_s$  kadar bir gerilim düşümü göz önüne alındığında diyotun uçlarında görülen gerilim  $V - IR_s$  olarak yazılır ve denklem yeniden düzenlenerek;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.24)$$

halini alır.



Şekil 2.9. Seri direncin akım-gerilim (I-V) karakteristiğine etkisi (Bozkaplan,2011)

İdeal olmayan Schottky diyotların seri direncini hesaplamak için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlardan tarihsel sıralamaya göre en yaygın kullanılan metotlardan ilki 1979 da Norde tarafından seri direnci hesaplamak için kendi adıyla Norde metodu, diğeri de 1986 da Cheung ve Cheung tarafından diyotun doğru kutuplamadaki I-V datasından yararlanılarak diyot parametrelerin hesaplanması için one sürdürdükleri Cheung's metodudur.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

##### 3.1.1. Silisyum

Yer kabuğunun yaklaşık %26'sı Si elementinden oluşur. Si bir IV-A grubu elementidir. Bileşik olarak en fazla bulunan elementlerden biridir. Son katmanında 4 elektron bulundurduğundan Bor gibi bir III-A grubu elementiyle birleştiğinde (katkılandığında) p-tipi yarı iletken elde edilirken, arsenik gibi V-A grubu elementiyle birleştirildiğinde n-tipi yarı iletken elde edilebiliyor. Saf Si kristal ve amorf olmak üzere iki farklı yapıya görünümü bulunmaktadır. Elektronik cihazlarda kullanımı 20. Yüzyılda başlarken, ham maddesinin (kum) doğada bolca olması ve üretim maliyetinin düşüklüğü transistörlerin yapısında yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Aşağıdaki çizelge 3.1.'de saf silisyumun 300 K'de bazı fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

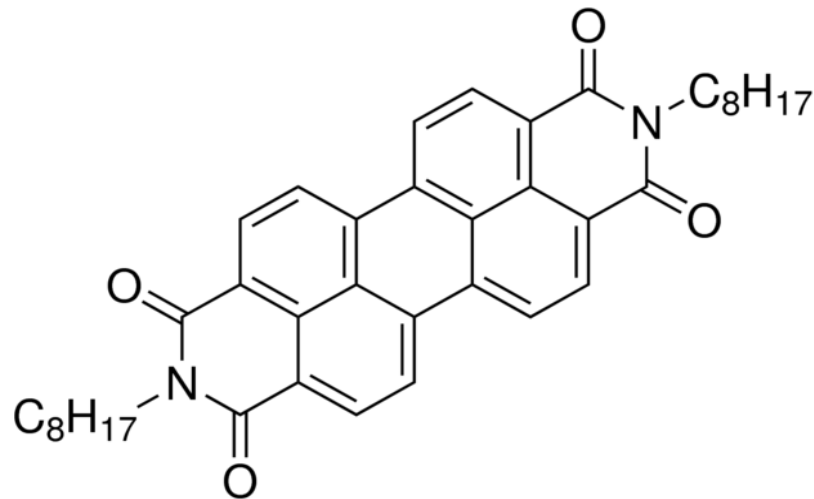
Çizelge 3.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri

Si	Özellikleri
Yoğunluğu	2,328 (g/cm <sup>3</sup> )
Atom ağırlığı	28,09
Kristal yapısı	Elmas
Dielektrik sertlik	3×10 <sup>5</sup> (V/cm)
Atom yoğunluğu	5×10 <sup>22</sup> (Atom/cm <sup>3</sup> )
Bağıl dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumlarının yoğunluğu	2,8×10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>
Valans bandındaki durumlarının yoğunluğu	1,04×10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>

<b>Saf taşıyıcı yoğunluğu</b>	$1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
<b>Saf özdirenci</b>	$2,3 \times 10^5 \text{ cm}^3$
<b>Elektron yakınlığı</b>	4,05 (eV)
<b>Mineral sertliği</b>	6,5
<b>Yasak enerji aralığı</b>	1,12 (eV)
<b>Elektronların etkin kütlesi</b>	$m_l^* = 0,98, m_t^* = 0,19$
<b>Hollerin etkin kütlesi</b>	$m_{lh}^* = 0,16, m_{hh}^* = 0,49$
<b>Elektron Mobilitesi- hole</b>	$1,450-500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
<b>Erime noktası</b>	1414 ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>Kaynama noktası</b>	2900 ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>Termal iletkenliği</b>	1,56 (W/cm.K)
<b>Molar hacmi</b>	12,06 (ml/mol)

### 3.1.2. PTCDI-C8

Organik olan PTCDI-C8 perilen bisimid türevli, molekül formülü  $\text{C}_{40}\text{H}_{42}\text{N}_2\text{O}_4$  ve kırmızı pigmentli bir maddedir. Şekil 3.1’de PTCDI-C8’in molekül yapısı gösterilmektedir. PTCDI-C8 çizelge 3.2’deki fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra  $1.7 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ’lik elektron hareketliliğiyle mevcut en iyi n tipi organik yarıiletkenlerden birini temsil eder (Turak ve ark., 2010).



Şekil 3.1. N, N'-dioktil-3,4: 9,10-perilen tetrakarboxilik diimid( PTCDI-C8 ) molekül yapısı

Çizelge 3.2. PTCDI-C8 maddesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

PTCDI-C8	Özellikleri
Molekül ağırlığı	614.8
Hidrojen bağ alıcı sayısı	4
Hidrojen bağ donör sayısı	0
Dönebilen bağ sayısı	14
Tam kütle	614.31445783
Monoizotopik kütle	614.31445783
Topolojik yüzey alanı	74,8 Å <sup>2</sup>
Ağır atom sayısı	46
İzotop atom sayısı	0
Kovalent bağlı birim sayısı	1
Bileşik kanonikleştirilmiş	evet

Çalışmada PTCDI-C8 maddesinin kullanılmasının başlıca sebepleri;

- Organik elektronik cihazlar için iyi bir aday olması
- Işık altında yüksek absorpsiyon sergilediğinden alıcı malzemeler için çekici olması
- Cihaz içindeki n ve p tipi kanallar için dengeli ve yüksek alan elektron hareketliliği sağlaması

### 3.2. Diyotun Hazırlanması

#### 3.2.1. Silisyum althğın temizlenmesi

Yapılan deneyde [100] doğrultusunda büyütülmüş 400 µm kalınlıklı, akseptör konsantrasyonu  $1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olan bir yüzü parlatılmış p-Si kullanıldı. Kullanılan Si fabrikasyon olarak bir yüzü mekanik parlatılmış şekilde hazır olarak alındığı için yalnız kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirildi. Kristal yüzeyindeki, organik ve diğer kirleri temizlemek için ultrasonik banyo kullanıldı. Si altlık bir elmas kesici ile beş

parçaya bölündü ve bu yarıiletken parçasının temizlenmesi sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirildi;

- Temizleme sırasında deiyonize (DI) saf su kullanıldı. Temizleme işleminden önce cımbız, beher vb. araçlar asetonla iyice yıkandıktan sonra DI saf suyla durulandı. Yarıiletken malzemeyi aseton dolu beherin içerisine katıp ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika yıkadıktan sonra DI su içerisine alınıp tekrar aynı süreyle ultrasonik banyoda duruladı. Asetonla temizleme prosedürü aynı şekilde metanol kullanılarak da yapıldı ve yine DI saf suda durulandı.
- Organik kirlere arındırılan Si altlık yüzeyindeki ince oksit tabakasının kaldırılması için seyreltilmiş hidroflorik asit (HF) çözeltisi ( $H_2O:HF:10:1$ ) içine 30 saniye daldırıldı ve sonra DI saf suyla iyice durulandı.
- Son olarak azot ( $N_2$ ) kurutma yapıldı ve böylece temizlenme kısmını bitirmiş olduk.

### 3.2.2. Omik kontak oluşturulması

Kullanacağımız yarıiletkenin yüzey temizliği yapıldıktan sonra bir tarafına omik kontak oluşturulmalıdır. Buharlaştırma işlemi için kullanılacak ısıtıcı seyrekleştirilmiş HCl (Hidroklorik asit) ve deiyonize saf  $H_2O$  (su) ile iyice yıkanıp oksitlenme için yakıldı. Omik kontakın oluşturulacağı kısma buharlaştırılacak olan Al metali 10'ar dakikalık aralıklarla aseton ve metanol ile ultrasonik olarak ve seyrekleştirilmiş HCl (%10) ile arındırıldı. Sonrasında arındırmak için DI su ile yıkandı. Kuru  $N_2$  gazı ile kurutulduktan hemen sonra bekletilmeden daha önce hazır hale getirilmiş olan Si altlık vakum sistemi içine uygun bir şekilde yerleştirildi. Vakum içindeki basınç, yaklaşık olarak  $10^{-6}$  torr seviyesindeyken kimyasal temizliği daha önce yapılmış ve ısıtıcı potaya yerleştirilmiş olan %99,99 saflıktaki alüminyum metali p-Si'nin mat tarafına buharlaştırıldı. İstenilen kalınlığa gelince buharlaştırma işlemi durdurulup vakum kazanına hava gönderildi. Numune vakum termal buharlaştırma (VTB) cihazından çıkarıldı. Sonra, daha önce fırında  $400-500$  °C'de yakılarak organik kirlere arındırılmış quartz pota içine yerleştirilerek, tavlama işlemi için hazır hale getirilen tüp fırına yerleştirilerek inert  $N_2$  gazı ortamında  $570$  °C'de ve 3 dakika tavlama işlemi gerçekleştirildi. Böylece omik kontak oluşturma aşaması tamamlandı. Şekil 3.3'de omik kontakın oluşumu için laboratuvarımızda bulunan VTB(Vakum termal buharlaştırma) cihazının fotoğrafı almaktadır.



Şekil 3.2. Vakum termal buharlaştırma cihazının fotoğrafı



Şekil 3.3. Tavlama için kullanılan tüp fırının fotoğrafı

### 3.2.3. PTCDI-C8 çözeltisinin hazırlanması ve ince filmin oluşturulması

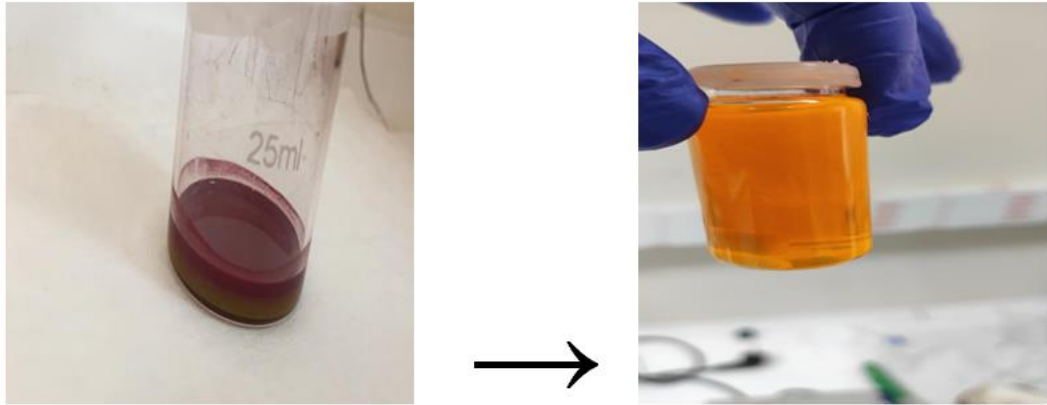
Organik ve yarıiletken özelliğine sahip PTCDI-C8 maddesiyle Kloroform çözücüsünün homojen hale dönüşebilmesi için uygun ölçüler oluşturuldu. Bunun için kullanılması gereken PTCDI-C8 ve Kloroform, homojen çözeltiyi elde etmek için aşağıdaki en uygun oranlar ile bir araya getirilerek oluşturuldu;

PTCDI-C8: 0.005 g

Kloroform: 40 ml

Sıcaklık:35 °C

Beherglas içerisinde belirtilen miktarlarda ve sıcaklıkta PTCDI-C8 organik maddesi üzerine kloroform çözücüsü azar azar eklenerek manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Başlangıçta koyu renkte olan (kırmızı) çözelti, çözücünün eklenmesiyle açık renge dönüşmeye başladı(turuncu). Yaklaşık 20 dk. karıştırılan çözelti homojen hale gelmeye başladı.

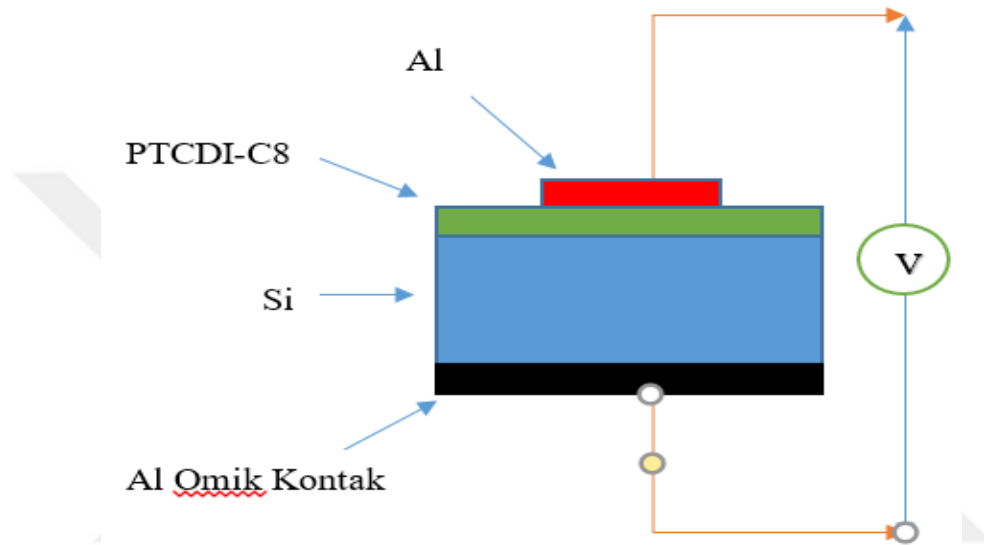


**Şekil 3.4.** PTCDI-C8 organik maddesine Kloroform çözeltisi eklendiğindeki renk değişimi

İnce film oluşturulmasında spin coating (Döndürerek kaplama) yöntemi kullanıldı. Kaplama devir sayısı farklı üç programda, her program 10 sn aralıklarla ve döndürme işlemi 700-1200-1000 (yavaş-yüksek-orta) devir/dk olacak şekilde gerçekleşti. Temizlenen Silisyum, cihaz üzerine yerleştirilerek, üzerine damlalık ile homojen çözelti damlatıldı ve birinci program 700 devirde (düşük) dönmeye başladı. 10 sn geçtikten sonra bir damla daha 1200 devirdeyken (yüksek) damlatıldı. Yine 10 sn sonra 1000 devirde(orta) bir damla damlatılarak dönme işlemi tamamlandı. Daha sonra film yaklaşık 150 °C sıcaklıktaki ısıtıcı üzerinde 10 dk tavlandıktan sonra beklenmeye alındı. Bu işlemler 10 (kat) kez tekrarlandı. Böylece ince film oluşturulmuş oldu ve diyet yapısının tamamlanması için üst kontak oluşturulması için hazır hale getirildi

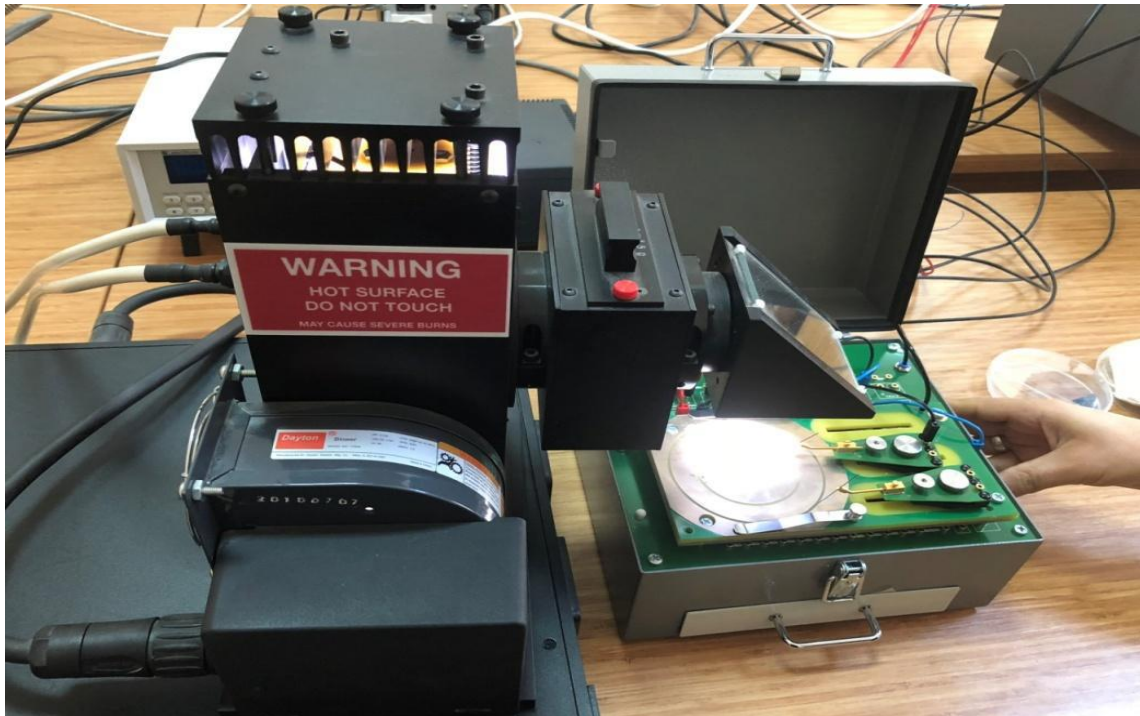
### 3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Elektriksel ölçümlerinin alınabilmesi için  $\sim 100$  nm kalınlığında, 1mm çapında Al kontaklar delikli maske yardımıyla PTCDI-C8/p-Si/Al yapısının üst kısmına  $10^{-6}$  Torr basınç altında %99,99 saflıktaki alüminyum metali buharlaştırılarak doğrultucu kontak işlemi gerçekleştirildi. Doğrultucu kontağında oluşturulmasıyla Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyotu elde edildi. Şekil 3.5’de hazırladığımız Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyotun şemasını görülmektedir.



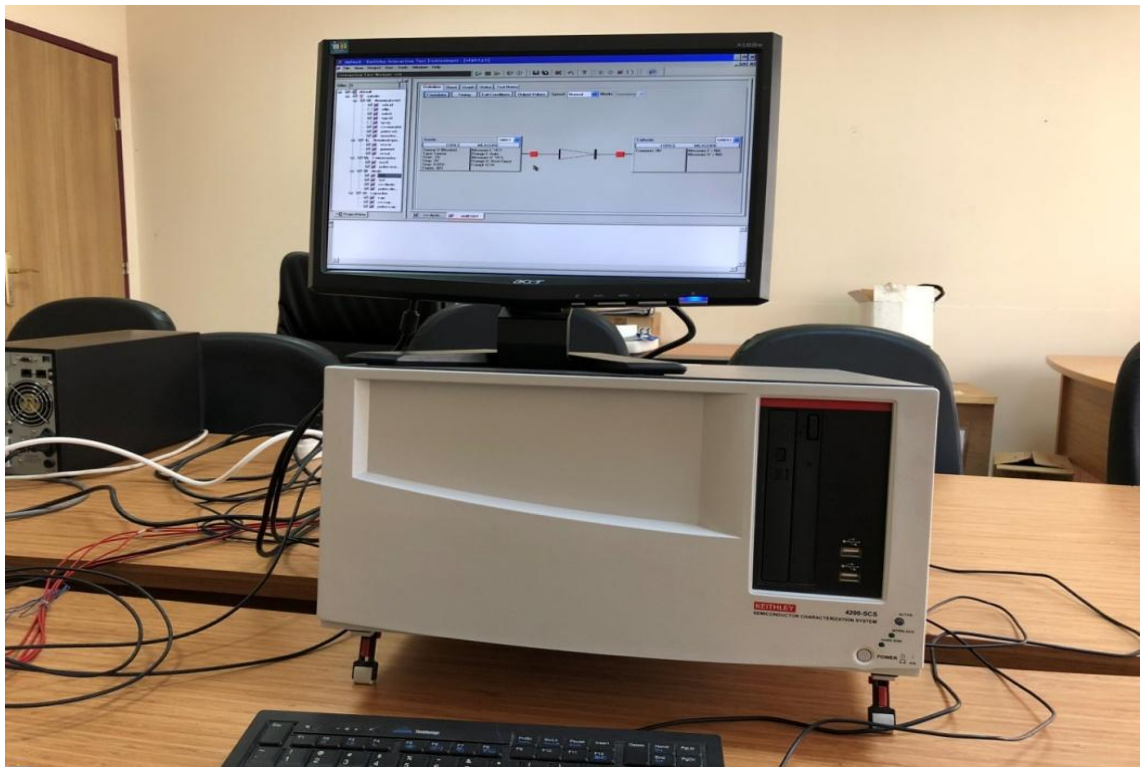
Şekil 3.5. Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyot şeması

Fabrikasyonu yapılan Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyotünün I-V ölçümleri KEITHLEY 4200-SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi cihazı ile oda sıcaklığı koşullarında hem karanlık hem de ışık altında (-2V)-(+2V) değerleri arasında ve 0.02 V aralıklarla alındı. Bunun yanı sıra ışık altındaki I-V ölçümleri solar simülatör ile gerçekleştirildi (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 . Organik ara yüzeyli Al/PTCDI-C8/p-Si/Al diyotunun  $100 \text{ mW/cm}^2$  gücünde ve oda sıcaklığında solar simülör cihazı ile ölçüm düzeneği

Oluşturulan diyotların kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri Batman Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜMER) bulunan KEITHLEY 4200-SCS cihazı ile yapıldı (Şekil 3.7). Ölçümler 10kHz-1MHz frekans ve (-2V+2V) aralığında 0.05 V'luk adımlarda alındı.



Şekil 3.7. Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının I-V ve C-V ölçümlerinin alındığı yarıiletken karakterizasyon sistemi (Keithley 4200-SCS)

### 3.3. Metal-Yarıiletken Kontakların Akım-Gerilim (I-V) Özellikleri

#### 3.3.1. Metal-yarıiletken kontakın engel yüksekliği

Metal-yarıiletken kontakta ait akım-gerilim karakteristikleri Termiyonik Emisyon (TE) teorisinde doğru kutuplama geriliminin küçük değerleri için geçerli olur (Türüt ve Sağlam, 1992). Yani I-V ölçümleri sonucunda oluşturulan grafiklerden; idealite faktörü, diyotun gösterdiği direnç ve BH bulunmuştur. Tabii bu durum ideal Schottky diyotları için geçerlidir. Diyotun ideal bir yapıda olması, ara yüzey tabakalı durumda uygulanan tüm gerilimin deplasyon bölgesi boyunca düşmeyeceğini gösterir. Diyot için akım denklemi daha öncede denklem 2.3'te ifade edilmişti; İdealite faktörü  $n > 1$  şeklindedir. Akım-gerilim karakteristiğinin nispeten yüksek gerilimlerde bükülmesine neden olan etken  $R_s$  seri direncidir. Bu seri direncin hesaba katılması ile akım denklemi,

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

şeklinde yazılır. Yarı logaritmik akım gerilim ( $\ln(I)$ -V) grafiğinde  $I_0$ , lineer kısmın  $V=0$  noktasına doğru extrapolasyonu ile bulunur. Denklem (3.1)'de  $eV \gg 3kT$  olduğu durumda 1 ihmal edilebilir. Denkleminde her iki tarafın logaritması alınıp  $R_s$  etkisi ihmal edilirse, idealite faktörü bu grafiğin lineer kısmının eğiminden bulunur. Yani;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3.2)$$

şeklinde hesaplanır. Bu denklemde V diyot üzerinde oluşan gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti ( $8,625 \cdot 10^5$  eV/K), T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. İdealite faktörü bulunduktan sonra sıfır beslemdeki BH  $\phi_b$  bulunur. 2.52' deki akım denkleminde faydalanarak, her iki tarafın logaritması alınıp, denklem yeniden düzenlenirse;

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

elde edilir ve bu ifadeden de BH;

$$e\phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3.4)$$

olarak elde edilir. Bu denklemde A, diyotun alanı ( $7.85 \cdot 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>), A\* Richardson sabiti ve değeri (p-Si için)  $A^* = 32 \text{ AK}^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ AK}$ 'dir (Sze, 1981).

### 3.3.2. Cheung's fonksiyonları

Schottky diyotlarda akım-gerilim karakteristiğinde uygulanan gerilimde en yüksek değerde, enerji-band diyagramında kırılmaya sebep olan etki seri dirençtir ( $R_S$ ).

Özellikle seri direnç olmak üzere diyotun BH ve idealite gibi değerleri bulabilmek için bulunan yöntemlerden birisi de Cheung ve Cheung (1986) tarafından elde edilen Cheung's fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların belirlenmesinde TE teorisinden faydalanılmıştır.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

Bu ifadede  $eV \gg 3kT$  ise 1 ihmal edilebilir. İdeallikten sapmaları belirlemek için idealite faktörünün ( $n$ ) eklenmesiyle akım denklemini;

$$I = \left[ AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.6)$$

elde edilir.

Gerilimin ( $V$ ),  $IR_S$ 'lik kısmı seri direnç üzerine düşeceğinden  $V$  yerine  $V - IR_S$  yazılır

ise yeni denklemi şu şekilde yazabiliriz;

$$I = \left[ AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{e(V - IR_S)}{nkT}\right) \right] \quad (3.7)$$

Her iki tarafın logaritması alınıp gerilim için tekrardan çözümlendiğinde aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\ln I = \ln AA^*T^2 - \frac{-e\phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_S}{nkT} \quad (3.8)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_S \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemde  $n\phi_b$ 'yi yok etmek için her iki tarafında  $\ln I$  'ya göre türevi alınır,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \quad (3.10)$$

Cheung fonksiyonlarından biri elde edilir. Denklemde görüldüğü üzere,  $dV/d(\ln I)$ 'nın

$I$ 'ya göre lineer olduğu görülür. Grafiğin eğimi de  $R_S$ 'yi gösterecektir. Grafiğin dikey

ekseni kestiği noktada  $n$  idealite faktörü bulunur. Diğer parametrelerin elde edilmesi için  $\Phi_b$  ve  $IR_S$  eşitliğin bir tarafına toplanırsa;

$$V - \frac{nkT}{e} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\phi_b + IR_S \quad (3.11)$$

gibi olur. Bu denklem iki bölüm olarak düşünüldüğünde eşitliğin her bir bölümü Cheung fonksiyonu olarak kabul edilir.

$$H(I) = V - \left( \frac{nkT}{e} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12)' deki denklemlerden;

$$H(I) = n\phi_b + IR_S \quad (3.13)$$

Ve bu denklemde de cheung fonksiyonlarından diğeri yazılır. BH'nin hesaplanabilmesi için  $H(I)$ 'nin  $I$ 'ya göre grafiği çizildiğinde doğru şeklinde bir grafik oluşur. Bu grafiğin eğimi de seri direnci( $R_S$ ) verir. Doğrunun  $H(I)$  eksenine kesiştiği noktada BH ( $e\phi_b$ ) bulunur.

### 3.3.3. Norde fonksiyonu

Diyot parametreleri  $\ln I-V$  grafiğinin eğim çizgisinin eksenine kestiği noktadan bulunur. Ancak seri direncin olması bu parametrelerin belirlenmesinde zorluk meydana getirir. Bu şekilde eğimi alınan lineer  $kT/e \ll V \ll IR$  bölgesi verimli değerler vermeyecek şekilde küçülür. Aynı zamanda gerilimi ( $V$ ) çok küçük ise, diyotta geçen akımın büyük bir kısmı rekombinasyon akımla oluşturulacağı için grafikten yararlanarak elde edilen doyma akımı ( $I_0$ ) değeri güvensiz bir hal alır. Bu BH'ni daha güvenilir hale getirmek için Norde (1979) tarafından tanımlanan bir fonksiyon  $F(V)$  önerilmiştir.

Termiyonik emisyon teoremine göre akım denklemini, Norde denklemi gerilime göre düzenleyerek farklı bir denklem elde etmiştir. Bu denklem aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{e(V - IR_S)}{nkT} \right) \right] \quad (3.14)$$

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.15)$$

Norde;  $e/kT$  bağıntısını  $\beta$  ile ifade etmiştir. Yani  $\beta = e/kT$ 'dir. Denklemde

$V_d \gg kT/e$  alındığında, (3.14) ve (3.15) denklemlerinden ;

$$F(V) = \phi_b + IR_S - \frac{1}{2} V \quad (3.16)$$

elde edilir.

Seri direncin bulunmadığı ideal durumda  $R=0$  ve  $F(V)$  denklemi eğimi 0.5 olan bir doğru verir. Bu doğrunun  $F(V)$  eksenini kestiği noktada  $\phi_b$  BH bulunur. Sadece seri direncin olduğu durum için denklem aşağıdaki gibi olur.

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{RAA*T^2}\right) \quad (3.17)$$

(3.17) denklemi için yüksek gerilim değerlerinde kesim eğrisinin eğimi 1/2 olur. Düşük akımlarda direncin göz ardı edildiği  $F(V)$  geçerlidir. Seri direncin yüksek olduğu akımlar için  $F_R(V)$  olur. Bu durumda  $F(V)$  iki uç nokta arasında minimum bir değere sahip olacaktır. (3.16) denkleminin gerilime göre türevi alınır;

$$\frac{dF}{dV} = R_S \left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} = \quad (3.18)$$

bulunur.  $V_d$  'ye göre denklem düzenlenirse;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[1 + R_S \left(\frac{dI}{dV_d}\right)\right]^{-1} = \quad (3.19)$$

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{d}{dV_d} [I_0 \exp(\beta V_d)] = \beta I \quad (3.20)$$

$F(V)$  fonksiyonun  $V$ 'ye göre türevi alınır; aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\beta R I}{1 + \beta R I} - \frac{1}{2} \quad (3.21)$$

$dF/dV = 0$  olduğu zaman,  $F(V)$ 'yi minimum yapan  $I_{min}$  bulunur. Böylece;

$$I_{min} = \frac{I}{\beta R} = \frac{kT}{eR} \quad (3.22)$$

olarak bulunur.  $I_{min}$  değerini kullanarak  $V_{min}$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{min} = I_{min} R_S + V_d(I_{min}) = \frac{I}{\beta} + \ln\left(\frac{I_{min}}{AA*T^2}\right) \quad (3.23)$$

$F(V)$  denkleminin minimum değeri ;

$$F(V_{min}) = \frac{V_{min}}{2} - \frac{I}{\beta} \ln\left(\frac{I_{min}}{AA*T^2}\right) \quad (3.24)$$

$I_{min}$  ,  $V_{min}$  ve  $F(V)$  terimlerinin değerlerinde (3.22) ve (3.23) denklemleri kullanılarak  $R_S$  ve  $\phi_b$  denklemleri elde edilir.

$$R_S = \frac{kT}{eI_{min}} \quad (3.25)$$

$$\phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{kT}{e} \quad (3.26)$$

Norde tarafından geliştirilen bu yöntem seri direncin minimum olduğu ideal durumlar için geçerlidir. Bohlin, 1986 yılında Norde yöntemini geliştirerek genellemiştir (modifiye Norde fonksiyonları). Burada Norde yöntemini kullanarak seri direnç ve n değerlerini hesaplamıştır. Böylece Bohlin de, Norde fonksiyonunu şu şekilde genellemiştir;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{I}{\beta} \left[ \ln \left( \frac{I(V)}{AA*T^2} \right) \right] \quad (3.27)$$

Denlemdaki  $I(V)$  akım-gerilim grafiğinden alınan değerlerdir. Burada  $\gamma$ , n'den büyük tamsayı bir sabittir.  $F(V)$ 'nin  $V$ 'ye göre grafiğinden elde edilen BH de;

$$\phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \quad (3.28)$$

elde edilir.  $F(V)$  eğrisinin minimum noktası,  $F(V_{min})$  'dir. Bu noktaya karşılık gelen beslem değeri  $V_{min}$  'dir.  $n > 1$  olduğunda ise ;

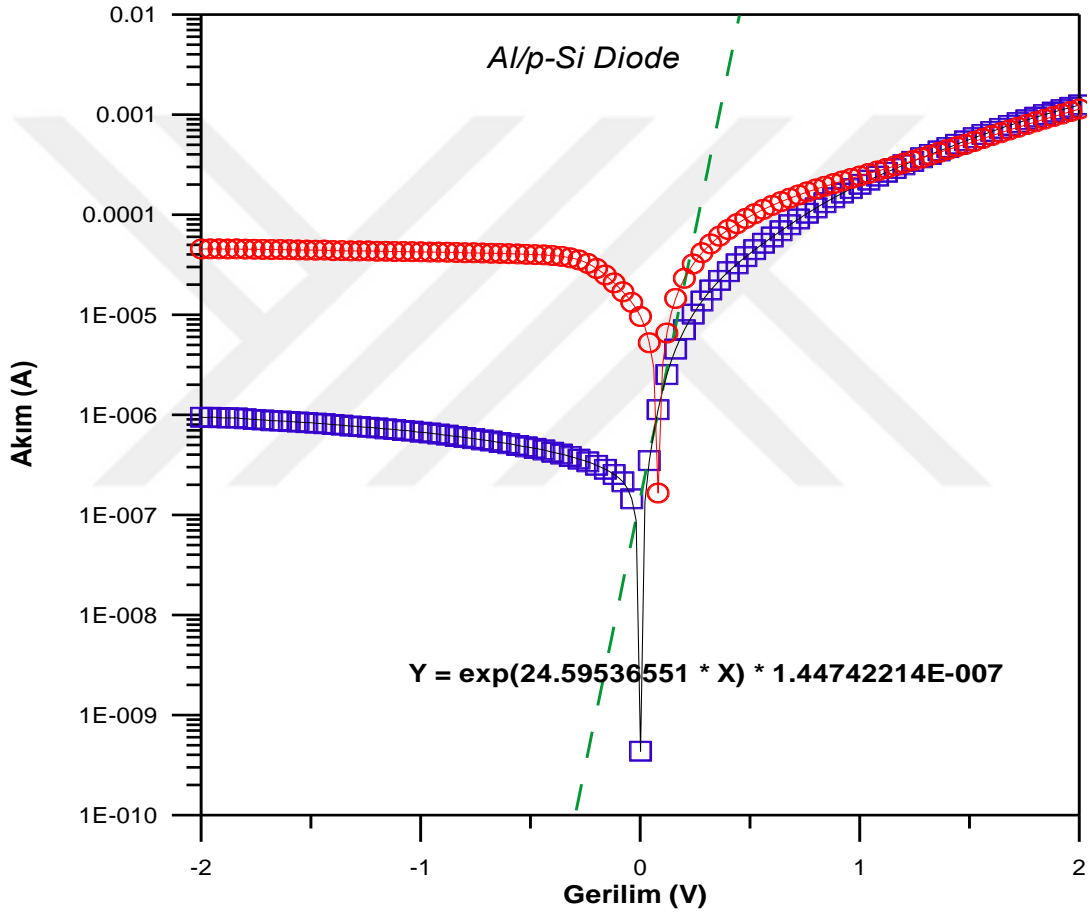
$$R_S = \frac{(\gamma - n)kT}{eI_{min}} \quad (3.29)$$

olur.  $F(V)$ 'nin minimum değerinde okunan  $V_{min}$  değerindeki doğru kutuplama akımı ise  $I_{min}$  'dir.

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

##### 4.1. Akım-Gerilim Karakteristikleri ve Diyot Parametreleri

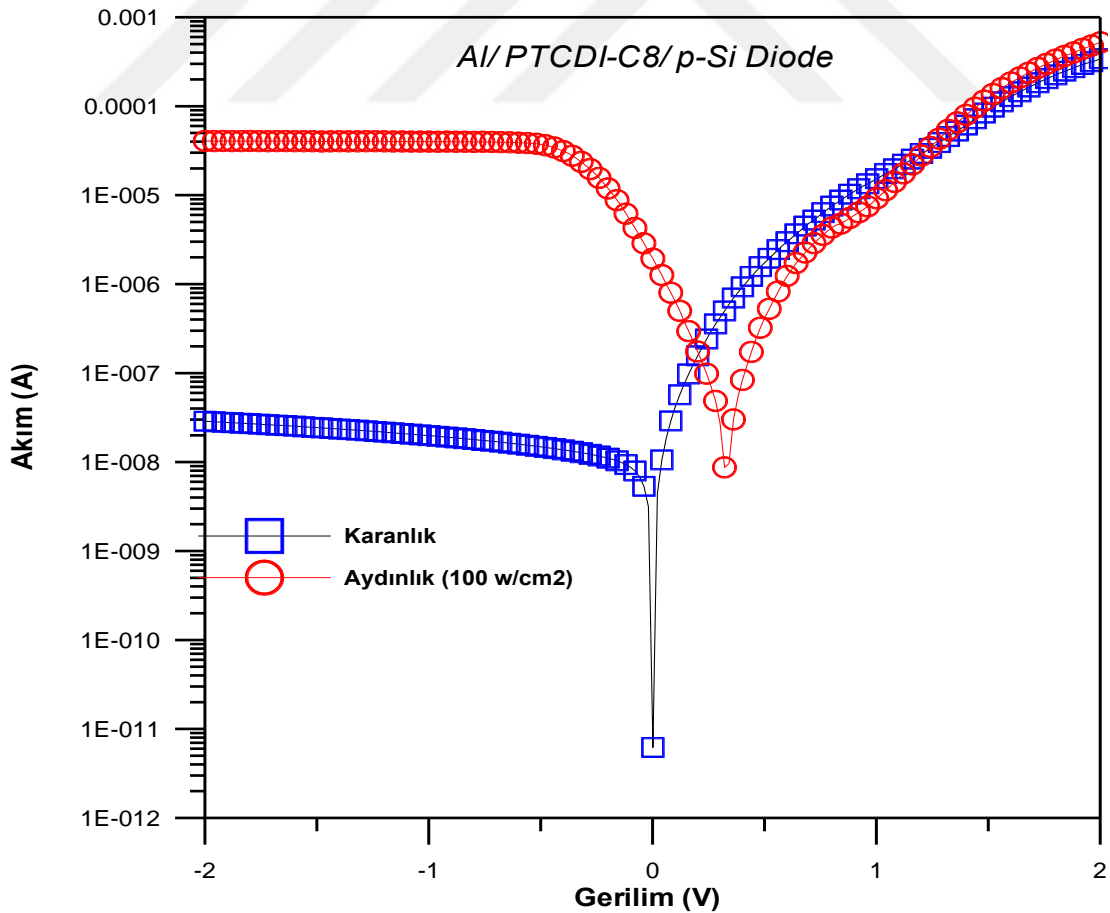
Üretilen Al/p-Si referans ve Al/PTCDI-C8/p-Si MIS diyotlarının akım-gerilim ölçümleri yarıiletken karakterizasyon cihazıyla oda sıcaklığında karanlık ve aydınlık şartlarında, (-2V)-(+2V) aralığında 0.02 V adımlarla alındı. Deneysel verilerden hem karanlıkta hem de ışık altında Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının yarı-logaritmik akım-gerilim ( $\ln(I)$ -V) grafikleri sırasıyla şekil 4.1 ve şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Al/p-si referans diyotun oda sıcaklığındaki akım-gerilim grafiği

Diyotların deneysel idealite faktörü ve BH değerleri hesaplanırken sırasıyla denklem 3.2. ve denklem 3.4. kullanıldı. Ara tabakasız referans Al/p-Si diyotunun karanlıkta hesaplanan BH değeri  $\phi_b=0,662$  eV, idealite faktörü  $n=1,58$  ve doyma akımı  $I_0= 1.44 \times 10^{-7}$  A olarak elde edildi. Işık altındaki akım-gerilim verisinden açık devre gerilimi  $V_{OC}$ : 80 mV, kısa devre akımı  $I_{SC}$ : 9.66  $\mu$ A ve -2 V'teki akımlar oranı=48.206 olarak hesaplandı. Al/p-Si diyotunun  $n=1.58$  olarak değerinin idealden büyük çıkması

fabrikasyon sırasında istenmeyen ara yüzey oksit tabakasına, ara yüzey durumlarına ve BH'nin homojensizliğine ve seri dirence atfedilir (Karataş, 2010; Yüksel, 2009; Altındal ve ark., 2007; Çankaya ve Uçar, 2004). Örneğin, Bilkan ve ark. (2015), ara tabakalı Al/C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>/p-Si ve ara tabakasız Al/p-Si diyotları için idealite faktörü değerlerini sırasıyla  $n=3.834$  ve  $n=2.765$  olarak buldular. Onlar,  $n$ 'nin bu yüksek değerlerini arayüzey perilen tabakasının varlığına, p-Si/perilen arayüzünde arayüzey durumlarının (N<sub>ss</sub>) özel yoğunluk dağılımına ve Al/p-Si arayüzünde düşük Schottky BH'ne veya homojensizliklerin geniş dağılımına atfettiler. Karadeniz ve ark. (2013); Al/p-Si ve Al/rubrene/p-Si diyotlarının idealite faktörü değerlerini 1.22 ve 1.52, BH değerini de 0.649 ve 0.771 olarak buldular. Al/rubrene/p-Si'nin yüksek idealite faktörü değerini ( $n = 1.51$ ) arayüz katmanındaki potansiyel düşüşten, aşırı akımın varlığından ve yarı iletken ile yalıtkan arasındaki arayüzey durumları boyunca rekombinasyon akımından kaynaklanabileceğini rapor ettiler. Engel yüksekliğindeki artışı Rubren tabakasının, metalin iş fonksiyonunda ve yarı iletkenin elektron afinitesinde önemli bir kayma üretebilmesine ve buna karşılık, organik tabakanın 0.122 eV'lik bir engel artışı verdiği atfettiler.



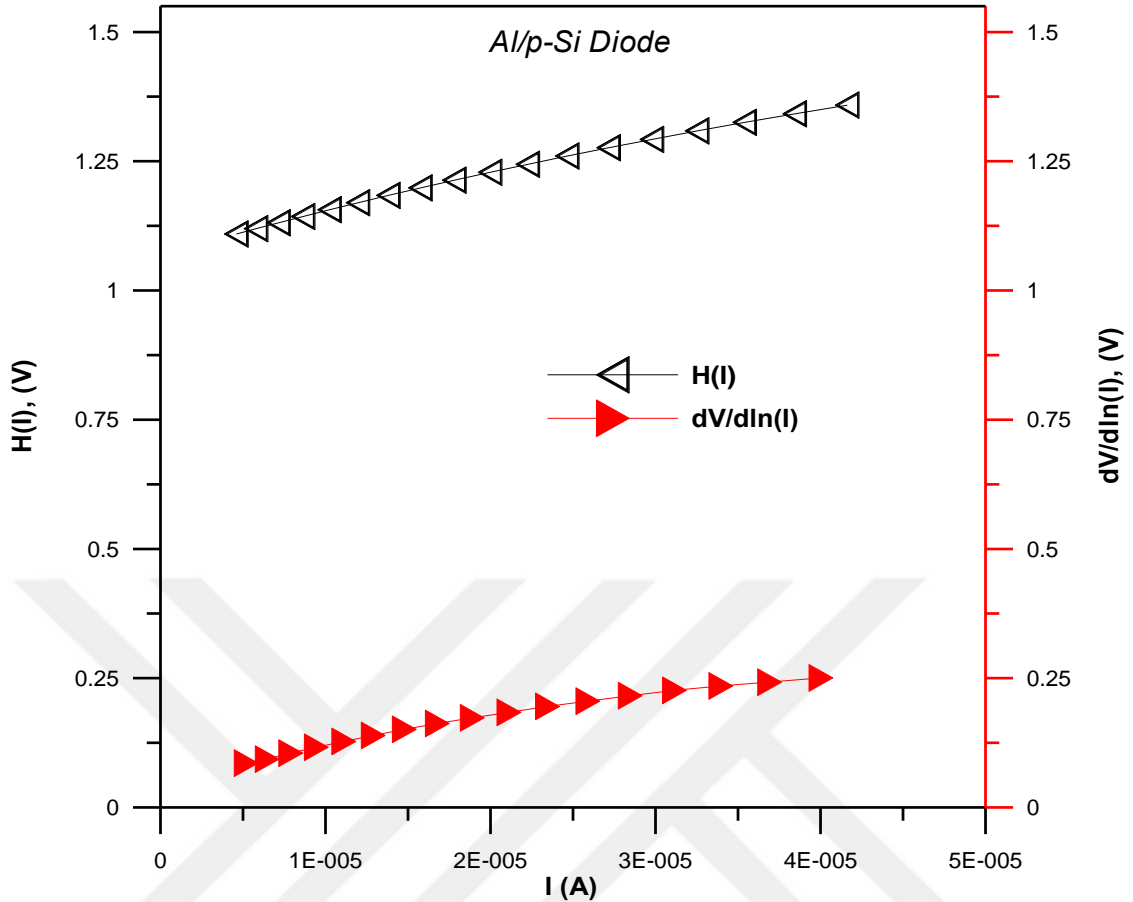
Şekil 4.2. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun oda sıcaklığındaki akım-gerilim grafiği

Ara tabakalı Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun karanlıkta hesaplanan BH değeri  $\phi_b=0.742$  eV, idealite faktörü  $n=2.1$  ve doyma akımı  $I_0=6.41 \times 10^{-9}$  A olarak bulundu.

Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun BH'nin Al/p-Si referans diyotunkinden farklı çıkması, ara tabakanın varlığına ve ara yüzeydeki oksitlenmenin diyotun uzay bölgesindeki yük dağılımının değişmesinden kaynaklandığına atfetmekteyiz. Aynı zamanda, Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun idealite faktörünün Al/p-Si referans diyotunkinden farklı çıkması PTCDI-C8 organik yarı iletken maddenin etkisiyle diyotun idealite faktörünü değiştirdiğini gösterir. Üretilen diyotlardaki idealite faktörünün idealden büyük çıkması ise, genelde üretim sırasında olabilecek ara yüzey oksit tabakasına, yüzey/ara yüzey hallerine ve seri direnç ( $R_s$ ) etkisinden ortaya çıkar (Güllü, 2018). Işık altındaki akım-gerilim verisinden açık devre gerilimi  $V_{OC}=320$  mV, kısa devre akımı  $I_{SC}=1.91$   $\mu$ A ve  $-2V$ 'taki Akımlar oranı=1418.7 olarak hesaplandı. Schottky bariyer diyotlarının bariyer yüksekliğini arttırmaya, azaltmaya veya değiştirmeye yönelik birçok girişim, metal ve yarı iletken arasında bir ara yüzey tabakası oluşturulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Öneğin; Yeşildağ ve ark., (2021), yaptıkları çalışmada pyrene-imine bazlı organik molekül kullanarak Al/C<sub>40</sub>H<sub>24</sub>N<sub>2</sub>/p-Si diyotunu oluşturdular. Diyotun idealite faktörünü TE'ye ve Cheung's Metoduna göre sırasıyla 2.04 ve 2.75 olarak, BHni TE teorisi, Cheung's metodu ve Norde metoduna göre sırasıyla 0.77, 0.82 ve 0.79 eV olarak hesapladılar ve organik ara tabakanın idalite faktörünü ve BH'ni artırdığını ve arayüz katmanının, kaçak akımı önlediğini ve ters kutuplama akımını azalttığını rapor ettiler.

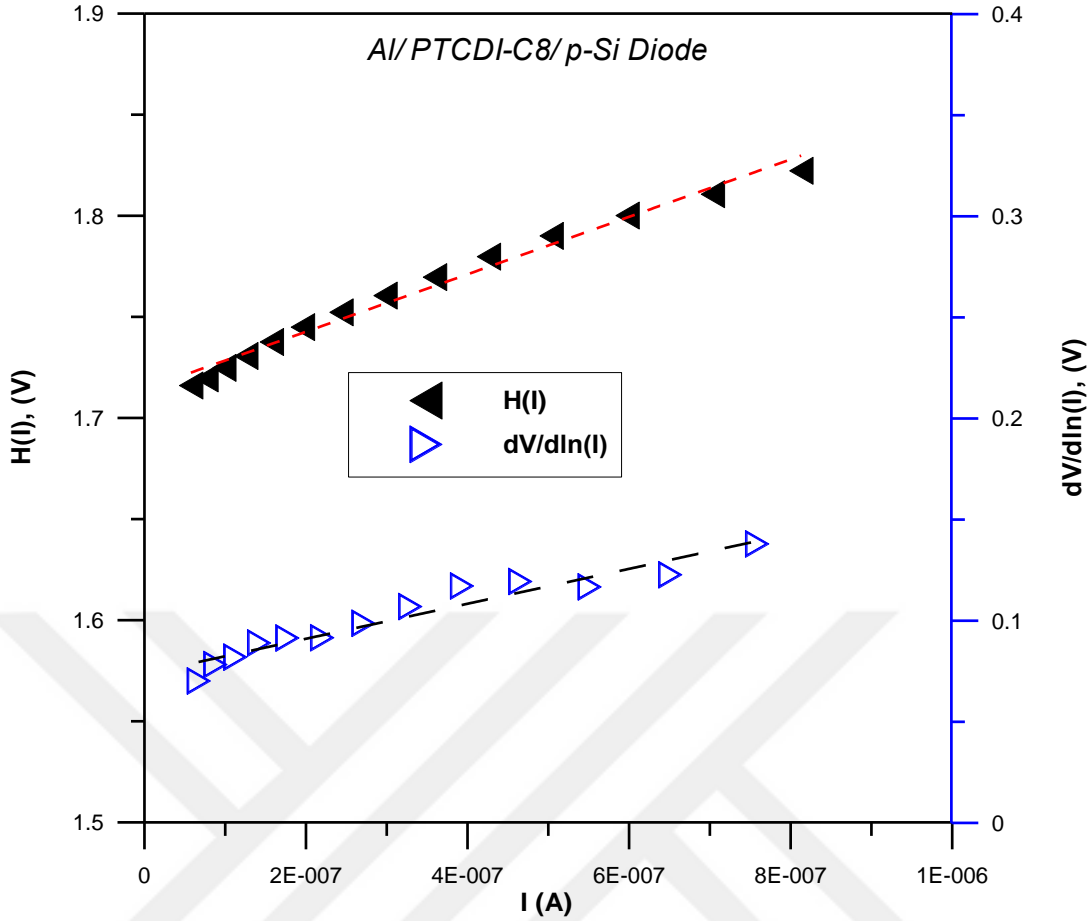
Seri direnç durumunda diyotun, BH, seri direnç ve idealite faktörü gibi değerlerin bulunabilmesi için kullanılan yöntemlerden biri Cheungs metodudur. S.K. Cheung ve N.W. Cheung (1986) tarafından geliştirilen bu metotta, denklem 3.10 ve 3.13'deki Cheungs fonksiyonlarından Al/p-si referans diyotu için elde edilen  $dV/d(\ln I)-I$  (Kırmızı) ve  $H(I)-I$  (Siyah) grafikleri aynı grafikte ve sırasıyla Şekil 4.3'teki grafiğin sağ ve sol düşey eksenlerinde gösterildi. Al/p-si referans diyotu için  $dV/d(\ln I)-I$  grafiğinin eğiminden seri direnç  $R_s=4.821 \times 10^3 \Omega$  ve düşey ekseni kestiği noktadan da idealite faktörü  $n=2.887$  olarak hesaplandı. Yine Al/p-si referans diyotu için  $H(I)-I$  grafiğinin eğiminden seri direnç  $R_s=6.784 \times 10^3 \Omega$  ve BH de  $\phi_b=0.679$  eV olarak hesaplandı.

Diyotta ara tabakanın seri direnç üzerine etkisiyle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Genellikle ara tabakanın seri direnç üzerindeki etkisi seri direncin artışı yönündedir



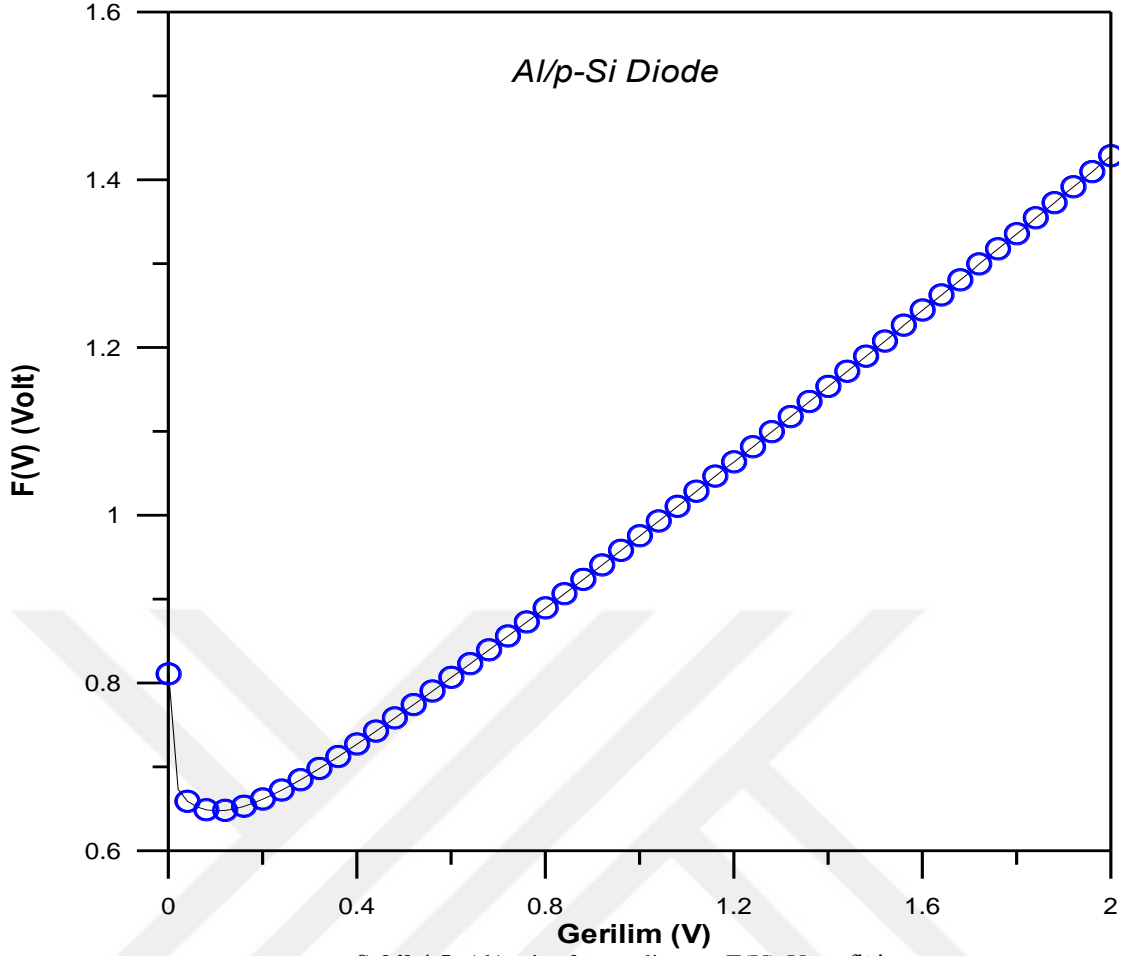
Şekil 4.3. Al/p-si referans diyotun  $dV/d(\ln I)$ -I ve  $H(I)$ -I grafiği

Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun  $dV/d(\ln I)$ -I (Mavi) ve  $H(I)$ -I (Siyah) grafikleri aynı grafikte ve sırasıyla Şekil 4.4'teki grafiğin sağ ve sol düşey eksenlerinde gösterildi. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotu için  $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinin eğiminden seri direnç  $R_s = 0.86 \times 10^5 \Omega$  ve düşey ekseni kestiği noktadan da idealite faktörü  $n = 2.87$  olarak hesaplandı. Yine Al/PTCDI-C8/p-Si diyotu için  $H(I)$ -I grafiğinin eğiminden seri direnç  $R_s = 1.42 \times 10^5 \Omega$  ve BH de  $\phi_b = 0.758$  eV olarak hesaplandı.



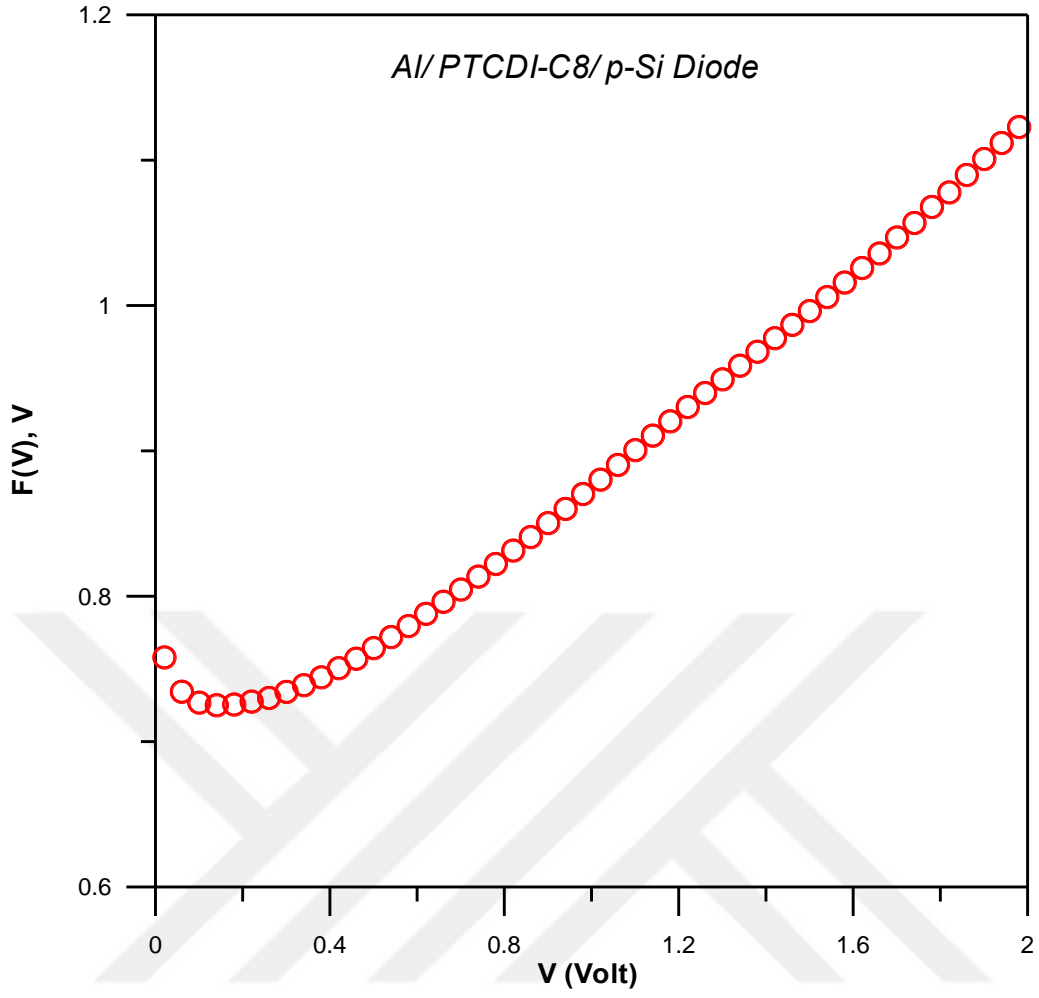
Şekil 4.4. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafiği

Diyotun BH, idealite faktörü ve seri direnç gibi parametrelerinin hesaplanması için yaygın kullanılan yöntemlerden diğeri de Norde (1979) tarafından geliştirilen Norde fonksiyonlarıdır. Diyotların deneysel akım-gerilim verilerinden denklem 3.27'ye göre  $F(V)$ - $V$  grafikleri oluşturuldu. Şekil 4.5 ve şekil 4.6'da sırasıyla Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının  $F(V)$ - $V$  grafikleri gösterilmiştir. Her iki diyotun BH ve seri direnç değerleri sırasıyla Norde metodundaki denklem 3.28 ve 3.29'a ve göre elde edildi. Buna göre referans Al/p-Si diyotun Norde fonksiyonundan elde edilen parametre ve değerleri  $V_0= 0,1$ ,  $F(V_0)=0.648$ ,  $\gamma=2$ ,  $I_{min}=1.575 \times 10^{-6}$  A, BH 0.672 eV ve seri direnç değeri  $R_s= 6.12 \times 10^3 \Omega$  olarak elde edildi ve çizelge 4.1'e çıkarılmıştır.



Şekil 4.5. Al/p-si referans diyotun F(V)-V grafiği

Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun Norde fonksiyonundan elde edilen parametre ve değerleri  $V_0= 0,14$ ,  $F(V_0)=0.725$ ,  $\gamma=3$ ,  $I_{min}=7.64 \times 10^{-8}$  A, BH 0.787 eV ve seri direnç değeri  $R_s= 2.48 \times 10^5 \Omega$  olarak elde edildi ve çizelge 4.1'e çıkarılmıştır.



Şekil 4.6. Al/PTCDI-C8/p-Si referans diyotun  $F(V)$ - $V$  grafiği

**Çizelge 4.1.** Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının I-V, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri (Diyot alanı A=0,00785 cm<sup>2</sup> olarak alınmıştır.)

Numune Adı	Cheung							Norde	
	Fonksiyonu				I-V Grafiği			Fonksiyonu	
	dV/d(lnI)-I		H(I)-I Grafiği					F(V <sub>0</sub> )-V <sub>0</sub> Grafiği	
	Rs(kΩ)	n	Rs(kΩ)	φ <sub>b</sub> (eV)	n	φ <sub>b</sub> (eV)	I <sub>0</sub> (A)	Rs(kΩ)	φ <sub>b</sub> (eV)
Al/p-Si	4.821	2.887	6.784	0.679	1.58	0.662	1.44x10 <sup>-7</sup>	6.12	0.672
Al/PTCDI-C8/p-Si	86	2.87	142	0.758	2.1	0.742	6.41x10 <sup>-9</sup>	248	0.787

#### 4.2. Kapasite-Gerilim Karakteristikleri ve Diyot parametreleri

Kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri MIS diyotların kalitesi hakkında bilgiler veren, ara yüzey durum yoğunluklarının belirlenmesi için kullanılan önemli tekniklerdendir. Diyot sığası,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{qA^2 \epsilon_S N_A} \quad (4.1)$$

olarak belirlenir. Na

$$N_A = \frac{2}{qA^2 \epsilon_S \epsilon_0} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (4.2)$$

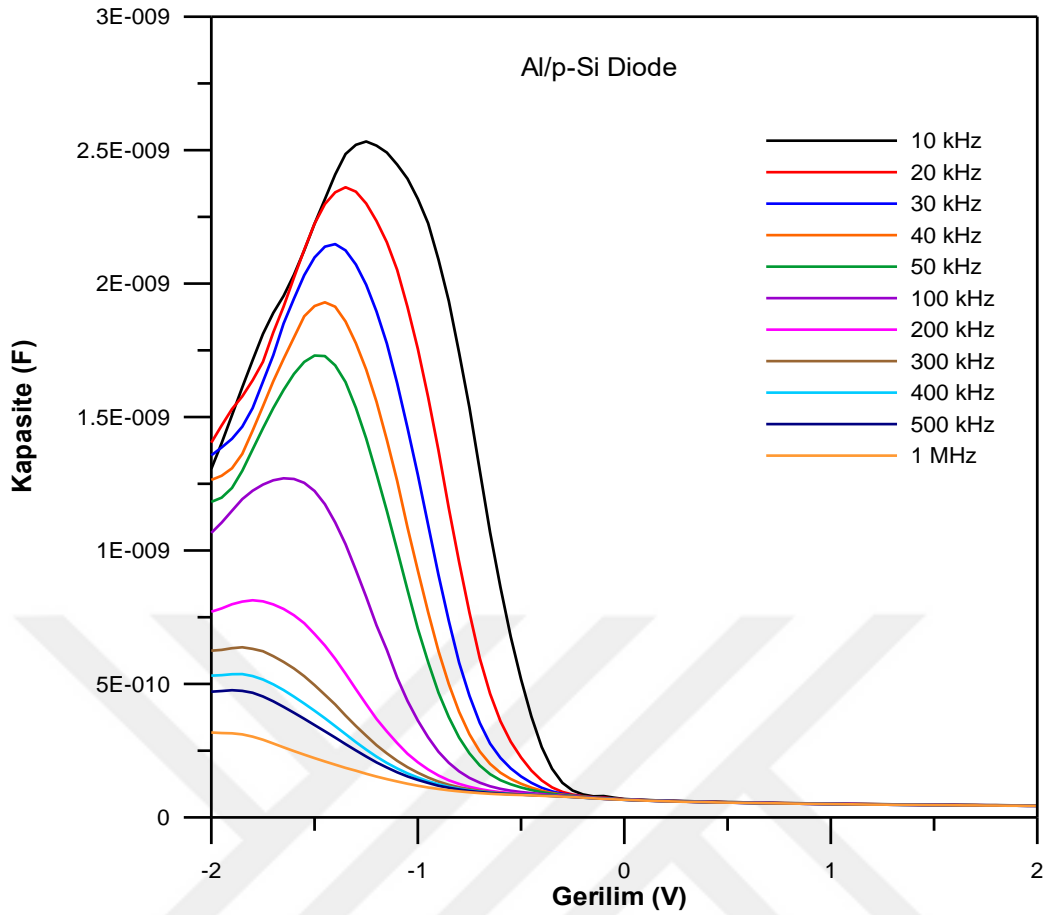
Eşitliği elde edilir. C-V'den BH;

$$\phi_b = c_2 V_d + V_p \quad (4.3)$$

elde edilir.

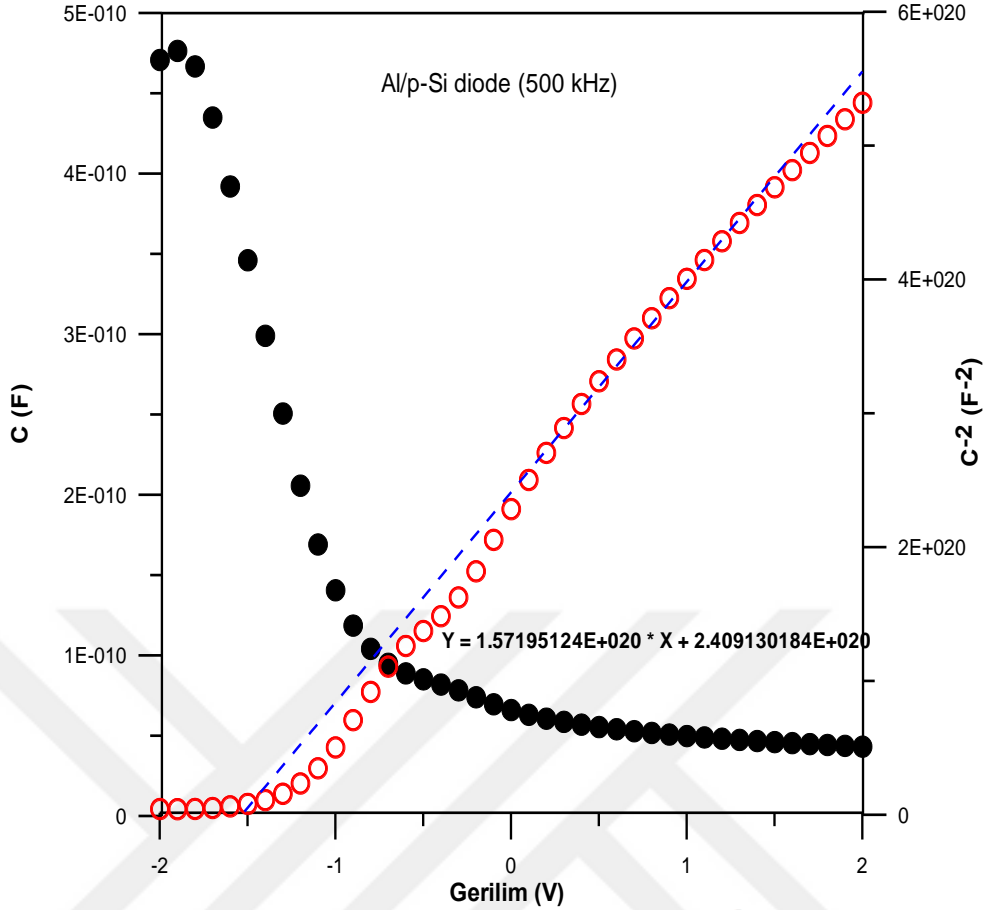
$$V_p = kT \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) \quad (4.4)$$

burada N<sub>v</sub>, p-Si yarıiletkeninin E<sub>v</sub> valans bandındaki etkin durumların yoğunluğudur ve p-Si için bu değer N<sub>v</sub> = 1.04 · 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> tür. Şekil 4.7'da Al/p-Si diyotunun 10 kHz ile 1 MHz arasında farklı frekanslardaki C-V grafiği gösterilmiştir. Buna göre frekans arttıkça kapasitenin azaldığı gözlemlendi. Bu ara yüzey durumlarının yüksek frekansta AC sinyalinin takip edememesinden kaynaklanmaktadır.



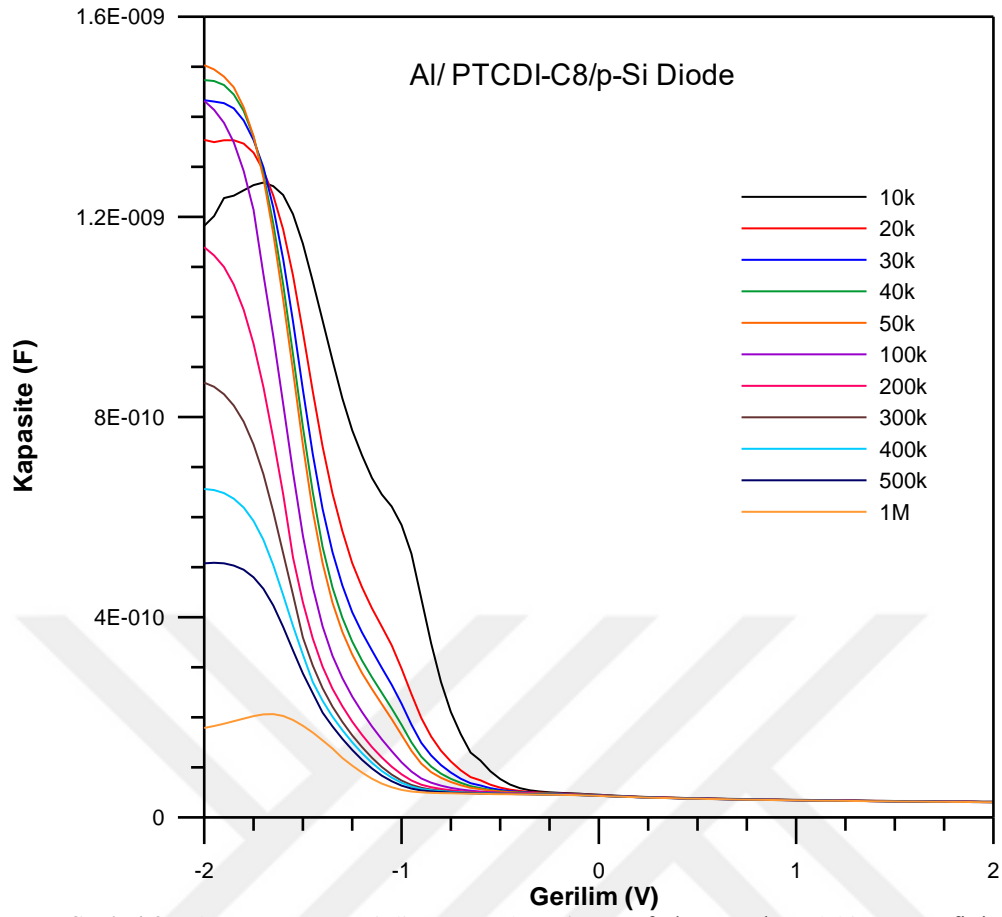
Şekil 4.7. Al/p-si referans diyotun 10 kHz-1 MHz frekans aralığındaki C-V grafiği

Şekil 4.8' de Al/p-Si ekleminin 500 kHz frekansında C-V (siyah) ve C-2-V (kırmızı) eğrileri aynı grafikte verilmiştir. Al/p-Si diyotu için 500 KHz'de kapasite gerilim ölçümlerinden elde edilen  $V_d$ ,  $N_A$ ,  $E_f$  ve  $\phi_{b(C-V)}$  değerleri hesaplanmış ve çizelge 4.2' ye çıkarılmıştır.

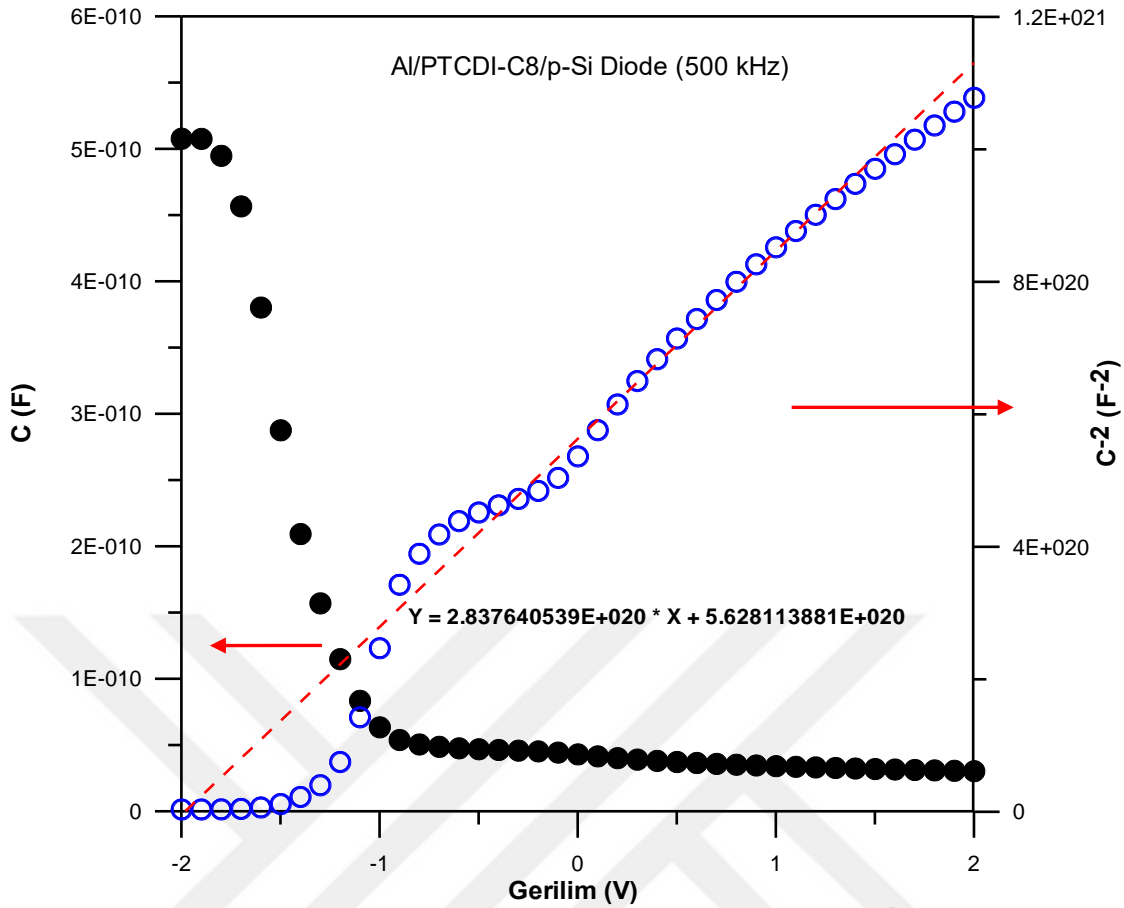


Şekil 4.8. Al/p-si referans diyotun 500 kHz frekanstaki  $C^{-2} - V$  grafiği

Şekil 4.9’da Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun 10 kHz ile 1 MHz arasında farklı frekanslardaki C-V grafiği gösterilmiştir. Buna göre frekans arttıkça kapasitenin azaldığı gözlemlendi. Yüksek frekanslarda ara yüzey/tuzak durumları AC sinyaline karşılık veremezler ve bu yüzden toplam kapasiteye katkı sağlayamadıkları için frekans arttıkça kapasite azalır.



Şekil 4.9. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun 10 kHz-1 MHz frekans aralığındaki C-V grafiği



Şekil 4.10. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun 500 kHz frekanstaki C-V ve  $C^{-2} - V$  grafiği

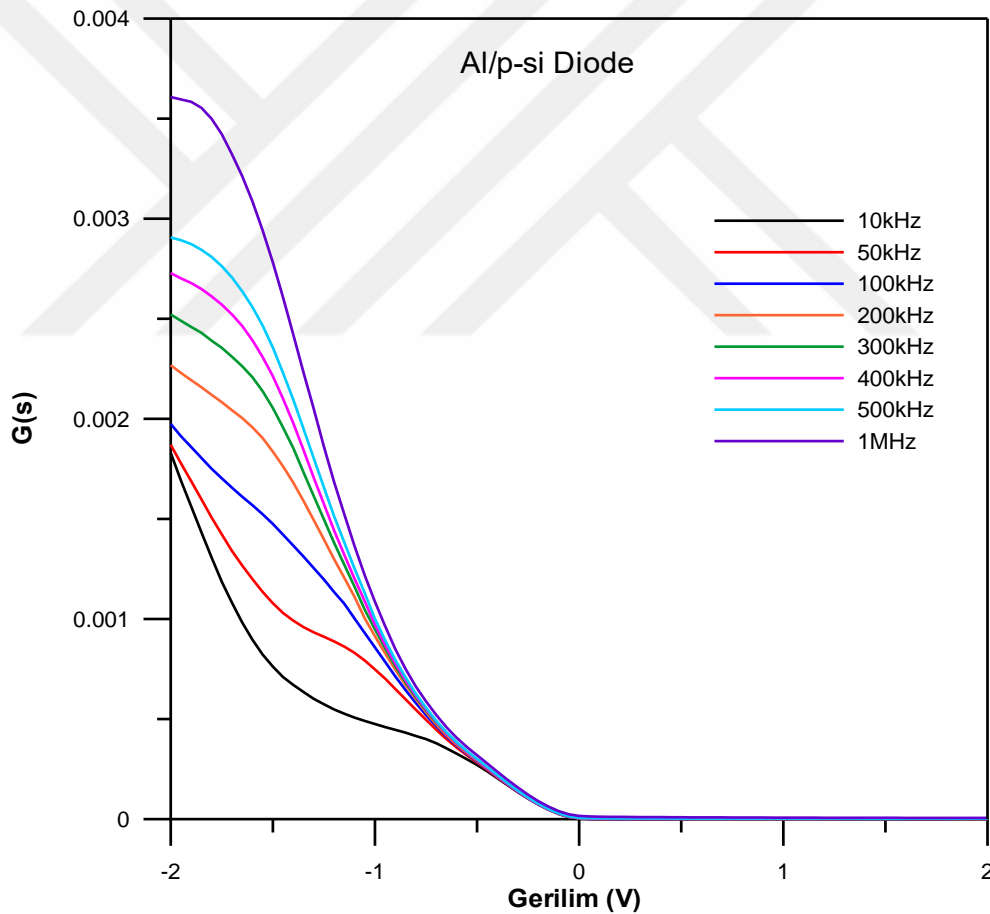
Şekil 4.10’da Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun 500 kHz frekansında C-V (siyah) ve  $C^{-2}-V$  (mavi) eğrileri aynı grafikte verilmiştir. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotu için 500 KHz’de kapasite gerilim ölçümlerinden elde edilen  $Vd$ ,  $N_A$ ,  $E_f$  ve  $\phi_{b(C-V)}$  değerleri hesaplanmış ve çizelge 4.2’ye çıkarılmıştır. Elde edilen difüzyon potansiyeli değerinin nispeten büyük olması ara yüzey oksit tabakasına ve organik ara tabakanın varlığına atfedildi (Çağlar ve ark., 2009). C-V karakteristiğinden elde edilen BH ile I-V karakteristiğinden elde edilen BH arasındaki fark BH’nin arayüzey tabaka kalınlığının ve arayüzey yüklerinin dağılımının uniform olmaması gibi engel homojensizliklerine bağlandı (Song ve ark., 1986; Yakuphanoğlu ve ark., 2007). Ayrıca, arayüz üzerinden geçen akım Schottky bariyer yüksekliğine üssel olarak bağlıdır ve akım arayüzdeki bariyer dağılımına duyarlıdır. Yanısıra, I-V ve C-V yöntemlerinin farklı doğasında BH değerlerinin farklılığında etkilidir. C-V yönteminden elde edilen bariyer yüksekliği, temasta mevcut olan yamaların Schottky bariyer yüksekliklerinin ortalama bir değerini içerir (Chattopadhyay ve ark., 1998).

**Çizelge 4.2.** Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının kapasite-voltaj grafiklerinden elde edilen diyot parametreleri

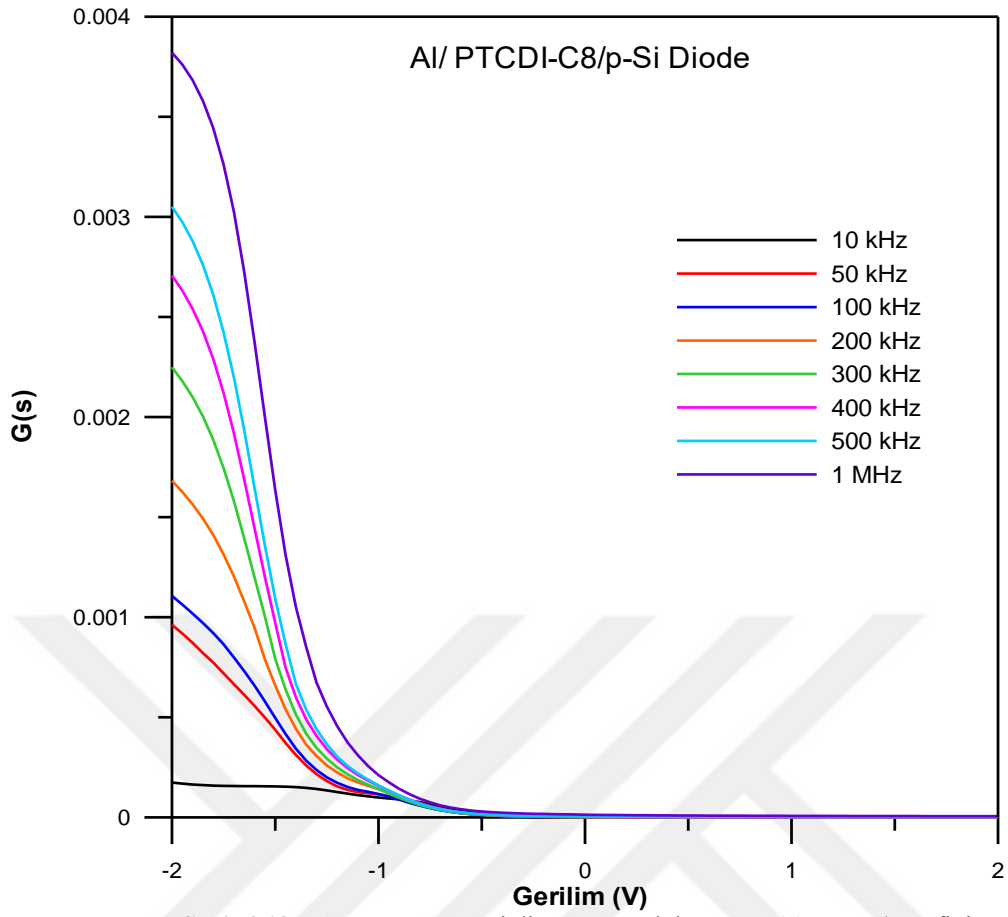
C-V	$\phi_b$ (eV)	$N_a$	$V_d$ (V)	$E_F$ (eV)
Al/p-Si	1.20	$1.236 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	1.533	0.233
Al/PTCDI-C8/p-Si	1.19	$6.85 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	1.98	0.247

### 4.3. Kondüktans-Gerilim Karakteristikleri

C-V karakteristiğinden elde edilen parametreleri etkileyen faktörlerden biri de kullanılan ara-yüzeyin fiziksel durumudur. Şekil 4. 11 ve 4.12’de frekans arttıkça gerilim orantılı olarak kondüktans değerinin de arttığı görülmektedir.



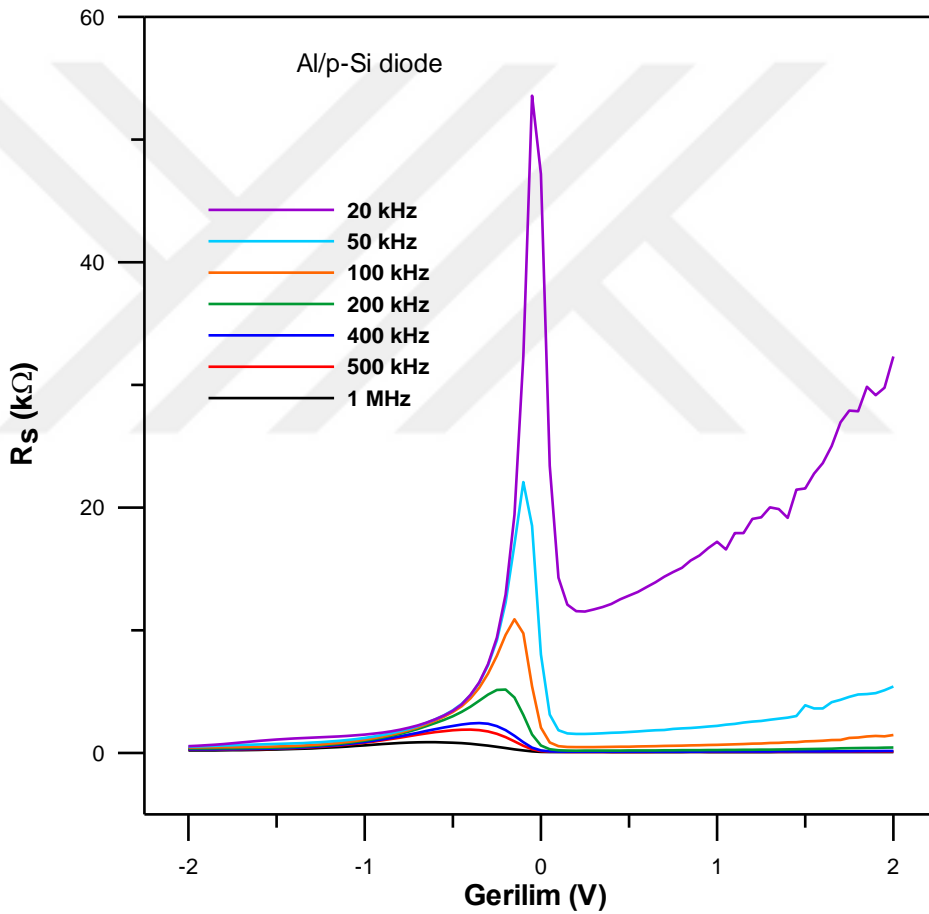
**Şekil 4.11.** Al/p-si referans diyotun Kondüktans-Gerilim (G-V) grafiği



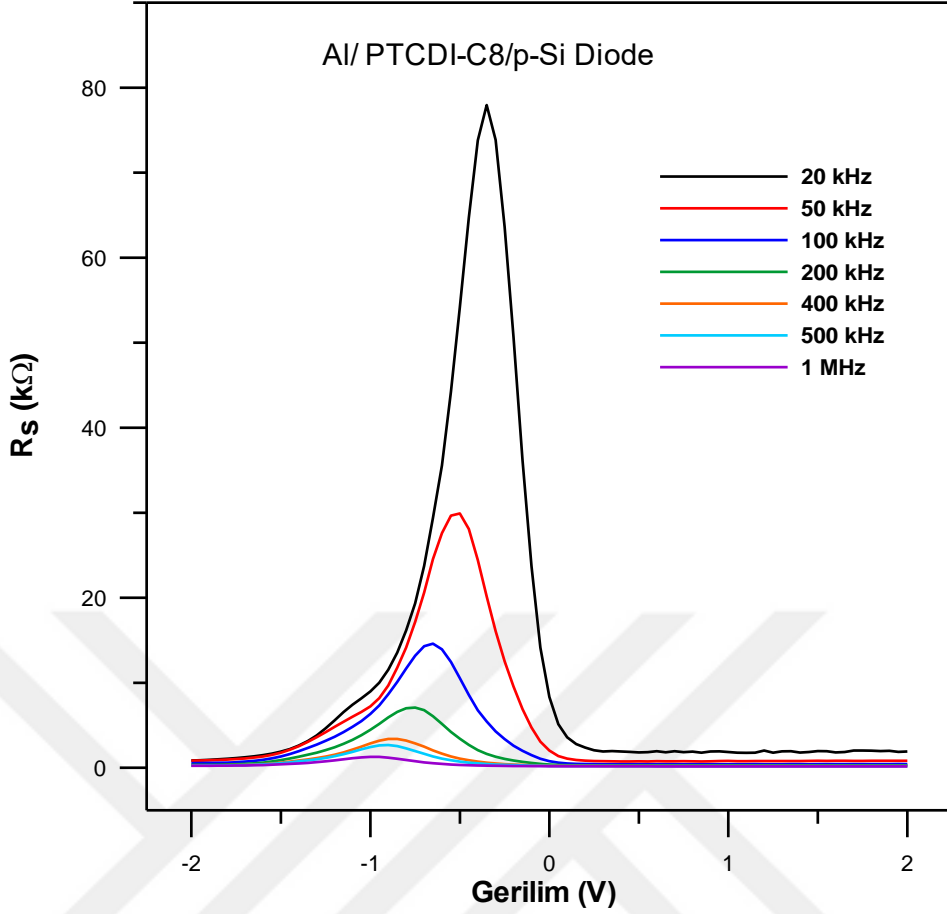
Şekil 4.12. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun Kondüktans-Gerilim (G-V) grafiği

#### 4.4. Seri Direnç-Gerilim Karakteristikleri

MIS cihazları için bir diğer önemli parametre de seri dirençtir. Diyotlar için seri direnç, 4200-SCS sistemi kullanılarak doğrudan ölçülmüş ve sırasıyla şekil 4.13 ve 4.14'te üretilen diyotun Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si yapılarının farklı frekanslar altındaki seri direnç-gerilim grafikleri aşağıda gösterilmiştir. Bu çizimler çeşitli frekanslar için bir tepe noktası belirler. Pik yoğunluğu artan frekans ve tepe kaymalarının konumu ile azalır. Pik yoğunluğundaki değişiklik alternatif akımı takip eden ara yüz durumlarını gösterir. Fakat, Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotları için sırasıyla 500 kHz'den sonra tepe kaybolur ve bu durum, ara yüz durumlarının alternatif akımı izleyemeyeceğini gösterir.



Şekil 4.13. Al/p-si referans diyotun Seri direnç-Gerilim ( $R_s$ -V) grafiği



Şekil 4.14. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotun Seri direnç-Gerilim ( $R_s$ -V) grafiği

Şekil 4.13 ve 4.14'de görüldüğü gibi, yüksek frekanslarda seri direnç hemen hemen değişmezken, düşük frekanslarda ise artarak sabit bir değere ulaşır. Gerilim ve frekansa bağlı seri direnç profili, ara yüz durumlarının belirli dağıtım yoğunluğuna bağlı olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Al/p-Si ara tabakasız referans diyotu ile PTCDI-C8 organik yarıiletken ince filminin spin kaplama yöntemi ile p-Si üzerine oluşturulmasıyla üretilen Al/PTCDI-C8/p-Si ara tabakalı diyotunun elektriksel karakterizasyonu akım-gerilim ve kapasite-gerilim teknikleri ile incelendi. Hem Al/p-Si hem de Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının idealite faktörü ve bariyer yüksekliği deneysel akım-voltaj verilerinden belirlendi. Karanlık ve oda sıcaklığı şartlarında I-V karakteristiğinden elde edilen verilerden Al/p-Si referans diyotu için TE teorisine göre deneysel BH  $\phi_b = 0.662$  eV ve idealite faktörü  $n=1.58$  olarak elde edildi. Diyotun saturasyon (doyma) akımı  $I_0=1.44 \times 10^{-7}$  A olarak elde edildi. İdealite faktörünün birim değerden büyük çıkması ara yüzey durumları ve metal ile yarıiletken arasındaki doğal oksit tabakasına atfedilebilir. Karanlık ve oda sıcaklığı şartlarında PTCDI-C8 ince film ara tabakalı diyotun akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen verilerden TE teorisine göre BH ve idealite faktörü sırasıyla 0.742 eV ve 2.1 olarak elde edildi. Diyotun saturasyon (doyma) akımı  $I_0=6.41 \times 10^{-9}$  A olarak elde edildi. Karanlıkta ve oda sıcaklığında akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen temel diyot parametreleri PTCDI-C8 ince film tabaksının diyot parametrelerini belirgin bir şekilde değiştirdiğini göstermektedir. Aynı zamanda ince film ara tabakasının varlığının da kanıtıdır.

Hem Al/p-Si hem de ara tabakalı Al/PTCDI-C8/p-Si diyotların oda sıcaklığında ve ışık altında ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) akım-gerilim ölçümleri alınarak fotovoltajik parametreleri ve ışığa duyarlılıkları belirlendi. Buna göre ışık altında Al/p-Si referans diyotun açık devre gerilimi  $V_{OC} = 80$  mV ve kısa devre akımı  $I_{SC} = 9.66$   $\mu\text{A}$  olarak, Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun  $V_{OC}$  ve  $I_{SC}$  değerleri sırasıyla 320 mV ve 1.91  $\mu\text{A}$  olarak belirlendi. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotunun  $-2\text{V}$ 'da karanlık ve ışık altındaki akımları aranı 1418.7 iken ara tabakasız Al/p-Si referans diyotunki ise 48.206 olarak hesaplandı. Diyotların ışık altındaki sonuçlarından PTCDI-C8 ince film ara tabakasının diyotun ışığa duyarlılığını artırdığı görüldü. Al/PTCDI-C8/p-si diyotunun idealite faktörü ( $n=2.1$ ), referans Al/p-si diyotunun idealite faktöründen ( $n=1.55$ ) daha büyüktür. Bu, organik ara katman nedeniyle seri dirence bağlandı. Diyotlardaki seri direnç etkisini incelemek için en yaygın yöntemlerden olan Norde fonksiyonu ve Cheungs fonksiyonları kullanılarak seri direnç, bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değerleri hesaplandı. Norde metoduna göre Al/p-Si diyotu için seri direnç değeri  $R_S=6.12$  k $\Omega$  ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotu için de  $R_S=248$  k $\Omega$  olarak hesaplandı. Norde metodundan elde edilen sonuç PTCDI-C8 ara

tabakalı diyotta seri direncin daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu organik ara tabakanın gövde direnci ile ara tabakanın birleşim ara yüzeylerindeki dirençten kaynaklanmaktadır. Cheungs metoduna göre, H(I)-I fonksiyonundan Al/p-Si diyotu için BH  $\phi_b=0.679$  eV ve seri direnç  $R_S=6.78$  k $\Omega$ , ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotu için de  $\phi_b=0.758$  eV ve seri direnç  $R_S=142$  k $\Omega$  olarak hesaplandı. Buradan elde edilen sonuç yine seri direncin PTCDI-C8 ara tabakalı diyotta daha büyük olduğunu göstermektedir ve Norde metoduyla uyumludur. Bunun yanı sıra H(I)-I fonksiyonundan elde edilen diyotların engel yükseklikleri değerleri de deneysel olarak elde edilen BH değerleri ile uyum içindedir. Cheungs metodundaki  $dV/d\ln(I)$ -I fonksiyonundan Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının seri direnç ve idealite faktörü değerleri sırasıyla  $R_S=4.82$  k $\Omega$ ,  $n=2.89$  ve  $R_S=86$  k $\Omega$ ,  $n=2.87$  olarak hesaplandı. Buradan elde edilen seri direnç değerleri de seri direncin PTCDI-C8 ara tabakalı diyotta daha büyük olduğunu göstermektedir ve diğer sonuçlar ile uyumludur. Cheungs metodundan elde edilen idealite faktörü değerlerinin deneysel idealite faktörü değerlerinden farklı çıkması iki yöntemde alınan veri kümelerinin farklı bölgelerden olmasıdır. Deneysel yöntemde idealite faktörü elde edilirken akım-gerilim karakteristiğinin lineer bölgesi kullanılırken Cheungs yönteminde lineerlikten sapma bölgesi yani seri direnç bölgesi kullanılmaktadır.

Ayrıca, ara yüzey tabakasının kapasitans ve iletkenlik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak için diyotların oda sıcaklığında C-V ve G-V ölçümleri yapılmıştır. Diyotun C-V ölçümleri farklı frekans ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Diyotların şekil 4.7 ve şekil 4.9'daki farklı frekanslardaki kapasite-gerilim karakteristiklerinden frekans arttıkça kapasitenin azaldığı görüldü. Bunun nedeni ara yüzey durumlarının yüksek frekanslarda A.C. sinyali takip edememesi ve dolayısıyla kapasiteye katkı yapamamasıdır. C-V ölçümlerinin analizinden  $C^2$ -V grafikleri oluşturuldu. Diyotların  $C^2$ -V grafiklerinden difüzyon potansiyeli ( $V_{bi}$ ), BH ( $\phi_b(c - v)$ ) ve serbest taşıyıcı katkı yoğunluğu ( $N_A$ ) değerleri hesaplandı. C-V ölçümlerinin analizinden Al/p-si diyotu için difüzyon potansiyeli, C-V'den elde edilen BH ve serbest taşıyıcı akseptör konsantrasyonu sırasıyla  $V_{bi}=1.53$  V,  $\phi_b(c - v)=1.20$  eV ve  $N_A= 1.24 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup> olarak hesaplandı. Al/PTCDI-C8/p-Si diyotu için difüzyon potansiyeli, C-V'den elde edilen BH ve serbest taşıyıcı akseptör konsantrasyonu sırasıyla  $V_{bi}=1.98$  V,  $\phi_b(c - v)=1.19$  eV ve  $N_A= 6.85 \times 10^{14}$  cm<sup>-3</sup> olarak hesaplandı. Diyotların farklı frekanslarda iletkenlik-

gerilim (G-V) karakteristikleri çıkarıldı. G-V karakteristiklerinden ters kutuplamada artan frekansla birlikte iletkenliğin arttığı gözlemlendi. Frekans azaldığında, tuzaklardaki arayüzey yükleri A.C. sinyali takip edebilir ve böylece iletkenliğin artmasına neden olur. Al/p-Si ve Al/PTCDI-C8/p-Si diyotlarının farklı frekanslardaki seri direnç-gerilim ( $R_s$ -V) grafikleri şekil 4.13 ve şekil 4.14'de görülmektedir.  $R_s$ -V grafiklerinden pik yoğunluğu artan frekans ve tepe kaymalarının konumu ile azalır. Tepe yoğunluğundaki değişiklik, alternatif akımı takip eden arayüz durumlarını gösterir.

İnorganik yarıiletken (p-Si) ve organik yarıiletken (PTCDI-C8) arasındaki elektronik etkileşim bir heteroeklem oluşturur. Elde edilen sonuçlar ve önceki çalışmalar, organik filmin hazırlanma sürecinin, cihaz imalatında kullanılacak organik yarı iletkenin malzeme özelliklerinin, metal-yarı iletken cihazların cihaz performansını ve elektronik ve fotoiletkenlik parametrelerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Elde ettiğimiz sonuçlara göre; Al/PTCDI-C8/p-Si heteroeklem diyotun optoelektronik uygulamalarda foto diyot veya foto sensör olarak kullanılabileceğini söyleyebiliriz.

## KAYNAKLAR

- Abhijith,T.,T., Yoosuf Ameen, M., Reddy, V.S., 2015, Synthesis of PTCDI-C8 one dimensional nanostructures for photovoltaic applications, *International Conference on Materials Science and Technology (ICMST 2012)*, IOP Publishing, 73,012052
- Akkılıç, K., Yakuphanoglu, F., 2008, Electrical and photovoltaic properties of a n-Si/kitosan/Ag photodiode, *Microelectronic Engineering*, 85, 1826-1830.
- Altındal, Ş., Kanbur, H., Yıldız, D.E., Parlak, M., 2007, Current conduction mechanism in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures, *Applied Surface Science*, 253, 5056-5061.
- Bethe, H.A., 1942, Theory of the boundary layer of crystal rectifiers, *Radiation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology*, 43-12.
- Bilkan, Ç., Altındal, Ş., Azizan-Kalandaragh, Y., 2017, Investigation of frequency and voltage dependence surface states and series resistance profiles using admittance measurements in Al/p-Si with  $\text{Co}_3\text{O}_4$ -PVA interlayer structures, *Physica B.*, 515, 28-33.
- Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San, S.E., Altındal, Ş., 2015, A Compare of electrical characteristics in Al/p-Si(MS) and Al/ $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ /p-Si(MPS) type diodes using current-voltage(I-V) and capacitance-voltage(C-V) measurements, *Metaterials Science in Semiconductor Processing*, 32, 137-144.
- Bozkaplan, C., 2011, Ag/ZnO/p-Si Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 25-27.
- Crowell , C.R., Sze, S. M., 1966. Current transport in metal-semiconductors, barriers. *Solid State Electronics*, 9, 1035-1048.
- Çağlar, Y., Çağlar, M., Ilican, S., Yakuphanoglu, F., 2009, Determination of the electronic parametersn of nanostructure  $\text{SnO}_2$ /p-si diode, *Microelectronic Enginnering*, 86, 2072-2077.
- Çankaya, G, Uçar, N., 2004, Schottky Barrier Height Dependence on the Metal Work Function for p-type Si Schottky Diodes, *Zeitschrift für Naturforschung A*, 59a, 795-798.
- Datar, A., 2006, Effect of Side-chain Substituents on Self-assembly of Perylene Diimide Molecules: Morphology Control, *Journal of the American Chemical Society* , 128(22),7114-7398.
- Evcil, M.A., 2019,  $\text{SnO}_2$ /p-Si Heteroeklem Yapıların Termal Buharlaştırmayla Üretilmesi, Diyot ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, 28-35.
- Güllü, Ö., 2008, H2 Ön Tavlamalı Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 24-38.
- Güllü, Ö., 2017, Analysis of interface states of Al/DNA/p-Si MIS photovoltaic structures with DNA biomolecules using the conductance technique, *Metaterials Technology*, 8, 505-513.
- Gündüz, B., 2016, Investigation of the spectral, optical and surface morphology properties of the N,N'-Dipentyl-3,4,9,10 perylenedicarboximide small molecule for optoelectronic applications, *Polymers Advanced Technologies*, 27, 144-155.
- Gündüz , B., Kurban, M., 2018, Photonic, spectroscopic properties and electronic structure of PTCDI-C8 organic nanostructure, *Vibrational Spectroscopy*, 96, 46-51.
- Gündüz, B., Yahia I.S., Yakuphanoglu, F., 2012, Electrical and photoconductivity

- properties of p-Si/P3HT/Al and p-Si/P3HT:MEH-PPV/Al organic devices: Comparison study, *Microelectronic Engineering*, 98, 41-57.
- Han, H.S., Lee, K.J., Lee, H.S., Jang, J., 2008, N-type organic thin-film transistor using N,N'-dioctyl-3,4,9,10-perylene tetracarboxylic diimides grown by organic vapor deposition, *ScienceDirect*, 354, 2870-2874.
- Karadeniz, S., Barış, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu N., 2013, Analysis of electrical properties of Al/p-Si Schottky contacts with and without rubrene layer, *Synthetic Metals*, 168, 16-22.
- Karak, S. Reddy, V.S., Ray, S.K., Dhar, A., 2009, Organic photovoltaic devices based on pentacene/N,N'-dioctyl-3,4,9,10-perylenedicarboximide heterojunctions, *Organic Electronics*, 10, 1006-1010.
- Karataş, Ş., 2010, Effect of series resistance on the electrical characteristics and interface state energy distributions of Sn/p-Si (MS) Schottky diodes, *Microelectronic Engineering*, 87, 10, 1935-1940.
- Marıl, E., 2021, The effect of (PVP-Cu<sub>2</sub>Te) organic interlayer on the electrical parameters of Al/p-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at room temperature, *Physica B*, 604, 412732.
- Orak, İ., Türüt, A., Toprak, M., 2015, The comparison of electrical characterizations and photovoltaic performance of Al/p-Si and Al/Azure C/p-Si junctions devices, *Synthetic Metals*, 200, 66-73.
- Prigholi-Givi, G., Altındal, Ş., Shahedi Asl, M., Namini, A.S., Farazin, J., Azizan-Kalandaragh, Y., 2021, The effect of cadmium impurities in the (PVP-TeO<sub>2</sub>) interlayer in Al/p-Si (MS) Schottky barrier diodes (SBDs): Exploring its electrophysical parameters, *Physics B*, 604, 412617.
- Pakma, O., 2008, Metal/TiO<sub>2</sub>/c-Si/Metal Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektriksel Belirtiler Üzerindeki Etkisi, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-17.
- Rahimi, R., Roberts, A., Narang, V., Korokakis, D., 2013, Investigate the role of the active layers' structures and morphology in the performance of the organic solar cell devices, *Applied Physics Letters*, 102, 073105.
- Rhoderick, E. H. and Williams R. H., 1988, *Metal-Semiconductor Contacts* 2nd ed, *Oxford University Press*, Oxford, 257-264.
- Song, Y.P., Van Meirheaghe, R.L., Lafle're, W.H., Cardon, F., 1986, On the Difference in Apparent Barrier Height as Obtained from Capacitance-voltage and Current-voltage- temperature Measurements on Al/p-InP Schottky Barriers, *Solid-State Electronics*, 29, 6, 633-638.
- Sze, S.M. 1981. *Metal-Semiconductor Contacts*, *Physics of Semiconductors Devices*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 225.
- Temirci, C., 2000, Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotların Fabrikasyonu, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 9-11.
- Turak, A.Z., Nguyen, M., Maye, F., Heidkamp J., Wrachtrup, J. and Dosch H., 2010, Island size effects in organic optoelectronic devices, *Organic Photonics IV*, 7722, 772210.
- Türüt, A., Sağlam, M., 1992. Determination of the Density of Si-Metal Interface States and Excess Capacitance Caused by them. *Physica B*, 179, 285-294.
- Uslu, N., 2011, Işığın, P3HT Poly(3-Hexylthiophene) Organik Filmi ile elde edilen Al/P3HT/p-Si yapısının elektriksel özelliklerin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 13-14.

- Yakuphanoglu, F., Şenkal, B.F., 2007, Electronic and thermoelectric properties of polyaniline organic semiconductor and electrical characterization of Al/PANI MIS diode, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 4, 1840-1846.
- Yeşildağ, A., Erdoğan, M., Sevgili, Ö., Çaldıran, Z., Orak, İ., 2021, Optical and Electrical Properties of Pyrene–Imine Organic Interface Layer Based on p-Si, *Journal of Electronic Metariales*, 50, 6448-6458.
- Yücedağ, İ., Kaya A., Altındal, Ş., Uslu, İ., 2014, Frequency and voltage-dependent electrical and dielectric properties of Al/Co-doped PVA/p-Si structures at room temperature, *Cihn. Phys.B.*, 4, 047304.
- Yüksel, Ö.F., 2009, Temperature dependence of current–voltage characteristics of Al/p-Si (10 0) Schottky barrier diodes, *Physica B*, 404, 1993-1997.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Murat ERDAL  
**Uyruğu** : T.C.

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Atatürk Üniversitesi, Merkez, AĞRI	2009
Yüksek Lisans	:	
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
-----	-------	--------

### UZMANLIK ALANI

### YABANCI DİLLER

### YAYINLAR

**Özaydın, C., Erdal, M.** (2021). Electrical and Photoelectrical Characterization of the PTCDI-C8/p-Si Heterojunction. 4<sup>TH</sup> International Conference on Life and Engineering Sciences, İstanbul, 23-25 September 2021, TURKEY ICOLES 2021