

**Si YARIİLETKENİ ÜZERİNE İLETKEN POLİMER KAPLANARAK  
OLUŞTURULMUŞ SCHOTTKY DİYOTLARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**AHMAD ASIMOV**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Si YARIİLETKENİ ÜZERİNE İLETKEN POLİMER KAPLANARAK  
OLUŞTURULMUŞ SCHOTTKY DİYOTLARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**AHMAD ASIMOV**

Danışman: Prof.Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA-2014

## TEZ ONAYI

AHMAD ASIMOV tarafından hazırlanan "Si Yarıiletkeni Üzerine İletken Polimer Kaplanarak Oluşturulmuş Schottky Diyotların Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman :** Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

**Başkan :** Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU  
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Fizik Anabilim Dalı

**Üye:** Prof. Dr. Mürsel ALPER  
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Fizik Anabilim Dalı

**Üye :** Doç. Dr. Ali KARA  
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Kimya Anabilim Dalı

**Üye :** Doç. Dr. Sertan Kemal AKAY  
Uludağ Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Fizik Anabilim Dalı

**Üye :** Yard.Doç.Dr. Ayşe BEDELOĞLU  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Doğa bilimleri, Mühendislik Fakültesi  
Lif ve Polimer Fiziği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali Osman DEMİR**  
**Enstitü Müdürü**  
**11/12/2014**

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**11/12/2014**

**Ahmad ASİMOV**

## ÖZET

Doktora Tezi

### **Si YARIİLETKENİ ÜZERİNE İLETKEN POLİMER KAPLANARAK OLUŞTURULMUŞ SCHOTTKY DİYOTLARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**AHMAD ASIMOV**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

Bu çalışmada Si yarıiletkeni üzerine iletken polimer kullanılarak oluşturulmuş Schottky engel diyotlarının (SBDs) elektriksel karakteristikleri, akım-voltaj ( $I-V$ ) ve kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) ölçüm metotları kullanılarak incelendi. Bütün ölçümler oda sıcaklığında ve karanlıkta gerçekleştirilmiştir. Metal ile yarıiletken arasında ince bir polimer tabakanın varlığı Metal/yarıiletken Schottky yapılarında önemli rol oynadığı bilinmektedir. İletken polimerlerin elektriksel karakteristikleri, teknolojik öneminden dolayı büyük önem teşkil etmektedir. Bu materyaller (P3HT, MEH-PPV, MDMO-PPV...), organik ledler, transistörler, Schottky diyotlar, fotovoltaik ve güneş pili gibi yoğun madde fiziği uygulamalarında geniş kullanılmaktadır. Hazırlanan Au/P3HT/n-Si, Al/MEH-PPV/p-Si ve Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky kontakların  $I-V$  ve  $C-V$  ölçümleri oda sıcaklığında alındı. Öncelikle bu diyotların Schottky engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), idealite faktörü ( $n$ ), arayüzey durum yoğunlukları ( $N_{ss}$ ) ve seri direnci ( $R_s$ ) gibi temel elektriksel parametreleri, deneysel akım-voltaj ( $I-V$ ) ve kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) ölçümlerinden elde edilmiştir. Oda sıcaklığında Au/P3HT/n-Si diyodunun idealite faktörü değeri ( $n=3,47$ ) geleneksel Au/n-Si Schottky diyodundan ( $n=1,18$ ) önemli ölçüde büyük bulunmuştur. Seri direnç ( $R_s$ ) Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunmuştur.

Au/P3HT/n-Si diyodun ters beslem  $C^{-2}-V$  karakteristiğinden engel yüksekliği 1,26 eV olarak elde edilmiştir.  $C-V$  ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği değeri  $I-V$  ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği değerinden daha büyüktür. Bu iki değer arasındaki uyumsuzluk artık kapasite veya engel düzensizliği varlığından kaynaklanmaktadır.

**Anahtar kelimeler: Schottky diyotlar; Seri direnç; İletken polimer; P3HT; MEH-PPV; MDMO-PPV.**

**2014, ix + 87 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF SCHOTTKY DIODES FABRICATED BY COATING A CONDUCTIVE POLYMER ON SILICON SEMICONDUCTOR

AHMAD ASIMOV

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

In this study, electrical characteristics of schottky diodes fabricated by coating a conductive polymer on silicon semiconductor have been investigated by using the current-voltage ( $I$ - $V$ ), and capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) measurement methods. All measurements were performed at room temperature and in dark. It has been known that a thin interfacial layer plays important role between the metal and semiconductor. Due to the technological importance of electrical characteristics of conducting polymers is of greater interest. These materials (P3HT, MEH-PPV, MDMO-PPV...) can be used in different condensed matter physics applications, such as organic light-emitting diodes, organic field effect transistors, Schottky diodes, photovoltaic and solar cells.  $I$ - $V$  and  $C$ - $V$  measurements of Au/P3HT/n-Si, Al/MEH-PPV/p-Si and Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky structures were obtained at room temperature. Firstly, the Schottky barrier height ( $\Phi_B$ ), ideality factor ( $n$ ), interface state densities ( $N_{ss}$ ) and series resistance ( $R_s$ ) of these diodes have been obtained from their experimental current-voltage ( $I$ - $V$ ) and capacitance-voltage ( $C$ - $V$ ) measurements. The ideality factor ( $n=3,47$ ) value for the Au/P3HT/n-Si junction at the room temperature are significantly larger than of the conventional Au/n-Si Schottky diode ( $n=1,18$ ). Series resistance ( $R_s$ ) of the diode were calculated from Cheung Functions

The Barrier height value for diode was extracted from its reverse bias  $C^{-2}$ - $V$  characteristic. The barrier height value obtained from the reverse bias  $C^{-2}$ - $V$  characteristics has varied with 1,26 eV. The barrier height value obtained from  $C$ - $V$  measurement is higher than that of the barrier height value obtained from  $I$ - $V$  measurement. The discrepancy between these values is probably due to existence of excess capacitance at the structure or presence of barrier inhomogeneities.

**Key Words : Schottky diodes; Series resistance; Conducting polymer; P3HT; MEH-PPV; MDMO-PPV.**

**2014, ix+87 pages.**

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince bana yol gösteren, sabır ve özveri ile yardımlarını esirgemeyen, değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Muhitdin AHMETOğLU'na, tezimin yazımı sırasında verdikleri desteklerden dolayı arkadaşlarım Ahmet KIRSOY, Araş. Gör. Banu KUCUR ile Araş. Gör. Cüneyt Hacıismailoğlu'na ve tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi her türlü desteği veren, gelmiş olduğum noktada katkıları çok büyük olan canım aileme en içten teőekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü hocalarına ve araştırma görevlilerine çok teşekkür ederim.

11/12/2014

AHMAD ASIMOV

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Metal -Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	3
2.2. İdeal Metal -Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky-Mott Teorisi .....	4
2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ( $\Phi_s < \Phi_m$ ) .....	7
2.3. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ( $\Phi_s > \Phi_m$ ) .....	9
2.3.1. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları.....	13
2.3.2. Termiyonik emisyon teorisi (TE).....	14
2.3.3. Difüzyon Teorisi .....	16
2.3.4. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi .....	18
2.3.5. Engel boyunca tünelleme. ....	19
2.3.6. $T_0$ etkili akım iletimi .....	22
2.4. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken Yapıların Fiziği .....	23
2.4.1. İdeal MİS diyot.....	23
2.5 İletken Polimerler.....	27
2.6 Bant Yapısı.....	29
2.7. İletken Polimerlerin Yapısı .....	32
2.8. İletken Polimerlere Doping işlemi .....	33
2.9. İletken Polimerlerin Sentez Yöntemleri .....	35
2.10. İdeal MPY diyot.....	36
2.1. Schottky Diyotlarında Doğru Beslem I-V Karakteristikleri .....	37
2.12. Si'un Oda Sıcaklığındaki ( $T= 300$ K) Bazı Fiziksel Parametreleri.....	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	42
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar.....	42
3.2. DENEYSEL YÖNTEM .....	44
3.2.1. İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	44
3.2.1.1. Fiziksel kaplama yöntemler.....	44
3.2.1.1.1. Vakum içinde buharlaştırma .....	44
3.2.1.1.2. Sıçratma tekniği ile kaplama .....	45
3.2.1.1.3. Kimyasal kaplama yöntemleri.....	47
3.3. Kullanılan Polimerler .....	52
3.3. DENEYSEL İŞLEMLER.....	55
3.3.1. Kristal temizleme .....	56
3.3.2. Omik kontakın oluşturulması .....	49
3.3.3. Polimer tabakanın oluşturulması .....	56
3.3.3.1. Çözelti Hazırlanması .....	56
3.3.3.2. İnce Film Hazırlanması .....	57
3.4. Kullanılan Ölçüm düzeneği.....	60



3.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	60
3.4.2. Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği .....	60
3.4.3. Kapasitans-Voltaj ölçüm düzeneği .....	64
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	65
4.1. Akım –Voltaj (I-V) Karakteristikleri .....	65
4.1.1 Au/P3HT/n-Si Schotky diodun farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.....	65
4.1.2. Oda sıcaklığında Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si diyotlarının I-V karakteristiklerinin incelenmesi .....	71
4.1.3. Farklı polimerlerle: a) MEH-PPV, b) MDMO-PPV ile yapılan schottky diodların akım-voltaj karakteristiği .....	74
4.2. Au/P3HT/n-Si Schottky Diodun Kapasite –Voltaj (C-V) Karakteristikleri.....	77
5. SONUÇ .....	81
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	88

## SİMGELER DİZİNİ

<b>A</b>	Diyotun etkin alanı
<b>A<sup>*</sup></b>	Richardson sabiti
<b>C</b>	Sığa
<b>C<sub>ox</sub></b>	Yalıtkan oksit tabakanın sığası
<b>E<sub>c</sub></b>	İletkenlik bant kıyısı enerjisi
<b>E<sub>g</sub></b>	Yasak bant aralığı
<b>E<sub>F</sub></b>	Fermi enerji seviyesi
<b>E<sub>Fm</sub></b>	Metalin Fermi seviyesi
<b>E<sub>Fs</sub></b>	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
<b>E<sub>ss</sub></b>	Arayüzey durumlarının enerjisi
<b>E<sub>v</sub></b>	Valans bant kıyısı enerjisi
<b>ε<sub>0</sub></b>	Boşluğun dielektrik sabiti
<b>ε<sub>s</sub></b>	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
<b>I<sub>0</sub></b>	Doyum akımı
<b>K</b>	Boltzman sabiti
<b>N</b>	Diyot idealite faktörü
<b>N<sub>A</sub></b>	Alıcı(acceptor) yoğunluğu
<b>N<sub>D</sub></b>	Verici (donor) yoğunluğu
<b>N<sub>ss</sub></b>	Arayüzey durum yoğunluğu
<b>W</b>	Tüketim bölgesi genişliği
<b>T</b>	Sıcaklık (K)
<b>Φ<sub>B</sub></b>	Potansiyel engel yüksekliği
<b>MDMO-PPV</b>	poly-[2-(3,7-dimethyloctyloxy)-5-methyloxy]-para-phenylene-vinylene
<b>MEH-PPV</b>	poly[2-methoxy-5-(20-ethylhexyloxy)-1,4- phenylene-vinylene
<b>P3HT</b>	poly(3-hexylthiophene)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### SAYFA

Şekil 2.1.	Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) elektron enerji-band diyagramı (a) Kontak yapılmadan önceki durum (b) Kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu .....	5
Şekil 2.2.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için (a) doğru beslem ve (b) ters beslem altında enerji-bant diyagramı .....	8
Şekil 2.3.	Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak enerji bant diyagramı. (a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı. (b) Kontak oluştuktan sonraki termal denge durumu .....	10
Şekil 2.4.	Farklı voltajlarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerine metal doğrultucu kontakların enerji band diyagramları (a) Termal denge (b) Doğru beslem (c) Ters beslem .....	12
Şekil 2.5.	Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) Potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) Elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c) Uzay yük bölgesinde birleşme, (d) Doğal bölgede deşik enjeksiyonu .....	14
Şekil. 2.6.	Doğru beslemde Termiyonik Alan Emisyonu ve Alan Emisyonu band diyagramı ( $\xi$ 'nin negatif olduğu çok katkılı yarıiletken için.) .....	21
Şekil 2.7.	Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren $nkT/q-kT/q$ grafiği.....	22
Şekil 2.8.	Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyod .....	24
Şekil 2.9.	$V=0$ durumunda ideal bir MIS diyodun enerji-band diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken.....	25
Şekil 2.10.	$V \neq 0$ durumunda ideal MIS diyodun enerji-band diyagramı (a) akümülyasyon (yığılım) (b) tüketim (c) inversiyon (terslenim) durumları.....	26
Şekil 2.11.	Sıcaklığın, iletken polimerlerin ve metallerin iletkenlikleri üzerine etkisi .....	27
Şekil 2.12.	Polimer molekülünde bağ ve anti bağ orbitallerinin oluşumu .....	31
Şekil 2.13.	Polimerde zincir boyunca yük iletimi .....	32
Şekil 2.14.	Metal-polimer-yarıiletken (MPY) diyodun enerji bant diyagramı .....	36
Şekil 3.1.	“Radwag” hassas tartı ve “TRANSSONIC TS 540” ultrasonic titreştirici Çözelti hazırlamada sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı kullanıldı .....	41
Şekil 3.2.	“Yellowline” manyetik karıştırıcı ve numunelerin kaplanmasında kullanılan “Spin coater VTC-100” cihazı .....	42
Şekil 3.3.	“Aldrich” fırın ve malzemeleri korumak için vakuum odası Glove box.....	43
Şekil 3.4.	Omik ve doğrultucu kontak oluşturmada kullanılan metal buharlaştırma sistemi. LEYBOLD Univex 450 .....	53
Şekil 3.5.	Döndürme yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi .....	54
Şekil 3.6.	P3HT polimerinin kimyasal yapısı .....	54
Şekil 3.7.	MEH-PPV polimerinin kimyasal yapısı .....	56
Şekil 3.8.	MDMO-PPV'nin kimyasal bağ oluşum şeması .....	57
Şekil 3.9.	Sıvı haldeki farklı polimerlerin görünümü .....	57
Şekil 3.10.	Omik kontak maskesi .....	58
Şekil 3.11.	Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan.....	59

Şekil 3.12. Metal/Polimer/Yarıiletken diyodunun şematik gösterimi .....	60
Şekil 3.13. Diyotların son hali .....	60
Şekil 3.14. Au/P3HT/n-Si Schottky diodun SEM görüntüsü .....	61
Şekil 3.15. Deneysel ölçümler için kullanılan düzenek.....	62
Şekil 4.1. Au/P3HT/n-Si Schottky diyodun $\ln(I)$ -V grafiği .....	66
Şekil 4.2. Au/P3HT/n-Si Schottky diyodun farklı sıcaklıklardaki $dV/\ln(I)$ -I grafiği.....	68
Şekil 4.3. Au/P3HT/n-Si Schottky kontağın farklı sıcaklıklardaki $H(I)$ -I grafiği.....	69
Şekil 4.4. Au/P3HT/n-Si Schottky diyodun farklı sıcaklıklardaki ara yüzey durum yoğunluğu grafiği .....	70
Şekil 4.5. Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si Schottky diotların I-V ve $\ln(I)$ -V grafiği .....	71
Şekil 4.6. Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si Schottky diotların $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafiği .....	73
Şekil 4.7. Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si Schottky diotların ara yüzey durum yoğunluğu grafiği.....	73
Şekil 4.8. a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diotların $\ln(I)$ -V grafikleri .....	74
Şekil 4.9. a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diotların $dV/d\ln(I)$ -I grafikleri.....	76
Şekil 4.10. Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diyotların $H(I)$ -I grafikleri .....	76
Şekil 4.11. Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diyotların $H(I)$ -I grafikleri .....	77
Şekil 4.12. Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanstaki C-V grafikleri .....	78
Şekil 4.13. Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanslardaki $C^{-2}$ -V grafiği .....	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	SAYFA
Çizelge 2.1. Kontak türünün iş fonksiyonlarına göre değişimi.....	3
Çizelge 2.2. Oda sıcaklığında Si'a ait bazı fiziksel parametreler .....	23
Çizelge 4.1. Diyodun farklı sıcaklıklardaki akım – voltaj parametrelerinden farklı yöntemlerle elde edilen (idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği) değerleri.....	61
Çizelge 4.2. Au/n-Si ve b) Au/P3HT/n-Si Schottky diyotların n; $\Phi_b$ ; $I_0$ ; $dV/d\ln(I-I)$ ; $H(I-I)$ ve $N_{ss}$ değerleri .....	72
Çizelge 4.3. Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diyotların n; $\Phi_b$ ; $I_0$ ; $dV/d\ln(I-I)$ ; $H(I-I)$ ve $N_{ss}$ değerleri .....	75
Çizelge 4.4. Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanslardaki $C^{-2}$ -V grafiğinden hesaplanmış $V_d$ ; $W_D$ ; $\Phi_B(C-V)$ ; $E_f$ (eV) değerleri .....	80

## 1. GİRİŞ

Modern teknolojide çok büyük bir öneme sahip olan metal-yarıiletken kontaklardan hızlı anahtar uygulamaları, güneş pilleri, mikrodalga karıştırıcı dedektörler, laser diyotlar, fotodiyotlar, yarıiletken dedektörler, radyo dedektörleri, radar dedektörleri, bipolar entegre devrelerin anahtarlama hızını artırma ve Schottky engel tabakalı alan etkili transistörler yapılmaktadır. Metal-yarıiletken kontak oluşturulduğunda ara yüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koymuştur, (Cowley ve Sze 1965). Schottky'nin geliştirdiği modelde yarıiletkende oluşan elektrik alan, Gauss kanununa göre tüketim bölgesinden olan uzaklıkla lineer olarak artar, potansiyel ise azalır. Potansiyel engeli ile ilgili diğer bir model Mott tarafından geliştirilmiştir. (Crowell 1965). Mott, yarıiletkenin metal komşuluğunda vericilerden yoksun ince bir tabakaya sahip olduğunu kabul etmiştir. Bu tabakada elektrik alan sabit kalmakta fakat potansiyel lineer olarak değişmektedir. Mott'a göre potansiyel engeli, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Crowell ve Sze, MS kontaklarda akım iletim mekanizmalarını açıklayan Schottky'nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin termiyonik emisyon teorisini (TE), tek bir termiyonik emisyon difüzyon modelinde birleştirmişlerdir (TED).

Metal ile yarıiletken arasına kaplanan yalıtkan tabaka diyot parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun için metal ve yarıiletken arasına çok ince bir yalıtkan tabaka çeşitli yöntemlerle kaplanmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda metal ve yarıiletken arasına çeşitli tipte yalıtkan tabakalar kaplanmıştır. Bunlar için de en önemlileri  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2$  dir. (Altındal 2005; Karadeniz 2004). Metal ve yarıiletken arasına kaplanan yalıtkan malzemenin en önemli özellikleri; düşük elektriksel özdirence, yüksek optik geçirgenliğe ve yüksek dielektrik katsayısına sahip olmasıdır.

Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan ya da polimer tabakanın varlığı arayüzey durumlarını etkiler ve metal-yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Metal-polimer-yarıiletken (MPS) yapıların elektriksel karakteristiklerinin davranışları metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi Schottky engel diyotların davranışına benzerdir (Pakma ve ark. 2008). Bu yapıların elektriksel karakteristikleri özellikle

arayüzeyssel yalıtkan/polimer tabakanın oluşumuna, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyssel özelliklere, seri dirence ( $R_s$ ) ve Schottky engel yüksekliklerindeki düzensizliğe bağlıdır (Sullivan ve ark. 1991). Polimerler metallerle doğrultucu kontak oluşturduklarından, mekanik dayanıklılıkları ve kolay temin edilebilmelerinden dolayı, polythiophene gibi polimerler, günümüzde ara yüzey olarak birçok deneyin ve araştırmanın ilgi merkezi olmaktadır (Güllü 2010). MPS yapıların performansını etkileyen parametrelerin başında metal ile yarıiletken arasında oluşan yalıtkan polimer tabakanın homojenliği ve kalınlığı, yapının seri direnci, yarıiletken ile yalıtkan arasında ve yasak enerji bandında yer alan ara yüzey durumları ile potansiyel engelinin homojenliği gelmektedir. Mikro elektronik cihaz, (ışık yayan organik diyot (OLED), Schottky engel diyot (SBD), güneş pili vb.) üretiminde elektriksel, optik ve dielektrik özelliklerinin yeterliliği nedeniyle kullanılan pek çok polimer vardır. Ayrıca iletken polimerler metalle kontak haline getirildiği zaman fotovoltak, elektrolüminesans ve doğrultucu etki gösterdiğinden son zamanlarda elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahip olmaya başlamışlardır.

Bu çalışmanın amacı, farklı polimerler kullanılarak Metal/Polimer/yarıiletken yapısında Schottky diyotlar üretmek ve I-V; C-V verilerini kullanarak diyotları karakterize etmektir. Polimerler olarak MEH-PPV (poly[2-methoxy-5-(20-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene), MDMO-PPV(poly-[2-(3,7-dimethyloctyl oxy)-5-methyloxy]-para-phenylene-vinylene) ve P3HT (poly(3-hexylthiophene) kullanılmıştır. Deneysel ölçümler kullanılarak idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ), seri direnç ( $R_s$ ), difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ), tüketim tabakasının genişliği ( $W_d$ ) gibi temel parametreler elde edilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde bu yapılarla ilgili genel teorik bilgiler, üçüncü bölümde diyotların hazırlanması ve deneysel sistemler, dördüncü bölümde, I-V ve C-V deneysel verileri kullanılarak yapılan hesaplamalar ve bu hesaplamalar sonucunda elde edilen diyot parametreleri, grafikler ve çizelgeler verilmiştir. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçların genel değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER.

### 2.1. Metal -Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal-yarıiletken (MS) kontakların veya diğer adıyla Schottky kontakların karakteristik parametrelerinin iyi anlaşılabilmesi için, yarıiletken kristaller ile iletkenin iletkenlik özelliklerinin iyi bilinmesi ve bu yapılara uygun gerilimlerin uygulanması gerekir. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak malzeme olabildiğince çok küçük bir dirençle atomik boyutta temas etmelidirler. Oluşturulan kontakların ideal olması için, kontak olarak kullanılan metaller yeterince yüksek saflıkta ve yarıiletken kristallerin yüzeyleri de yeterince temiz olmalıdır. Metal-yarıiletken kontaklar, doğrultucu ve omik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Metal-Yarıiletken kontaklarda iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (boşluklar ve elektronlar) bir yönden diğer yöne kolay iletilebiliyorsa bu tür kantağa doğrultucu kontakt denmektedir yani doğru beslem altında akım çok iyi iletilyorken, ters beslem altında kötü veya hiç iletilmemektedir. Ohmik kontaklarda ise taşıyıcılar her yönde iletilmektedir. Kontakın omik veya doğrultucu olmasını, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler.  $\Phi_m$  metalin,  $\Phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, metal-n tipi yarıiletken kontaklarda  $\Phi_m > \Phi_s$  ise “doğrultucu kontak” ve  $\Phi_m < \Phi_s$  olması durumunda ise “omik kontak” oluşur. Metal-p tipi yarıiletkenlerde ise durum bunun tersidir. Bunu aşağıdaki Çizelge 2.1’de görebiliriz.

**Çizelge 2.1.** Kontak türünün iş fonksiyonlarına göre değişimi.

İş fonksiyonları ilişkisi	Yarıiletken türü	Kontak Türü
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Doğrultucu
$\Phi_m < \Phi_s$	n tipi	Ohmik
$\Phi_m > \Phi_s$	p tipi	Ohmik
$\Phi_m < \Phi_s$	p tipi	Doğrultucu



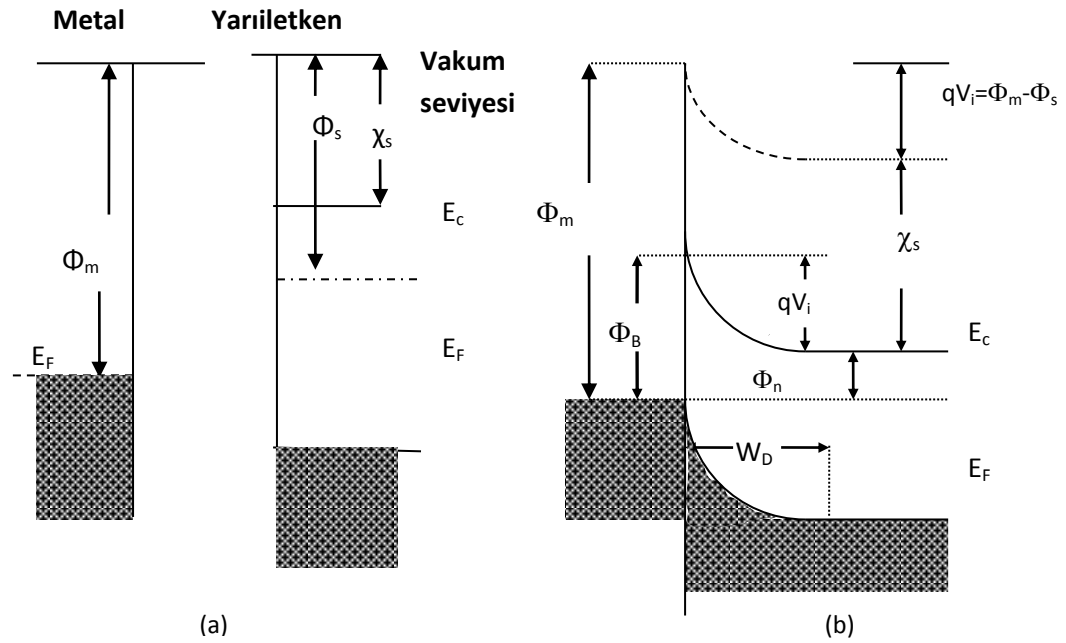
## 2.2. İdeal Metal -Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky-Mott Teorisi

Metal-yarıiletken kontakların karakteristiklerini belirleyen birçok faktör olmasına karşın, bunlardan en önemlisi metal-yarıiletken ara yüzeyinde oluşan potansiyel engelinin yapısıdır. Bu ara yüzeyde potansiyel engelinin oluşumu üzerine çeşitli modeller ileri sürüldü (Rhoderick ve Williams 1988).

Schottky ve Mott tarafından önerilen modellere göre elektronlar, gözlenen doğrultma yönünde, potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yolu ile geçerler. Mott'a göre bu potansiyel engeli, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Mott, ara yüzey bölgesinde, kirlilik atomlarının olmadığını ve dolayısıyla elektrik alanın sabit olduğunu ayrıca, elektrostatik potansiyelin metale kadar, uzaklıkla lineer olarak değiştiğini kabul etti. Schottky ise engel bölgesinin sabit yoğunlukta safsızlık atomları içerdiğinden elektrik alanın lineer olarak arttığını, ayrıca elektrostatik potansiyelin metale kadar kuadratik olarak değiştiğini ifade etti (Sharma 1984).

Şekil 2.1 Metal/n-tipi yarıiletken kontak ,  $\Phi_m > \Phi_s$  (doğrultucu kontak) için elektron enerji-band diyagramını göstermektedir. Şekilde gösterilen vakum seviyesi, metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi olup Şekil 2.1a' da referans olarak alınmıştır. Metalin iş fonksiyonu,  $\Phi_m$  bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji miktarıdır.  $\Phi_m$  iş fonksiyonu, kristal örgünün periyodik potansiyeli sebebiyle oluşan hacim katkısına ve yüzeyde oluşabilecek dipol tabakası nedeniyle oluşan yüzey katkısına sahiptir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$ ' de benzer şekilde tanımlanır ve değişken bir niceliktir. Çünkü yarıiletkenin Fermi seviyesi katılanan verici veya alıcı atomların miktarına bağlı olarak değişir. Yarıiletkende katkı miktarına bağlı olmayan önemli diğer bir parametre ise  $\chi_s$  ile gösterilen elektron yakınlığıdır. Şekil 2.1a'da yarıiletken yüzey durumları içermediğinden yüzeyin band yapısı yarıiletken gövde (bulk) band yapısı ile aynıdır yani bandlarda bir bükülme yoktur. Şekil 2.1b, kontak yapıldıktan sonra dengeye ulaşmış durumun enerji-band diyagramını göstermektedir. Metal yarıiletkenle kontak edildiğinde, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar yarıiletkenden metale doğru

akarlar. Bunun sonucunda yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu azaldığı için yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kaymaya başlar. Böylelikle iletkenlik band kenarı  $E_C$  ile Fermi seviyesi  $E_F$  arasındaki fark, azalan bu elektron konsantrasyonu ile artar ve termal dengede  $E_F$  tamamen sabit kaldığı için iletkenlik ve valans band kenarları Şekil 2.1b'deki gibi yukarı doğru bükülürler. Yarıiletkenin vakum seviyesi de yarıiletkenin elektron yakınlığı kontak ile değişmediğinden aynı şekilde yukarı doğru bükülür. Metalden yarıiletkene geçen iletkenlik bandı elektronları arkalarında pozitif yüklü verici (donor) iyonları bırakırlar. Böylece yarıiletkenin metale bakan ön yüzeyinde hareketli yükler azalır.



**Şekil 2.1.** Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) elektron enerji-band diyagramı (a) Kontak yapılmadan önceki durum (b) Kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu (Sze S.M. 1981).

Bunun bir sonucu olarak ara yüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yük tabakası, metal tarafında ise yarıiletkenden metale geçen elektronlar nedeniyle ince bir negatif yük tabakası oluşur. Bu tabaka ara yüzeyden Thomas-Fermi film mesafesi ( $\approx 0.5\text{\AA}$ ) kadar uzaktadır.

Sonuçta, yarıiletkenen metale doğru doğal bir elektrik alan oluşur. Yarıiletkenin band aralığı metal ile kontak halinde değişmediğinden valans band kenarı  $E_v$ , iletkenlik band kenarı  $E_c$ 'ye paralel hareket eder. Aynı zamanda elektron yakınlığı da değişmeyeceğinden vakum seviyesinde de  $E_c$ 'ye benzer değişiklikler oluşur. Böylece termal dengedeki metal-yarıiletken sistemde, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanmış olur ve band bükülme miktarı, metal ile yarıiletken materyallerin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. Bu fark  $qV_i = (\Phi_m - \Phi_s)$  olarak ifade edilir. Burada  $V_i$ 'nin birimi volt olup eklemde oluşan potansiyel veya kontak potansiyel farkı olarak bilinir.  $qV_i$  yarıiletkenen metale gidecek olan elektronun sahip olması gereken enerji yani engel yüksekliğidir. Bununla birlikte metal tarafından görünen engel yüksekliği, yarıiletken tarafından görünen engel yüksekliğinden farklıdır ve

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.1)$$

ile verilir.  $\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$  ve  $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$  olduğundan,

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.2)$$

elde edilir. Burada  $\Phi_n = (E_c - E_F)$  olup,  $q$  elektronik yüküdür. Eş. (2.1) birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir (Crowell ve Sze 1966).

Termal denge halinde, yarıiletkenen metale geçen elektronlar metalden yarıiletkene geçen elektronlar ile dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir (iletkenlik küçüktür). Bu nedenle uygulanan dış gerilimin neredeyse tamamı bu bölgeye düşer. Uygulanan doğru veya ters ön gerilim voltajı termal denge durumundaki enerji-band diyagramını değiştirir. Bu değişim, tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesi ve bant bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur.

### 2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ( $\Phi_s < \Phi_m$ )

Metalde bulunan elektronlar

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.3)$$

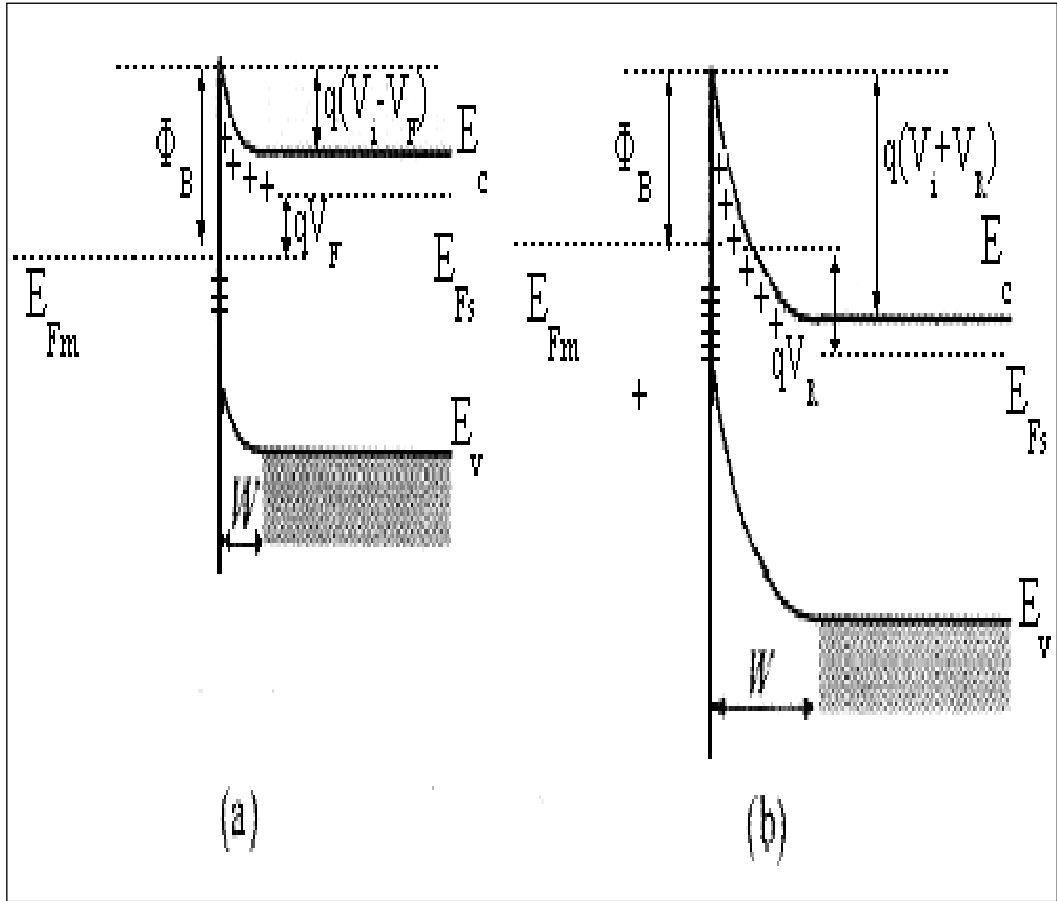
ile verilen yükseklikteki bir potansiyel engel görürler (Şekil 2.3).

$$\left. \begin{aligned} \Phi_s &= (\chi_s + \Phi_n) \\ \Phi_m &= qV_i + \Phi_s \\ \Phi_n &= E_c - E_F \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.4)$$

$\Phi_B$  için Eş.[2.3] elde edilir. Burada  $q$  elektron yüküdür. Eş.[2.3], birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir.

Potansiyel engelinin tam biçimi, uzay yük bölgesindeki yük dağılımından hesaplanabilir. Oda sıcaklığında potansiyel engeli  $kT/q$ 'dan büyüktür ve çok az sayıdaki elektron bu engeli atlamak için yeterli enerjiye sahiptir. Yarıiletkenin uzay yükü bölgesi hareketli yüklerden yoksun, yüksek dirençli yalıtkan bir tüketim bölgesi olmaya başlar. Bu sabit uzay yükleri için elektrik alanın büyüklüğü, uzay yük tabakası kenarından olan uzaklıkla lineer olarak artar, bunun sonucu olarak engel yüksekliği paraboliktir (Schottky engeli). Mott, yarıiletkende yüklerin bulunmadığı ince bir tabaka kabul etmiştir. Bu ince bölgede elektrik alanın büyüklüğü sabittir ve potansiyel, bölge boyunca lineer olarak artar (Mott engeli). Mott engeli, yüksek katkılanmış yarıiletken ile metal arasına az katkılanmış ya da özgül bir yarıiletken konulduğu zaman kullanılır.

Metal/n-tipi yarıiletken kontak yapıldığında, termal denge durumunda yarıiletkenden metale geçen elektronların yarattığı akım ( $I_{sm}$ ), metalden yarıiletkene geçen elektronların yarattığı akım ( $I_{ms}$ ) ile dengelenir ve böylece net bir akım oluşmaz. Şekil 2.2’de metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağa bir gerilim uygulandığındaki enerji-bant diyagramı gösterilmiştir.



**Şekil 2.2** Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için (a) doğru beslem ve (b) ters beslem altında enerji-bant diyagramı (Sze S.M. 1981).

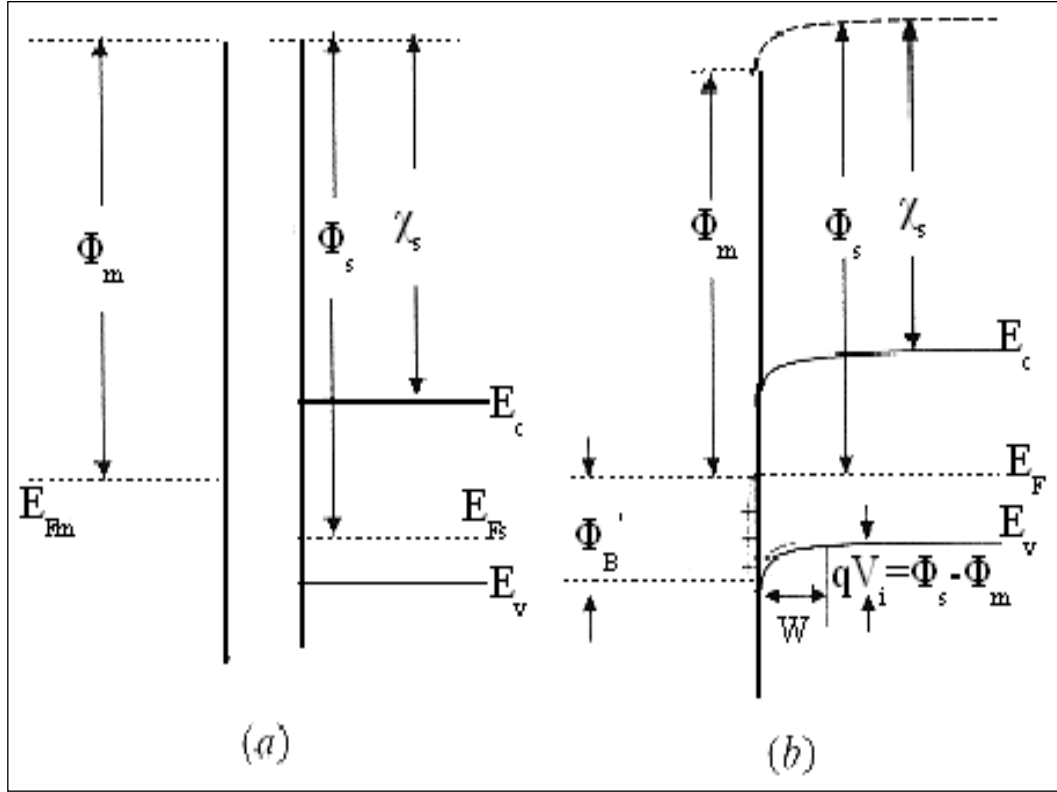
Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok

yüksektir ve uygulanan dış voltajın tamamı bu bölgeye düşer. Uygulanan gerilim termal denge bant diyagramını değiştirir. Bu değişim, tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesiyle ve bant bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur.

### 2.3 Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ( $\Phi_s > \Phi_m$ )

Metal/p-tipi doğrultucu MY kontak yapıldığında, termal denge kuruluncaya, her iki malzemenin Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar, daha yüksek enerjiye sahip metal elektronları yarıiletken içine akarlar. Şekil 2.3' de görüldüğü gibi p-tipi yarıiletkenler için elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır, akım boşluk tarafından oluşturulur. Metal/p-tipi (MS) kontak yapıldığında, termal denge kuruluncaya, her iki malzemenin Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar, metalden yarıiletkene bir elektron akışı olur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesi ile dengelenmek için metalden yarıiletkene elektron akışından dolayı ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar yükselir. Yasak bant aralığı ( $E_g$ ) kontak sebebiyle değişmediği için ( $E_v$ ) valans bant kenarı ( $E_c$ ) iletkenlik bant kenarına paralel olarak yukarı doğru kayacaktır. Yarıiletkenin elektron ilgisi de kontak sebebiyle değişmediği için yarıiletkenin vakum seviyesi de, ( $E_v$ ) valans bant kenarı ve ( $E_c$ ) iletkenlik bant kenarına paralel olarak kayacaktır. Böylece termal dengedeki metal-yarıiletken sistemde, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin yüksek olması sağlanmış olur.

Metal ve yarıiletken malzemelerin Fermi seviyelerinin aynı hizada olmasından ve tüketim bölgesinin ortaya çıkmasından dolayı bantlarda aşağıya doğru bir bükülme meydana gelir (Şekil 2.2(b)). Yarıiletkene geçen elektronlar, metal-yarıiletken arayüzeyinde metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluştururlar ve yarıiletkenin metale bakan sınırındadeşiklerle birleşirler.



**Şekil 2.3.** Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak enerji bant diyagramı.

(a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.

(b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu (Sze S.M. 1981).

Yarıiletkende bulunan uzay yükü tabakasındaki deşik konsantrasyonu, elektron konsantrasyonuna göre oldukça az olduğu için, uzay yük bölgesi negatif yüklü iyonize alıcı atomlarının konsantrasyonuna bağlı  $W$  genişlikli bir tüketim tabakası içerir ve bir potansiyel engeli meydana gelir. Deşikler için, oluşan bu potansiyel engel yüksekliği

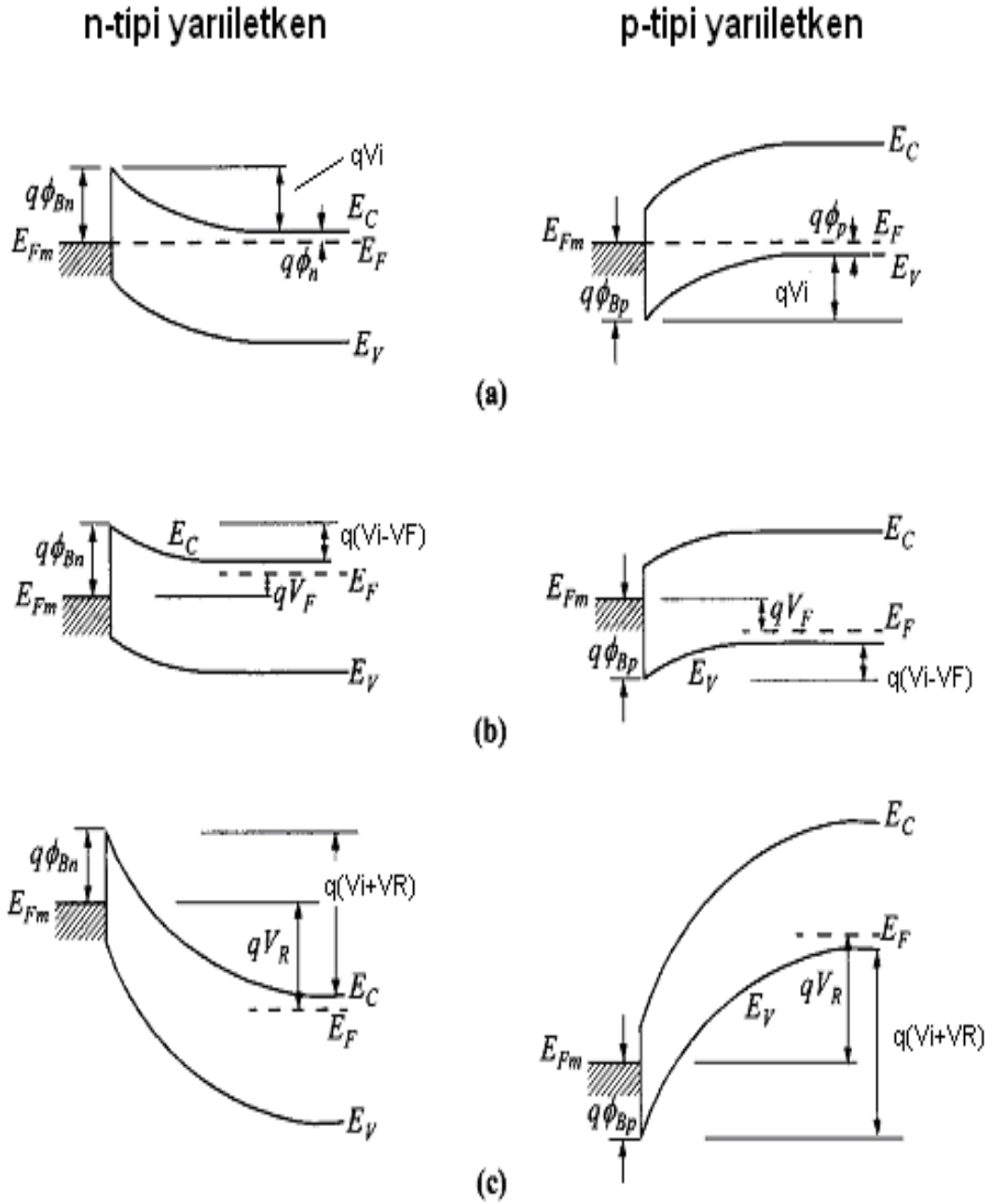
$$\Phi_B' = E_g + \chi_s - \Phi_m \quad (2.3)$$

ile verilir. Eş. [2.1] ve [2.2] 'den

$$\Phi_B + \Phi_B' = E_g \quad (2.4)$$

bulunur. Şekil 2.4. farklı voltajlarda metal/n ve p-tipi yarıiletken kontakların enerji bant diyagramlarını göstermektedir. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklara, yarıiletken tarafı metale göre negatif ( $V=V_F$ ) olacak şekilde gerilim uygulandığında, tüketim bölgesinin genişliği azalır ve Şekil 2.4 b' de gösterildiği gibi termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği,  $qV_i$ 'den  $q(V_i - V_F)$ 'ye iner. Bu durumda yarıiletkenden metale geçecek elektronlar, azalmış bir engel ile karşılaşır ve bunun sonucu olarak da yarıiletkenden metale doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre artar. Metalden yarıiletkene elektron akımı termal denge değerine göre değişmez. Çünkü metalde her hangi bir gerilim düşmesi olmaz ve potansiyel engel yüksekliği uygulanan gerilimden etkilenmez. Sonuç olarak yarıiletken tarafı negatif, metal tarafı pozitif olacak şekilde kontakta bir potansiyel uygulandığı zaman, yarıiletkenden metale doğru net bir akım oluşur. Bu durumda eklem doğru beslem olduğu söylenir. Doğru beslem akımı, uygulanan  $V_F$  voltajı ile üstel olarak artar. Ters beslemde kontakın enerji bant diyagramı Şekil 2.4.c'de verilmektedir. Yarıiletken metale göre pozitif ( $V = -V_R$ ) olacak şekilde bir gerilim uygulandığında ise tüketim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği  $qV_i$ 'den  $q(V_i + V_R)$ 'ye artacaktır. Burada yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge durumuna göre azalır. Metalden yarıiletkene elektron akımı ise pratik olarak termal dengedeki akımın aynısı olur. Yarıiletkenden metale doğru olan akım doğru beslemdeki ile kıyaslandığında daha küçüktür. Böylece kontak tek yönde akım ileten doğrultucu kontak olur. Şekil 2.4'b ve Şekil 2.4 c' deki enerji-bant diyagramları denge şartlarında değildir ve tek bir Fermi enerji seviyesi, elektronların geldiği bölgenin Fermi enerjisinden daha büyüktür.





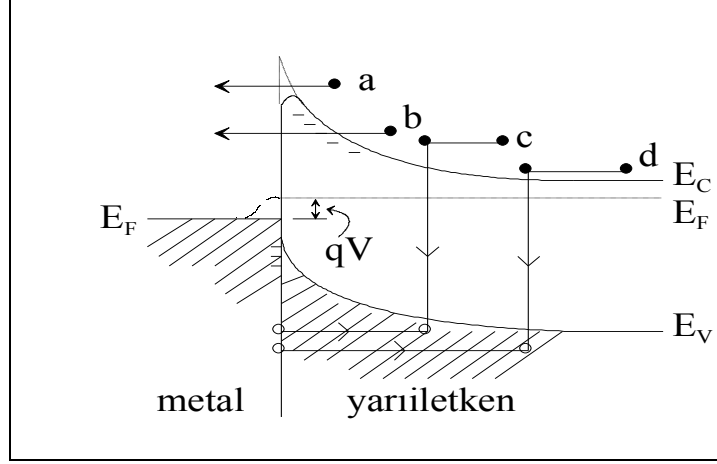
**Şekil 2.4.** Farklı voltajlarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerine metal doğrultucu kontaktarın enerji band diyagramları (a) Termal denge (b) Doğru beslem (c) Ters beslem (Sze S.M. 2007).

### 2.3.1 Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontaklarda, seri direnç ( $R_s$ ), arayüzeydeki oksit tabaka kalınlığı ( $d_{ox}$ ), sıcaklık, arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ), beslem gerilimi türü parametreler Schottky diyotlardaki akım iletim mekanizmalarını etkilemektedir. Bu parametrelerin etkisinde, hangi durumda hangi iletim mekanizmasının en doğru sonucu vereceğini belirlemek oldukça önemlidir. MS kontaklarda akım iletimi, azınlık taşıyıcıların iletimi sağladığı p-n eklemlerin aksine, çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır (Sze 1981).

Doğru beslem altında MS kontaklarda kullanılan temel akım-iletim mekanizmaları şunlardır (Crowel 1966) (Şekil 2.5):

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE))
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Deşik enjeksiyonu



**Şekil 2.5.** Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) Potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) Elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c) Uzay yük bölgesinde birleşme, (d) Doğal bölgede deşik enjeksiyonu (Sze S.M. 1981).

### 2.3.2. Termiyonik emisyon teorisi (TE)

Termiyonik emisyon; sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların salınması anlamına gelir. Schottky kontaklarda yeterli termal enerjisi kazanan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmeleri TE olayı olarak bilinir. Bu olay metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektron, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda deşikler tarafından sağlanır (Cowley ve Sze 1965). Metal tarafı uygulanan gerilimden bağımsızdır ve termal enerjileri nedeniyle metal tarafındaki engeli aşan elektronların oluşturduğu akım yoğunluğu  $J_0$  termiyonik akım yoğunluğudur. Bethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu termiyonik emisyon teorisinin varsayımları şunlardır (Rhoderick ve Williams 1988).

- Potansiyel engelinin yüksekliği,  $kT/q$  enerjisinden çok büyüktür.
- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır.

- İmaj (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte, engelin biçimi önemsiz olup akım engel yüksekliğine zayıf bağlıdır.

Bu varsayımlar doğrultusunda yarıiletken den metale doğru akı yoğunluğu  $J_{sm}$ , potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızı ile ifade edilir:

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (2.5)$$

Burada  $E_F + q\phi_B$  metalden TE için gerekli minimum enerji,  $V_x$  ise iletim yönündeki taşıyıcı hızıdır.  $dn$  küçük bir enerji aralığında enerji yoğunluğudur. Bu ifadeden hareketle metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda metalden yarıiletkene geçen elektronlar için akım denklemi,

$$J_{sm} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[ \frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (2.6)$$

şeklinde verilir. Burada  $m^*$  taşıyıcının etkin kütlesi,  $k$  Boltzmann sabiti,  $h$ 'da Planck sabitidir. Buradan;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left[ \frac{-q\phi_B}{kT} \right] \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) \quad (2.7)$$

ifadesi yazılır. Burada  $A^*$ , TE için Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene hareket eden elektronlar için engel yüksekliğinin aynı kalmasından dolayı yarıiletkende akım yoğunluğu uygulanan gerilimden etkilenmez. Bu akım yoğunluğu dengede ( $V=0$ ), yarıiletkenden metale geçen akım yoğunluğuna eşittir. Buna göre metalden yarıiletkene doğru akan akım,

$$J_{sm} = -A^* T^2 \exp\left[ \frac{-q\phi_B}{kT} \right] \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Toplam akım yoğunluğu Eş.(2.7) ve yine Eş.(2.8) denklemlerinin toplamı olup,

$$J_n = \left( A * T^2 \exp \left[ \frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \right) \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $A * T^2 \exp \left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right)$  terimi, doyum akım yoğunluğudur.

Termiyonik emisyon teorisine göre, yarı logaritmik akım-voltaj eğrilerinin eğiminden hesaplanan idealite faktörleri genelde  $n > 1$  dir. Dolayısıyla termiyonik emisyon teorisine göre hesaplanan potansiyel engel yüksekliği, artan sıcaklıkla artar. İdealite faktörlerinin  $n > 1$  olmasının birkaç nedeni vardır. Birincisi, metal ve yarıiletken arasındaki ince oksit tabakanın varlığıdır. İkincisi, yüksek katkılı yarıiletkenlerde ya da yeterince düşük sıcaklıklarda tünelleme akımıdır. (Termiyonik

Alan Emisyonu ve Alan Emisyonu). Üçüncüsü, ara yüzeyde elektrik alandan dolayı hayali Schottky engel alçalmasıdır ( $\Delta\Phi_b$ ). Dördüncüsü, uzay yük bölgesinde oluşma-yeniden birleşme akımlarıdır. Bu dört neden Schottky kontaklarının durumlarını (ara yüzey tabakası, yüksek katkılanma, yüksek elektrik alan, uzay yük bölgesindeki tuzaklar) ve metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzeyin atomik olarak tam düzgün olmadığı ve genelde uzaysal bir homojensizliğe sahip olduğunu gösterir. (Sharma B. L. 1984).

### 2.3.3. Difüzyon Teorisi

Aralarında yük yoğunluk farkı bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçişlerine difüzyon denir. Schottky tarafından tanımlanan. Difüzyon Teorisinin dayandığı varsayımlar (Cova ve Singh 1990);

- Potansiyel engelin yüksekliği  $kT/q$  enerjisinden büyüktür.
- Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi ihmal edilir.
- $x=0$  ve  $x=w$ 'daki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmemiştir. (yani onlar termal denge değerine sahiptir).

-Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir. Kabuller doğrultusunda tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılır.

Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_e = q \left[ n(x) \mu E(x) + D_e \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.10)$$

$$J_x = q D_e \left[ \left( \frac{-qn(x)}{kT} \right) \left( \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.11)$$

şeklinindedir. Burada  $n(x)$  elektron yoğunluğu,  $\mu$  elektron mobilitesi,  $D_e$  elektron difüzyon sabiti ve  $E(x)$  Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Buna göre difüzyon kuramında akım ifadesi,

$$J_x = J_{SD} \left[ \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

ile verilir. Burada  $J_{SD}$  doyum akım yoğunluğu olup,

$$J_{SD} = \left( \frac{q^2 N_V D_e}{kT} \right) \left[ \frac{q(V_d - V) 2N_A}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp \left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $N_V$  değerlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu,  $V_d$  difüzyon gerilimi,  $N_A$  alıcı yoğunluğu,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Bu iki kuramdan elde edilen ifadeler birbirine çok benzerdir. Bununla birlikte difüzyon kuramının doyum akım yoğunluğu,  $J_{SD}$  voltaj ile daha çabuk değişir fakat sıcaklığa bağlılığı TE'deki doyum akım yoğunluğuna göre daha küçüktür (Sharma B.L. 984).

#### 2.3.4. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi

Crowell ve Sze, TE ve difüzyon teorisini birleştirerek Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisini geliştirdiler. Teori MS ara yüzey kenarında tanımlanmış olan  $V_r$  rekombinasyon

hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan gerilim, metale doğru bir elektron akışına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalara uğradığından akım değeri azalır. Sze bunun nedenini rekombinasyon hızındaki azalmaya bağlamıştır. Termiyonik emisyon difüzyon teorisine göre elektronlar MS ara yüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak ( $A^*$ ) Richardson sabiti ( $A^{**}$ ) etkin Richardson sabiti olarak değişir. Buna göre en genel akım-gerilim (I-V) ifadesi,

$$J = J_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.14)$$

ile verilir. Burada T sıcaklık, n diyodun idealite faktörü ve  $J_0$  doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = -A^{**} T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir.  $\beta$  engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere,

$$A^{**} = A^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.16)$$

ile verilir. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakası (MIS-MOS) varsa Richardson sabiti oksit tabakasına bağlı etkin değer alır ve  $A^{**}$  yerine yalıtkan oksit tabakası nedeniyle  $A_{\text{etk}}$  alınır.

$$A_{\text{etk}} = A^{**} \exp\left[\frac{-4\pi\delta}{h((2m^* \chi)^{1/2})}\right]^{1/2} \quad (2.17)$$

Burada  $\delta$ , metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı,  $m^* = 0,5 m_0$  etkin kütle, h Planck sabiti,  $\chi$  ise yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyoda  $n = 1$ 'dir. İdeal diyottan sapmaları belirlemek amacıyla bir idealite faktörü, n tanımlanır. Buna göre akım yoğunluğu ifadesi:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.18)$$

şeklini alır. Burada n idealite faktörü 1'den uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletken ile dengede ara yüzey durumları ( $N_{ss}$ ) ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı ( $\delta$ ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[ \frac{\epsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir. Bu denklem, ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de ara yüzey durumlarının artması ile doğru orantılı olacak şekilde artmaktadır. Engel alçalması ve  $A^{**}$ 'nin alana bağımlı olması nedeniyle gerçek Schottky diyotlarında n idealite faktörü  $1 < n < 1,2$  arasında bir değer alır.

### 2.3.5. Engel boyunca tünelleme

Metal-yarıiletken Schottky diyotlarında TE mekanizması yanında, elektronlar kuantum mekaniksel tünelleme ile de engeli aşabilirler. Çok fazla katkılanmış dejenere ( $N_A > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) yarıiletken durumunda tünelleme doğru beslemde, düşük katkılı yarıiletkenlerde de tünelleme işlemi ters beslemde ortaya çıkar. Aşırı katkılanmış yarıiletken nedeniyle tüketim bölgesi incedir. Düşük sıcaklıklarda, Fermi seviyesine çok yakın elektronlar yarıiletkenden metale doğru tünelleme yapabilir. Böylece doğru beslem yönündeki akım yarıiletkenin Fermi enerjisine yakın elektronların tünellemesiyle artar. Bu duruma Alan Emisyonu (AE) adı verilir. Yüksek sıcaklıklarda, elektronların önemli bir kısmı Fermi seviyesinin üstüne doğru yükselir. İletkenlik bandından  $E_m$  kadar yukarıda bulunan bu elektronların daha yüksek enerjili olması ve bu seviyede daha düşük bir engelle karşılaşiyor olmaları tünelleme ihtimalini artırır ve doğru beslem yönündeki akımı artırır. Bu durum Termiyonik Alan Emisyonu (TAE) olarak bilinir. Bu mekanizmalar Şekil 2.6'de gösterilmiştir.



Eğer sıcaklık daha da artırılırsa elektronlar potansiyel engel yüksekliğini aşabilecek kadar yeterli enerji kazanırlar ve dolayısıyla tünelleme olmadan engel üzerinden karşı tarafa rahatlıkla geçerler. Bu durum Termiyonik Emisyondur (TE). Termiyonik Alan Emisyonu (TAE) durumunda çok düşük doğru beslem voltajı varken, doğru beslem I-V karakteristiği,

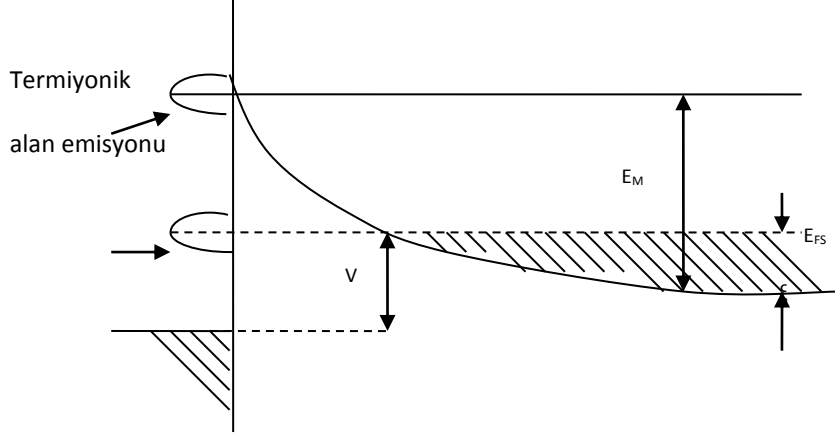
$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] \quad (2.20)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.21)$$

$$E_{00} = h / 4\pi \left( \frac{N^*}{m^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (2.22)$$

şeklindedir. Burada  $N^*$ , etkin taşıyıcı yoğunluğu,  $m^*$ , etkin elektron kütlesi ve  $h$ , Planck sabitidir.  $I_0$ , zayıf bir şekilde gerilime bağlı olup engel yüksekliğinin, yarıiletken parametrelerinin ve sıcaklığının bir fonksiyonudur.  $E_{00}$  enerjisi tünelleme işleminde önemli bir parametre olup,  $kT/E_{00}$ , TE'nin ve tünellemenin önemli bir ölçüsüdür. (Werner ve Güttler 1991). Düşük sıcaklıklarda,  $E_{00} \gg kT$ 'ye nazaran büyük bir değer alır ve  $E_0 \cong E_{00}$  'dır.



**Şekil. 2.6.** Doğru beslemde Termiyonik Alan Emisyonu ve Alan Emisyonu band diyagramı ( $\xi$ 'nin negatif olduğu çok katlı yarıiletken için.)

$\ln I-V$  eğrisinin eğimi sabit ve  $T$ 'den bağımsız olur, bu durum alan emisyonu demektir. Yüksek sıcaklıklarda, ( $E_0 \ll kT$ ),  $E_0 = kT$  olur.  $\ln I-V$  eğrisinin eğimi  $q/kT$  olur ki, bu da  $TE'$  ye karşılık gelir. Orta sıcaklık değerleri için eğimi,  $q/nkT$  şeklinde yazabiliriz. Burada,

$$n = E_{00}/kT \left[ \coth \left( \frac{E_{00}}{kT} \right) \right] \quad (2.23)$$

dir. TAE'nin diyot akımına katkısı,  $E_{00} \cong kT$  olduğu zaman mümkündür. TAE'nin maksimum katkısı olduğu zamanki  $E_m$  enerjisi,

$$E_m = qV_d / \left[ \cos \left( \frac{E_{00}}{kT} \right) \right]^2 \quad (2.24)$$

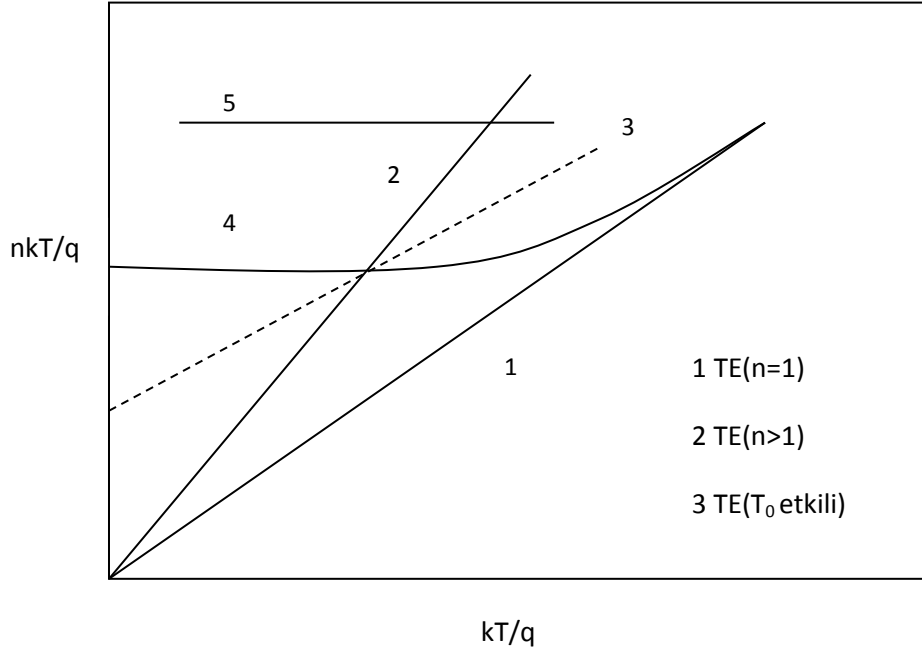
şeklindedir. Burada  $V_d$ , toplam band bükülme gerilimine karşılık gelir.  $E_m$  ise tüketim bölgesi kıyısında iletkenlik bandının altından ölçülür.  $N_A > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  iken (300 K'de) Si'da TAE önem kazanır. Daha az katkılı yoğunluklarda TAE ihmal edilebilir.

### 2.3.6. $T_0$ etkili akım iletimi

İdealite faktörünün 1'den büyük olması hayali kuvvet ya da ara yüzey durumlarından ortaya çıkıyorsa  $n$  sıcaklıktan bağımsız olmalıdır. Fakat  $n$ 'in 1'den büyük olması eğer termiyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa, idealite faktörü  $n$  sıcaklığa bağlıdır.  $T_0$  etkili J-V karakteristiği,

$$J = A^{**} T^2 \exp \left[ -\frac{q\phi_B}{k(T + T_0)} \right] \left\{ \exp \left[ \frac{qV}{k(T + T_0)} \right] - 1 \right\} \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $T_0$  geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve voltajdan bağımsız olan sabit bir parametredir.  $n$ 'in sıcaklığa bağlılığı deneysel olarak  $n = 1 + T_0/T$  olarak ifade edilir. Voltajın fonksiyonu olarak değişik akım-iletim mekanizmaları Şekil 2.7'de görüldüğü gibi olabilir. 1, 2, 3 eğrileri, TE teorisinin baskın olduğu mekanizmaları belirtir. Bunlar  $n = 1$ ,  $n > 1$  ve  $T_0$  etkili durumlarına karşılık gelir. 4 nolu eğri TAE iletim mekanizmalarının etkin olduğu, 5 nolu eğri ise AE iletim mekanizmalarının etkin olduğu durumları gösterir (Sharma B.L. 1984).



Şekil 2.7. Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren  $nkT/q$ - $kT/q$  grafiği

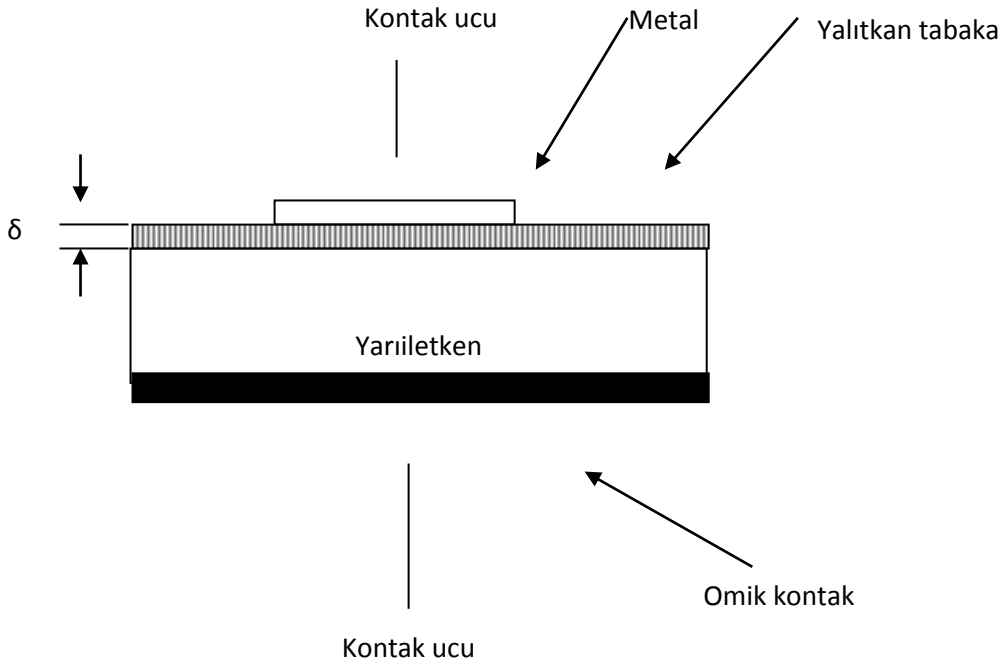
#### 2.4. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken Yapıların Fiziği

Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakası ister doğal yolla oluşsun ister deneysel yöntemlerle oluşturulsun arada bir oksit tabakanın varlığı metali yarıiletkenden ayırır. Bu sistemlerde yarıiletkendeki ara yüzey durumları metaldeki elektron durumlarından izole edilmiş olur. Bir MIS yapıda metal-yalıtkan ve metal-yarıiletken arasında olmak üzere iki önemli ara yüzey vardır. İdeal durumda oksit tabakasında tuzak yükler yoktur ve bir DC gerilimi altında yalıtkan içinden hiç akım geçmez. Bu durumda sistemin yükleri ara yüzey yükleri ve yarıiletkenin tüketim tabakasının yüklerinden ibarettir. Metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabaka varsa doğru beslem altında akım iletimi MS yapılardan biraz farklı olur. Bu durumda  $\ln I$ - $V$  grafiğinin eğimi  $q/kT$  değerinden küçük olur hatta  $q/2kT$  ya da daha da küçük olabilir. MIS Schottky engelli yapılarda yalıtkan tabakanın etkisi Card ve Fonash tarafından araştırılmıştır. (Card ve Rhoderick 1971).

### 2.4.1. İdeal MIS diyot

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Burada  $\delta$  yalıtkan tabakanın kalınlığı,  $V$  ise metal üzerine uygulanan voltajdır. Metal kısım omik kontakta göre pozitif olduğu zaman doğru beslem, metal kısım omik kontakta göre negatif olduğunda ise ters beslem oluşur.

İdeal MIS yapıların,  $V=0$  durumunda enerji band diyagramı. Şekil 2.9’da gösterilmiştir. İdeal bir MIS diyod aşağıdaki gibi tanımlanır.



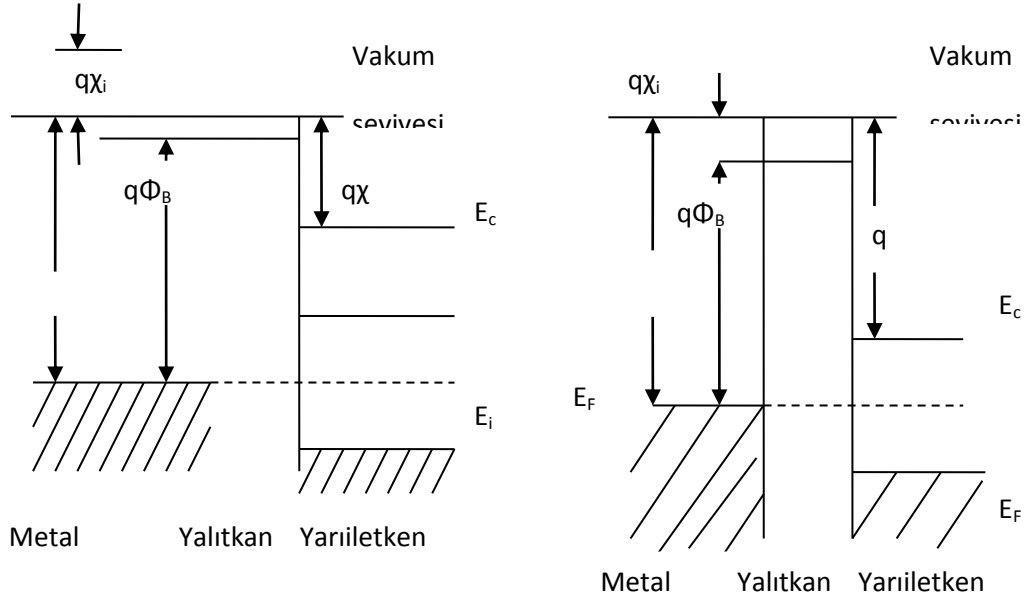
**Şekil 2.8.** Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) diyod.

Sıfır beslem voltajında, metal iş fonksiyonu  $\Phi_m$  ile yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$  veya iş fonksiyonu farkı  $\Phi_{ms}$  sıfırdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi_s + E_g/2q - \Phi_b) = 0 \quad \text{n-tipi için} \quad (2.26)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi_s + E_g/2q + \Phi_b) = 0 \quad \text{p-tipi için} \quad (2.27)$$

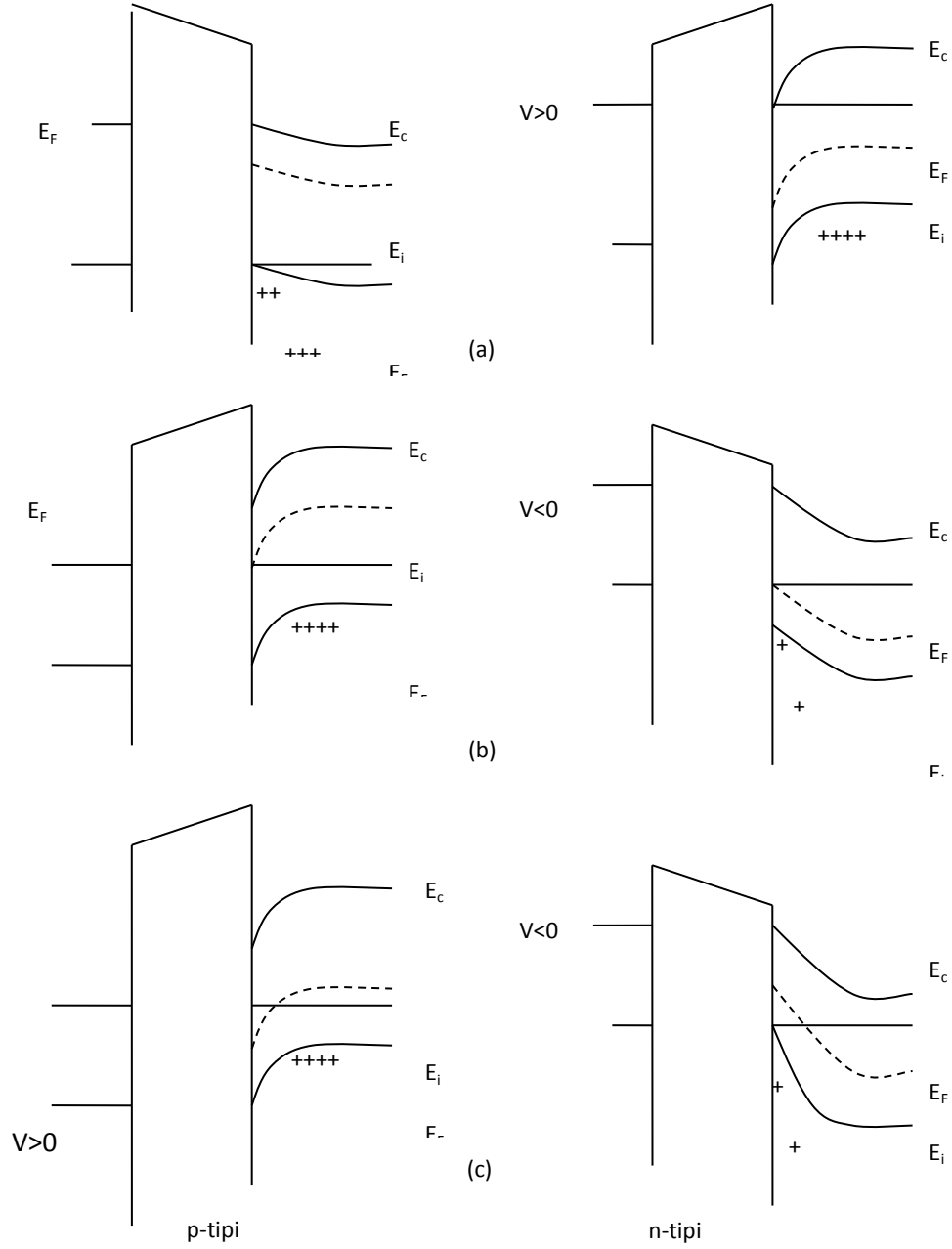
$\Phi_B$ , Fermi enerjisi ( $E_F$ ) ile saf Fermi seviyesi ( $E_i$ ) arasındaki enerji farkıdır.



**Şekil 2.9.**  $V=0$  durumunda ideal bir MIS diyodun enerji-band diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken (Sze S.M. 1981).

- Herhangi bir beslem altında yarıiletken ve yalıtkanın yakın metal yüzeyinde yükler mevcut olabilir fakat eşit ve zıt işaretlidir.
- DC beslem altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez veya yalıtkanın direnci sonsuzdur.

İdeal bir MIS diyoda ters beslem uygulandığında, yarıiletken yüzeyinde temel olarak üç durum mevcut olabilir. p-tipi yarıiletkenli MIS yapılarında metale negatif voltaj ( $V < 0$ ) uygulandığında (Şekil 2.10a) valans bandının tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine yükselir. p-tipi yarıiletkenli MIS yapılarında küçük bir pozitif voltaj ( $V > 0$ ) uygulandığında bandlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcılar tüketilir (Şekil 2.10b). Bu tüketim bölgesidir. p-tipi yarıiletkenli MIS yapılarında büyük bir pozitif voltaj uygulandığında ise, bandlar oldukça aşağı doğru bükülür öyle ki, saf seviye  $E_i$ , yüzeyde Fermi seviyesi  $E_F$ 'nin üstüne çıkar (Şekil 2.10c).



**Şekil 2.10.**  $V \neq 0$  durumunda ideal MIS diyodun enerji-band diyagramı (a) akümülayson (yığılım) (b) tüketim (c) inversiyon (terslenim) durumları. (Sze S.M. 1981).

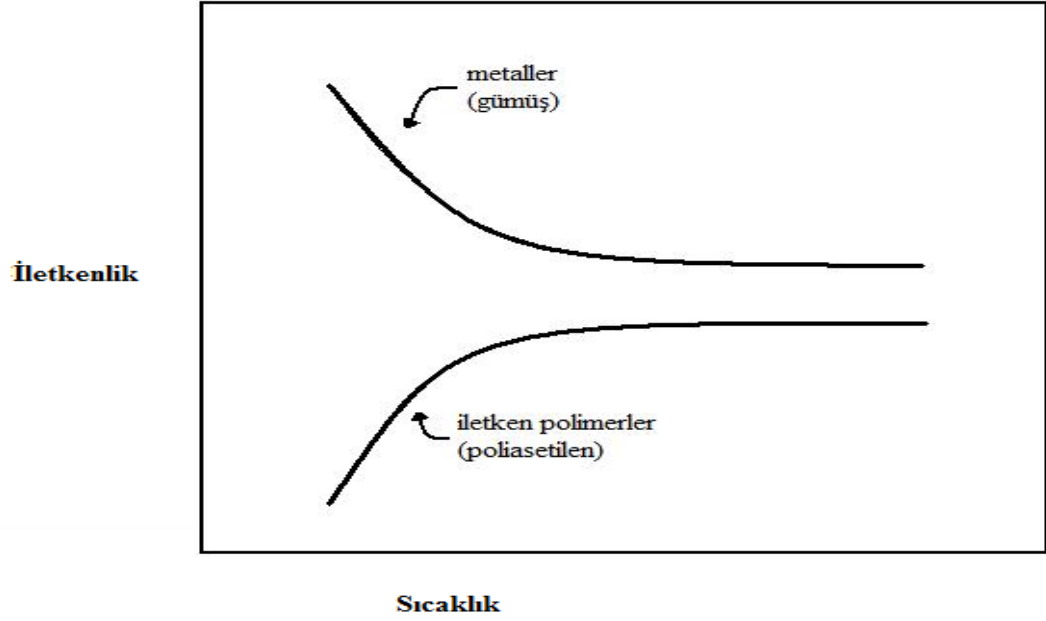
## 2.5 İletken Polimerler

Polimerler, aynı yapıda olan çok sayıdaki yüksek moleküllü bileşiklerin (monomerlerin) bir araya gelmesi ve kendi aralarında kovalent bağlarla bağlanması sonucu oluşan organik yapılardır. Polimerler kimyasal, fiziksel, elektrik ve optik özelliklerinden dolayı araştırmalarda çok sık kullanılmaktadır. Polimerler kristal ve amorf yapıya sahiptirler. Polimerler metallerle kıyaslandığında, polimerlerin genellikle metallerden daha hafif ve ucuz olduğu, kolay şekil alabildiği fakat iletken olmadıkları göze çarpmaktadır. Metallerin ise zor işlenebilen, ağır, pahalı olmalarının aksine iletkenlikleri yüksek maddeler olduğu bilinmektedir. Polimerler ile metallerin üstün özellikleri bir araya getirilerek iletkenlik özelliği taşıyan polimerlerin elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu amaçla hazırlanan polimerler, iletken polimerler olarak isimlendirilmiştir (Coşkun 2009).

“İletken polimerler” terimi elektriği dağıtabilen veya iletebilen özel polimerler olarak geniş manasıyla tanımlanmıştır, fakat bu terim gerçekte tamamıyla farklı iki tür polimerleri içerir. Birinci tür polimerler karbon siyahı, metal tabakaları ve metalfiberler gibi iletken dolgu maddeleri ile birleştirilmiş polimerleri içerirler ve bunlar ticari olarak kullanılan polimerlerin çoğunu oluştururlar. İkinci tür polimerler ise kendiliğinden iletken polimerler (KİP) olup, kimyasal yapıları nedeniyle kendi molekül sel zincirleri boyunca elektriği dağıtabilen veya iletebilen polimerlerdir. (Kalaycı 2008).

Metaller elektriksel iletkenliği yüksek, üstün mekaniksel özelliklere sahip bir başka madde grubunu oluşturur. Ancak metaller polimerlerden ağır, pahalı ve polimerler gibi kolayca şekil değiştirmezler.





**Şekil 2. 11.** Sıcaklığın, iletken polimerlerin ve metallerin iletkenlikleri üzerine etkisi.

Sıcaklığın değişmesiyle birlikte termal etkiyle iletkenlik bandına geçen elektronların sayısı değişir. Sonuç olarak yalıtkan ve yarı iletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklık ile artar, tam tersine metallerin iletkenlikleri artan sıcaklık ile düşer (Şekil 2.11.) ( Rainde ve Diaz-Calleja 2004). İletken polimerlerde ise metallerden farklı olarak iletkenlik sıcaklık ile üstel olarak artar.

İletken polimerler konusundaki çalışmalar 1950'lerde başlamıştır. İletkenlikleri oda sıcaklığında  $10^{-5}$  S/cm olan yarı iletken polimerler 1950-1960 yılları arasında üretilmiştir. Shirakawa yöntemiyle üretilen poliasetilenin yükseltgen ile dop edilmesi sonucunda iletkenliğinin  $10^8$  kat arttırıldığı görülmüştür (Akbulut 1999). İletkenlik konusunda en önemli adım 1979'da Diaz'ın pirolü elektrokimyasal yöntemle yükseltgeyerek polipirolü üretmesiyle atılmıştır. Polipirol anot üzerinde üretilebilmiş ve güçlü bir film olarak yüzeyden çıkarıldığında iletkenliği 100 S/cm'ye ulaşabilmiştir. Benzer şekilde, elektro yükseltgenme yöntemiyle iletken politiyofen anot üzerinde üretilebilmiştir (Muhammet 2008).

İletken polimerlerin kullanılabilecekleri birçok alan arasında yarı iletken çipler, entegre devreler, hafif pil bileşenleri, sensörler, antistatik kaplama, antistatik ambalaj ve paketleme malzemelerinin yapımı sayılabilir. Ayrıca transistör, diyot, LCD televizyon ekranı ve güneş paneli türü malzemelerin yapımına da uygundur. Ancak iletken polimerlerin erimez ve çözünmez oluşları istenilen amaca yönelik şekillendirilmelerini engeller ve kullanım yerlerini sınırlar.

İletken bir polimerin temel özelliği polimerin ana zinciri boyunca konyuge (ardışık sıralanmış) çift bağların olmasıdır. Konyugasyonda, karbon atomları arasındaki bağlar birbiri ardı sıra değişen tek ve çift bağlar şeklinde dizilmişlerdir. Her bir bağ kuvvetli bir kimyasal bağ olan “sigma” bağı içerir. İlâveten, her çift bağda daha zayıf ve da az lokalize olmuş bir “pi” bağı vardır. Bunlara rağmen, konjugasyon, polimer maddeyi iletken yapmak için yeterli değildir. Fakat bunlara dopant maddeleri girilerek iletkenliği artırılabilir. Dopantların yaptığı şey malzeme içerisinde elektron ve hollerin sayısını artırmaktır. Bir elektron eksikliğinin olduğu konuma bir hole denir. Böyle bir hole komşu bir konumdan atlayan bir elektronla doldurulduğunda yeni bir hole oluşturur ve bu durumun böyle devam etmesiyle yükün uzun bir mesafeye göç etmesi sağlanır.

Elektriği, elektronik yolla ileten poliasetilen, polianilin, polipirol gibi polimerlerde iletkenlik mekanizması henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Elektronik iletkenliğin açıklanmasına yönelik kuramsal yaklaşımlardan birisi band kuramıdır (Batır 2009). Polimerlerde delokalize elektronlar tarafından sağlanan elektriksel iletkenlik metallerde ve yarı iletken sistemlerde olduğu gibi Band Teorisi ile açıklanır. Bu teoriye göre organik maddeler yüksek enerjili elektronlar ile iletkenlik bandı arasında geniş enerji aralığına sahip delokalize elektronlara sahiptirler ve bu nedenle yalıtıcıdır (Kittel 1986). Elektriksel iletkenliğin olabilmesi için elektronların serbestçe hareket etmesi gerekir. Bu da dolu ve boş bantların birbirine bitişik olması ile sağlanabilir. Eğer bir maddede enerji bantlarından biri elektronlarla tamamen dolu ve kendisinden sonra gelen boş enerji bandı ile arasındaki enerji farkı büyük ise, madde yalıtıcıdır. Metallerde ise bu enerji bandı olmadığı için elektronlar kolayca hareket edebilecek ve böylece iletkenlik sağlanmış olacaktır. Buna göre bazı polimerler, metallere yalıtıcılar arası bir iletkenliğe sahiptir. Bu polimerlere iletken polimerler denir. Bir polimerin iletkenliğinin büyüklüğü, örgüsündeki yük taşıyıcıların sayısı ( $n$ ) ve bunların

hareket yetenekleriyle ( $\mu$ ) yakından ilişkilidir. Bu ilişki,  $e$  elektron yükünü göstermek üzere,  $\sigma = n \cdot \mu \cdot e$  şeklindedir. Artı yük taşıyıcıların (katyon veya artı yüklü boşluklar) bulunduğu tuz çözeltilerinde ve yarı iletkenlerde, artı yük taşıyıcıların iletkenliğe olan katkısı yukarıdaki bağıntıya eklenmelidir (Saçak 2004).

Poliasetilen, polianilin ve polipirol gibi konjuge polimerlerin optik absorpsiyon çalışmaları sonucunda, bu polimerlerin değerlik bandını iletkenlik bandından ayıranyasak enerji aralığının yarı iletkenlerde olduğu gibi 1,4-3 eV arasında olduğu anlaşılmıştır. Bir yarı iletkende elektronun, değerlik bandından iletkenlik bandına çıkması ile sistemin yapısı değişmez. Konjuge çift bağ yapısına sahip polimerlerde ise elektronik uyarma, örgünün relaksasyonuna neden olmaktadır. Polimerlerde iki tür yapısal relaksasyon olduğu kabul edilmektedir. Birincisi polimer zinciri boyunca oluşan tek düze relaksasyon, ikincisi ise lokal olarak yapısal deformasyona neden olan relaksasyondur. Bunların sonucunda polimer zinciri üzerinde serbest radikal (soliton) olarak isimlendirilen farklı spin yük konfigürasyonuna sahip hata merkezleri oluşturulabilmektedir (Can 2010).

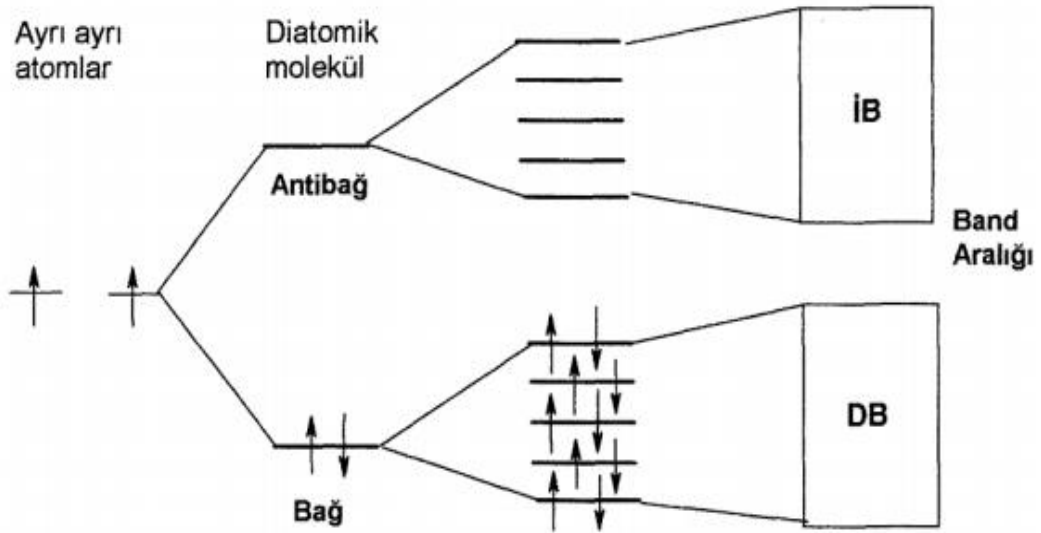
Katkı maddesinin fazla eklenmesi durumunda veya elektrokimyasal olarak katkılama miktarının dolayısıyla polaronların derişimi daha da artırılırsa, polaronlar kendi aralarında etkileşerek bipolaronları oluştururlar. Soliton türü hataların sadece zincir boyunca aktarımının mümkün olmasına karşılık bipolaronik hataların bir zincir üzerinden diğerine atlayabilecekleri belirtilmiştir. Sonuç olarak katkılama ile yasak enerji aralığındaki enerji düzeylerine yerleşen soliton, polaron ve bipolaron gibi yapılar polimerlere iletkenlik kazandırmaktadır (Aydın 2002).

## **2.6 Band Teorisi.**

İletken polimerlerde elektronik iletkenlik kuramsal yaklaşımlardan biri olan band kuramı ile açıklanmaktadır. Bağ oluşumu sırasında iki yeni enerji düzeyi ortaya çıkar. Bunlar, elektron bulunduğu bağ enerji düzeyleri (bağ orbitali) ve boş olan antibağ enerji düzeyleridir (antibağ orbitali). Moleküle her yeni atom katılmasında molekülün elektronik yapısına yeni bir bağ ve antibağ enerji düzeyi eklenir. Molekül büyüklükleri arttıkça bağ orbitali sayısı artar sürekli görünümdeki bir enerji bandı oluşur. Bu banda bağ bandı, valans veya değerlik bandı denir. Bağ bandı oluşumuna benzer şekilde sayıları sonsuza yaklaşan antibağ

orbitalleri de iletkenlik bandını oluşturur. Valans bandı ve iletkenlik bandı arasındaki aralığa band eşiği, bu aralığın geçilmesi için gereken enerjiye ise band eşik enerjisi denir. Maddelerin yalıtkan, yarı iletken, iletken şeklinde sınıflandırılmasını bu bağ eşik enerjisinin büyüklüğü belirler.

Elektronları ısı veya ışık etkisiyle yüksek enerjili antibağ enerji düzeyine çıkabilen maddeler elektriği iletmektedir. Birer elektronu bulunan benzer iki atomun bir araya gelerek oluşturduğu iki atomlu bir bileşiğin (H<sub>2</sub>), bağ yapmadan önceki ve bağ yaptıktan sonraki elektron enerji düzeyleri Şekil 2.12’de görülmektedir.

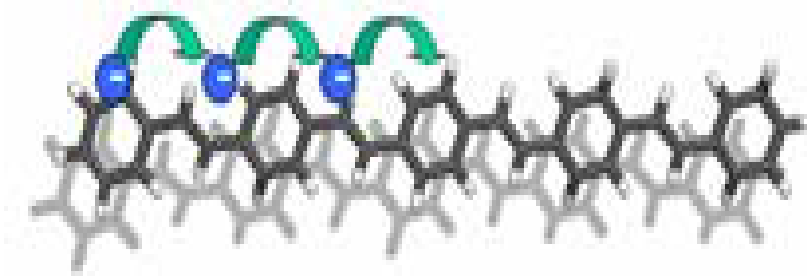


Orta büyüklükteki polimer molekülünde bağ ve anti bağ orbitallerinin oluşumu (Şahmetlioğlu, 2004)

Şekil 2.12. Polimer molekülünde bağ ve anti bağ orbitallerinin oluşumu.

## 2.7 İletken Polimerlerin Yapısı

İletken polimerler, ana iskelet zincirlerinde zayıf bağlı elektronlar içeren polimerler olarak tanımlanırlar. Polimerlerin elektronik iletkenlik gösterebilmesi için, polimer örgüsünde, elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerlerin bulunması gerekir. Bu koşulu ana zincirinde konjuge çift bağlar bulunan polimerler sağlar. İletken polimerleri, diğer polimerlerden ayıran temel özellik, sırayla değişen tek ve çift bağlardan oluşan bir zincir yapısına sahip olmalarıdır. Bu şekilde sırayla değişen bağ yapısına; “konjügasyon” denir (Saçak 2004).



**Şekil 2.13.** Polimerde zincir boyunca yük iletimi (Zuhal A. 2009).

Ancak konjügasyon yüksek düzeyde iletkenlik için tek başına yeterli değildir. Bu polimerlerin iletkenliğini artırmak için ”doping” işlemi uygulanır. Bu işleme göre n-tipi doping olarak adlandırılan; yapıya elektron vererek negatif yüklü bölgeler oluşturma veya p-tipi doping olarak adlandırılan; polimer zincirinden elektron koparılmasıyla polimer örgüsünde artı yüklü boşluklar oluşturma işlemleri gerçekleştirilir. İletkenliğin sağlanması genel olarak katkılı yarıiletkenlerinkine benzer yaklaşımla bu elektron ve boşlukların hareketi ile sağlanır. Katkılama ile yasak enerji aralığındaki enerji düzeylerine yerleşen soliton, polaron ve bipolaron gibi yapılar polimerlere iletkenlik kazandırmaktadır. Doping işleminde polimere verilen elektron, iletkenlik bandına değil bant aralığında bulunan bir ara enerji düzeyine yerleşir. Oluşan bu yeni enerji seviyesi yükün taşınmasını kolaylaştırır. Polimere doping yoluyla verilen elektron “polaron” olarak adlandırılan radikal anyon oluşumunu sağlar. İkinci bir elektron verilirse “bipolaron” olarak adlandırılan dianyon oluşur. Her iki yapıda da bant aralığına yerleşmiş olan elektronlar kolaylıkla iletkenlik

bandına geçerek elektriksel iletimi sağlar. Polimerlerde iletkenliği etkileyen diğer bir olay da soliton oluşumudur. Soliton oluşumu bir yapı kusuru olarak tanımlanabilir. Polimer zincirindeki herhangi bir soliton, kendisine yakın zincirdeki bir solitonla etkileşerek elektron atlamalarını gerçekleştirir (Aydın 2002).

İletken polimerlerde elektronik iletkenlik kuramsal yaklaşımlardan biri olan band kuramı ile açıklanmaktadır. Polimerlerde bağ oluşumu sırasında iki yeni enerji düzeyi ortaya çıkar. Bunlar, iki elektronun bulunduğu bağ enerji düzeyi (bağ orbitali) (HOMO) ve boş olan antibağ enerji düzeyidir (antibağ orbitali) (LUMO). Bağ enerji düzeyindeki elektronlar, ısı veya ışık etkisiyle yeterli enerji alarak daha yüksek enerjili antibağ enerji düzeyine çıkabilirler.

## **2.8 İletken Polimerlerde Doping İşlemi**

Bir polimere uygun yöntemlerle elektron verilmesi veya uzaklaştırılması yöntemiyle iletkenlik düzeyinin artırılması işlemine doping veya doplama yapma işlemi denir. Doplama amacıyla kullanılan kimyasallara dopant denir. Doping yapma işlemi, iletken polimerler hazırlamak için konjuge  $\pi$  bağlarına sahip olan bir polimeri uygun bir reaktif ile indirgemek veya yükseltmek ile gerçekleştirilir. Dop işlemiyle polimer yapısına iletkenliği sağlayacak olan elektronlar verilir veya elektronlar alınarak polimer örgüsünde artı yüklü boşluklar oluşturulur. Artı yüklü bir boşluğa başka bir yerden atlayan elektron, geldiği yerde de artı yüklü boşluk oluşturacaktır. Bu işlem ard arda zincir boyunca yinelenerek elektrik iletilir.


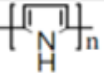
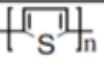
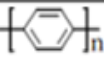
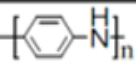
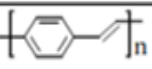
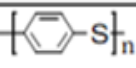
Polimerler aşağıdaki tekniklerle doplanabilirler:

1. Gaz fazında doping,
2. Çözelti ortamında doping,
3. Elektrokimyasal doping,
4. Radyasyon kaynaklı doping,
5. İyon değişimi dopingi.

Bu tekniklerden ilk üçü daha az maliyetli olduğu için tercih edilmektedir.

Polimerlerde doping yoluyla iletkenliğin sağlanabilmesi şu şekilde açıklanabilir: Değerlik kabuğundaki elektronlar ya yükseltgen bir reaktif ile koparılabilir ve değerlik kabuğu pozitif hale gelir veya indirgen bir reaktif ile boş iletkenlik bandına bir elektron verilebilir. Bu işlemler, yükseltgenmeye karşılık olmak üzere p-türü doping, indirgenmeye karşılık olmak üzere n-türü doping olarak isimlendirilir. Doping işlemi sırasında doping moleküllerinin hiç birisi polimer atomları ile yer değiştirmez, doping molekülleri yalnızca elektronların enerji kabuklarından geçişlerine yardımcı olurlar.

Doping yapıcı maddeler veya dopantlar ya güçlü indirgen veya güçlü yükseltgen maddelerdir. Bunlar kolaylıkla iyon oluşturabilen inorganik tuzlar veya bileşikler, nötral moleküller, organik dopantlar ve polimerik dopantlar olabilirler (Randriamahazaka ve ark. 2005). Doplama işlemi geri dönüşümsüz bir işlem değildir. İletken polimerlerin doplanmış halden andop edilerek yeniden yalıtkan formlarına dönüştürülmesi mümkündür. Dopantların yapısı iletken polimerlerin kararlılığında önemli rol oynar.

Polimer	Tekrardan birim	Doping maddeleri	Renk	
			doyurulmamış	doyurulmuş
Poliasetilen (trans) (PA)		I <sub>2</sub> , Br <sub>2</sub> , Li, Na, AsF <sub>5</sub>		
Polipirol (PPyr)		BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , tosilat	sarı- yeşil	mavi- siyah
Politiyofen (PT)		BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> , ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , tosilat, FeCl <sub>4</sub> <sup>-</sup>	kırmızı	mavi
Poliparafenilen (PPP)		AsF <sub>5</sub> , Li, K		
Polianilin (PANI)		HCl, asitler	mavi	yeşil
Poli(parafenilen vinilen) (PPV)		AsF <sub>5</sub>		
Polifenilen sulfid (PPS)		AsF <sub>5</sub>		

**Çizelge 2.2.** Dop edilmiş bazı iletken polimerlerin yapıları ve iletkenlikleri.

## 2.9 İletken Polimerlerin Sentez Yöntemleri

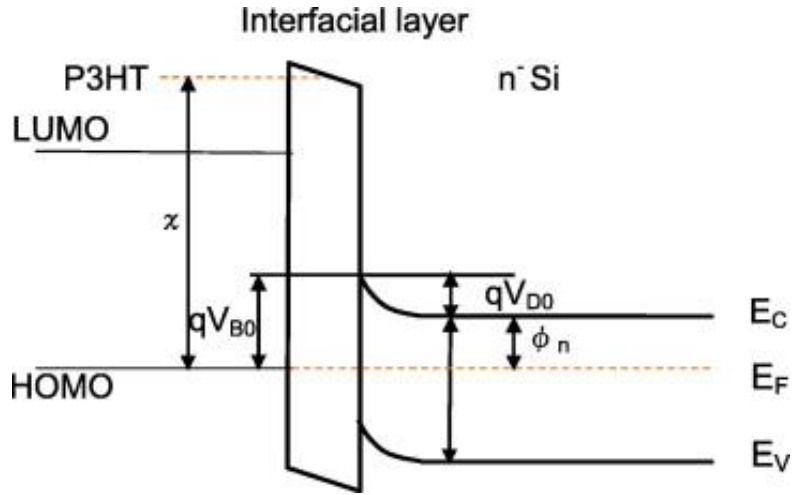
İletken polimerleri sentezlemek için belli başlı dört metot kullanılmaktadır. Bunlar; elektrokimyasal polimerizasyon, kimyasal polimerizasyon, piroliz ve katalitik polimerizasyon teknikleridir. Bu polimerizasyon metotlarından sıkça kullanılanları elektrokimyasal polimerizasyon ve kimyasal polimerizasyondur. İletken polimerlerin sentezinde, başlangıçta kullanılan monomerler sonuçta oluşan polimerin yapısında korunabilen tipik aromatik veya çoklu konjuge bağ yapısına sahiptirler. Örneğin asetilenin polimerizasyonu sonucu konjuge etilen birimleri içeren polietilen oluşmaktadır. Benzenin polimerizasyonunda ise birbirine kovalent bağlı aromatik zincirli poli(p-fenilen) oluşur. Bu şekilde elde edilen iletken polimerlerin yapısında  $\pi$  – konjugasyonunun uzatılması çok önemlidir.



## 2.10 İdeal MPY diyot

Metal ile yarıiletken arasına yalıtkan ya da polimer bir tabaka kaplanırsa, metal/yarıiletken (MS) yapı, metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS veya MPS) yapıya dönüşür. Bu yalıtkan veya polimer arayüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Metal-Polimer-Yarıiletken (MPY) yapı Şekil 2.14'de gösterilmiştir (Crowell C.R. 1966). Burada  $\delta$  polimer tabakanın kalınlığıdır. Metal kısım omik kontakta göre pozitif olduğu zaman doğru beslem, metal kısım omik kontakta göre negatif olduğunda ise ters beslem oluşur.

Bu çalışmada kullandığımız polimerler p-tipi polimerlerdir, yani donör özelliği gösterirler. Bu polimerler ışığı adsorbe etme özelliğine sahiptirler ve güneş pilleri yapımında kullanılmaktadırlar. Bu yapılarda p-tipi polimer foton absorbe eder ve eksiton oluşturulur. Bu eksiton ara yüzeyde ayrışır. Sonra elektronlar anorganik yarı iletkene transfer edilir. Organik güneş pilleri eksitonik güneş pilleri olarak da adlandırılmaktadır. Çünkü güneş pili tarafından absorbe edilen ışık elektron-boşluk çifti olan eksitonları oluşturmaktadır



Şekil 2.14. Metal-polimer-yarıiletken (M.P.Y) diyodun enerji bant diyagramı (Crowell C.R., 1966)

## 2.11 Schottky Diyotlarında Doğru Beslem I-V Karakteristikleri

TE teorisine göre Schottky diyotlarında doğru beslem altındaki akım yoğunluğu-gerilim ilişkisi aşağıdaki şekilde verilmektedir

$$J_n = \left( A^* T^2 \exp \left[ \frac{-q\phi_B}{kT} \right] \right) \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.28)$$

Akım yoğunluğu  $J=I/A$ 'dır. Pratikte Schottky diyotlarında, doğru beslem akım-gerilim karakteristiğinde ideal durumdan bazı sapmalar olabilir. Yani boyutsuz olan idealite faktörü (n) birden büyük ve seri direnç sıfırdan büyük olabilir. Bu durumda yukardaki akım ifadesi,  $\exp(qV_D/\eta kT) \gg 1$  durumu da göz önüne alınırsa

$$I = A A^{**} T^2 \exp \left( \frac{q\Phi_{Bo}}{kT} \right) \exp \left[ \frac{q(V - IR_s)}{\eta kT} \right] \quad (2.29)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Buna ek olarak son zamanlarda yüksek seri direnç ve idealite faktörüne sahip Schottky kontaklarda; seri direnç ( $R_s$ ), idealite faktörü (n) ve sıfır beslem engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ) gibi temel diyot parametrelerini tayin etmek amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir. H.Norde (1979) tarafından geliştirilen ve Cheung (1986) tarafından modifiye edilen iki fonksiyon aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (2.30)$$

$$H(I) = n \Phi_B + IR_s \quad (2.31)$$

## 2.12. Si'un Oda Sıcaklığındaki (T= 300 K) Bazı Fiziksel Parametreleri

Silisyum doğada en çok bilinen elementlerden biridir. Yerkabuğunun % 25'i silisyumdan oluşur. Oksijenden sonra bileşikleri halinde en fazla bulunan elementtir. Silisyumun iki tane allotropu vardır. Bunlardan birincisi saf kristal silisyumdur. Saydam olmayan koyu gri renkli, parlak, sert ve kırılkan olup örgü yapısı elmas yapıdadır. Diğeri ise amorf silisyumdur. Koyu kahve renkli olup tane büyüklüğü nedeni ile kristal silisyumdan ayırt edilebilir ve kolay reaksiyon verir. Silisyum dioksitin ( $\text{SiO}_2$ ) elektrik arkında redüklenmesi ile elde edilen silisyum, saf olmaması nedeniyle silanlı ( $\text{SiH}_4$ ) bir bileşiğe dönüştürülür. Sıvı olan bu bileşik, kademeli distilasyon yöntemi ile ayrılır ve silisyumu içeren kısım kendi başına veya hidrojen atmosferinde ısıtılarak saf silisyuma ulaşılır. Bu yöntemlerle kimyasal saflığa getirilen silisyum yarıiletkeni henüz elektronik cihaz yapımı için yeterli saflığa ulaşmamıştır (Shuer 1990). Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden faydalanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır. Böylece saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bu aşamadan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülerek içine istenilen özdirenci sağlayacak oranda safsızlık (katkı) maddelerinin katkılanması gerekir.

Silisyum son yörüngesinde 4 elektron taşıyan (IVA grubu) bir elementtir. Silisyum, Bor gibi III A grubu elementlerinden biri ile katkıldığında oluşan madde bir elektron eksikliği nedeniyle elektron alma eğilimindedir. Böylece p-tipi yarıiletken elde edilmiş olur ve bu yarıiletkende deşik yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır. Benzer şekilde silisyuma fosfor gibi VA grubu elementlerinden biri katkılanırsa bir elektron fazlalığı nedeniyle oluşan madde elektron verme eğilimindedir ve bu tür yarıiletkene n-tipi yarıiletken adı verilir.

Silisyumun diğeri yarıiletkenlere göre önemli avantajlarından bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Sharma 1984):

Yüzey passivasyonu kolaydır. Böylece yüzey rekombinasyon hızını azaltan kararlı bir oksit tabaka oluşur.

Silisyumun sertliğinden dolayı geniş waferlar şeklinde hazırlanabilir.

Silisyum termal olarak çok kararludur. Bu özellik difüzyon, oksidasyon ve tavlama gibi işlemlerde yüksek sıcaklıklarda çalışmaya izin verir.

Doğada bol miktarda bulunduğu için maliyeti düşüktür.

Silisyumun yasak enerji aralığının şekli ve boyutudur. Silisyum indirekt bant aralıklı bir yarıiletkenidir ve yasak enerji değeri (1,12 eV) onun optoelektronik uygulamaları için limit değeridir.

Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 2.3’ de verilmiştir.

<b>Si (T=300K)</b>		
Kristal yapısı	Elmas	
Yasak bant aralığı (eV)	1,12	
Örgü sabiti (Å)	5,43095	
Atom/cm <sup>3</sup>	2,32x10 <sup>22</sup>	
Dielektrik sabiti	11,9	
İletkenlik bandı efektif (cm <sup>-3</sup> )	42,8x10 <sup>19</sup>	
Valans bandı efektif (cm <sup>-3</sup> )	1,04x10 <sup>19</sup>	
Elektron etkin kütlesi (m <sub>e</sub> /m <sub>0</sub> )	0,19	
Deşik etkin kütlesi (m <sub>h</sub> /m <sub>0</sub> )	Ağır m <sub>hh</sub>	0,16
	Hafif m <sub>lh</sub>	0,49
Elektron yakınlığı, X (eV)	4,05	
Erime noktası (K)	1414	
Molar hacmi (ml/mol)	12,06	

**Çizelge 2.3.** Oda sıcaklığında Si’ a ait bazı fiziksel parametreler.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar

Si Yarıiletken; Mikropipet; Petri kabi; Cam tüp; Manyetik balıklar; Etanol; Metanol; Aseton; Saf su; Klorobenzen; P3HT – Poli(3-hekziltiyofen) ; poli [2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil] (MEH-PPV ); poly-[2-(3,7-dimethyloctyl oxy)-5-methyloxy]-para-phenylene-vinylene) MDMO-PPV

Kimyasal malzemeleri tartmak için ve temizleme aşamasında altlıkları titreştirdiğimiz ultrasonik titreştirici;



Şekil 3.1. “Radwag” hassas tartı ve “TRANSSONIC TS 540” ultrasonik titreştirici.

Çözelti hazırlamada sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı kullanıldı



Şekil 3.2. “Yellowline” manyetik karıştırıcı ve numunelerin kaplanmasında kullanılan “Spin coater VTC-100” cihazı;

Hazırlanan ince filmin tavlama için kullanılan fırın;



Şekil 3.3. "Aldrich" fırın ve malzemeleri korumak için vakuum odası Glovebox.



## **3.2. DENEYSEL YÖNTEM**

### **3.2.1 İnce Film Kaplama Yöntemleri**

İnce film kaplama yöntemleri kimyasal ve fiziksel yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır.

#### **3.2.1.1. Fiziksel kaplama yöntemleri**

##### **3.2.1.1.1. Vakum içinde buharlaştırma**

Hedefe (kaplama malzemesine) yüksek enerjili parçacıkların bombardıman edilmesiyle atomik veya iyonik parçacıklar yüzeyden momentum transferi ile kopartılır ve elektrik alan etkisinde altaşa yönelip ona yapışmaları sağlanır. Böylece yüksek kalitedeki film azar azar büyütülür. Yüksek enerjili parçacıklar argon gibi asal gaz iyonlarıdır. En yaygın olarak kullanılan ince film kaplama tekniklerden birisidir ve bu işlem momentum transferi sonucunda oluştuğundan diğer ince film kaplama tekniklerinden tamamen farklıdır.

Sistem tamamen basınca ve ısıya dayanıklı kapalı bir kap içinde bulunur. Genel olarak camdan yapılmış kap kullanılır. Önce mekanik olarak sonra da turbo pompa kullanılarak basınç  $10^{-6}$  Torr'a kadar düşürülür. Kapalı kabın alt kısmına yerleştirilen film yapımında kullanılacak olan malzeme elektriksel yöntemlerle ısıtılır. Böylece malzemenin buharlaşması sağlanır. Buharlaşan malzeme taşıyıcıya yapışarak üzerinde birikir. Vakum içinde buharlaştırma yönteminde film kalınlığını etkileyen üç faktör vardır ( Savaş ve ark. 2012)

- Buharlaşma hızı,
- Buharlaşan malzemenin bulunduğu kap ile taşıyıcı arasındaki uzaklık,
- Buharlaşma basıncı

Vakumun düşük olması, metallerin oksijenle birleşerek kaplama kalitesini bozmasına engel olur. Sekil 3.4' de termal buharlaştırma ünitesi gösterilmiştir.

Buharlaşma tekniğinin avantajları.

-Termal buhar kaplama işlemi, buharlaşan atomların kinetik enerjileri düşük olduğu için, kaplamaların ana malzemeye yapışma yetenekleri düşüktür.

-Bunun yanında sistemin oldukça basit olması ve buhar veriminin yüksek, kaplama malzemesi seçiminde geniş olanaklar sunması termal buharlaşma tekniğinin avantajlarıdır.

Buharlaşma tekniğinin dezavantajları

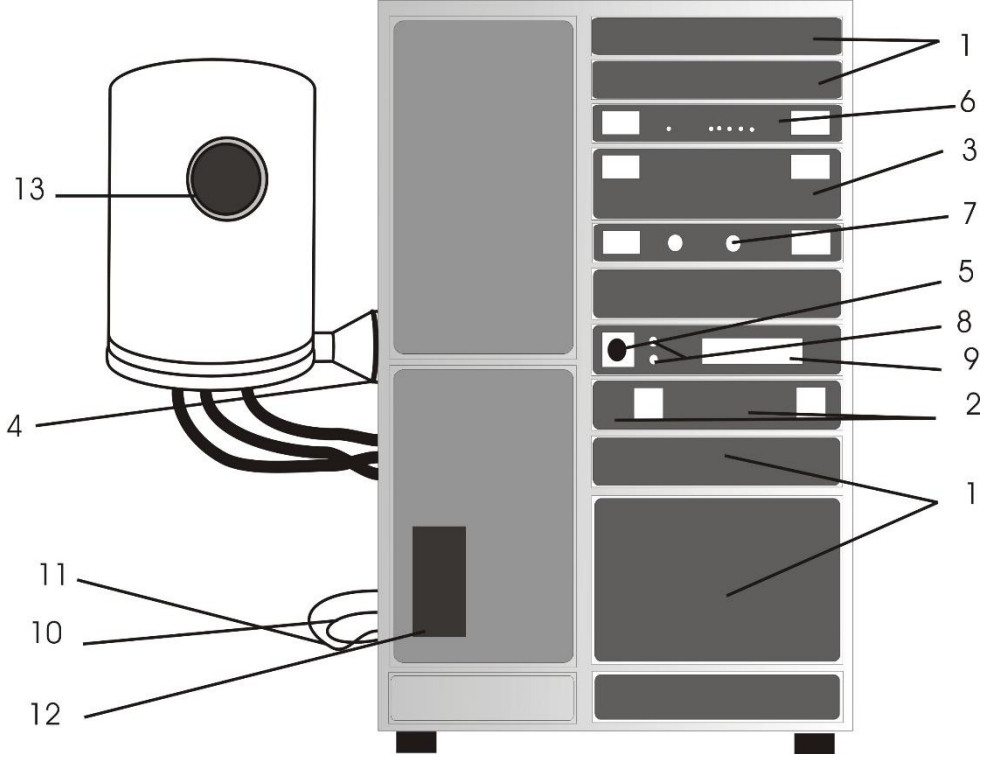
-Buharlaşmanın ısı rezistansı ile sağlandığı durumda, etrafına rezistans teli sarılmış, yüksek sıcaklığa dayanıklı pota içerisinde malzemeler ısıtılmaktadır.

-Buharlaştırma indüksiyon akımı ile yapıldığında ise su soğutmalı bakır tel sarılmış, sıcaklığa dayanıklı potalara akım uygulanarak buharlaştırma sağlanır.

-Bu yöntem diğer tekniklere göre daha ucuzdur ancak bazı dezavantajları vardır.

-Geometrik faktörler sebebiyle büyük çaplı üretimler çok zor veya mümkün değildir.

-Düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler için kullanılabilir. Bazı durumlarda, pota da sıcaklıktan etkilenecek buharlaşır ve kaplama bozulabilir.



**Şekil 3.4.** Omik ve doğrultucu kontak oluşturmada kullanılan metal buharlaştırma sistemi. LEYBOLD Univex 450

1. Yardımcı aletler için boş levhalar.
2. Katı – hal frekans dönüştürücü.
3. AS 052 güç sağlayıcı ünite.
4. Taban levha bağlantı flenç.
5. Ana şalter
6. COMBIVAC IT 230.
7. CONTRASTER C 2000.
8. Zilli kapasite birimi asansörü için basma düğmesi.
9. Yardımcı ekipman için akım kırıncılar ve fazla akım kaynağı.
10. Boşaltma hattı için bağlantıları
11. Soğutucu su bağlantıları
12. Yağ seviyesi kontrol paneli
13. Zilli kapasite biriminde gözlem penceres.

### **3.2.1.1.2. Sıçratma tekniği ile kaplama**

Yüksüz bir gazın bulunduğu ortamlarda uygulanabilen bir yöntemdir. Bu ortamın içine yerleştirilen yüzey, yüksek enerjili parçacıklarla bombardıman edilerek yüzeyden atom sökülmesi sağlanır. Böylece ortamdaki yüksüz gazda pozitif iyonlar oluşur. Elektrik devresinin katoduna yerleştirilen hedef metalin yüzeyine gönderilen pozitif iyonlar taşıyıcının malzeme ile kaplanmasını sağlar. Sıçratma tekniği ile birçok malzeme başarılı bir şekilde kaplanmasına rağmen, birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması ve alttaş sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır.

#### **Sıçratma Tekniğinin avantajları**

Sıçratma yönteminin en önemli avantajı farklı buhar basınçlarında farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilebilmesidir. Ayrıca bu yöntemde film yapısına makro partiküllerin girme olasılığı çok düşüktür. Elde edilen kaplamaların alt malzemeye yapışması oldukça iyidir ve alt malzemenin sıçratma ile temizlenmesi ile daha da iyi hale getirilebilir. Sonuç olarak sıçratma ile elde edilen filmin kalitesi ve yapısı mükemmeldir. Yöntemin dezavantajları olarak ise limitli kaplama kalınlığı ve yüksek maliyeti sayılabilir.

### **3.2.1.1.3 Kimyasal kaplama yöntemleri**

#### **Sol-Jel yöntemi**

Sol-jel yöntemi özellikle organik olmayan ince film kaplamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntem, geleneksel yöntemlere nazaran 100-600 °C gibi düşük sıcaklıklarda kullanılabilir. Geleneksel yöntemlerde ise sıcaklıklar 1500-1600 °C'ye kadar çıkabilir. Bu kimyasal yöntemde başlangıçta kaplama yapılacak malzeme solüsyon şeklindedir. Bu solüsyon kullanılarak jel şeklinde bir madde elde edilir. Böylece

çözelti katılaşmadan önce daldırma, döndürme ve püskürtme gibi yaygın yöntemlerle ince film şeklinde kaplanır. (Tülay 2012).

#### Anadizasyon

Özellikle madeni kaplamalarda kullanılır. Madeni çözeltinin iyon iletkenliği kullanılır. Kaplanacak malzeme devrenin anotuna yerleştirilir ve devreye akım verildikten bir süre sonra iyon durumundaki malzeme anota yapışarak kaplamayı oluşturur.

#### Kimyasal buhar birikimi

Bu yöntemde vakum içine yerleştirilen malzemenin buharlaştırılarak taşıyıcı malzeme üzerine yoğunlaşması temel alınır. Kaplaması yapılacak malzemenin buharı kimyasal tepkimeler sonucu oluşturulur. Böylece çok benzediği fiziksel kaplama yöntemlerinden vakumda buharlaştırmadan ayrılır. Vakumda buharlaştırmada buhar ısı verilerek elde edilir.

#### Elektro kaplama

Bu yöntem metal taşıyıcının kaplanmasında kullanılır. Kaplanacak metal devrenin katotuna, kaplama malzemesi ise anotuna yerleştirilir. Devreye akım verildiğinde zamanla katottaki metal malzeme kaplanır. Kaplanan malzemenin kalınlığının kolay kontrol edilebilir olması ve kaplanacak taşıyıcının çözeltinin içerisine daldırıldığında şeklinin öneminin olmaması nedeniyle sanayide ve araştırmalarda yaygın olarak kullanılır.

#### Kimyasal banyo birikimi

Çözeltisi hazırlanan kaplama malzemesinin içerisine kaplanacak malzeme yerleştirilir. Kaplama zamanla kimyasal tepkimeler sonucu oluşur. Dışarıdan akım veya gerilim uygulanmaz.

## Püskürtme yöntemi

Çözeltisi hazırlanan kaplama malzemesi taşıyıcı üzerine püskürtme tabancasıyla püskürtülür. Kaplamanın kalınlığı ve kalitesi şu özelliklere bağlıdır;

- Tabancanın ucundaki delik sayısına,
- Deliklerin çapına,
- Püskürtme uzaklığına,
- Çözeltinin yoğunluğuna,
- Püskürtme hızına.

## Daldırma yöntemi (Dip coating)

Taşıyıcının hazırlanan çözeltiliye belirli bir hız ile daldırılması ve aynı hızla çıkarılması kuralına dayanır. Bu yöntem çoğunlukla saydam tabakalar üretmek için kullanılır. Daldırma yönteminin diğer yöntemlere göre düzgün bir kaplama elde edilmesi, kaplama kalınlığının kolayca elde edilebilmesi ve çok katlı kaplama yapılabilmesi gibi bazı avantajları vardır. Scriven'e göre daldırma ile film kaplama yöntemi beş aşamada gerçekleşir.

1. Daldırma
2. Çıkarma (yukarı çekme)
3. Kaplama
4. Akıtma (süzülme); Alkole benzer çözücülerle yapılan kaplamalarda, bu maddelerin uçucu özelliğinden dolayı süzülme basamağına gerek yoktur.

## Döndürme yöntemi ile film kaplama (Spin coating)

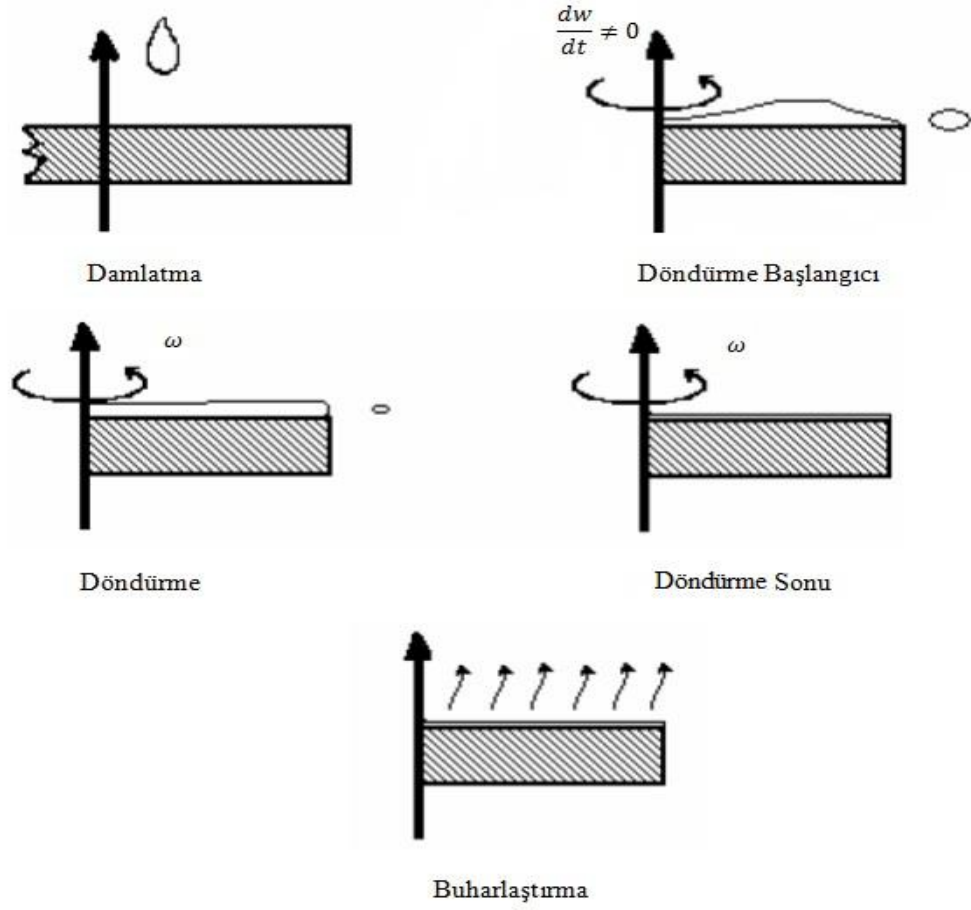
Bu yöntem sert yüzeyler veya hafif pürüzlü taşıyıcılar üzerinde ince filmler oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde taşıyıcılar, çok yüksek dönme hızında, örneğin 1200-4000 devir/ dakika hızla döndürülürler.

Döndürme yöntemi ile film kaplama işlemi 5 aşamaya ayrılabilir.

Bu beş aşama birbirini takip eden süreçlerdir (Şekil 3.5);

1. Birikim (Damlatma)
2. Döndürme başlangıcı
3. Döndürme
4. Döndürme sonu (Durdurma)
5. Buharlaştırma

Birikim aşamasında filmi kaplayabilecek çözültiden daha fazlası duran veya yavaşça dönen taşıyıcı üzerine damlatılır. Daha sonra taşıyıcı yüksek bir devirle (2000-2500 devir/dakika) döndürülür. Sıvının fazlası film üzerinde merkezci kuvveti yenerek dışarı doğru ilerler ve taşıyıcıyı damlalar halinde terk eder. Üçüncü ve dördüncü aşamada taşıyıcının üzerindeki ıslak film, taşıyıcı üzerine homojen olarak dağılır. Film incelidikçe kalan sıvının akışkanlığı azalır. Beşinci aşamada, film buharlaşmadan dolayı daha da incelir. Bu aşamada gaz haline dönüşmeyen çözültinin koyulaşması, durdurma sürecinin sonuna kadar devam eder. Film kalınlığı durdurma sürecinden sonra değişimi devralan buharlaşma sürecinin oluşturduğu incelmenin sonucudur. Buharlaşmayan bileşenlerden ne kadar kalırsa kalsın, film oldukça incelmiş ve yapışkanlık akısı durduğu zaman ince film oluşturulmuş olur (Savaş S. ve diğerleri 2012).



**Şekil 3.5.** Döndürme yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi.

Film kalınlığının düzgün olmasını sağlayan iki kuvvet vardır; bunlar merkezci kuvvet ve buna ters yönde sürtünme kuvvetidir.



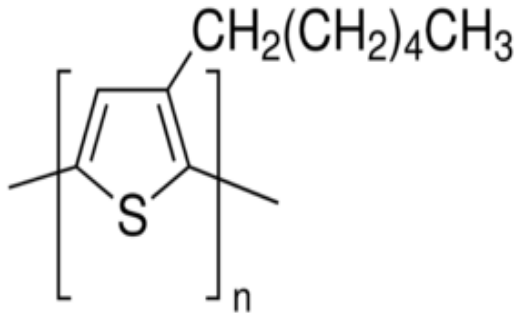
### 3.3. Kullanılan Polimerler

Bu çalışmada Phenylene-Vinylene türevlerinden olan MDMO-PPV ve MEH-PPV ve Tiyofen türevi olan P3HT iletken polimerleri kullanılmıştır. Politiyofenler, tiyofenden hem kimyasal hem de elektrokimyasal yöntemle sentezlenen bir diğer iletken polimerlerdir. Ancak, iletkenliği diğer iletken polimerlere göre daha düşüktür. ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$  S/cm) ve atmosfer koşullarında kararsızdır (Saçak 2004). Politiyofen ve türevlerinin iletken polimerler içerisinde ilgi çekmesinin en önemli iki nedeni kararlılıkları ve organik çözücülerde çözünür olmalarıdır. Bu özellikler iletken polimerlerin pratik uygulamaları için önemlidir. En önemlisi, politiyofen hem yükseltgenmiştir (p-doping), hem de nötral (undoped) formlarında suda ve havada kararlıdır. MDMO-PPV, MEH-PPV ve P3HT polimerleri güneş pili yapımında en sık kullanılan polimerlerdir. Bunun sebebi bu polimerler ışığı kolayca absorbe edebilme özelliğine sahiptirler. Polimerin ışığı absorbe etmesi sonucu elektronlar  $\pi$ 'den  $\pi^*$  orbitaline geçerler. Bu geçişler genelde elektromanyetik spektrumun görünen bölgelerinde mümkündür. Görünür bölgede absorpsiyon ve ışımaya yapabilen polimerler fotodetektörler (Gu ve Hegeer 1994), Led, lazerler gibi çeşitli optoelektronik uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu polimerler donör özelliğine sahiptir. Bu yapılarda p-tipi polimer foton absorbe eder ve eksiton oluşturulur. Bu eksiton ara yüzeyde ayrışır. Sonra elektronlar anorganik yarı iletkene transfer edilir. Organik güneş pilleri eksitonik güneş pilleri olarak da adlandırılmaktadır. Çünkü güneş pili tarafından absorbe edilen ışık elektron-boşluk çifti olan eksitonları oluşturmaktadır. Düşük dielektrik sabitleri ve moleküller arası zayıf bağlar nedeniyle ışık absorpsiyonuyla eksitonlar oluşturulur (Hoppe ve Sarıçiftçi 2004).

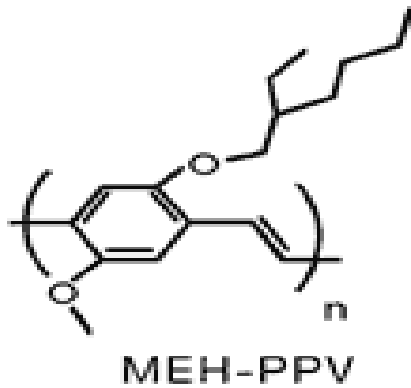
Elektron ve boşluk birbirine Coulomb etkileşmesiyle bağlıdır. Işık altında, elektronlar absorbe olan foton LUMO seviyesine gönderilir. Bu geçişi yapan elektronlar arkalarında HOMO seviyesinde boşluk bırakırlar (Winder ve Sarıçiftçi 2004). İletken polimerlerde fotoakım sıcaklık değişimine çok duyarlıdır. Bunun gibi nedenler cihazın kalınlığını sınırlamaktadır. Çoğu iletken polimer hava ortamında bulunan oksijen ve neme karşı çok

hassastır. Bu nedenden dolayı organik tabanlı güneş pilleri eldivenli kutu (glovebox) denilen oksijensiz ortam içeren bir cihazın içinde yapılmaktadır (Zuhal 2009).



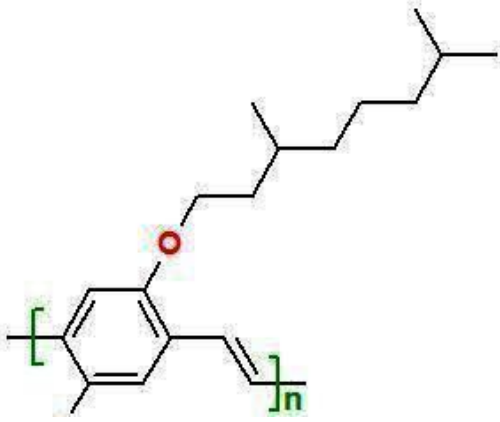
**Şekil 3.6.** P3HT'nin kimyasal bağ oluşum şeması.

Şekil 3.6'da P3HT polimerinin bağ oluşum şeması verilmiştir. P3HT– Poli(3-hekziltiyofen) polimeri kimyasal yönden kararlı olmakla birlikte aynı zamanda farklı çözeltilerde iyi çözünürdür. Politiyofen polimerinin  $E_g = 2$  eV bant aralığına (LUMO= 3eV ve HOMO=5eV ) ve  $\sigma = 10^{-10^3}$  (S/sm) gibi iletkenlik değerine sahip olması önemli özelliklerindedir. P3HT kolay üretilir, sade yapısı ve yüksek mobilite, geniş soğurma spektrumuna ve oksitlenmeye karşı dayanıklı olduğu için elektrik ve elektronik açıdan büyük önem teşkil etmektedir.



**Şekil 3.7.** MEH-PPV polimerinin kimyasal yapısı.

(MEH-PPV ) poli [2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil] polimeri düşük iyonizasyon potansiyeline sahip olması (Yang ve Shalish 2001), çeşitli çözeltilerde iyi çözünür olması, kolay üretimi ve oksitlenmeye karşı daha dayanıklı (Braun ve Heeger 1991) olması gibi önemli özelliklere sahip iletken bir polimerdir. Bundan dolayı geniş bir uygulama alanına sahip olabilmektedir. (LUMO=2,7eV ve HOMO=5.1eV)



**Şekil 3.8.** MDMO-PPV polimerinin kimyasal yapısı

Poly-[2-(3,7-dimethyloctyl oxy)-5-methoxy]-para-phenylene-vinylene) (MDMO-PPV) polimeri Phenylene-Vinylene türevlerinden biridir ve hol taşıyıcı yoğunluğuna sahip donör tipli yarıiletken polimerdir.  $E_g = 2,2$  eV (LUMO=3,2 eV ve HOMO= 5,4 eV) bant aralığına ve  $\sigma = 3-5 \times 10^3$  (S/sm) gibi iletkenlik değerine sahip olması önemli özelliklerindedir.



**Şekil 3.9.** Sıvı haldeki farklı polimerlerin görünümü.

### **3.3. DENEYSEL İŞLEMLER**

Bu çalışmada Schottky diyotların oluşturulması için (100) doğrultusunda büyütülmüş, 300  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki n-Si ve p-Si kristalleri kullanıldı. Numune hazırlama sırasında kullanılacak malzemeler bir takım kimyasal temizlemeden geçirildi. Si ince tabakaları üzerinde oluşmuş oksit tabakayı kaldırmak için kimyasal temizleme işlemleri yapıldı.

#### **3.3.1. Kristal temizleme**

Metal-yarıiletken kontaklar yapılmadan önce yarıiletken kristal ve numune hazırlama sırasında kullanılacak malzemeler bir takım kimyasal temizleme süreçlerinden geçirilir.

Deneysel araçların temizliği kaliteli diyot oluşturmada önemli olduğu için kimyasal temizlemeler aşağıdaki sıraya göre titizlikle gerçekleştirilmiştir.

1. Temizleme işlemlerinde kullanılacak tüm beherler, tutucular, DIW (de iyonize su

18 M $\Omega$ -cm) ile temizlenip yüksek sıcaklıktaki fırında kurutularak temizlendi.

2. Bakır maske, numune tutucu, cımbız ve buharlaştırılacak metal parçaları (Au ve Al) sırasıyla aşağıdaki temizleme işlemine tabi tutuldu.

a. Triklor Etilen ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.

b. DIW ile durulandı.

c. Aseton ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.

d. DIW ile durulandı.

e. Metanol ile ultrasonik banyoda 5 dakika yıkandı.

f. DIW ile durulandı.

3. Si kristallerin temizliği RCA temizleme işlemine uygun olarak aşağıdaki gibi yapıldı. Üretim aşamasında, öncelikle silisyum tabanlar  $H_2SO_4 + H_2O_2$  karışımılı çözeltili içerisinde yaklaşık 10 dakika bırakılmış, bunu takiben  $HCl + H_2O_2 + 6H_2O$  çözeltilde bırakılarak kimyasal olarak 60 s 20 % HF'de tutulduktan sonra 18 MW-cm özdirençli deiyonize suda yıkanmıştır. Son olarak saf (%99,999)  $N_2$  gazı ile kristal kurutuldu.

### 3.3.2. Omik kontağın oluşturulması.

1. Cihazın metal eritme potası ve ince paslanmaz çelik levhadan hazırlanan maskeler kimyasal olarak ultrasonik banyoda temizlendi ve de-iyonize su ile iyice durulandı. Bunlar saf azot gazı ile kurutulduktan sonra omik kontağı oluşturmak için yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine konuldu. Omik kontak için Şekil 3.10'da gösterilen maskeye benzer bir maske kullanıldı.

2. Numune Vakumda Metal Kaplama Sistemine (Vacuum Coating System) aktarılarak temizlenmiş (Au:Sb ve Al) metal parçacıkları pota içerisine konuldu.

3. Sistemin kapağı hemen kapatılarak vakumlama işlemine geçildi. Vakum  $> 5,1 \times 10^{-6}$  Torr 'a ulaştığında, pota üzerinden akım geçirilerek ( $>> 255$  A) % 99.95 'lik saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş metal parçacıkları, n-Si için Au:Sb ve p-Si için Al buharlaştırılarak omik kontak oluşturuldu.

4. Yarıiletkenlerin mat olan yüzeylerine 1650 Å (Au:Sb ve Al) kaplandıktan sonra 550 °C sıcaklıkta 3 dakika tavlayarak altının yarıiletken içerisine çökmesi sağlandı ve böylece omik kontak işlemi tamamlandı.



**Şekil 3.10.** Omik kontak maskesi.

### **3.3.3. Polimer tabakanın oluşturulması.**

#### **3.3.3.1. Çözelti Hazırlanması**

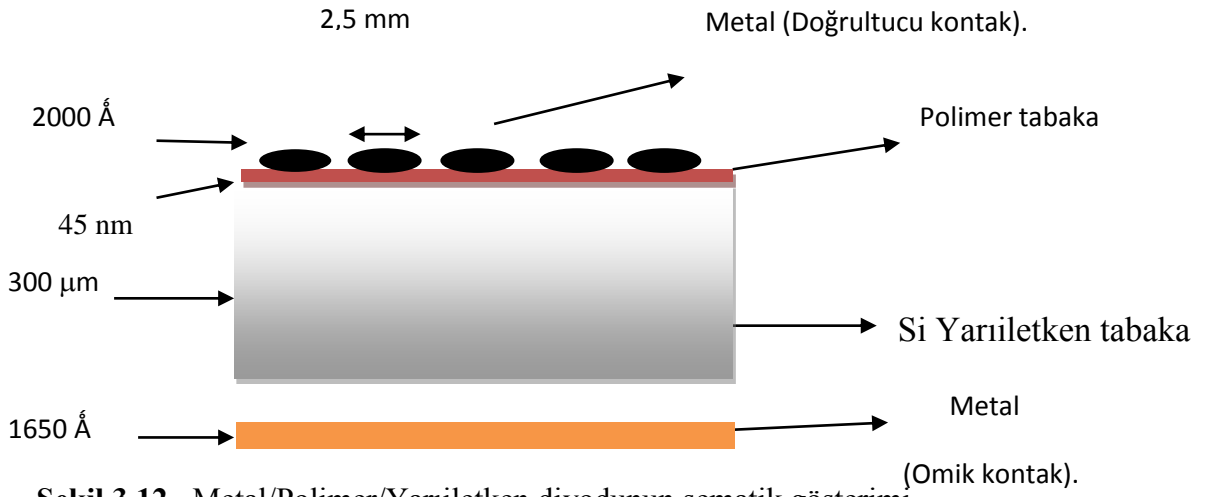
Çözelti hazırlama işleminde P3HT, MEH-PPV, MDMO-PPV gibi iletken polimerler 10 mg/mL polimer ve 5 mg/mL klorobenzen oranında karıştırılarak 50°C’ de, 1 saat süreyle manyetik karıştırıcı kullanılarak çözüldü. Karıştırma esnasında ışık almaması için cam tüplerin etrafı folyo ile kapatıldı, sıcaklık ve süre kriterleri kullanılarak çözeltilerinin hazırlanması sağlandı.

#### **3.3.3.2. İnce Film Hazırlanması**

Hazırlanan tüm çözeltiler Si altlıkların üzerine mikropipetle yüzeye tam olarak dağıtıldı ve döndürerek kaplama (spin-coater) yöntemi ile kaplandı. İletken polimerler, 1200 rpm döndürme hızıyla 60 s döndürülerek, Si tabakalar yüzeyine kaplandı. Daha sonra numuneler 150°C de 10 dakika süreyle fırında tavlandı. Sonra polimer kaplanmış ön yüzeye doğrultucu kontak oluşturmak için yaklaşık 2000 Å kalınlığında %99.99 saflıkta saf Al ve ya Au buharlaştırılarak Schottky diyotlar oluşturuldu. P3HT iletken polimeri için yapılan numune hazırlama işlemlerinin tümü MDMO-PPV ve MEH-PPV polimerleri için de tekrarlanarak yeni numuneler hazırlandı. Hazırlanan Au/P3HT/n-Si/AuGe; Al/MDMO-PPV/p-Si/Al ve Al/MEH-PPV/p-Si/Al Schottky diyotlarının ölçümleri alındı.



Şekil 3.11. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske.



Şekil 3.12. Metal/Polimer/Yarıiletken diyodunun şematik gösterimi.





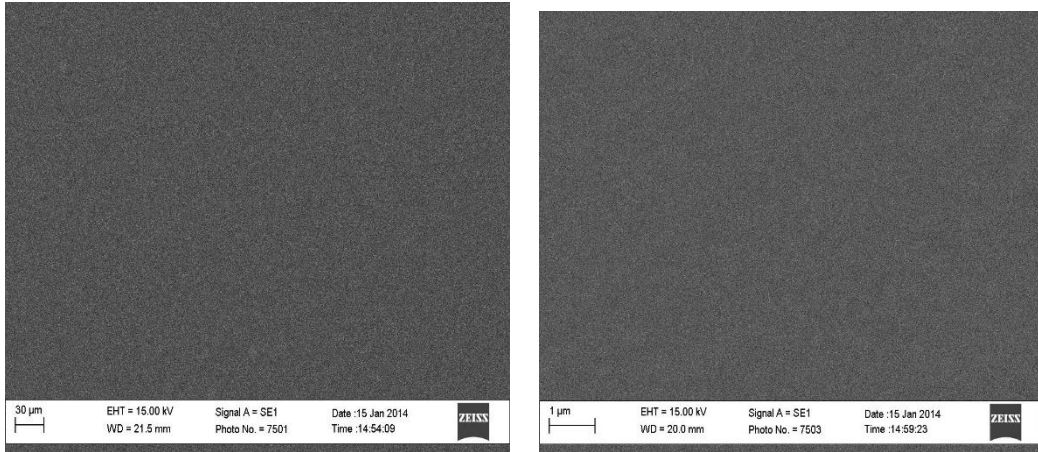


Şekil 3.13. Diyetlerin son hali.

### 3.5. Kullanılan Ölçüm düzeneği

#### 3.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

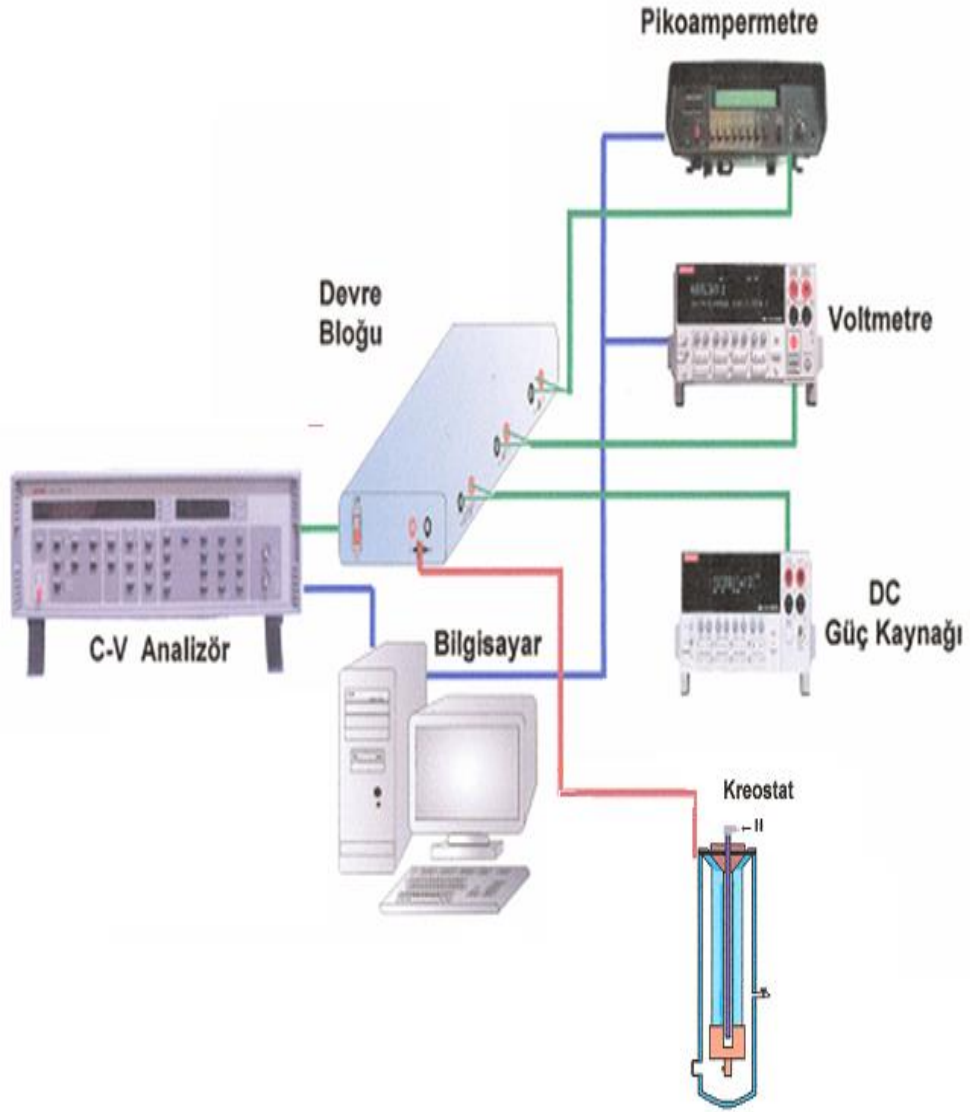
Altın kaplanmış numunelerin yüzey mikrografları değişik büyütmelerde 75000 büyütme kapasitesine sahip olan CARL ZEISS EVO 40 Model taramalı elektron mikroskobu ile alındı. 15kV gerilim altında alınan görüntülerde görüldüğü gibi polimer tabaka nümune üzerinde homojen şekilde dağılmıştır.



**Şekil 3.14.** Au/P3HT/n-Si Schottky diodun SEM görüntüsü

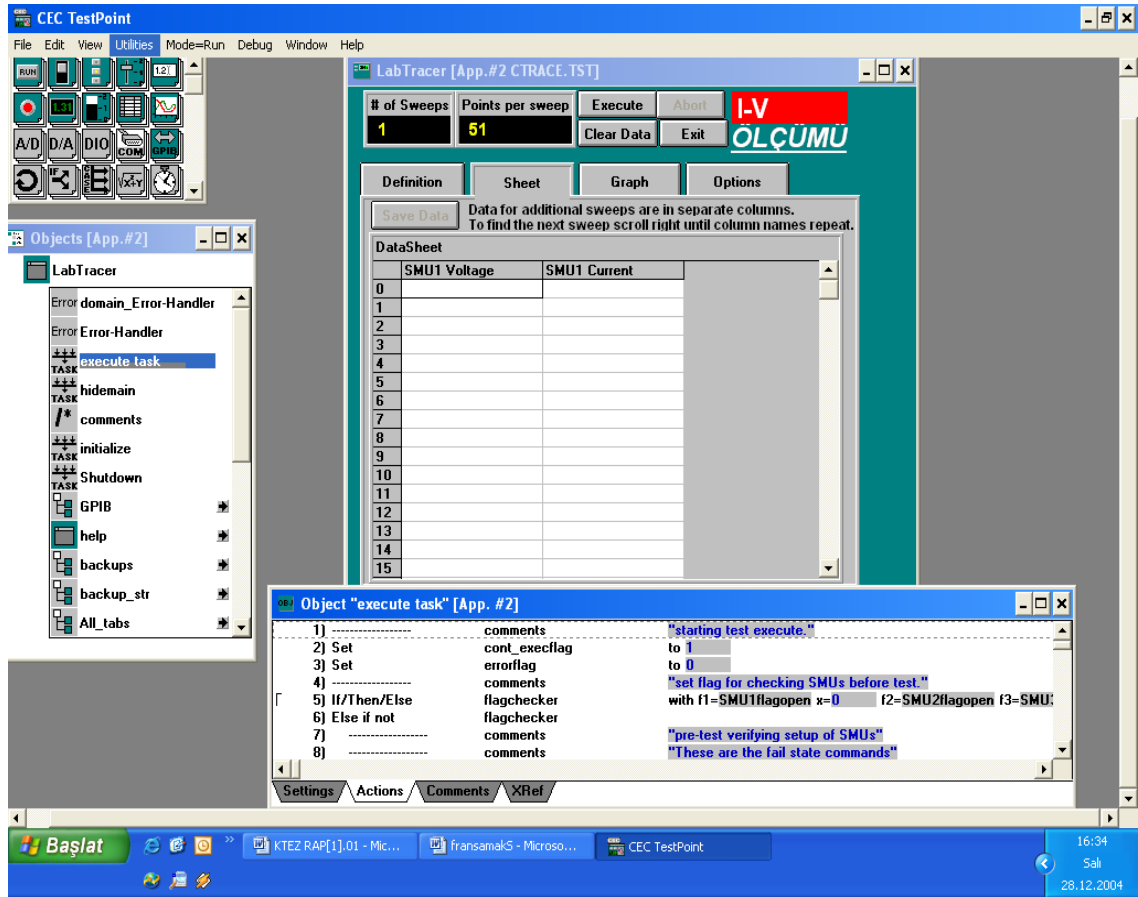
#### 3.4.2. Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği.

Fiziksel karakterlerin ölçülmesi, Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında yapıldı. Akım-Voltaj (I-V) ölçümleri için Keithley 2400 Sourcemeter kullanıldı. Ölçümler Hewlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Deneysel ölçümler için kullanılan düzenek.

Akım-gerilim ölçümlerinin farklı sıcaklıklarda alınması için kurulan deney düzeneğinde Keithley 2400 soğutucu içerisindeki örneğe Şekil 3.16'daki gibi bağlanmıştır. Sıcaklık kontrol ünitesi ile soğutucu içerisinde bulunan örneğin sıcaklığı sabit tutulmuştur. Testpoint programı kullanılarak Keithley 2400 bilgisayar ile kontrol edilmiş ve çok kısa sürede ölçümler alınmıştır. Daha sonra ilk akım-gerilim grafikleri yine Testpoint programı ile çizdirilmiştir. Böylece düşük sıcaklıklarda akımın gerilime bağlı değişimi incelenebilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. I-V ölçümleri için kullanılan Testpoint programının ekran görüntüsü.

Kullanılan Testpoint programının ekran görüntüsü Şekil 3.17'de verilmiştir. Bilgisayar ile Keithley 2400 arasındaki iletişim IEEE 488 GPIB kablosu ile sağlanmaktadır.

### 3.4.3 Kapasitans-Gerilim Ölçüm sistemi

Kapasitans-gerilim ölçümlerini almak için için Empedans Analizörü (HP 4194) cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.18). Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Ölçümler farklı frekanslarda alınarak analiz edildi.

Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümlerinin yapıldığı Empedans Analizörü (HP 4194).

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Akım –Voltaj (I-V) Karakteristikleri.

#### 4.1.1 Au/P3HT/n-Si Schotky diodun farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.

İdeal Schottky diyotlarında uygulanan voltaj çok yüksek olmadıkça akım iletimi, termiyonik emisyon teorisine uyar. Bu teoriye göre, akım gerilim;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada  $V_D$  diyod üzerine düşen voltaj,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklık ve  $I_0$  doyma akımı olup,

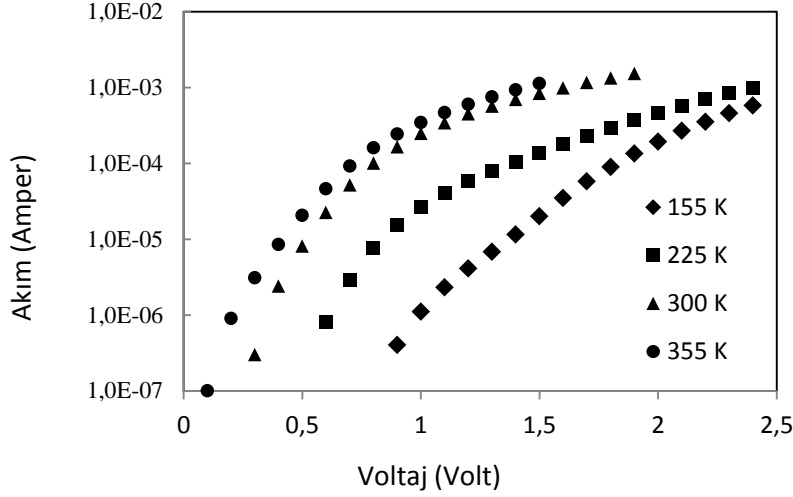
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left[\frac{-q}{kT} \Phi_B\right] \quad (4.2)$$

Burada  $\Phi_B$  potansiyel engel yüksekliği,  $A$  diyod alanı ve  $A^*$  Richardson sabitidir.

Eş. [4.1] ifadesinin her iki tarafının  $\ln$ 'i alınırsa;

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{nkT} V_D \quad (4.3)$$

olur ve bu doğrunun eğiminden idealite faktörü hesaplanabilir. Bu denklemde  $\ln I$ - $V$  grafiğinin lineer bölgesinin eğimi  $\tan\theta = q/nkT$  ifadesini verir, buradan,



**Şekil 4.1.** Au/P3HT/n-Si Schottky diyodun Ln(I)-V grafiği.

$$n = \left( \frac{q}{\tan \theta k T} \right) \quad (4.4)$$

elde edilir.  $I_0$  doyma akımı değeri de, LnI-V grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının LnI eksenini kestiği noktadan bulunabilir. Bu  $I_0$  değeri kullanılarak;

$$\Phi_B(I-V) = \frac{kt}{q} \text{Ln} \left( \frac{AA * T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

potansiyel engel yüksekliği  $\Phi_B(I-V)$  değeri hesaplanabilir. Bu diyodun her sıcaklık için LnI-V eğrisinden elde edilen doyma akımı ( $I_0$ ), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliği  $\Phi_B(I-V)$  değerleri Çizelge 4.1' de verilmiştir. Şekil 4.1'e bakılacak olursa her bir sıcaklık için lineer bölgenin eğiminin farklı olduğu görülmektedir. Dolayısı ile hesaplanan idealite faktörleri de sabit kalmayıp değişen sıcaklıkla beraber değişmektedir. Bununla beraber imaj kuvveti etkisi, elektron ve deşiklerin yeniden oluşum ve birleşme olayları ve tünelleme olayı da idealite faktörünün 1 den uzaklaşmasına neden olarak gösterilebilir (Güllü ve Türot 2009).

T (K)	N	$\Phi_b$ (eV)	dV/dLn (I)		H (I)	
			n	Rs (Ohm)	Rs (Ohm)	$\Phi_b$ (eV)
155 K	12,97	0,39	15,71	484	567	0,39
225 K	8,24	0,54	12,47	437	500	0,56
300 K	3,47	0,75	6,07	495	611	0,74
350 K	2,57	0,86	4,51	472	669	0,74

**Çizelge 4.1.** Diyodun farklı sıcaklıklardaki akım – voltaj parametrelerinden farklı yöntemlerle elde edilen (idealite faktörü, doyum akımı, potansiyel engel yüksekliği) değerleri.

Metal-yarıiletken yapılarda idealite faktörü  $n$ , engel yüksekliği  $\Phi_B$  ve seri direnç  $R_s$  değerlerinin akım gerilim (I-V) karakteristikleri yardımıyla belirlenmesinde, yaygın olarak Cheung ve Cheung(1986) tarafından sunulan metot kullanılır.

Bu metoda göre termoiyonik emisyon mekanizması yardımıyla elde edilen akım yoğunluğu ifadesi A diyot etkin alanıyla çarpılırsa, diyottan geçen toplam akım ifadesi

$$I = A \cdot J = A A^* T^2 \exp\left[\frac{-q}{kT} \Phi_B\right] \left[\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1\right] \quad (4.6)$$

olarak elde edilir.

Burada  $eV \gg kT_0$  olduğundan 1 değeri ihmal edilebilir. Pratikte, uygulanan potansiyel tümüyle deplasyon bölgesinde düşmediğinden idealden sapmalar olacaktır. Bu sapmalar birimsiz bir sabit olan  $n$  idealite faktörü ile ifade edilir. Bu durumda akım ifadesi

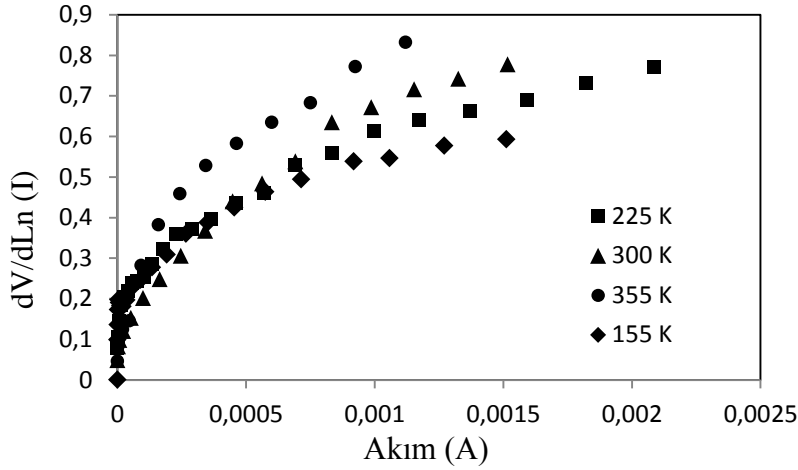


$$I = AA*T^2 \exp\left[\frac{-q}{kT} \Phi_B\right] \left[ \exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) \right] \quad (4.7)$$

Burada  $V_D = V - IR_s$  yazılır ve  $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alınıp yeniden çözülürse,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n\left(\frac{kT}{q}\right) \quad (4.8)$$

sonucu elde edilir. Buradan da anlaşılacağı gibi  $dV/d(\ln I)$  nın  $I$  'ya göre grafiği bir doğru verecektir. Denklemin düşey y eksenini kestiği noktadan ise denklemden görülen  $nkT/q$  sabitinin değeri bulunabilir. Bu bulunan değerde  $k, T$  ve  $e$  değişkenleri sabit bilinenlerdir ve bulunan değerde yerlerine konularak  $n$  idealite sabiti değeri hesaplanır. Bu doğrunun eğiminden seri direnç  $R_s$ , düşey eksenini kestiği noktadan da idealite faktörü  $n$  bulunur.



**Şekil 4.2.** Au/P3HT/n-Si Schottky diyodun farklı sıcaklıklardaki  $dV/ \ln(I)$ - $I$  grafiği.

Engel yükseklği ifadesi  $\Phi_b$  bulunmak istenirse,

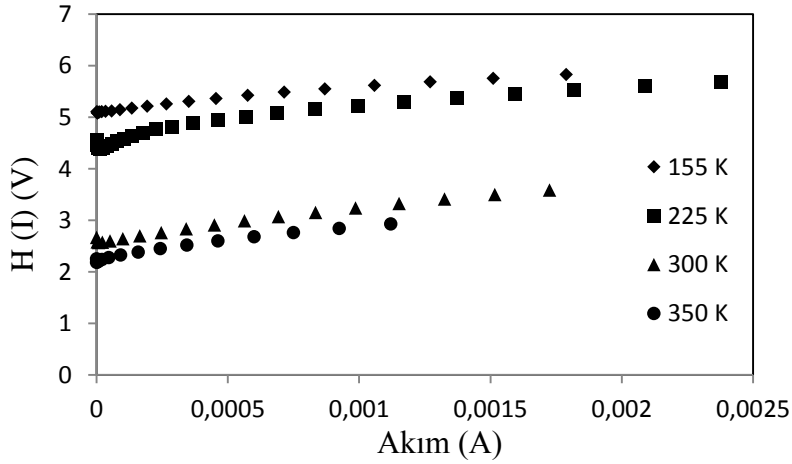
$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_0}{AA*T^2}\right) \quad (4.9)$$

Daha önce denklem (4.9)'dan bulunan  $n$  değeri kullanılarak,  $H(I)$  değerleri hesaplanır. Buradan  $H(I)$ 'nın  $I$ 'ya göre lineer olan grafiği çizilir. Elde edilen eşitlik, diğer Cheung denklemine eşitlenir.

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \quad (4.10)$$

olarak elde edilir. Yukardaki denklem (4.10)'dan görüleceği gibi grafik doğru denklemi olan “ $y=ax+b$ ” şeklinde bir denklem olarak görülebilir, bu benzetmede eğim seri direnç  $R_s$  'yi, denklemin sabiti ise  $n\Phi_b$  çarpımını verir. Bu değer, değeri bilinen idealite faktörüne bölünürse, engel yüksekliği  $\Phi_b$  değeri elde edilir.

$dV/d(\ln I) - I$  ve  $H(I)-I$  grafiklerinin eğim ve ordinat eksenini kesim noktalarından idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanarak Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi oda sıcaklığında, Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliğinin değerleri,  $I-V$  eğrilerinden elde edilenlerle benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.3. Au/P3HT/n-Si Schottky kontağın farklı sıcaklıklardaki  $H(I)-I$  grafiği.

Yüzey durum yoğunluğu diyod parametrelerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Card ve Rhoderich tarafından önerilen idealite faktörünün, yalıtkan tabaka kalınlığı( $\delta$ ) cinsinden ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left( \frac{\epsilon_s}{W_D} + N_{ss}(V) \right) \quad (4.11)$$

Burada  $\delta$  polimer tabakanın kalınlığı,  $\epsilon_s=11,8\epsilon_0$  ve  $\epsilon_i=3,8\epsilon_0$  yarıiletkenin ve arayüzeyin dielektrik sabitidir.  $W_D$  tüketim tabakası genişliğidir ve

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_o\epsilon_s}{qN_D}} \quad (4.12)$$

Şeklinde elde edilir. Polimer tabaka tabaka (P3HT) kalınlığı  $\delta$  yüksek frekanstaki ( $f = 500\text{kHz}$ ) deneysel C-V ölçümlerinden yararlanarak hesaplandı. Önce Eş 4.13' ün de kullanılmasıyla  $C_{ox}$  elde edildi.

$$C_{ox} = C_c \left[ 1 + \left( \frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (4.13)$$

Daha sonra  $C_{ox}=\epsilon_s\epsilon_iA/\delta$  eşitliği yardımıyla polimer tabaka kalınlığı yaklaşık olarak  $\delta=45$  nm olarak bulunmuştur. Burada n-tipi silisyum için  $\epsilon_s=11,8\epsilon_0$   $\epsilon_i=3\epsilon_0$ , burda  $\epsilon_0$  boş uzayın dielektrik sabitidir.  $N_{ss}$  ise arayüzey durumlarının yoğunluğudur ve aşağıdaki şekilde verilir.

$$N_{ss}(V)=1/q \{ \epsilon_i/\delta [n(V)-1] - \epsilon_s/W_D \} \quad (4.14)$$

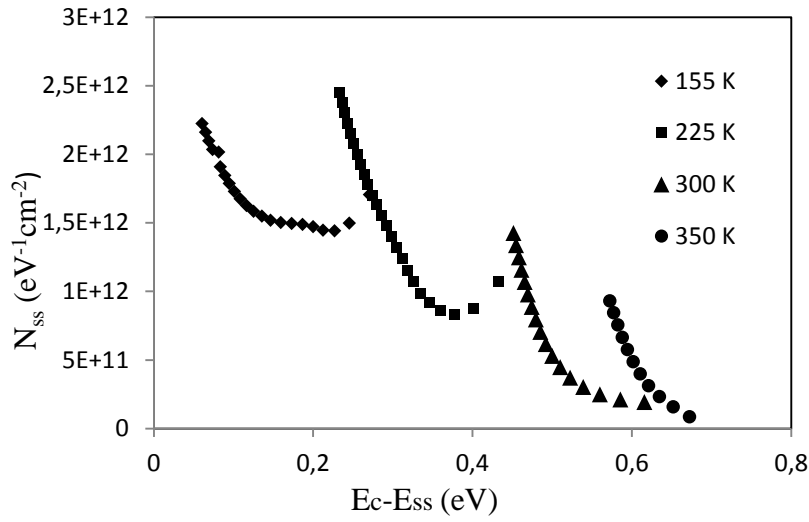
Arayüzey durumlarının enerjisi  $E_{ss}$ , şu şekilde verilir.

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V_D) \quad (4.15)$$

Burada  $\Phi_e$  etkin engel yüksekliğidir. Arayüzey durumları nedeniyle  $\Phi_e$ 'nin gerilime bağımlı olduğu kabul edilir. Etkin engel yüksekliği  $\Phi_e$ , engel yüksekliğinin uygulanan gerilime bağımlı olduğu göz önünde bulundurularak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\Phi_e = \Phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{\eta(V)}\right)(V - IR_s) \quad (4.16)$$

Doğru beslem I-V karakteristiklerinden ve Eş.(4.11) kullanılarak arayüzey durum yoğunluklarının ( $E_c - E_{ss}$ ) aralığındaki dağılım profili her sıcaklık için elde edilerek Şekil 4.4'te verildi. Şekilden de görüldüğü gibi  $N_{ss}$  değerleri artan sıcaklıkla azalmaktadır. Arayüzey durumlarının artan sıcaklıkla azalması diyodun ideale yaklaştığını göstermektedir.

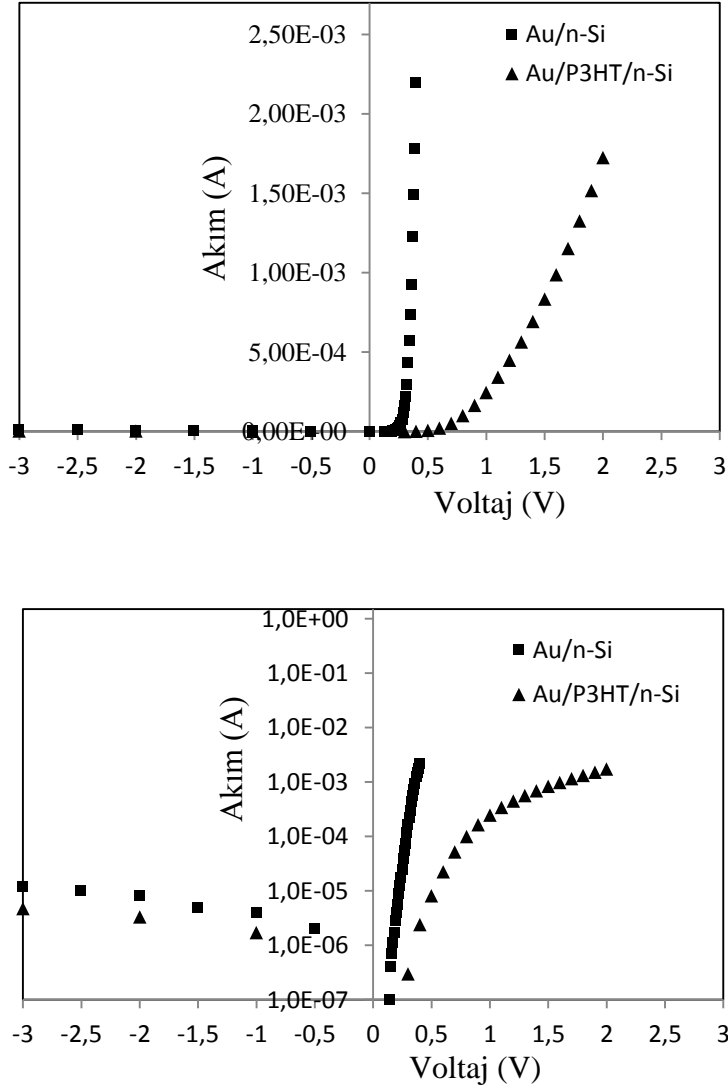


**Şekil 4.4.** Au/P3HT/n-Si Schottky diyodun farklı sıcaklıklardaki ara yüzey durum yoğunluğu grafiği.

#### 4.1.2. Oda sıcaklığında Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si diyotlarının I-V karakteristiklerinin incelenmesi

Bu bölümde, Au/n-Si Schottky diyodunun engel yüksekliğinin modifikasyonu için organik iletken polimer ara yüzey tabakalı Au/P3HT/n-Si yapısı oluşturuldu. Referans Au/n-Si ve arayüzeyli Au/P3HT/n-Si diyodları imal edildikten sonra I-V ölçümleri kullanılarak elektrik özellikleri incelendi.

Hazırlanan Au/n-Si ve Au/P3HT/n-Si Schottky kontakların I-V ölçümleri oda sıcaklığında alındı ( Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si Schottky diotların I-V ve Ln(I)-V grafiği

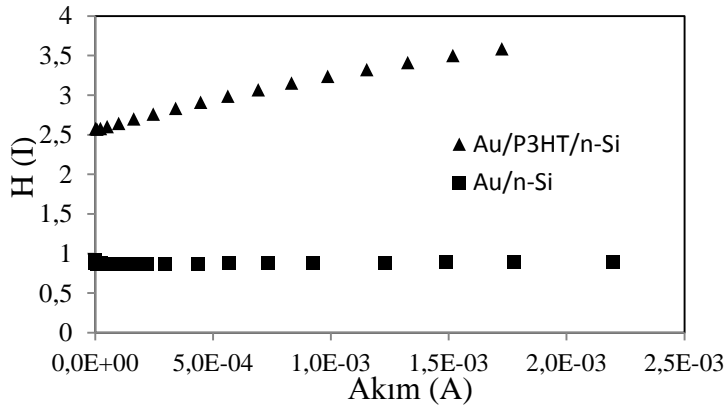
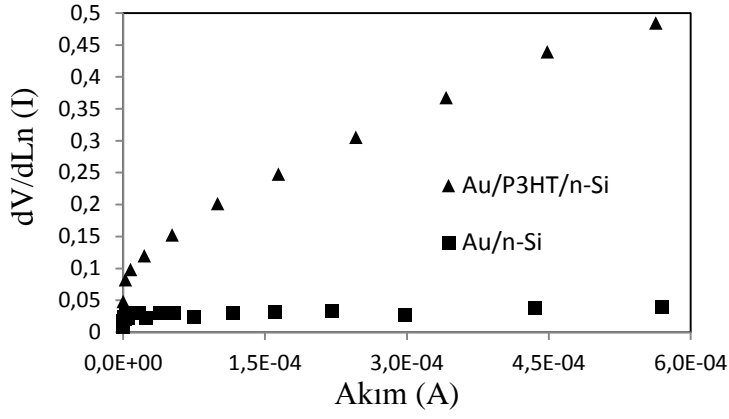
Au/n-Si diyodun idealite faktörü 1,18 olarak bulundu. Bir diyodun idealite faktörü değeri, 1,10'dan küçük ise ideale yakın bir diyod olarak kabul edilir. I-V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü değeri, ara yüzey oluşturulmadan üretilen diyodun ideale yakın olduğunu göstermektedir. Referans Au/n-Si Schottky diyodu, alışılmış tekniklerle

yapıldığı için ince bir oksit tabakasının ara yüzeyde oluşması kaçınılmazdır. Oda sıcaklığında Au/P3HT/n-Si yapısının idealite faktörü referans Au/n-Si yapısınıninkine göre yaklaşık 2,35 daha büyük olması rekombinasyon akım mekanizmasının güçlü etkisinin varlığını gösterir.

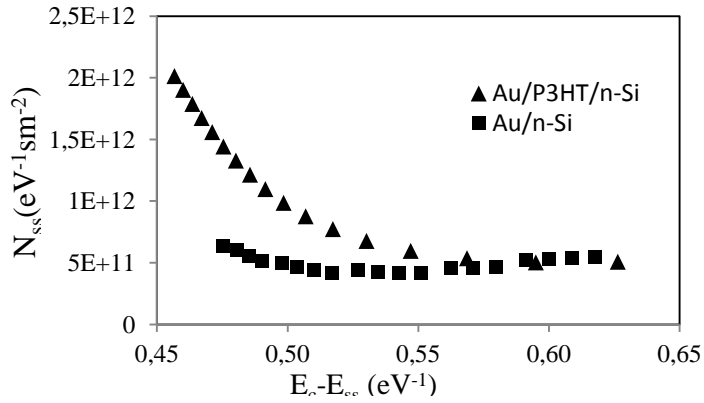
Diyod	N	$\Phi_b$	$I_0$	dV/dLn(I)		H(I)		$N_{ss}$
				n	$R_s$	$R_s$		
Au/n-Si	1,18	0,78	7,56e-9	1,12	18,6	13,5	0,73	$6,3 \times 10^{11}$
Au/P3HT/n-Si	3,47	0,75	2,08E-8	6,07	495	611	0,74	$2,1 \times 10^{12}$

**Çizelge 4.2.** Au/n-Si ve Au/P3HT/n-Si Schottky diyotların n;  $\Phi_b$ ;  $I_0$  dV/dLn(I)-I ; H(I)-I ve  $N_{ss}$  değerleri

Referans Au/n-Si ve Au/P3HT/n-Si yapıları için dV/d(InI)-I ve H(I)-I çizimleri Şekil 4.6'de verilmiştir. Bu çizimlerden elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Termoyonik emisyon teorisine göre doğru beslem için verilen temel akım denkleminde elde edilen Cheung fonksiyonları (denklem 4.8 ve 4.10) kullanılarak, oda sıcaklığında idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç parametreleri hesaplanabilir. Arayüzey polimer tabakadan kaynaklanan yüksek seri direnç değerleri, yüksek idealite faktörü değerlerine sebep olabilir. Bu da seri direncin imal ettiğimiz diyot için akım limitleyici bir etken olduğunu gösterir. Şekil 4.7.'de diyotların oda sıcaklığında, arayüzey durum yoğunluğu  $N_{ss}$  değerleri verilmiştir. Arayüzey durumları nünunenin elektriksel parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Değerlerin  $10^{12}$  civarında çıkması literatürle uyum içinde olduğunu gösterir.



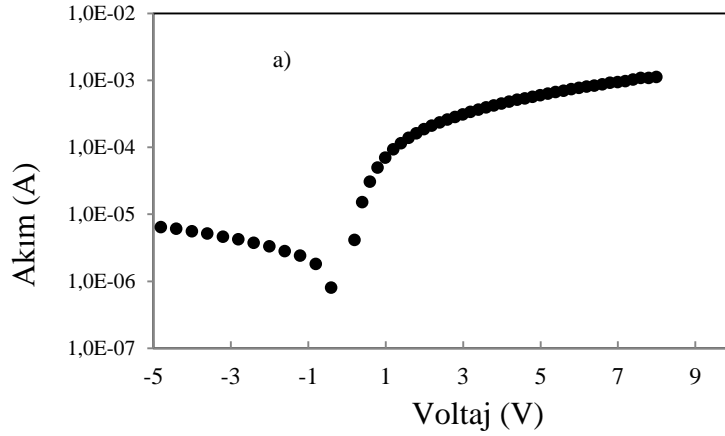
Şekil 4.6. Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si Schottky diotların  $dV/d\ln(I)$ -I ve  $H(I)$ -I grafiği.



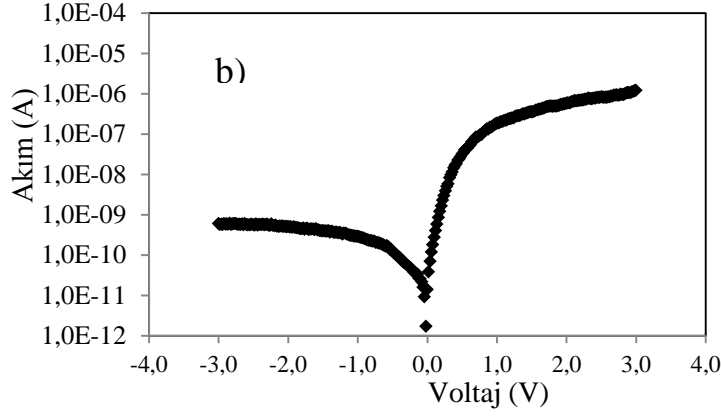
Şekil 4.7. Au/P3HT/n-Si ve Au/n-Si Schottky diotların ara yüzey durum yoğunluğu grafiği.

**4.1.3. Farklı polimerlerle: a) MEH-PPV, b) MDMO-PPV ile yapılan schottky diodların akım-voltaj karakteristiği.**

Bu bölümde, farklı polimer, (P3HT)– Poli(3-hekziltiyofen) ; poli [2-metoksi-5-(2'-etil-heksiloksi)-1,4-fenilen vinil] (MEH-PPV ) ve poly-[2-(3,7-dimethyloctyl oxy)-5-methyloxy]-para-phenylene-vinylene) (MDMO-PPV) kullanılarak yapılmış Schottky diodların akım-voltaj (I-V) karakteristiği incelenmektedir. İdeal Schottky diyotlarında uygulanan voltaj çok yüksek olmadıkça akım iletim mekanizması termiyonik emisyon teorisine uyar. Hazırlanan Al/MEH-PPV/p-Si/Al ve Al/MDMO-PPV/p-Si/Al Schottky diyotların I-V ölçümleri oda sıcaklığında alındı (Şekil 4.8). Denklem 4.4 ve denklem 4.5 kullanılarak diyodun, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi parametreleri hesaplandı ve Çizelge 4.3' de verildi





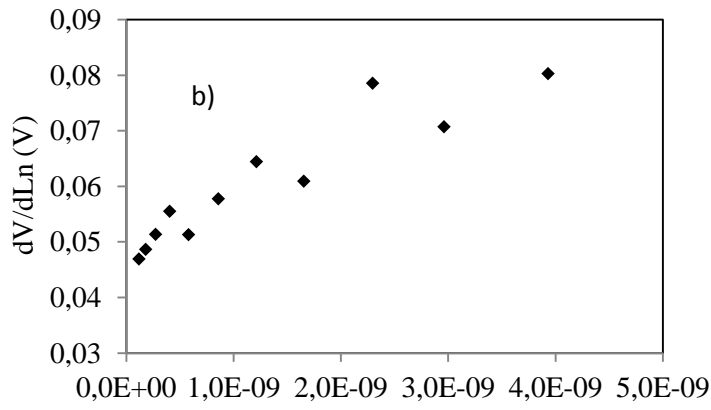
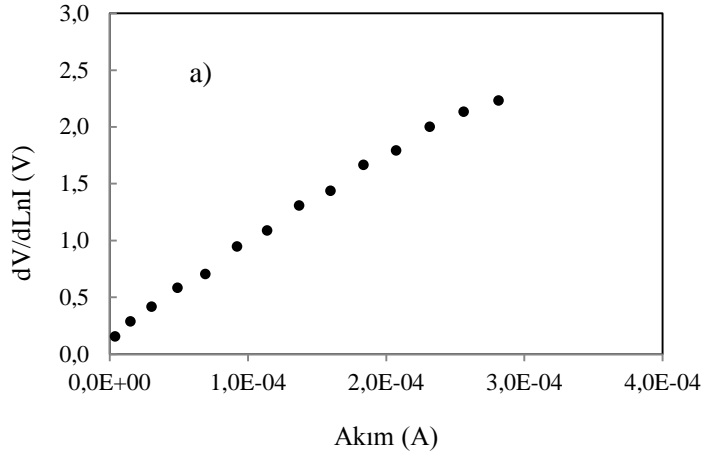


**Şekil 4.8.** a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diotların Ln(I)-V grafikleri.

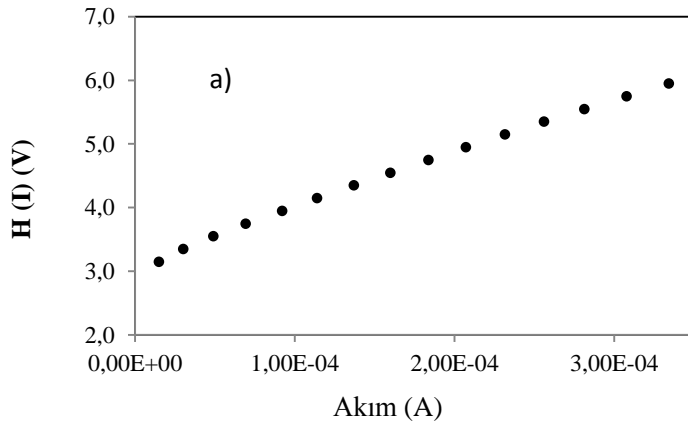
Hesaplanan idealite faktörü değerleri 1'den büyüktür ve bu da ideal durumdan ( $n=1$ ) sapma olduğunu gösterir. Bu durum ara yüzey durum yoğunluğuna, tünelleme akımının varlığına ve ara yüzey tabakasına atfedilmektedir. Ölçüm sonuçlarında Al/MEH-PPV/p-Si diyodunun idealite faktörünün daha yüksek değere sahip olması özellikle arayüzey polimer tabakanın homojensizliği, polimer tabakayla yarıiletken tabaka arasındaki oksit tabakanın varlığı ve arayüzey durumlarının yüksek değerlere sahip olmasından kaynaklanabilir. Seri direnç diyodun elektrik özelliklerini etkileyen önemli bir parametre olduğu için Cheung fonksiyonları (denklem 4.8 ve 4.10) kullanılarak hesaplandı.

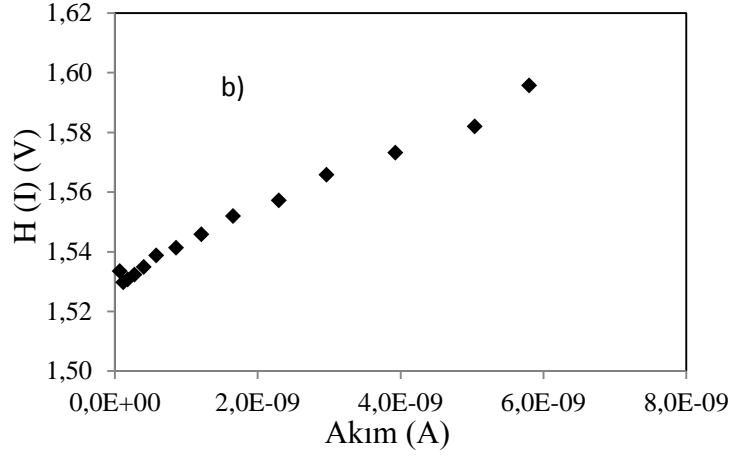
Farklı polimerler	n	$\Phi_b$	$I_o$	dV/dLn(I)		H(I)		$N_{ss}$
				n	$R_s$	$R_s$		
Al/MEH-PPV/p-Si	3,22	0,67	1,44E-07	3,86	7644	8649	0,96	$7,8 \times 10^{13}$
Al/MDMO-PPV/p-Si	1,73	0,89	2,29E-11	1,93	$9,2 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	0,79	$1 \times 10^{15}$

**Çizelge 4.3** a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diyotların n;  $\Phi_b$ ;  $I_o$ ; d V/dLn(I)-I; H(I)-I ve  $N_{ss}$  değerleri.

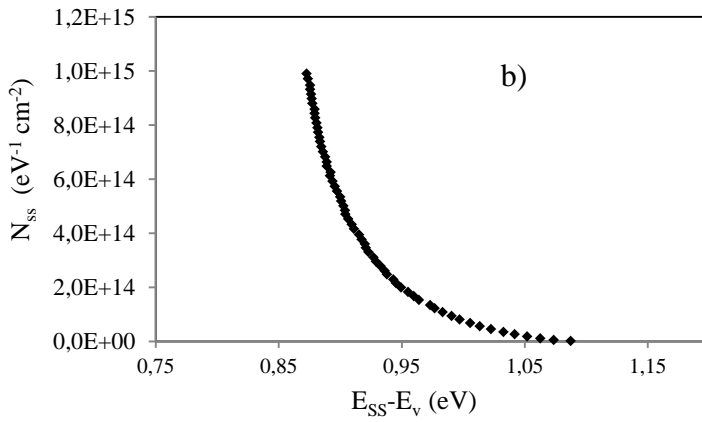
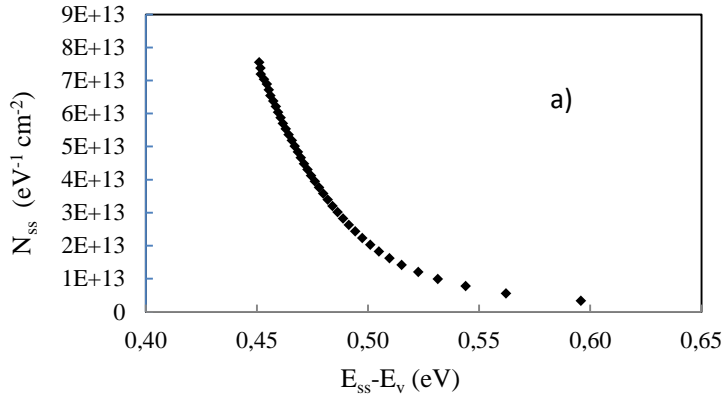


**Şekil 4.9.** a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diotların  $dV/d\ln(I)$ -I grafikleri.





Şekil 4.10 a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si Schottky diyotların H(I)-I grafikleri



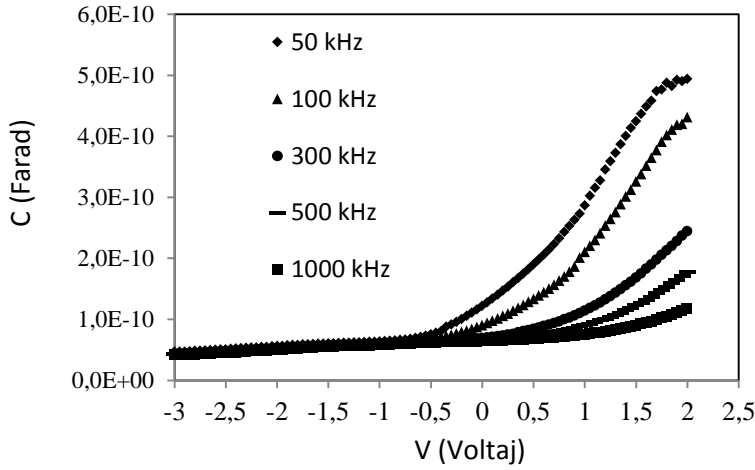
Şekil 4.11. a) Al/MEH-PPV/p-Si ve b) Al/MDMO-PPV/p-Si diyotların  $N_{ss}-(E_{ss}-E_v)$  grafikleri.

#### 4.1.4 Au/P3HT/n-Si Schottky diodun Kapasite –Voltaj (C-V) Karakteristikleri

Diyodun kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri oda sıcaklığında değişik frekanslarda yapılmıştır. (Şekil 4.12). Bu ölçümlerden; difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ), potansiel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), Fermi enerjisi ( $E_f$ ) ve tüketim bölgesi genişliği ( $W_d$ ) gibi fiziksel parametreler belirlendi. Şekil 4.12’te görüldüğü gibi kapasitans değerleri tersinim bölgesinde (-3 V ile 0 V arasında) sabit kalırken tüketim ve yığılma bölgelerinde frekansın ve gerilimin artmasıyla artmaktadır. C-V eğrilerinin kuvvetli yığılma bölgesindeki maksimum değere karşılık gelen kapasite değeri, polimer tabakanın kapasitansıdır. Kuvvetli yığılma bölgesinde bulunan kapasitans değeri şu şekilde verilir.

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{\delta} \quad (4.16)$$

Diyot alanı ( $A=0,0075 \text{ cm}^2$ ) ve kapasitansın maksimum ( $21,6 \text{ nF}$ ) değeri kullanılarak polimer tabakanın kalınlığı yaklaşık ( $\delta$ ) 45 nm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.12. Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanstaki C-V grafikleri.

Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanstaki C-V ölçümlerinden yararlanılarak hesaplanan  $C^{-2}$ -V grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir. C-V ölçümlerinde  $C^{-2}$ -V ilişkisi şu şekilde verilir.

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_A} (V_0 + V) \quad (4.17)$$

Burada A diyot alanı,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $N_D$  katkılanan verici atomların yoğunluğu olup  $C^{-2}$ -V grafiğinde lineer kısmın eğiminden ve  $V_0$  ise yine lineer eğrinin gerilim eksenini kesme noktasından elde edilir.  $V_D$  difüzyon potansiyelidir ve şu şekilde verilir:

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (4.18)$$

Bulunan difüzyon potansiyelleri her bir frekans değeri için Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Ölçüm yapılan her sıcaklık için tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ),

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_o\epsilon_s}{qN_D}} \quad (4.19)$$

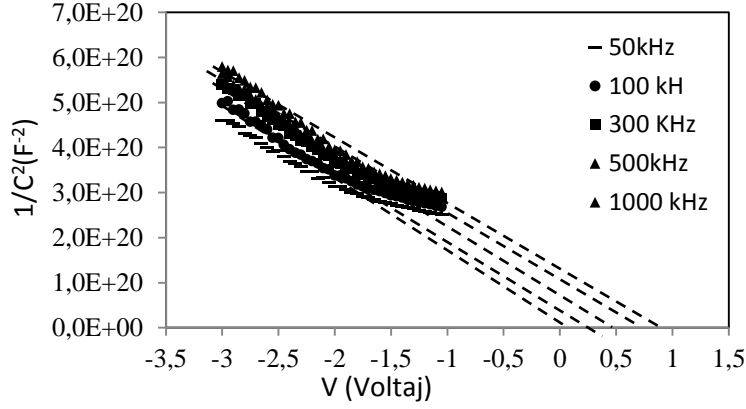
Burada  $V_D$  difüzyon potansiyeli,  $N_D$  verici yoğunluğudur. Oda sıcaklığında için tüketim tabakası genişliği  $W_D=2,05 \times 10^{-5}$  cm olarak bulunmuştur. Diğer frekanslar için tüketim tabakasının değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Her bir sıcaklık için Fermi Enerji seviyeleri,

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (4.20)$$

ifadesinden hesaplanabilir.  $C^{-2}$ -V eğrilerinden elde edilen  $\Phi_b$  potansiyel engel yüksekliği, difüzyon potansiyeli ve Fermi Enerji seviyesine bağlı olarak,

$$\phi_B(C - V) = V_D + E_F \quad (4.21)$$

şeklinde ifade edilir. Tüm frekanslar için  $C^{-2}$ -V eğrilerinden hesaplanan  $\Phi_b$  potansiyel engel yüksekliği değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Şekil 4.12'de C-V eğrilerinden görüldüğü gibi, düşük frekanslarda arayüzey halleri a.c. sinyalini takip ettiğinden artık kapasite vermektedir. Yüksek frekanslarda, arayüzey halleri a.c. sinyalini takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla toplam sığa ve sığanın pik değeri artan frekansla azalır.



**Şekil 4.13.** Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanslardaki  $C^{-2}$ -V grafiği.

f (kHz) ( $\text{sn}^{-1}$ )	$V_D$ (V)	$W_D$ (cm)	$\Phi_B(C-V)$ (eV)	$E_f$ (eV)
10	0,125	$2,31 \times 10^{-5}$	0,26	0,223
50	0,425	$5,49 \times 10^{-5}$	0,66	0,2360
100	0,525	$6,10 \times 10^{-5}$	0,76	0,2362
300	0,825	$7,65 \times 10^{-5}$	1,06	0,2389
500	0,925	$8,10 \times 10^{-5}$	1,16	0,2362
1000	1,025	$8,52 \times 10^{-5}$	1,26	0,2362

**Çizelge 4.4.** Au/P3HT/n-Si Schottky diodun farklı frekanslardaki  $C^{-2}$ -V grafiğinden hesaplanmış  $V_d$ ;  $W_D$ ;  $\Phi_B(C-V)$ ;  $E_f$  (eV) değerleri.

Nümunenin (C-V) ölçümleri, diyot parametreleri geniş bir frekans aralığında alınmıştır. Şekil 4.13 'de farklı frekanslar için çizilen  $C^{-2}$ -V grafiklerinden difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_{B0}$ ), Fermi seviyesi ( $E_f$ ) gibi diyot parametreleri bulundu. Polimer yüzeyli Schottky diyotlarda polimer ve ara yüzeyde yasak enerji aralığına karşılık gelen durumlar oluşmaktadır. Bu da kapasitansın değerini yükseltmektedir.

## 5 SONUÇ

Bu çalışmada, Au/P3HT/n-Si; Al/MDMO-PPV/p-Si; Al/MEH-PPV/p-Si MPS diyotların elektriksel özellikleri I-V ve C-V ölçümleri kullanılarak oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda incelendi. Ayrıca referans Au/n-Si ve polimer arayüzeyli Au/P3HT/n-Si diyotları yapılarak polimer arayüzeyinin diyodun elektriksel parametrelerini nasıl etkilediği incelendi. Bu diyotların, idealite faktörü, engel yüksekliği, doyum akımı, seri direnci, Fermi enerjisi gibi temel parametreleri hesaplanarak Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3’ de verilmiştir.

Oda sıcaklığında Au/P3HT/n-Si diyodunun idealite faktörü değeri ( $n=3,47$ ) geleneksel Au/n-Si Schottky diyodundan ( $n=1,18$ ) önemli ölçüde büyük bulunmuştur. Bunun nedeni diyot hazırlama ve metal buharlaştırma sırasında oluşabilen bir ara yüzey oksit tabakasından ve arayüzey hallerinden kaynaklanabilir. Ayrıca polimer tabakadan kaynaklı yüksek bir seri direncin varlığı diyodun idealite faktörünü etkilemektedir. İdealite faktörünün 1 ile 2 arasında olması, difüzyon ve rekombinasyon (yeniden birleşme) akımının üstün olduğunu göstermektedir. İdealite faktörü 1 ile 2 arasında olduğu için, difüzyon/rekombinasyon akımı baskın iken,  $n>2$  olduğundan rekombinasyon mekanizmasının üstün olduğunu söyleyebiliriz (Güllü ve ark.2010). Diyot parametrelerini etkileyen seri direnç etkilerini belirlemek için çeşitli modeller ortaya konmuştur. Bu modellerden biri Cheung fonksiyonları olarak bilinen diyot parametrelerini hesaplama yöntemidir (Aydın ve Yakuphanoglu 2008). Cheung fonksiyonları yardımıyla idealite faktörü ve engel yüksekliği ve seri direnç hesaplanarak sonuçlar karşılaştırıldı ve uyum içinde olduğu gözlemlendi. Au/P3HT/n-Si diyodunun  $dV/d\ln(I)-V$  grafiğinden idealite faktörü ( $n=6,07$ ) ve seri direnç ( $R_s=495$  Ohm) değerleri bulunurken, Au/n-Si diyodunun  $dV/d\ln(I)-V$  grafiğinden ise idealite faktörü ( $n=1,12$ ) ve seri direnç ( $R_s=18,6$  Ohm) değerlerinde bulunmuştur. Bu farklılığın önemli sebepleri arasında polimer tabakadan kaynaklanan yüksek seri direnç değeri ve arayüzey halleri gösterilmektedir. Cheung fonksiyonları ile elde edilen idealite faktörü değerleri, I-V karakteristiğinden elde edilen değerlerden daha yüksek çıkmaktadır. Bu yöntemlerdeki değerlerin farklılık göstermesinin nedenleri; idealite faktörünün uygulanan gerilime bağlı olması ve her iki yöntem için karakteristiğin farklı bölgelerinden idealite faktörü değerlerinin elde edilmesi olabilir. Başka nedenler arasında arayüzey halleri ve seri direnç gibi etkenler

gösterilebilir (Özdemir ve ark. 2009). Hesaplanan idealite faktörü değerleri 1'den büyüktür ve bu da ideal durumdan ( $n=1$ ) sapma olduğunu gösterir. Bu durum ara yüzey durum yoğunluğuna, tükenim bölgesinde yüksek ihtimalli elektron ve boşluk rekombinasyonuna, tünelleme akımının varlığına ve ara yüzey tabakasına atfedilmektedir. Böyle bir ara yüzey oksit tabakası yüzey hazırlama ve metal buharlaştırma sırasında oluşabilir. Ayrıca farklı polimerler kullanılarak Al/MDMO-PPV/p-Si; Al/MEH-PPV/p-Si diyotlar üretilmiş ve akım-voltaj karakteristiği incelenmiştir.

Ayrıca nümunenin kapasitans-voltaj C-V ölçümleri, diyot parametrelerinin uygulanan frekansla değişimini gözlemek amacıyla geniş bir frekans aralığında alınmıştır. Farklı frekanslar için çizilen  $C^2$ -V grafiklerinden kesişim voltajı ( $V_0$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_{Bo}$ ), Fermi seviyesi ( $E_f$ ), değerleri bulundu. Bu değerler Çizelge 4.3'de verilmiştir. Polimer yüzeyli Schottky diyotlarda polimer ve ara yüzeyde yasak enerji aralığına karşı gelen durumlar oluşmaktadır. Bu da kapasitansın değerini yükseltmektedir. C-V eğrilerden görüldüğü gibi, düşük frekanslarda arayüzey halleri a.c. sinyalini takip ettiğinden artık kapasite vermektedir. Yüksek frekanslarda, arayüzey halleri a.c. sinyalini takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla toplam sığa ve sığanın pik değeri artan frekansla azalır. Bu durum açıkça (Sekil 4.12)'de görülmektedir.

Sonuç olarak, Schottky diyotlar elektronik sanayisinde kullanılan elektronik devre elemanlarının temelini teşkil eder. Son yıllarda iletken polimerler teknolojik açıdan büyük önem teşkil etmektedir. Bu devre elemanlarının, daha iyi bir verime sahip olması kontakların sanayide kullanımları bakımından önemlidir. Bu nedenle çalışmada farklı yöntemler ve farklı maddeler kullanılarak diyotlar incelenmiştir. Bu çalışmada, farklı polimerler kullanılarak üretilmiş Au/P3HT/n-Si, Al/MDMO-PPV/p-Si ve Al/MEH-PPV/p-Si yapıları elde edildi ve I-V ve C-V karakteristikleri incelendi. Değişik metotlarla bulunan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri birbirleriyle karşılaştırıldı. Si numunesi üzerine iletken polimerlerin iyi bir doğrultucu davranış gösterdiği gözlemlendi.



## KAYNAKLAR

- Aydın, A., 2002.** Pirelün Elektrokimyasal Polimerizasyonuna Organik Asit Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aydın M.E, Yakuphanoglu F, JH Eom, DH Hwang (2007)** Electrical characterization of Al/MEH-PPV/p-Si Schottky diode by current–voltage and capacitance–voltage methods Physica B: Condensed Matter 387.
- A. Türüt, B. Batı, A. Kökçe, M. Sağlam, N. Yalçın, 1996.** The Bias-Dependence Change of Barrier Height of Schottky Diodes under Forward Bias by Including the Series Resistance Effect, Physica Scripta, 53,118-122.Phys. Scr. 53,118.
- Akbulut, U., 1999.** İletken Polimerlerle Transduser Hazırlanması. Biyosensörler.
- Braun D, Heeger AJ. 1991.** "Visible light emission from semiconducting polymer diodes" Applied Physics Letters; 58
- Can, F., 2010.** Glukoz Oksidaz Enziminin İletken Polimerlere İmmobilizasyonu Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Cowley, A.M., Sze, S.M., 1965.** "Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems", J. Appl. Phys., 36: 3212-3216 .
- Crowell, C.R., Sze, S.M.,1966 .** "Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers", Solid State Electron., 9: 1035 .
- Card, H.C. and Rhoderick, E.H., 1971** " Studies of Tunnel MOS diodes I.Interface Effects in Silicon Schottky Diodes ", J: Phys. D: Appl., 4.
- Coşkun, K., 2009.** Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerle İletken polimerlerin sentezi ve Membran uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
- Cheung N.W., 1986.** Appl.Phys. Lett., 49, 85-87.
- Cheung S.K. and Cheung N.W., 1986.** Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics, Appl. Phys. Lett., 49, 85-87.
- C. Winder, N. S. Sariciftci, 2004.** J. Mater. Chem 14, 1077–1086
- Cova, P. and Singh,A.,1990.**Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n-CdF Schottky barrier type diodes, Solid-State Elec,33,11
- Çakar, M., Türüt, A., Onganer, Y. 2002.** The conductance and capacitance-frequency characteristics of the rectifying junctions formed by sublimation of organic pyronine-B on p-type silicon", J. Solid State Chems., 168:169-174.
- G.Yu, K. Pakbaz, A.J. Heeger, 1994.** Appl.Phys.Lett. 64, 3422,

- Güllü, O., Kilicoglu, T, Türüt, A., 2010.** “Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device”, J. Phys. Chems. Solid., 71:351-356 .
- Güllü, O., Türüt, A., 2009.** “Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structures”, J. Appl. Phys., 106: 103717(1-6).
- H. Hoppe, N. S. Sariciftci, J. 2004.** Mater. Res., 19, 1924
- H. Norde, J. 1979.** Appl. Phys. 50 (1979) 5052
- H.C. Card, E.H. Rhoderick, 1971.** J. Phys. D: Appl. Phys. 4 (10)1589–1602.
- Kalaycı, G., 2008.** Polianilin/Aktif Karbon Kompozit Maddesinin Sentezi, Karakterizasyonu Ve İletken Film Yapımı. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Muhammet, S.M., 2008.** Kolesterol Tayini İçin Biyosensör Hazırlanması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- P. Chattopadhyay, 1996.** Solid-State Electron. 39 (1996) 1491
- Pakma, O., Serin, N., Serin, T., Altındal, Ş.,** “The double Gaussian distribution of barrier heights in Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (metal-insulator-semiconductor) structures at low temperatures”, J. Appl. Phys., 104: 014501(1-6) (2008).
- Randriamahazaka, H., Noel, V., Guillerez, S. ve Chevrot, C., 2005.** Interpenetrating organic conducting polymer composites based on polyaniline and poly(3,4- ethylenedioxythiophene) from sequential electropolymerization. Journal of Electroanalytical Chemistry, 585, 157-166.
- Rhoderick, E. H. and Williams R. H., 1988.** “Metal-Semiconductor Contacts 2<sup>nd</sup> ed. ”, Oxford University Press, Oxford, 257.
- Rhodecik, E.H., Williams, R.H., 1988.** “Metal-Semiconductor Contacts 2<sup>nd</sup> ed.”, Clarendon Press. Oxford, 1-3.
- Sze, S.M.,1981.** “Physics of Semiconductor Devices 2<sup>nd</sup> ed.”, Willey, New York, 245-300.
- Sze, S.M.,1981** “ Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductors Devices, 2<sup>nd</sup> ed.”, Wiley, New York, 225.
- Sharma, B.L.,1984.** ”Metal Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications”, Plenum Press, New York and London, 176 .
- Sönmezoglu, S., Şenkul, S., Taş, R., Çankaya, G., Can, M., 2010.** “Electrical and interface state density properties of polyaniline-poly-3-methy triophene bblend/p-Si Schottky barrier diode”, Solid State Elect., 12:706-711.
- Shuer, M.,** “ Physics of Semiconductor Devices 2<sup>nd</sup> ed”, *Prentice-Hall, Int.Inc.*, New Jersey, 194-225 (1990).

- Saçak, M., 2004.** Polimer Kimyası. Gazi Kitabevi, 525 s, Ankara.
- Sharma, B.L.,** “Physics of Schottky Barrier Junctions”, Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications, Plenum Press, New York and London, 1-56 (1984).
- Sullivan, J.P., Tung, R.T., Pinto, M.R., Graham, W.R.,** “Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study”, J. Appl. Phys., 70 (1991).
- Savaş S. Mehmed K. Seçkin A.** İnce film üretim teknikleri. Erciyes Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25 (5):389-401.(2012).
- Şahmetlioğlu, E., 2004.** İletken Aşı Kopolimerlerin Sentezi ve Bunların Enzim Tutuklama Matrisleri Olarak Kullanımları, Doktora Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Toppare, L., 2003.** Bilim ve Teknik Dergisi Yayınları, Kasım, 86-87.
- Tülay T.A. 2012.** Bazı İnce Film İletken Polimerlerin Bant Aralıkları ve Yüzey İletkenliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Çanakkale.
- Yang J, Shalish I, Shapira Y. 2001** Physical Review B;64:35325.
- Zuhal ALPASLAN, 2009.** Bazı İletken Polimerlerin Güneş Pili Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen bilimleri Enstitüsü.
- Werner, J.H. and Güttler, H.H., 1991.** “Barrier Inhomogeneities At Schottky Contacts”, J. Appl. Phys., 69: 1522-1533.

## ÖZGEÇMİŞ

Soyadı, Adı : ASIMOV, AHMAD  
Uyruğu : Azerbaycan  
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.08.1986-Bakü  
Medeni Hali : Evli  
Telefon : 05350628201  
e-mail. : fizikasimov@gmail.com

Eğitim Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Uludağ Üniversitesi	2014
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	2010
Lisans	Bakü Devlet Üniversitesi / Fizik	2007
Lise	Abdullah Hamzayev Lisesi	2003
Yabancı Dil	İngilizce.	

### Yayınlar

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler (SCI: *Science Citation Index*; SSCI: *Social Science Citation Index*).

1. A. ASIMOV, M. AHMETOGLU. The calculation of electronic parameters of Al/MDMO-PPV/p-Si/Al Schottky diode by current–voltage characteristics. OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS–RAPID COMMUNICATIONS. (2014). Vol. 8, No. 9-10,
2. M. ÖZER, T. GÜZEL, A. ASIMOV, M. AHMETOGLU. Gaussian Distribution of Inhomogeneous Barrier Height in Au/n-GaP (100) Schottky Barrier Diodes. OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS–RAPID COMMUNICATIONS. (2014) . Vol. 16, No. 5-6.
3. A. ASIMOV, M. AHMETOGLU, B. KUCUR, I. GUCUYENER.(2014). Electrical characteristics of Al/n-type GaAs Schottky barrier diodes at room temperature. OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS-RAPID COMMUNICATION. Vol. 8, No. 3-4.
4. A. ASIMOV, M.AHMETOGLU, B.KUCUR, M.ÖZER, T.GÜZEL. The determination of series resistance and interface state density distributions of Au/p-type GaAs Schottky barrier diodes. OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS. (2013) Vol. 7, No. 7-8.