



**GaAs YARIİLETKENİ ÜZERİNE İLETKEN  
POLİMER KAPLANARAK OLUŞTURULAN  
YAPININ ELEKTRİKSEL VE OPTİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Ahmet KIRSOY**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GaAs YARIİLETKENİ ÜZERİNE İLETKEN POLİMER KAPLANARAK  
OLUŞTURULAN YAPININ ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Ahmet KIRSOY**

Danışman: Prof.Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI

BURSA-2015

## TEZ ONAYI

Ahmet KIRSOY tarafından hazırlanan "GaAs Yarıiletkeni Üzerine İletken Polimer Kaplanarak Oluşturulan Yapının Elektriksel ve Optik 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 Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Fizik Anabilim Dalı

**Üye:** Prof. Dr. Hakan KÖÇKAR  
Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi,  
Fizik Anabilim Dalı

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

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

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

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali Osman DEMİR**  
**Enstitü Müdürü**  
.../.../2015

**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.**



**.../10/2015**

**Ahmet KIRSOY**

## ÖZET

Doktora Tezi

### GaAs YARIİLETKENİ ÜZERİNE İLETKEN POLİMER KAPLANARAK OLUŞTURULAN YAPININ ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Ahmet KIRSOY**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

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

Bu çalışmada n-GaAs yarıiletkeni üzerine P3HT poly(3-hexylthiophene), MEH-PPV poly [2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] iletken polimerleri, fulleren türevi PCBM [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) ve GO (Graphene oxide) iletken materyalleri kaplanarak Schottky engel diyotları üretilmiştir. Çalışmada kullanılan bu iletken organik materyaller (P3HT, MEH-PPV, PCBM, GO), elektronik dünyasında Schottky diyotlar, organik ledler, transistörler, biyosensörler, fotosensörler, fotovoltaiik ve güneş pili uygulamaları gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Üretilen diyotların elektriksel karakteristikleri, akım-voltaj ( $I-V$ ) ve kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) ölçüm metotları kullanılarak incelenmiştir. Bütün ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Diyot parametreleri çeşitli yöntemlerle hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Polimer kullanarak Au/n-GaAs/Au geleneksel Schottky diyodunun elektriksel özelliklerinin kontrol edilebileceği görülmüştür.

Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun frekansa bağlı  $C-V$  ve  $G/\omega-V$  ölçümleri oda sıcaklığında 10 kHz-1MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.  $C-V$  ölçümlerinden artan voltajla birlikte her bir frekans için kapasitansın negatif değerler aldığı gözlenmiştir. Literatürde bu durum negatif kapasitans (NC) olarak bilinir. NC özellikle düşük frekanslarda daha dikkat çekici olup, kapasite değerlerinin mutlak değerinin frekansın düşmesiyle arttığı gözlenmiştir. Seri direnç  $R_s$  değerleri de NC'nin gözlendiği yığılma bölgesinde düşük frekanslar için yüksek olup, frekansın artmasıyla düştüğü gözlenmiştir.  $G/\omega-V$  ölçümlerinden de doğal olarak seri direncin tersine bu bölge için frekansın artmasıyla iletkenlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Diyodun NC karakteristiği iyonizasyon nedeniyle Fermi seviyesinin altındaki dolu durumlarda meydana gelen ara yüzey yük kaybından kaynaklandığı düşünülebilir. Aynı zamanda NC'ye özellikle düşük frekanslarda meydana gelen polarizasyondaki artış ve yapıya daha fazla taşıyıcı girişi atfedilebilir.

Üretilen Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun  $I-V$  ölçümlerinden ışığa duyarlı olduğu tespit edilmiş olup bu yapının fotosensör olarak kullanılabilceği değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Schottky engel diyotlar; seri direnç; iletken polimer; P3HT; MEH-PPV; PCBM, GO, NC.

2015, xi + 120 sayfa.

## ABSTRACT

PhD Thesis

### INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF THE STRUCTURE FORMED BY COATING CONDUCTIVE POLYMER ONTO GaAs SEMICONDUCTOR

**Ahmet KIRSOY**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

In this study, Schottky Barrier Diodes have been fabricated by coating P3HT poly(3-hexylthiophene), MEH-PPV poly [2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] conductive polymers, derivative of fullerene PCBM [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) and GO (Graphene oxide) conductive materials onto n-GaAs semiconductor. These organic conductive materials used in the study have a very broad range of application areas such as Schottky diodes, organic light-emitting-diodes, transistors, biosensors, photosensors, photovoltaic and solar cells. Electrical characteristics of the fabricated diodes have been investigated by using the current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurement methods. All measurements were performed at room temperature. The diode parameters calculated by various methods were compared. The electrical properties of the conventional Schottky diode can be controlled by using polymer was observed.

Frequency dependent C-V and  $G/\omega$ -V characteristics of Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diode have been measured in the frequency range from 10 kHz to 1MHz at room temperature. Negative capacitance values have been observed with the increasing applied voltage for each frequency from C-V measurements. This is known as negative capacitance (NC) in the literature. NC is more remarkable especially at low frequencies, It was observed that the absolute values of capacities increased with the decrease of frequency. Series resistance values  $R_s$ , in the accumulation region where NCs occurred, were observed to be high for low frequencies, and they decreased with increasing frequency. Naturally, contrary to series resistance, it was observed from  $G/\omega$ -V measurements that the values of  $G/\omega$  increased with increasing frequency in the same region. The negative capacitance characteristic of the diode can be referred to the loss of interface charges at occupied states below Fermi level due to impact ionization processes. It can also be attributed to an increase in the polarization particularly at low frequencies and the introduction of more carriers in the structure.

The produced Au/n-GaAs/GO/Au diode was determined to be sensitive to light from I-V measurements and it is evaluated that this structure would be used as photosensor.

**Key Words :** Schottky barrier diodes; series resistance; conducting polymer; P3HT; MEH-PPV; PCBM, GO, NC.

**2015, xi+120 pages.**

## TEŞEKKÜR

Çalışmamın başından sonuna kadar karşılaştığım bütün güçlüklerde değerli yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyip beni yönlendiren, çalışmalarımda sürekli beni teşvik eden değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na bütün kalbimle teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tezimin yazımı sırasında ve deneysel çalışmalarda verdikleri desteklerden dolayı arkadaşlarım Ahmad ASİMOV ve Araş. Gör. Banu KUCUR'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü hocalarına, UNAM laboratuvarı teknik personeli ile Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Mustafa OKUTAN'a ayrıca çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman beni destekleyen, yanımda olan, doktora eğitiminin tamamlanmasında çok büyük manevi katkısı olan canım eşim Esin Derya ve sabırla çalışmalarımı destekleyen sevgili evlatlarım Erişcan Melih ve Efe Mert'i sevgiyle kucaklarım.

Ahmet KIRSOY  
...../...../2015

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	3
2.1. Metal -Yarıiletken (MS) Kontaklar .....	3
2.1.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ( $\Phi_s < \Phi_m$ ) .....	4
2.1.2. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ( $\Phi_s > \Phi_m$ ) .....	8
2.2. Metal/yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları .....	12
2.2.1. Termoyonik emisyon teorisi (TE) .....	13
2.2.2. Difüzyon teorisi .....	16
2.2.3. Termoyonik emisyon-difüzyon teorisi .....	18
2.2.4. Engel boyunca tünelleme .....	20
2.2.5. $T_0$ etkili akım iletimi .....	23
2.3. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi .....	24
2.4. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken (MIS) Yapılar .....	28
2.4.1. Yığılma (accumulation) .....	32
2.4.2. Tüketim (depletion) .....	33
2.4.3. Tersinim (inversion) .....	33
2.5. İletken Polimerler .....	34
2.5.1. Band teorisi .....	35
2.5.2. İletken polimerlerde katkılama işlemi .....	41
2.5.3. İletken polimerlerin sentez yöntemleri .....	43
2.6. İdeal MPY Diyot .....	43
2.7. Schottky Diyotlarında Doğru Beslem I-V Karakteristikleri .....	44
2.8. GaAs Yarıiletkeninin Bazı Temel Özellikleri .....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	50
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar .....	50
3.2. Deneysel Yöntem .....	55
3.2.1. İnce film kaplama yöntemleri .....	55
3.2.1.1. Fiziksel kaplama yöntemleri .....	55
3.2.1.1.1. Vakum içinde buharlaştırma .....	56
3.2.1.1.2. Sıçratma tekniği ile kaplama .....	57
3.2.1.2. Kimyasal kaplama yöntemleri .....	58
3.3. Kullanılan Polimerler .....	64
3.3.1. P3HT .....	64
3.3.2. MEH-PPV .....	65
3.3.3. PCBM .....	66
3.3.4. GO (Graphene Oxide) .....	68
3.4. Deneysel İşlemler .....	71
3.4.1. Kristal temizleme .....	71
3.4.2. Omik kontakın oluşturulması .....	72
3.4.3. Polimer tabakanın oluşturulması .....	73



3.4.3.1. Çözelti hazırlanması .....	73
3.4.3.2. İnce film hazırlanması .....	73
3.5. Kullanılan Ölçüm Düzenegi .....	80
3.5.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	80
3.5.2. Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzenegi .....	80
3.5.3 Kapasitans-Voltaj ölçüm sistemi .....	82
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	83
4.1. Akım –Voltaj (I-V) Karakteristikleri .....	83
4.1.1 Oda sıcaklığında Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının I-V karakteristiklerinin incelenmesi .....	83
4.1.2. Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodunun oda sıcaklığında karanlık ve ışık altındaki akım-gerilim karakteristiğinin incelenmesi .....	96
4.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Karakteristikleri .....	101
4.2.1 Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının kapasite–voltaj (C-V) karakteristikleri .....	101
4.2.2 Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri .....	106
5. SONUÇ .....	112
KAYNAKLAR .....	116
ÖZGEÇMİŞ .....	120

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Diyodun etkin alanı
$A^*$	Richardson sabiti
Å	Angström
Al	Alüminyum
Au	Altın
C	Kapasite
$C_{ADJ}$	Düzeltilmiş kapasite
$C_{ox}$	Yalıtkan oksit tabakanın sığası
$C_{sc}$	Tüketim bölgesinde yüzey yük kapasitansı
$D_e$	Elektron difüzyon sabiti
E	Elektrik alan
$E_c$	İletkenlik bant kıyısı enerjisi
$E_g$	Yarıiletkenin yasak bant aralığı
$E_F$	Fermi enerji seviyesi
$E_{Fm}$	Metalin Fermi seviyesi
$E_{Fs}$	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
$E_{ss}$	Arayüzey durumlarının enerjisi
$E_v$	Valans bant kıyısı enerjisi
GaAs	Galyum Arsenik
Ge	Germanyum
$G/\omega$	İletkenlik
h	Plank sabiti
I	Akım
$I_o$	Doyum akımı
$I_{sc}$	Kısa devre akımı
$J_0$	Doyum akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
kHz	KiloHertz
$m_e^*$	Elektronun etkin kütlesi
MHz	MegaHertz
$m_0$	Elektronun durgun kütlesi
n	Diyot idealite faktörü
$N_A$	Alıcı (akseptör) yoğunluğu
$N_D$	Verici (donor) yoğunluğu
T	Sıcaklık
V	Voltaj
$V_d$	Difüzyon voltajı
$V_F$	Doğru beslem voltajı
$V_R$	Ters beslem voltajı
$V_{oc}$	Açık devre voltajı
$W_D$	Tüketim tabakası genişliği
$\delta$	Yalıtkan tabaka kalınlığı
$\epsilon_0$	Boşluğun dielektrik sabiti
$\epsilon_s$	Yarıiletkenin dielektrik sabiti

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\epsilon_i$	Yalıtkanın dielektrik sabiti
$\mu_e$	Elektron mobilitesi
$\mu_h$	Boşluk mobilitesi
$\Phi_B$	Potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_e$	Etkin engel yüksekliği
$\Phi_m$	Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s$	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\psi_{bi}$	Difüzyon potansiyeli
$\chi_e$	Elektron yakınlığı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AE	Alan Emisyonu
C-V	Kapasitans-Voltaj
GO	Graphene Oxide
I-V	Akım-gerilim
NC	Negatif kapasitans
MEH-PPV	Poly[2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4- phenylene-vinylene]
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MPY	Metal-Polimer-Yarıiletken
P3HT	poly(3-hexylthiophene)
PCBM	[6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester)
TAE	Termoionik Alan Emisyonu
TE	Termoionik Emisyon

## 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-band diyagramı.....	7
Şekil 2.3.	(a) Kontak oluşmadan, (b) kontak oluşuktan sonraki metal/n-tipi yarıiletken kontakta (omik kontak) enerji-bant gösterimi .....	8
Şekil 2.4.	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 .....	9
Şekil 2.5.	Farklı beslem koşullarında n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerine metal doğrultucu kontakların enerji band diyagramları (a) Termal denge (b) Doğru beslem (c) Ters beslem .....	11
Şekil 2.6.	Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında 5 temel akım iletim mekanizması:(1) Termoyonik emisyon (2) Tünelleme (3) Tekrar birleşme (4) Elektronların difüzyonu (5) Boşukların difüzyonu .....	12
Şekil 2.7.	Termoyonik emisyon akımı için Schottky bariyer diyot (a) Denge durumu (b) Doğru beslem altında .....	14
Şekil 2.8.	Metal/n-tipi yarıiletken kontakta akım iletim mekanizmalarının katkılama konsantrasyonuna bağlılığı. Elektron akımı oklarla belirtilmiştir	20
Şekil 2.9.	Metal/n-tipi dejenere yarıiletken kontak için TE, AE, TAE. (a) Doğru beslem (b) Ters beslem. TE: Termoyonik Emisyon. TAE: Termoyonik Alan Emisyonu AE: Alan emisyonu .....	23
Şekil 2.10.	Farklı akım iletim mekanizmalarını belirtmek için $nkT/q-kT/q$ grafiği .....	24
Şekil 2.11.	Engel genişliği $d$ olan metal/n-tipi yarıiletken kontakta (a) $\psi(x)$ potansiyel fonksiyonunun $x$ 'e göre değişimi, (b) $\rho(x)$ uzay yük yoğunluğu fonksiyonunun $x$ 'e göre değişimi.....	25
Şekil 2.12.	Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısı .....	29
Şekil 2.13.	İdeal bir MIS yapının denge durumunda ( $V = 0$ ) enerji band diyagramı (a) n-tipi yarıiletken (b) p-tipi yarıiletken.....	30
Şekil 2.14.	$V \neq 0$ durumunda ideal MIS diyodun enerji-band diyagramı (a) yığılıma (accumulation) (b) tüketim (depletion) (c) tersinim (inversion) durumları .....	32
Şekil 2.15.	Farklı büyüklükteki moleküllerin oluşumunda elektronların buldukları enerji düzeyleri .....	35
Şekil 2.16.	Poliyetenin moleküler yapısı. Her karbon atomu en yakın dört komşusu ile bağ yapmış durumda .....	37
Şekil 2.17.	Konjuge yapıya sahip en basit molekül poliasetilen .....	37
Şekil 2.18.	Birkaç yakın organik molekülde enerji seviyeleri ve bandları.....	38
Şekil 2.19.	İyi bilinen bazı iletken polimerlerin moleküler yapısı.....	39
Şekil 2.20.	Sıcaklığın iletken polimerlerin ve metallerin iletkenlikleri üzerine etkisi...	40
Şekil 2.21.	Metal-polimer-yarıiletken (MPY) diyodun enerji bant diyagramı .....	44

Şekil 2.22.	GaAs'ın band yapısı .....	47
Şekil 2.23.	Elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs taşıyıcı hızlarının değişimi .....	48
Şekil 3.1.	Kullanılan bazı kimyasallar .....	50
Şekil 3.2.	a)“Radwag” hassas tartı ve b)“Transsonic TS 540” ultrasonik titreştirici .....	51
Şekil 3.3.	“Yellowline” manyetik karıştırıcı ve b) numunelerin kaplanmasında kullanılan “Spin coater VTC-100” cihazı .....	51
Şekil 3.4.	a) Omik kantağın gerçekleştirildiği VK-0814 Midas Termal Buharlaştırıcı b) Doğrultucu kontakların oluşturulduğu Univex 450 metal buharlaştırma sistemi .....	52
Şekil 3.5.	Hızlı termal tavlama (RTA) cihazı .....	53
Şekil 3.6.	“Aldrich” fırın ve b) malzemeleri korumak için vakum odası Glovebox....	54
Şekil 3.7.	Omik kontaklı numunenin bilgisayar kontrolünde eşit parçalara kesilmesi .....	55
Şekil 3.8.	Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi .....	60
Şekil 3.9.	Döndürme yöntemi ile kaplamanın işlem aşamaları .....	62
Şekil 3.10.	P3HT'nin kimyasal yapısı.....	65
Şekil 3.11.	MEH-PPV polimerinin kimyasal yapısı .....	65
Şekil 3.12.	(a) Fullerene C <sub>60</sub> ve (b) fulleren türevi [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) (PCBM)'nin kimyasal yapısı .....	66
Şekil 3.13.	C <sub>60</sub> 'ın çözünebilir türevi PCBM'nin sentezi.....	67
Şekil 3.14.	Grafen tek tabakanın şematik görüntüsü.....	68
Şekil 3.15.	Epoksid ve hidroksil gruplar içeren GO yapısının üstten ve yandan görünüşü. Karbon, oksijen ve hidrojen atomları sırasıyla cyan, kırmızı ve beyaz renkte belirtilmiştir .....	70
Şekil 3.16.	Toz ve çözelti haldeki farklı polimerlerin görünümü .....	71
Şekil 3.17.	Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske.....	74
Şekil 3.18.	Üretilen Metal/Polimer/Yarıiletken diyotların şematik gösterimi .....	74
Şekil 3.19.	Kimyasal temizlik aşaması; a) çeker ocakta altlıkların temizlenmesi, b) Deiyonize suda ultrasonik temizleme.....	75
Şekil 3.20.	Omik kantağın VK-0814 Midas Termal Buharlaştırıcıda oluşturulma aşaması.....	75
Şekil 3.21.	a) Hızlı termal tavlama (RTA) ve b) omik kontaklı numunenin bilgisayar kontrolünde kesilme aşaması .....	76
Şekil 3.22.	a) Spin Coater cihazı ile polimer kaplama b) ve fırınlama aşaması.....	77
Şekil 3.23.	Son olarak doğrultucu kontakların Univex 450 buharlaştırma sisteminde oluşturulma aşaması .....	78
Şekil 3.24.	Üretilen diyotların son hali a) Au/n-GaAs/P3HT/Au, Au/MEH-PPV:PCBM/Al ve b) Au/n-GaAs/GO/Au.....	79
Şekil 3.25.	Au/n-GaAs/P3HT/Au Schottky diodun SEM görüntüsü.....	80
Şekil 3.26.	Deneysel ölçümler için kullanılan düzenek .....	81
Şekil 3.27.	Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümlerinin gerçekleştirildiği Empedans Analizörü (HP 4194).....	82
Şekil 4.1.	Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının; a) I-V ve b) ln(I)-V grafikleri.....	85
Şekil 4.2.	Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının a) dV/dln(I)-I ve b) H(I)-I grafikleri.....	90

Şekil 4.3.	Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının V'ye karşı F(V) grafikleri .	92
Şekil 4.4.	Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapılarının oda sıcaklığında doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen ara yüzey durumlarının enerji dağılım grafikleri .....	95
Şekil 4.5.	Au/n-GaAs/GO/Au diyodun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm <sup>2</sup> ışık altındaki yarılogaritmik akım-gerilim karakteristiği.....	96
Şekil 4.6.	Au/n-GaAs/GO/Au Schottky bariyer diyodun karanlık ve 100 mW/cm <sup>2</sup> ışık altındaki I-V karakteristiği (Şekil içinde ayrıca orijin civarındaki değerler büyütülerek çizilmiştir) .....	97
Şekil 4.7.	Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm <sup>2</sup> ışık altındaki dV/dln(I) – I ve H(I) - I grafikleri.....	99
Şekil 4.8.	Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm <sup>2</sup> ışık altındaki V-F(V) grafikleri .....	100
Şekil 4.9.	Au/ n-GaAs /P3HT/Au yapısının; a) C-V ve b) 1/C <sup>2</sup> –V grafikleri.....	102
Şekil 4.10.	Au/ n-GaAs /MEH-PPV:PCBM/Al yapısının; a) C-V ve b)1/C <sup>2</sup> –V grafikleri.....	103
Şekil 4.11.	Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki C–V karakteristiği.....	107
Şekil 4.12.	Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki G/ω-V karakteristiği.....	107
Şekil 4.13.	Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki C <sub>ADJ</sub> –V karakteristiği.....	109
Şekil 4.14.	Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki R <sub>s</sub> –V karakteristiği.....	110
Şekil 4.15.	Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun 800 kHz frekanstaki C <sup>2</sup> – V grafiği.....	111

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Kontak türünün iş fonksiyonlarına göre değişimi.....	4
Çizelge 2.2. Katkılanmış bazı iletken polimerlerin yapıları ve katkı maddeleri .....	42
Çizelge 2.3. Oda sıcaklığında GaAs'e ait bazı fiziksel özellikler .....	49
Çizelge 4.1. Üretilen yapıların I-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metodları yardımıyla elde edilen diyot parametreleri .....	86
Çizelge 4.2. Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodunun karanlık ve ışık altında I-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metodları yardımıyla elde edilen diyot parametreleri.....	98
Çizelge 4.3. Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapıları için C-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel diyot parametreleri.....	105

## 1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken yapılar daha çok Schottky bariyer diyot olarak bilinir. Bazen yüzey bariyer diyot olarak da adlandırılırlar. Metal-yarıiletken yapılar birçok elektronik ve optoelektronik aygıtın temel elemanıdır. Schottky bariyer diyotlar endüstride sayısız uygulama alanına sahiptir. Özellikle yüksek frekans kabiliyeti ve doğru beslemde düşük kayıp voltaj duyarlılığı kullanım alanını genişletmiş ilgi odağı olmuştur. Yüksek frekans özelliği nedeniyle mikrodalga karıştırıcı, telekomünikasyon sistemleri, radar teknolojisi gibi pek çok alanda kullanılır. Yine doğru beslemde düşük voltaj kaybı özelliği nedeniyle başta düşük voltaj yüksek akım güç kaynakları olmak üzere güç elektroniğinde çok yoğun kullanım alanına sahiptir. Lineer olmayan I-V karakteristik özelliği nedeniyle varistör, ters beslemde tüketim bölgesi değişken kapasitans özelliği nedeniyle varaktor olarak kullanılır. Ayrıca Schottky bariyer diyotlar güneş pili, fotodedektörler, metal-tabanlı-transistör (MESFET) gibi birçok aygıtın temel taşıını teşkil eder (Kwok 1995, Singh 1995).

Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin temel olarak ara yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiği bilinmektedir (Rhoderick ve Williams 1988). Böylece çeşitli diyot uygulamaları için istenen özelliklere sahip diyot üretimi, metal/yarıiletken yapılarda metal ile yarıiletken arasına organik tabaka oluşturulmasıyla mümkün olmaktadır (Sönmezoğlu ve ark. 2010, Zeyrek ve ark. 2013). Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan ya da polimer tabakanın varlığı ara yüzey durumlarını etkiler ve metal-yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Metal-polimer-yarıiletken (MPY) yapıların elektriksel karakteristiklerinin davranışları metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi Schottky engel diyotların davranışına benzerdir. MIS yapıların elektriksel karakteristikleri ara yüzeyel yalıtkan/polimer tabakanın oluşumuna, metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzey enerji durum yoğunluğu dağılımına, seri dirence ve Schottky engel yüksekliklerindeki düzensizliğe bağlıdır (Pakma ve ark. 2011).

Son yıllarda organik iletken polimer sentezi ve bunların metallerle kontak yapılarak aygıt geliştirme çalışmalarına hız verilmiştir. Konjuge polimerler olarak da bilinen bu organik yarıiletken yapılar doğrultucu, elektrolüminesans ve fotovoltaik özellik göstermektedirler. Çalışılan iletken polimerlerin bazıları polipirrol, pirrol, tiofen, anilin, polivinil alkol, polianilin, polialkilitiofen, polyofen, polihekziltiofen, poliasetilendir.



İletken polimerler günümüzde bilimsel çalışmalarda, şarj olabilen pil yapımında, sensör yapımlarında, diyot, transistör ve mikroelektronik aletlerde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. İletken polimerlerin kolay sentezlenmesi, düşük maliyetli ve özellikle dayanıklı ve kararlı bir yapıya sahip olmaları son yıllarda bu malzemelere olan ilgiyi artırmıştır. Bu malzemeler endüstrinin ihtiyaç duyduğu sağlamlık, hafiflik, esneklik gibi özelliklere sahiptir (Böhler ve ark. 1998, Aydoğan ve ark. 2005, Kvasoğlu ve ark. 2010, Dökme ve ark.2011).

Polimerler metallerle doğrultucu kontak oluşturduklarından, mekanik dayanıklılıkları ve kolay temin edilebilmelerinden dolayı, poliofen gibi polimerler günümüzde ara yüzey olarak birçok deneyin ve araştırmanın ilgi merkezi olmaktadır (Aydoğan ve ark. 2005, Dökme ve ark. 2011). İletken polimerler; metallerin elektriksel iletkenliklerini polimerlerin kimyasal ve mekaniksel özellikleriyle birleştirerek, metallerle yarı iletkenler arasında iletkenliğe sahip olan polimerlerdir.

Bu çalışmanın amacı, farklı polimerler kullanılarak Metal/Polimer/Yarıiletken yapısında Schottky diyotlar üretmek ve I-V; C-V verilerini kullanarak çeşitli metotlarla diyotları analiz ederek karakterize etmektir. Çalışmada P3HT poly(3-hexylthiophene), MEH-PPV poly [2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] iletken polimerleri, fulleren türevi PCBM [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) ve GO (Graphene Oxide) iletken materyalleri kullanılmıştır. Deneysel ölçümlerle elde edilen I-V ve C-V verileri kullanılarak idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) ara yüzey durumları ( $N_{ss}$ ), seri direnç ( $R_s$ ), difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) ve tüketim tabakasının genişliği ( $W_d$ ) gibi temel parametreler hesaplanmıştır. Böylece diyotların elektriksel özellikleri elde edilmiştir.

Tez; Giriş, Kuramsal Temeller, Materyal ve Yöntem, Bulgular ve Tartışma ve Sonuç bölümü olmak üzere beş bölümden meydana gelmektedir. Tezin birinci bölümünde tezin amacı ikinci bölümünde bu yapılarla ilgili kuramsal temeller, teorik bilgiler, üçüncü bölümde diyotların hazırlanması, deneysel sistemler ve ölçümlerin nasıl yapıldığı, 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 değerlendirmesi yapılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

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

Metal-yarıiletken kontaklar genellikle Schottky-engel diyot olarak bilinir. Bazen de yüzey-engel-diyot olarak adlandırılır. Bir MS kontağı aynı zamanda birçok cihaz için yararlı bir yapı teşkil etmektedir. MS kontağın özel bir durumu da omik kontaklıdır. Omik kontakta yarıiletken aşırı katkılanmıştır. Omik kontak tüm yarıiletken cihazlar için gerekli olup çip yüzeyindeki son iletken metal olmak durumundadır.

Metal yarıiletken sistemler en eski yarıiletken cihazlardır. Yarıiletken cihaz uygulamalarının izlerine 1900'lerin öncelerinde rastlanır. Yarıiletken yüzeyinde potansiyel engelin oluşması birbirinden bağımsız olarak ilk defa Schottky ve Mott tarafından 1938'de gerçekleştirilmiştir. İlk kabul edilebilir teori Schottky tarafından 1930'larda geliştirildiği için metal yarıiletken yapılar genellikle adına itafen Schottky engel diyot denir. Termionik emisyon teorisinin formülasyonu ise 1942'de Bethe tarafından ortaya konmuştur. Bu teori daha sonra Crowell ve Sze tarafından 1966'da geliştirilmiştir. Yüzey durumları teorisi 1947'de Bardeen tarafından geliştirilmiş ve deneysel sonuçlar daha iyi anlaşılır hale gelmiştir (Kwok 1995).

Metal-yarıiletken kontakların ideal olması için, kontak olarak kullanılan metaller yeterince yüksek saflıkta ve yarıiletken kristallerin yüzeyleri de yeterince temiz olmalıdır. Metal- yarıiletken kontaklar doğrultma özelliği olan veya olmayan kontaklardır. Doğrultma özelliği olmayan kontağın, uygulanan dış gerilimin polaritesinden bağımsız olmak üzere, kontak üzerinde voltaj düşmesi yok denecek kadar azdır ve bu tür kontaklar omik kontak olarak adlandırılır. Burada metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşmadığı için taşıyıcılar metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale kolaylıkla geçerler.

Doğrultma özelliği olan kontaklar ise daha çok Shottky diyot ya da doğrultucu kontak olarak adlandırılır. Metal ile yarıiletken arasındaki kontakta iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (boşluklar ve elektronlar) metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale doğru rahatlıkla iletiliyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontaklar denir. Doğrultucu

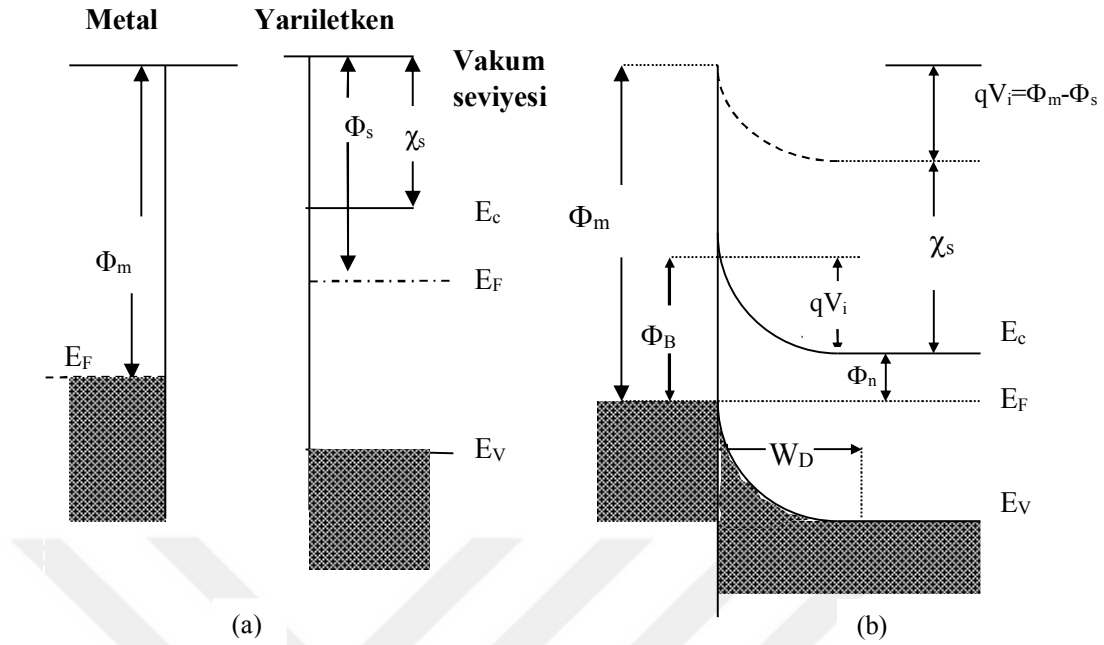
kontaklarda akım doğru beslem altında çok iyi iletiliyorken ters beslem altında kötü veya hiç iletilmemektedir. Bir metal ile yarıiletken arasındaki kontağın karakteristiği metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlıdır.  $\Phi_m$  metalin,  $\Phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere kontağın hangi durumda omik hangi durumlarda doğrultucu davranış göstereceği Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

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

Yarıiletken türü	İş fonksiyonlarının durumu	Kontak Türü
n-tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	Doğrultucu
n-tipi	$\Phi_m < \Phi_s$	Omik
p-tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	Omik
p-tipi	$\Phi_m < \Phi_s$	Doğrultucu

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

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 katkılanan verici veya alıcı atomların miktarına bağlı olarak değişir. Yarıiletkende katkı miktarına bağlı olmayan önemli diğer bir parametre ise  $\chi_s$  ile gösterilen elektron yakınlığıdır. Elektron yakınlığı iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır.



**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)

Şekil 2.1a'da yarıiletken yüzey durumları içermediğinden yüzeyin band yapısı yarıiletken gövde (bulk) band yapısı ile aynıdır yani bandlarda bir bükülme yoktur. Şekil 2.1.a'da görüldüğü gibi, metalin iş fonksiyonunun n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olması ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) serbest elektron veya serbeste çok yakın olan elektronların sayısının metalde daha az, yarıiletkende daha fazla olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle, metalin Fermi seviyesi, yarıiletkeninkinden daha aşağıdadır. Şekil 2.1b, kontak yapıldıktan sonra dengeye ulaşmış durumun enerji-band diyagramını göstermektedir. Metal n-tipi 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. Elektronlar bu geçişi yaparken arkalarında verici olarak adlandırılan iyonize yük merkezleri (donorlar) bırakırlar. Bu pozitif yük merkezleri bir uzay yükü dağılımı oluştururlar. Yarıiletken tarafındaki elektron sayısı azalırken metal tarafındaki elektron sayısı artar. Metal tarafındaki elektron sayısının artması metalin Fermi enerji düzeyini değiştirmez. Yarıiletken tarafındaki elektron sayısının azalması ise Fermi enerji düzeyinin yarıiletken tarafında aşağıya doğru bükülmesine neden olur.

Bunun sonucu olarak Şekil 2.1.b’de görüldüğü gibi yarıiletken içerisine doğru yayılan potansiyel engeli oluşur. Bu potansiyel engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği,

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.1)$$

ile verilir. Burada  $V_i$ 'nin birimi volt olup eklemde oluşan potansiyel veya kontak potansiyel farkı olarak bilinir.  $qV_i$  yarıiletkenden metale gidecek olan elektronun sahip olması gereken enerji yani engel yüksekliğidir. Potansiyel engelinin metal tarafındaki yüksekliği ise;

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (2.2)$$

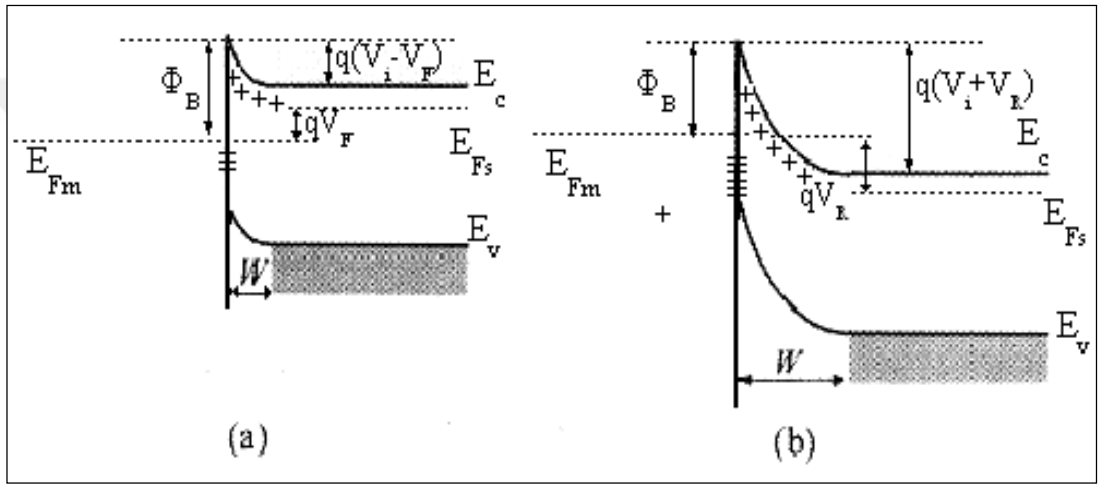
ile verilir.  $\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$  ve  $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$  olduğundan,

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.3)$$

elde edilir. Burada  $\Phi_n = (E_c - E_F)$  olup,  $q$  elektronik yüküdür. Eş. (2.2) birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir (Kwok 1995).

Termal denge halinde, yarıiletkenden metale geçen elektronlar metalden yarıiletkene geçen elektronlar ile dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Metal tarafında dik olarak yükselen potansiyel engeli, yarıiletken içinde  $W_D$  genişliğine sahiptir, böylece yarıiletken tarafında yüklerden arınmış bir bölge oluşur ve bu bölgeye Schottky bölgesi, engel bölgesi, uzay yükü bölgesi veya tüketim bölgesi denir. Bu ara bölge sığa özelliği gösterir ve bir kondansatör gibi davranır. Buna Schottky kapasitesi denir. Engel tabakasının kalınlığı, iyonize olmuş vericilerin sayısına ve difüzyon engel yüksekliğine bağlıdır. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir. 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 band bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur.

Şekil 2.2.a'da görüldüğü gibi metal/n-tipi yarıiletken kontakta metale pozitif gerilim uygulandığında durum düz beslem olarak tanımlanır ve metal tarafındaki engel yüksekliği aynı kalırken yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli bu bölgedeki uzay yükü yoğunluğundan dolayı azalır. İletkenlik bandındaki enerji seviyeleri  $qV_F$  kadar yükselmiş olduğundan yarıiletkenden metale doğru giden elektronlar için potansiyel engeli  $qV_F$  kadar alçalır ve yarıiletkenden metale elektron geçişi kolaylaşır. Kontakten geçen akım uygulanan gerilimle üstel olarak artar.

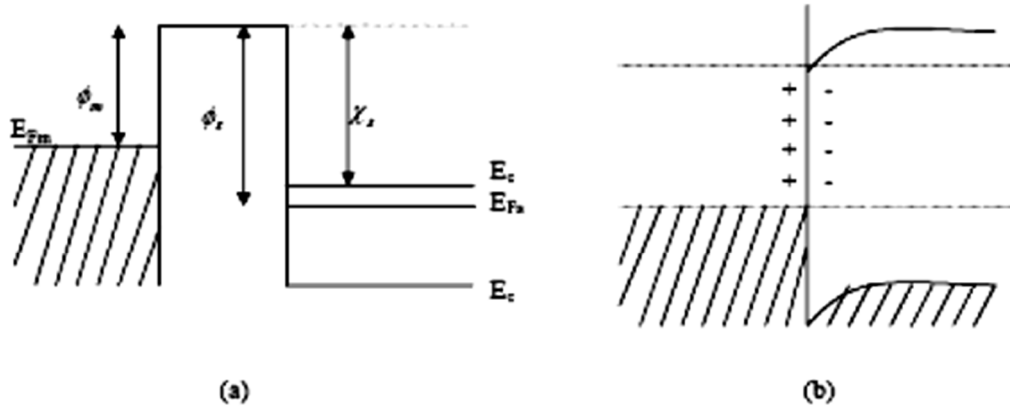


**Şekil 2.2** Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için (a) doğru beslem ve (b) ters beslem altında enerji-band diyagramı (Sze S.M. 1981)

Şekil 2.2.b'de görüldüğü gibi, kontakın metal tarafına negatif gerilim uygulandığında bu durum ters beslem olarak adlandırılır. Engelin yarıiletken tarafındaki kısmı uygulanan gerilimle yükselir. Bu durum elektronların geçişini zorlaştırır ve yarıiletkenden metale geçen akım azalır. Belirli bir ters beslemden sonra artık yarıiletkenden metale elektron geçişi olmayacağından dolayı kontakten geçen akımı sadece metalden yarıiletkene termiyonik emisyon yoluyla geçen elektronlar oluşturur. Engeli geçen elektronların sayısı sabit olacağından akım doyuma ulaşır ve sadece doyma akımı gözlenir. Yüzey durumlarının olmaması durumunda bu doyma akımı çok keskin ve değeri çok düşüktür.

Metalin iş fonksiyonu n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması ( $\Phi_m < \Phi_s$ ) durumunda ise, yukarıda da bahsedildiği gibi omik kontak oluşur. Şekil 2.3.a'da

görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi enerji düzeyi metalin Fermi enerji düzeyinden düşüktür. Metal/n-tipi yarıiletken temasında elektronlar metalden yarıiletkene doğru geçerler ve bu olay denge durumuna ulaşıncaya kadar devam eder. Metalden yarıiletkene elektron geçmesi sonucu metalin Fermi enerji düzeyi değişmez, fakat yarıiletken elektron kazandığından dolayı Fermi enerji düzeyi yukarı doğru kayar. Bu durumda metalden yarıiletkene geçen elektronlar arkalarında iyonize merkezler bırakmadıklarından ve yarıiletkene geçen elektronlar da iyonize merkezler gibi davranmadıklarından kontak bölgesinde uzay yükü oluşmaz. Metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale kolayca yük akışı olur.

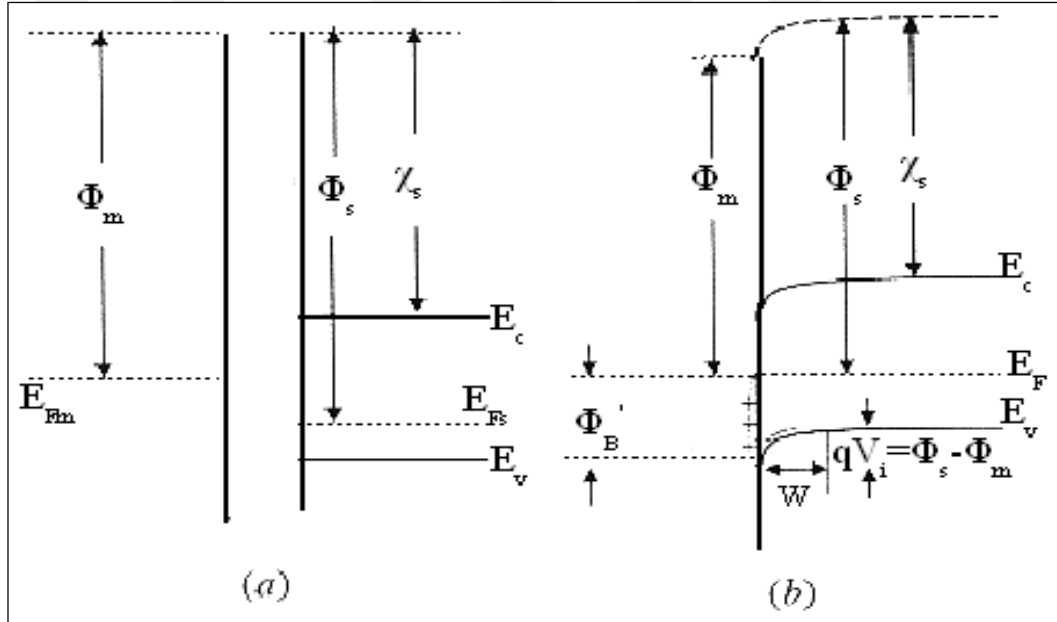


**Şekil 2.3.** (a) Kontaktan önceki, (b) kontaktan sonraki metal/n-tipi yarıiletken kontak (omik kontak) enerji-band gösterimi

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

Metal/p-tipi doğrultucu MS kontak yapıldığında, termal denge kuruluncaya, her iki malzemenin Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar, daha yüksek enerjiye sahip metal elektronları yarıiletken içine akarlar. Şekil 2.4' de görüldüğü gibi p-tipi yarıiletkenler için elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır ve akım boşluklar tarafından oluşturulur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesi ile dengelenmek için metalden yarıiletkene elektron akışından dolayı ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar yükselir. Yasak band aralığı ( $E_g$ ) kontak sebebiyle değişmediği için ( $E_v$ ) valans band kenarı ( $E_c$ ) iletkenlik band

kenarına paralel olarak yukarı doğru kayacaktır. Yarıiletkenin elektron ilgisi de kontak sebebiyle değişmediği için yarıiletkenin vakum seviyesi de, ( $E_v$ ) valans band kenarı ve ( $E_c$ ) iletkenlik band 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 bandlarda aşağıya doğru bir bükülme meydana gelir (Şekil 2.4(b)). Yarıiletkene geçen elektronlar, metal-yarıiletken ara yüzeyinde metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluştururlar ve yarıiletkenin metale bakan sınırında boşluklarla birleşirler.



**Şekil 2.4.** Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak enerji band diyagramı (a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji-band diyagramı (b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu (Sze S.M. 1981)

Uzay yük bölgesindeki boşlukların yoğunluğu alıcıların yoğunluğuna göre nispeten çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Bu sebeple kantağın yarıiletken tarafında alıcı yoğunluğuna bağlı  $W_D$  genişlikli tüketim tabakası oluşur ve bir potansiyel engeli meydana gelir. Böylece uzay yük bölgesi iyonize olmuş negatif yük merkezleri yani alıcı atomları ile dolar. Yarıiletken tarafındaki boşluklar için oluşan bu potansiyel engel



yüksekliği, Şekil 2.4'de görüldüğü gibi  $qV_i = \Phi_s - \Phi_m$  şeklindedir. Metal tarafındaki engel yüksekliği ise;

$$\Phi'_B = E_g + \chi_s - \Phi_m \quad (2.4)$$

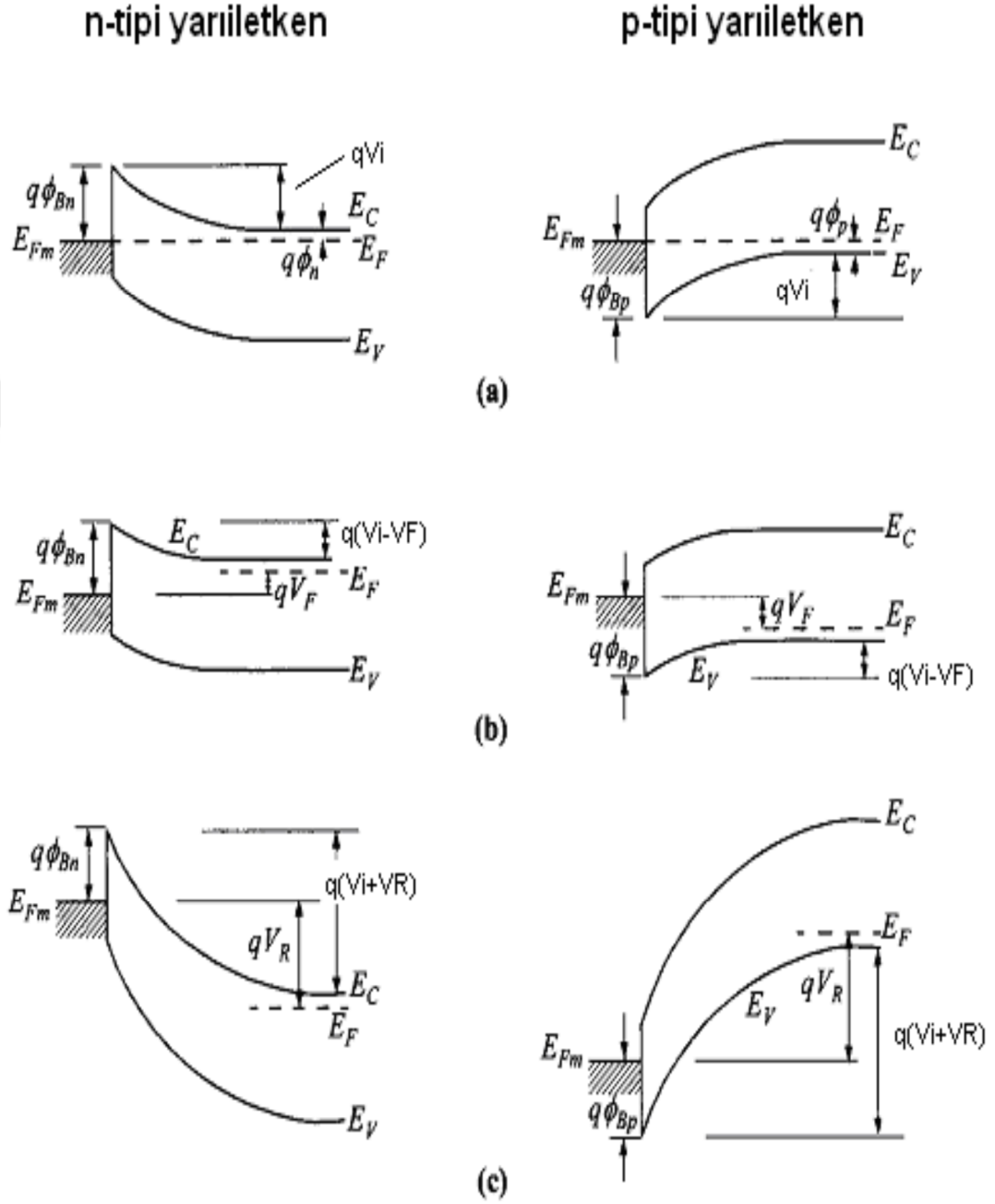
ile verilir. Eş. (2.2) ve Eş.(2.4)'den yasak enerji aralığı  $E_g$ ;

$$\Phi_B + \Phi'_B = E_g \quad (2.5)$$

olarak elde edilir.

Şekil 2.5 farklı beslem koşullarında metal/n ve p-tipi yarıiletken kontakların enerji band 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 2.5 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 karşılaşılır 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 herhangi bir gerilim düşmesi olmaz ve potansiyel engel yüksekliği uygulanan gerilimden etkilenmez. Sonuç olarak yarıiletken tarafı negatif, metal tarafı pozitif olacak şekilde kontağa bir potansiyel uygulandığı zaman, yarıiletkenden metale doğru net bir akım oluşur. Bu durumda eklem in doğru beslemde olduğu söylenir. Doğru beslem akımı, uygulanan  $V_F$  voltajı ile üstel olarak artar. Ters beslemde kontağın enerji band diyagramı ise Şekil 2.5.c'de görülmektedir. Yarıiletkene 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.



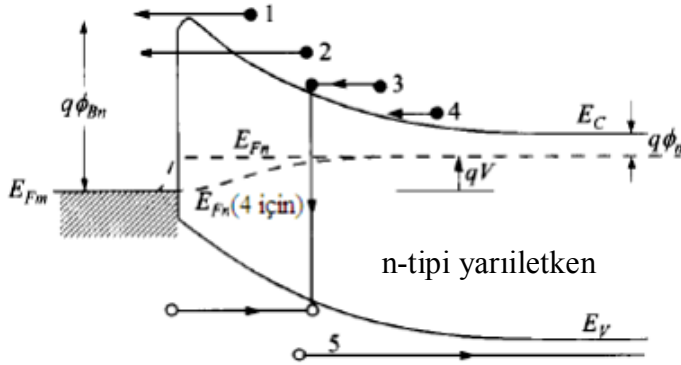
**Şekil 2.5.** Farklı beslem koşullarında n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerine metal doğrultucu kontaktarın enerji band diyagramları (a) Termal denge (b) Doğru beslem (c) Ters beslem (Sze ve Kwok 2007)

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

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi, azınlık taşıyıcıların iletimi sağladığı p-n eklemlerin aksine çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlanır. Doğru beslem altında metal-yarıiletken kontaklarda kullanılan temel akım-iletim mekanizmaları aşağıdaki gibidir (Rhoderick ve Williams 1988, Sze ve Kwok 2007):

- i. Termioyonik Emisyon Teorisi (TE)
- ii. Difüzyon Teorisi
- iii. Termioyonik Emisyon Difüzyon Teorisi (TED)
- iv. Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Termioyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE))
- v. Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- vi. Yüksüz bölgede rekombinasyon
- vii. Boşluk enjeksiyonu

Şekil 2.6’da metal/n-tipi yarıiletken yapılarda doğru beslem altında temel akım-iletim mekanizmaları gösterilmiştir.



**Şekil 2.6.** Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında 5 temel akım iletim mekanizması: (1) Termioyonik emisyon (2) Tünelleme (3) Tekrar birleşme, (4) Elektronların difüzyonu (5) Boşlukların difüzyonu (Sze S.M. 2007)

Bir Schottky kontakta hangi akım iletim kuramının geçerli olduğunu saptamak çoğu zaman kolay değildir. Akım-iletim mekanizması; yüzey durumları, uygulanan gerilim ve kontak bölgesinde oluşan elektrik alan tarafından belirlenir. Yüksek mobiliteye sahip

Si, GaAs gibi yarıiletkenler için akım iletim mekanizmasını açıklamada termoiyonik emisyon teorisi yeterli olabilir. Ancak düşük mobiliteye sahip yarıiletkenlerde meydana gelen difüzyon teorisi ve genel olarak bu iki teorisin sentezi olan termoiyonik- emisyon-difüzyon teorisini de ele alacağız.

### 2.2.1. Termoiyonik emisyon teorisi (TE)

Termoiyonik emisyon; sıcak bir yüzeyden yeterli enerjiye sahip taşıyıcıların salınması anlamına gelir. Schottky kontaklarda yeterli termal enerjiyi kazanan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden yarıiletken metale veya metalden yarıiletken geçmeleri termoiyonik emisyon (TE) olayı olarak bilinir. Termoiyonik emisyon metal/n-tipi yarıiletken yapılarında elektron, metal/p-tipi yarıiletken yapılarında boşluklar tarafından sağlanır. TE modeli Bethe tarafından ortaya konmuştur. Bethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletilmesini kabul ederek kurduğu termoiyonik emisyon teorisinin varsayımları şunlardır (Rhoderick ve Williams 1988, Sze ve Kwok 2007).

- a) Engelin yüksekliği ( $q\Phi_B$ ),  $kT/q$  enerji değerinden çok büyüktür.
- b) Isısal denge kurulmuş olup, net akımın akması bu dengeye etki etmez.
- c) Engel eğiliminin biçimi önemsiz olup, akım sadece engel yüksekliğine bağlıdır.
- d) Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır.
- e) Görüntü kuvvetlerinin (image force) etkisi ihmal edilmektedir.

Bu varsayımlardan dolayı, engel deseninin (profilinin) şekli önemsizdir ve akım akışı yalnızca engel yüksekliğine bağlıdır. Yarıiletken metale doğru olan akım yoğunluğu, engel potansiyelini aşmak için yeterli enerjiye sahip elektron dağılımının enerjisine ve yönelimine bağlı olarak verilir. Yarıiletken metale doğru olan akım yoğunluğu  $J_{sm}$ , potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızı ile ifade edilir.  $n(E)$  enerji dağılım fonksiyonu olarak durum yoğunluğu olmak üzere (Kwok 1995);

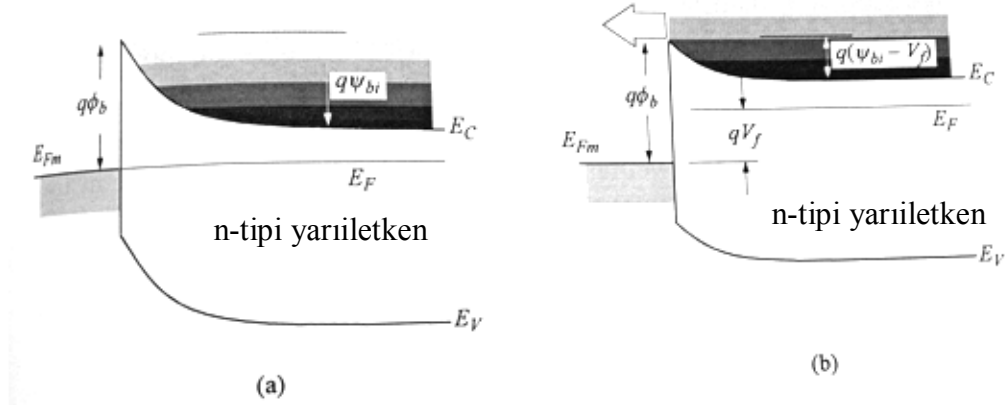
$$n(E) = 4\pi \left( \frac{2m^*}{h^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_C} \exp \left[ \frac{-(E - E_F)}{kT} \right] \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada;  $E - E_C$  iletkenlik bandının üzerindeki enerjiler olup;

$$E - E_C = \frac{1}{2} m^* (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (2.7)$$

ile verilir.

İfadedeki  $v_x^2$ ,  $v_y^2$  ve  $v_z^2$  elektronun hız bileşenleridir. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi doğru beslem altındaki diyotta potansiyel engeli uygulanan gerilime bağlıdır.



**Şekil 2.7.** Termiyonik emisyon akımı için Schottky bariyer diyot (a) Denge durumu (b) Doğru beslem altında

İletkenlik bandındanki elektronlardan;

$$\frac{1}{2} m^* v_x^2 \geq q(\psi_{bi} - V_f) \quad (2.8)$$

koşulunu sağlayan elektronlar engeli aşarak metale doğru akabilirler. İfadede elektronun sadece x doğrultusundaki hız bileşeni ele alınmıştır. Çünkü  $v_x$  hız bileşeni ara yüzeye

dik olup akım doğrultusundaki bileşendir. Diğer x ve y bileşenlerinin akıma katkısı yoktur.

Bu durumda yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu  $J_{s \rightarrow m}$ ,

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{\frac{1}{2}m^*v_x^2=q(\psi_{bi}-V_f)}^{\infty} qv_x n(E) dE \quad (2.9)$$

ile verilir. Bu ifadenin integrali alınır, metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda yarıiletkenden metale geçen elektronlar için akım denklemi;

$$J_{s \rightarrow m} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left( \frac{-q\Phi_b}{kT} \right) \exp\left( \frac{qV_f}{kT} \right) \quad (2.10)$$

olarak elde edilir. Burada  $m^*$  taşıyıcının etkin kütlesi,  $k$  Boltzmann sabiti,  $h$  ise Planck sabitidir. Akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left( \frac{-q\Phi_b}{kT} \right) \exp\left( \frac{qV_f}{kT} \right) \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlikteki  $A^*$  Richardson sabiti olup etkin kütlenin bir fonksiyonudur. Richardson sabiti aşağıdaki gibidir:

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.12)$$

Metalden yarıiletkene doğru zıt yönde elektron akımı ise engel yüksekliğinin aynı kalmasından dolayı uygulanan gerilimden etkilenmez. Yani bu zıt yöndeki akımı engel yüksekliği belirler. Böylece zıt yöndeki akım yoğunluğu denge durumunda ( $V = 0$ ), yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğuna eşittir. Metalden elektrona olan zıt yönlü akım, Eş. (2.11)  $V = 0$  için düzenlenirse;

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.13)$$

olarak elde edilir. Toplam akım yoğunluğu ise Eş.(2.11) ve Eş.(2.13) denklemlerinin toplanmasıyla;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

olarak elde edilir.

Burada  $A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right)$  terimi, doyum akım yoğunluğudur ve  $J_0$  ile gösterilir.

Böylece toplam akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_n = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

şeklinde yazılabilir.

### 2.2.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon genel anlamda yüksek yoğunluklu bölgeden düşük yoğunluklu bölgeye madde geçişidir. Metal–yarıiletken yapılar için difüzyonu aralarında yük yoğunluk farkı bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçişleri olarak tanımlayabiliriz. Düşük mobiliteye sahip yarıiletkenlerde akım iletim mekanizması difüzyon teorisi ile açıklanabilir. Schottky tarafından tanımlanan difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar aşağıdaki gibidir (Sze ve Kwok 2007):

- Engel yüksekliği  $kT$ 'den çok büyüktür.
- Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi hesaba katılır.

-  $x = 0$  ve  $x = W_D$ 'deki taşıyıcı konsantrasyonları termal denge değerlerine sahiptirler ve akımdan etkilenmezler.

-Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Bu kabuller doğrultusunda tüketim bölgesindeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılır. Akım yoğunluğu denklemi metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_e = q \left[ n(x) \mu_e E(x) + D_e \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.16)$$

ile verilir. Burada  $n(x)$  elektron yoğunluğu,  $\mu_e$  elektron mobilitesi,  $E(x)$  Schottky bölgesindeki elektrik alanı ve  $D_e$  elektron difüzyon sabitidir. Mobilitayı difüzyon katsayısına bağlayan ifade;

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT}{q} \quad (2.17)$$

ile verilir. Akım yoğunluğu ifadesindeki  $E(x)$ 'i;

$$E(x) = -\frac{\partial V(x)}{\partial x} \quad (2.18)$$

şeklinde yazabiliriz. Eş.(2.17) ve (2.18)'i Eş.(2.16)'da yerine yazıp, ifadeyi düzenlersek;

$$J_x = qD_e \left[ \left( \frac{-qn(x)}{kT} \right) \left( \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.19)$$

elde edilir. Bu denklemin çözümünden difüzyon akımı ifadesi;

$$J_x = J_D \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$



ile verilir. Burada  $J_D$  doyum akım yoğunluğu olup,

$$J_D = \left( \frac{q^2 N_C D_e}{kT} \right) \left[ \frac{2qN_D (\psi_{bi} - V)}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left( \frac{-q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $N_C$  iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu,  $\psi_{bi}$  difüzyon potansiyeli,  $N_D$  donör yoğunluğu,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Görüldüğü gibi termioyonik emisyon ve difüzyon teorisinden elde edilen akım yoğunluğu ifadeleri birbirine çok benzemektedir. Bununla birlikte difüzyon teorisinin doyum akım yoğunluğu  $J_D$ , uygulanan gerilime bağlı olup sıcaklık hassasiyeti TE'deki doyum akım yoğunluğuna göre daha azdır (Sze ve Kwok 2007).

### 2.2.3. Termioyonik emisyon-difüzyon teorisi

Yukarıda bahsedilen Termioyonik Emisyon Teorisi ve Difüzyon Teorisi Crowell ve Sze tarafından sentezlenerek Termioyonik Emisyon Difüzyon Teorisi geliştirilmiştir (Sze ve Kwok 2007). Teori metal-yarıiletken 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. Termioyonik emisyon difüzyon teorisine göre elektronların MS ara yüzeyinde optik fononlarla etkileşimsiz potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak Richardson sabiti ( $A^*$ ), etkin Richardson sabiti ( $A^{**}$ ) olarak değişir. Buna göre en genel akım-gerilim (I-V) ifadesi,

$$J = J_0 \left( \exp\left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.22)$$

ile verilir. Burada T sıcaklık ve  $J_0$  doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.23)$$

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

$$A^{**} = A^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.24)$$

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  $A_{etk}$  alınır.

$$A_{etk} = A^{**} \exp\left[\frac{-4\pi\delta}{h(2m^* \chi)^{1/2}}\right]^{1/2} \quad (2.25)$$

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

$$J = J_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (2.26)$$

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

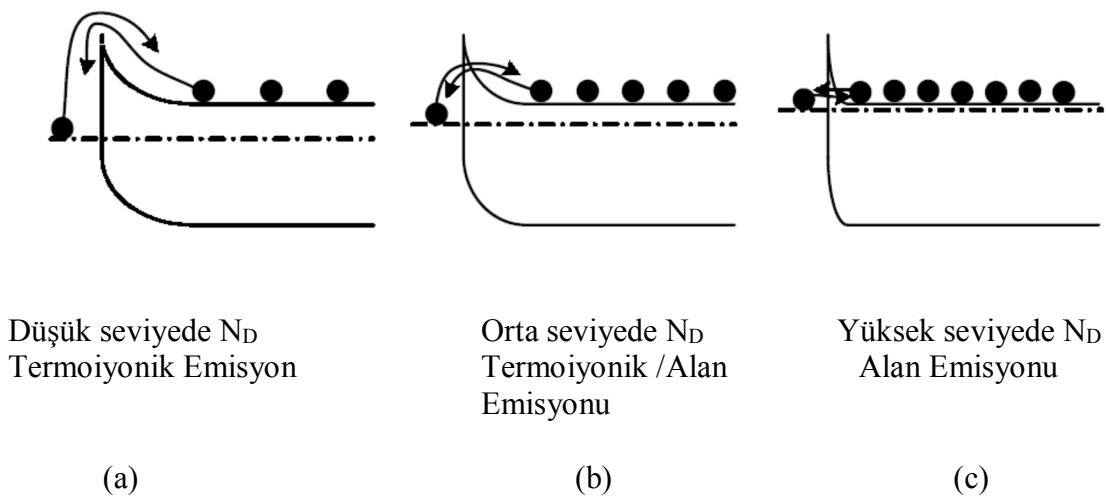
$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[ \frac{\epsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.27)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde, ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. 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.

#### 2.2.4. Engel boyunca tünelleme

Metal-yarıiletken yapılarda bir diğer akım iletim mekanizması da kuantum mekanişel tünellemedir. Tüketim tabakasının genişliği donör yoğunluğuna bağlı olup,  $N_D^{-1/2}$  ile orantılıdır. Buna göre aşırı katkılı yarıiletkenlerde tüketim tabakası genişliği oldukça sığ olur. Bu durumda metal-yarıiletken kontaklarda taşıyıcılar metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale tünelleme yapabilirler. Şekil 2.8'de metal/n-tipi yarıiletken yapılarda iletim mekanizmaları görölmektedir. Şekil 2.8'de göröldüğü gibi az katkılı yarıiletkenler için ( $N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) termoiyonik emisyon (TE) hakim olup termal olarak yeterince uyarılan elektronlar engeli aşarlar. Orta seviyede katkılı yarıiletkenler için ( $10^{17} < N_D < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) termoiyonik alan emisyonu (TAE) baskındır. Taşıyıcılar yine termal olarak uyarılır ve engel genişliği tünelleme oluşması için yeterince sığdır. Aşırı katkılı yarıiletkenler ( $N_D > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) için ise alan emisyonu baskındır. Engel genişliği iletkenlik bandının tabanındaki elektronların metale tünelleme yapması için yeterince sığdır (Schroder 1990).



**Şekil 2.8.** Metal/n-tipi yarıiletken kontakta akım iletim mekanizmalarının katkılama konsantrasyonuna bağlılığı. Elektron akımı oklarla belirtilmiştir (Schroder 2006)

Bu mekanizmaların oluşmasında donör yoğunluğu gibi sıcaklığın da önemi büyüktür. Bu durumda termoiyonik emisyon, alan emisyonu ve termoiyonik alan emisyonu oluşma koşullarını daha detaylı ele alalım. Termoiyonik emisyon akım yoğunluğu denklemini yukarıda;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) - 1 \right] \text{ şeklinde elde edilmiştir.}$$

Ara yüzey direnci  $\rho_i$  ohm  $\text{cm}^2$  olmak üzere;

$$\rho_i = \frac{\partial V}{\partial J} \Big|_{V=0} \quad (2.28)$$

olarak tanımlanır. Eş.(2.28)'den termoiyonik emisyon akım yoğunluğu ifadesi kullanılarak ara yüzey direnci TE için;

$$\rho_i(TE) = \rho_1 \exp(q\Phi_B / kT) \quad (2.29)$$

olarak elde edilir. Burada  $\rho_1$ ;

$$\rho_1 = \frac{k}{qA^*T} \quad (2.30)$$

ile verilir. Termoiyonik alan emisyonu (TAE) için  $\rho_i$ ;

$$\rho_i(TAE) = C_1 \rho_1 \exp(q\Phi_B / E_0) \quad (2.31)$$

ve son olarak alan emisyonu (AE) için  $\rho_i$  ise;

$$\rho_i(AE) = C_2 \rho_1 \exp(q\Phi_B / E_{00}) \quad (2.32)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada  $C_1$  ve  $C_2$ , donör yoğunluğu  $N_D$ , sıcaklık  $T$  ve engel yüksekliği  $\Phi_B$  'nin fonksiyonlarıdır.  $E_{00}$  enerjisi ise tünelleme olayının karakteristik enerjisi olup tünellemeyi karakterize eder.  $E_{00}$  karakteristik enerjisi;

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_D}{K_s \epsilon_0 m^*}} \quad (2.33)$$

ile verilir. İfadedeki etkin kütle  $m^*$ , tünelleme etkin kütesidir. Eş. (2.31)'deki  $E_0$  ile Eş. (2.32)'deki  $E_{00}$  arasındaki ilişki;

$$E_0 = E_{00} \coth(E_{00} / kT) \quad (2.34)$$

olarak verilir. Eş. (2.33) ile verilen  $E_{00}$  ifadesi Eş.(2.32)'de yerine yazılırsa;

$$\rho_i(AE) = C_2 \rho_1 \exp((q\Phi_B) \left( \frac{4\pi}{qh} \sqrt{\frac{K_s \epsilon_0 m^*}{N_D}} \right)) \quad (2.35)$$

elde edilir. Bu ifadeyi  $C_3$  bir diğer sabit olmak üzere;

$$\rho_i(AE) = C_2 \rho_1 \exp(C_3 / \sqrt{N_D}) \quad (2.36)$$

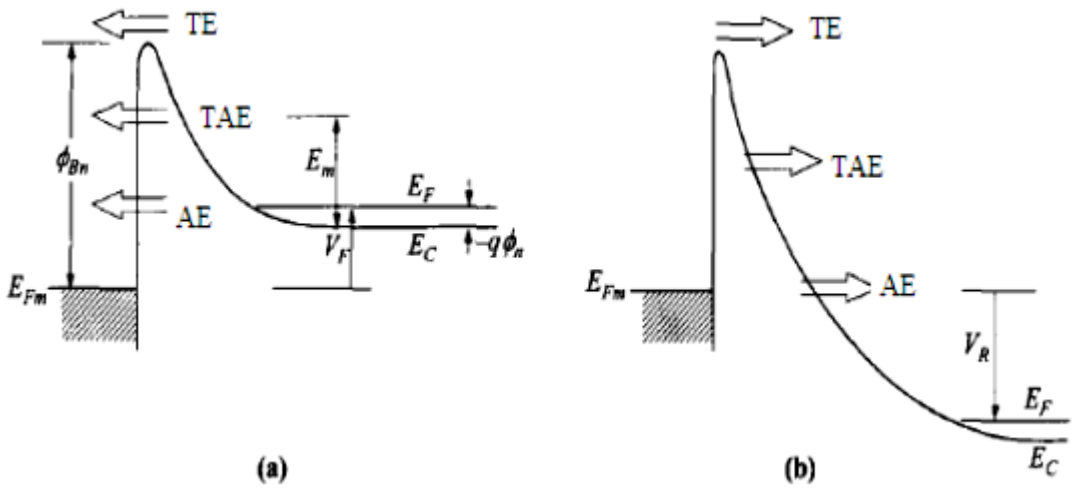
olarak yazabiliriz. Eş. (2.36)'nın logaritması alınırsa;

$$\log[\rho_i(AE)] \sim \frac{1}{\sqrt{N_D}} \quad (2.37)$$

elde edilir. Görülüyor ki ara yüzey direnci donör yoğunluğuna oldukça bağlıdır. Donör yoğunluğu  $N_D$  ne kadar yüksekse ara yüzey direnci de o kadar düşük olacaktır.

$kT/E_{00}$  oranı TE, TAE ve AE mekanizmalarını belirleyici bir orandır. Hafifçe katkı yarıiletkenler için  $kT/E_{00} \gg 1$  olur ve bu durumda termioyonik emisyon baskındır. Aşırı katkı yarıiletkenler için  $kT/E_{00} \ll 1$  olur ve bu durumda da tünelleme baskındır.  $kT/E_{00} \approx 1$  durumunda ise termioyonik emisyon ile alan emisyonunun kombinasyonu olan termioyonik alan emisyonu hakimdir (Schroder 1990).

Şekil 2.9’da akım iletim mekanizmaları görülmektedir. (1)Termioyonik emisyon (TE), (2) fermi seviyesi yakınında alan emisyonu (AE) (tünelleme), (3) termioyonik emisyon ile alan emisyonu arasındaki enerjilerde termioyonik alan emisyonu (TAE) gerçekleşmektedir.



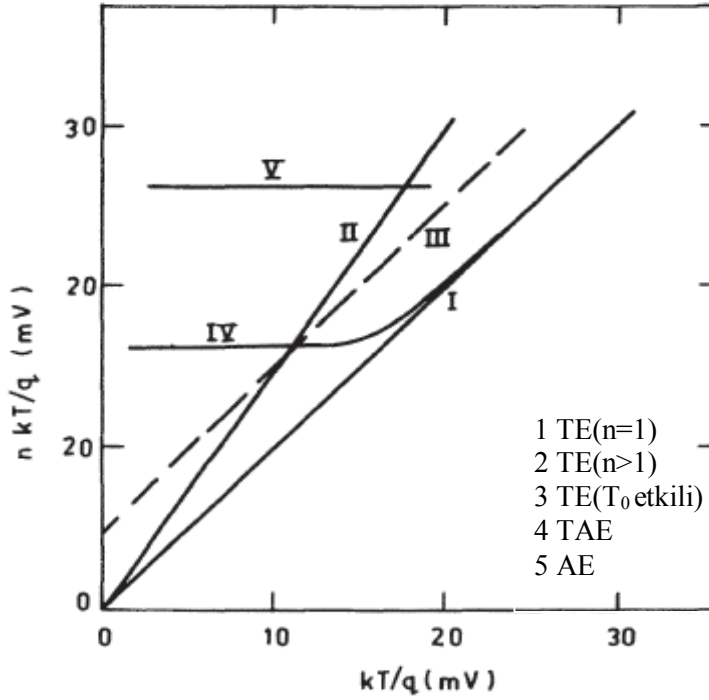
**Şekil 2.9.** Metal/n-tipi dejenere yarıiletken kontak için TE, AE, TAE. (a) Doğru beslem (b) Ters beslem. TE: Termioyonik Emisyon. TAE: Termioyonik Alan Emisyonu AE: Alan emisyonu (Sze ve Kwok 2007)

### 2.2.5. $T_0$ 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 termioyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa, idealite faktörü n sıcaklığa bağlıdır.  $T_0$  etkili J-V karakteristiği,

$$J = A^{**}T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_B}{k(T+T_0)}\right] \left\{ \exp\left[\frac{qV}{k(T+T_0)}\right] - 1 \right\} \quad (2.38)$$

şeklinde ifade edilir (Sharma 1984, Rhoderick ve Williams 1988). 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 2.10'da 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 1984).



**Şekil 2.10.** Farklı akım iletim mekanizmalarını belirtmek için  $nkT/q-kT/q$  grafiği (Sharma 1984)

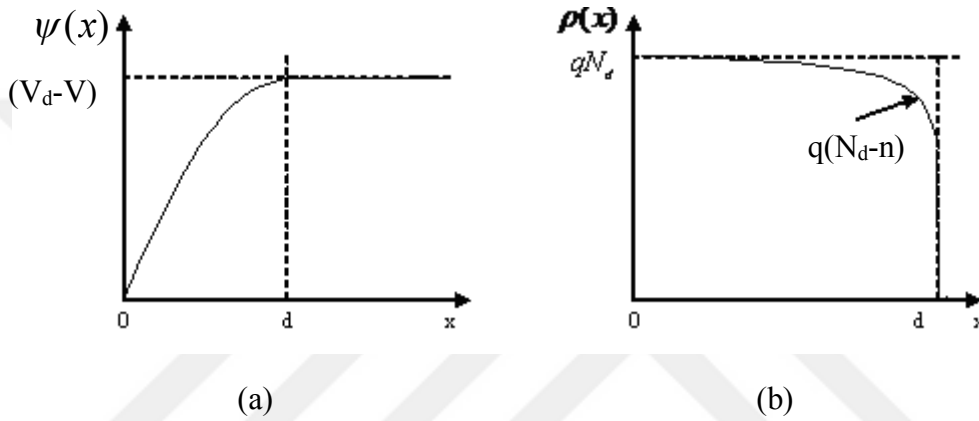
### 2.3. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi

Metal yarıiletken doğrultucu kontaklarda yük taşıyıcılarının metal-yarıiletken ara yüzeyindeki dağılımı sonucu yüksek dirençli bir tüketim tabakası oluşur. Tüketim tabakası genişliği ( $W_D$ ) uygulanan dış gerilimle değişir. Bu tür bir MS kontak bir kondansatöre benzer ve ara bölgede bir kapasitans oluşur. Bu ara bölgede sınır şartları

kullanılarak Poisson denkleminin çözülmesiyle engel yüksekliği ve kapasitans bulunabilir. Doğrultucu bir metal yarıiletken kontakta çözüm kolaylığı açısından akımın bir doğrultuda geçtiği kabul edilerek potansiyel dağılımı,

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} \quad (2.39)$$

olarak ifade edilir (Schroder 1990, Sze and Kwok 2007).



**Şekil 2.11.** Engel genişliği  $d$  olan metal/n-tipi yarıiletken kontakta (a)  $\psi(x)$  potansiyel fonksiyonunun  $x$ 'e göre değişimi, (b)  $\rho(x)$  uzay yük yoğunluğu fonksiyonunun  $x$ 'e göre değişimi

Şekil 2.11'e göre sınır şartlarını yazarsak;

$$x = 0 \text{ da} \quad \psi_{(0)} = 0 \quad (2.40a)$$

$$x = d \text{ de} \quad \psi_{(d)} = (V_d - V) \quad (2.40b)$$

$$x > d \text{ için} \quad \frac{\partial \psi(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.40c)$$

olur.  $\rho(x)$  uzay yükü yoğunluğunun verici ( $N_d$ ) ve iletim bandındaki elektron yoğunluğu ( $n$ ) farkına eşit olduğu düşünülürse;



$$\rho(x) = q(N_d - n) \quad (2.41)$$

eşitliği yazılabilir.  $\rho(x)$  için sınır şartlarını Şekil 2.11'i dikkate alarak yazarsak;

$$0 \leq x \leq d' \text{ de} \quad \rho(x) = qN_d \quad e(V_d - V) \gg kT \text{ ise}; \quad (2.42a)$$

$$x \geq d' \text{ de} \quad \rho(x) = 0 = q(N_d - n) = 0 \Rightarrow n = N_d \quad (2.42b)$$

elde edilir.  $\rho(x) = qN_d$  ifadesi vericilerin tamamının oda sıcaklığında iyonlaştığı anlamına gelir.  $0 < x < d$  bölgesindeki elektrik alanı, Eş.(2.42a)'yı Eş.(2.39)'da yerine yazarak aşağıdaki gibi elde edebiliriz:

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = -\frac{qN_d}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.43a)$$

$$E(x) = \frac{\partial \psi(x)}{\partial x} = -\frac{qN_d}{\epsilon\epsilon_0} (x - d) \quad (2.43b)$$

şeklinde elde edilir. (2.43b) ifadesinin de integrali alınır, metal/n-tipi yarıiletken yapı için potansiyel ifadesi;

$$\psi(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (2.44)$$

olarak elde edilir.

Eş.(2.40b) sınır şartından  $x = d \Rightarrow \psi(x) = V_d - V$  ifadesi Eş.(2.44)'de yerine yazılırsa; Schottky bölgesi genişliği  $d$ ;

$$V_d - V = -\frac{qN_d}{\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{2} d^2 - d^2 \right) \quad (2.45a)$$

$$V_d - V = -\frac{qN_d d^2}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{qN_d d^2}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.45b)$$

$$V_d - V = \frac{qN_d d^2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (2.45c)$$

$$d = W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qN_d}(V_d - V)} \quad (2.46)$$

olarak elde edilir. Eşitlikten görüldüğü gibi Schottky engel genişliği  $N_d^{-1/2}$  ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla Schottky engel genişliği safsızlık yoğunluğu ile değiştirilebilir.

Tüketim tabakasındaki uzay yükü,

$$Q = qN_d W_d \quad (2.47)$$

ile verilir. Eş.(2.46), Eş.(2.47)'de yerine yazılırsa;

$$Q = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 qN_d (V_d - V)} \quad (2.48)$$

elde edilir. Kapasite değeri ise;

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (2.49)$$

olduğuna göre;

$$C = \frac{\epsilon_s}{W_d} = \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_d}{2(V_d - V)}} \quad (2.50)$$

olarak elde edilir. Eş.(2.50)'den Schottky kapasitesinin düz beslemde uygulanan gerilimle arttığı, ters beslemde azaldığı ise görülmektedir. Schottky kapasitesi belirli bir ters beslem geriliminden sonra;

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0}{d} \quad (2.51)$$

geometrik kapasite değerine ulaşır. Eş.(2.50);

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d - V)}{q\epsilon\epsilon_0 N_d} \quad (2.52a)$$

veya

$$-\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 N_d} \quad (2.52b)$$

olarak yazılabilir. Eş.(2.52b)'den donör yoğunluğu ifadesi;

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{dV}{d(1/C^2)} \right) \quad (2.53)$$

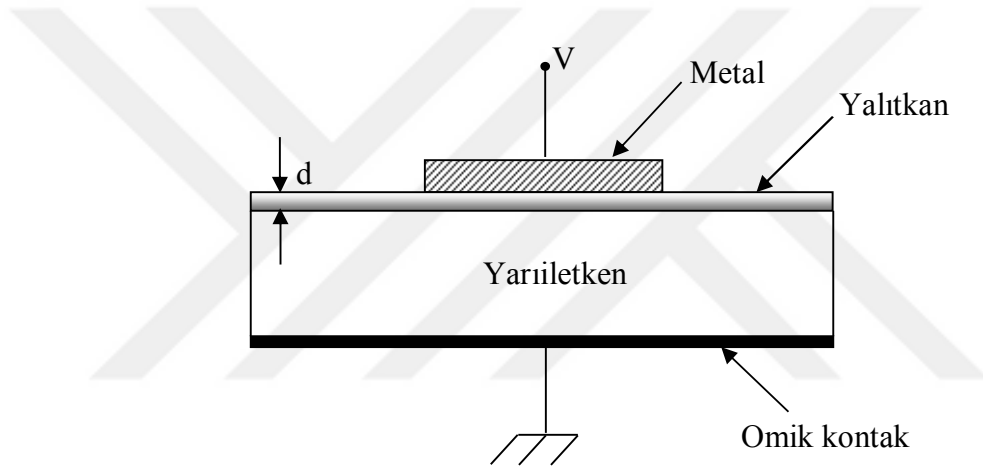
olarak elde edilir.  $N_d$  sabit olmak koşuluyla, Eş.(2.52a)'ya göre  $1/C^2$  'nin  $V$ 'ye karşı çizilen grafiği doğrusaldır ve eğiminden  $N_d$  'yi bulabiliriz. Eğer  $N_d$  sabit değilse, Eş.(2.52b) ifadesinden değişen kapasiteye bağlı olarak katkı eğilimini belirleyebiliriz.

#### 2.4. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken (MIS) Yapılar

Metal/yarıiletken arasında bazen kendiliğinden, bazen de deneysel çalışmalarla yalıtkan bir tabaka oluşur. Bu yapılar metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapılar olarak adlandırılır. Bu yapılar yarıiletken yüzeylerini, diğer bir deyimle yüzey durumlarını incelemek için çok daha kullanışlıdır. Tüm yarıiletken aygıtların kararlılık ve güvenilirliklerine yönelik

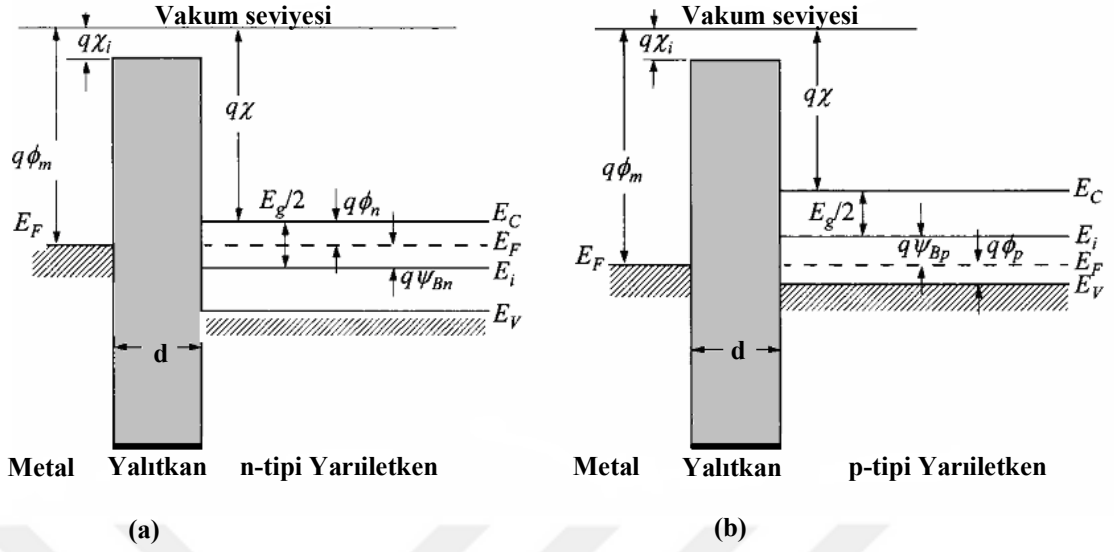
çoğu pratik problem aygıt yüzey koşulları ile yakından ilgilidir. MIS yapıların yardımıyla yüzey koşulları fiziğinin anlaşılması aygıt uygulamalarında büyük önem taşımaktadır.

MIS yapılar yarıiletken bir alt tabaka, bu alt tabakaya kontak yapılmış bir omik kontak, yarıiletken üzerinde bir yalıtkan tabaka ve onun da üzerinde yer alan bir metal kontaktan oluşur. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapı Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Burada  $d$  yalıtkan tabakanın kalınlığı,  $V$  ise metal üzerine uygulanan voltajdır. N tipi yarıiletken için metal kısım omik kontağa göre pozitif olduğu zaman doğru beslem, metal kısım omik kontağa göre negatif olduğunda ise ters beslem oluşur.



**Şekil 2.12.** Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapı

İdeal bir MIS yapıya voltaj uygulanmadan önceki enerji band diyagramı n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için Şekil 2.13’de görülmektedir.



**Şekil 2.13.** İdeal bir MIS yapının denge durumunda ( $V = 0$ ) enerji band diyagramı (a) n-tipi yarıiletken (b) p-tipi yarıiletken

Burada;

$\phi_m$  : Metalin iş fonksiyonu

$\chi$  : Yarıiletkenin elektron yakınlığı

$\chi_i$  : Yalıtkanın elektron yakınlığı

$E_v$  : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

$E_c$  : İletkenlik bandı enerji seviyesi

$E_F$  : Fermi enerji seviyesi

$E_i$  : Saf fermi enerji seviyesi :  $(E_c - E_v)/2$

olarak tanımlanır. İdeal bir MIS yapı aşağıdaki gibi tanımlanır (Sze and Kwok 2007):

- Herhangi bir beslem altında yarıiletkende ve yalıtkana bitişik metal yüzeyinde yükler mevcut olabilir fakat eşit ve zıt işaretlidir. Ara yüzey tuzakları ve her tür okside yük bulunmaz.
- Herhangi bir dc beslem altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez ve yalıtkanın direnci sonsuzdur.

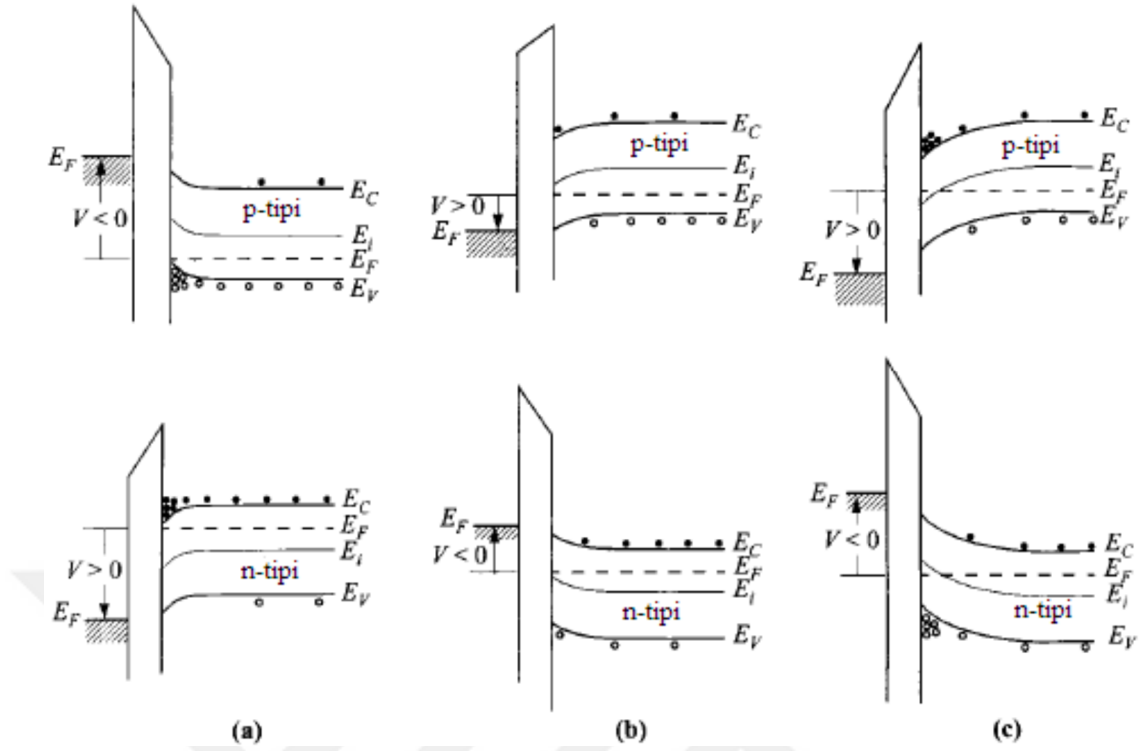
Ayrıca denge durumunda metalin iş fonksiyonu  $\phi_m$  yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\phi_s$  arasındaki farkın ( $\phi_{ms} = 0$ ) olduğu kabul edilir. Bu kabuller doğrultusunda ve Şekil 2.13 yardımıyla aşağıdaki eşitlikleri;

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \text{ (n-tipi yarıiletken için)} \quad (2.54a)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left( \chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \text{ (p-tipi yarıiletken için)} \quad (2.54b)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada  $E_g$  yarıiletkenin yasak enerji aralığı,  $\psi_{Bn}$ ,  $\psi_{Bp}$ ,  $\phi_n$ ,  $\phi_p$  fermi potansiyelleridir.  $\psi_{Bn}$  ve  $\psi_{Bp}$  fermi enerji seviyesi ile başlangıçtaki enerji seviyesi ( $E_i$ ) arasındaki enerji farkı;  $\phi_n$  ve  $\phi_p$  ise fermi enerji seviyesi ile band kenarı arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır.

İdeal bir MIS yapıya pozitif veya negatif voltaj uygulandığında temel olarak 3 durum meydana gelebilir. Bunlar yığılma (accumulation), tüketim (depletion) ve tersinim (inversion) durumlarıdır (Şekil 2.14.). Şekil 2.14'de üstte yer alan p-tipi yarıiletken içeren yapı göz önüne alınarak bu 3 durumu açıklayalım. Benzer durumlar n-tipi yarıiletken için de elde edilebilir.



**Şekil 2.14.**  $V \neq 0$  durumunda ideal MIS diyodun enerji-band diyagramı (a) yığılma (accumulation) (b) tüketim (depletion) (c) tersinim (inversion) durumları (Sze ve Kwok 2007)

#### 2.4.1. Yığılma (accumulation)

Metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken (MIS) yapısının metal elektroduna negatif gerilim ( $V < 0$ ) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan boşlukları yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir (Şekil 2.14.a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ( $E_F - E_V$ ) bağlı olduğundan, band bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan boşlukların yığılmasına sebep olur. Değerlik bandının yarıiletken ara yüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı, iletkenlik bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların ara yüzeyde birikmelerinden dolayı "yığılma" adı verilir. Bu durumda ara yüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle  $C_{SC} \rightarrow \infty$  dolayısıyla  $C = C_{0x}$  olur.

### 2.4.2. Tüketim (depletion)

Metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken (MIS) yapısının metal elektroduna küçük bir pozitif gerilim ( $V > 0$ ) uygulandığı zaman yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken ara yüzeyindeki boşlukları yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki boşluk yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki boşluk yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bandlar aşağıya doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen  $W$  genişliğinde bir bölgede, boşlukların azaldığı bir tüketim bölgesi oluşur. Boşlukların azaldığı bu bölgeye tüketim bölgesi, bu olaya da "tüketim" olayı denir (Şekil 2.14.b).

### 2.4.3. Tersinim (inversion)

Metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken (MIS) yapısının metal elektroduna daha büyük bir pozitif gerilim ( $V \gg 0$ ) uygulandığı zaman bandlar aşağı doğru bükülür. Saf durumdaki enerji seviyesi ( $E_i$ ), Fermi enerji seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar daha da artmaya başlar. Elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır. Şekil 2.14.c'de enerji-band durumu gösterilmiştir. Bu durumda MIS kapasitesini, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin ac sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu ac sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasite artan gerilimle yalıtkan kapasite değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasite  $C_{min}$  'da kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden-birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin  $C_{min}$  'un altında değerler almasına sebep olur.



## 2.5. İletken Polimerler

Organik materyaller genel olarak küçük moleküllü organik materyaller ve büyük moleküllü organik materyaller olarak sınıflandırılabilir. Küçük moleküllü organik materyaller her molekülü sadece tekrar eden birkaç birim veya mer içeren yapılar olup oligomer olarak adlandırılırlar. Büyük moleküllü organik materyaller ise her bir molekülü tekrar eden çok sayıda mer içeren yapılardır. Bu yapılar da polimer olarak adlandırılır. Tipik bir polimer molekülü yüzlerce hatta binlerce mer içerir (Kitai 2011).

Polimer, monomer denen küçük moleküllü yapıların polimerizasyon tepkimesi sonucu yan yana gelerek oluşturdukları büyük mol kütleli, uzun zincirli yapılara denir. 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 oldukları 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 (Aydın 2012).

İletken polimerlerle ilgili çalışmalar 1950'lerde başlamış, bu yapıların elektronik materyal olarak ele alınması 1970'lerden itibaren olmuştur. 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 (Aydın 2012). Günümüzde ise elektronik aygıt üretimi için gerekli temel özelliklere sahip bu yapılar organik yarıiletkenler ailesini oluşturmaktadırlar (Kitai 2011).

İletken polimerler üstün özelliklere sahip molekülüdür. Bu açıdan çok çeşitli kullanım alanlarında ihtiyaç duyulan malzemelerdir. Polipirol, polianilin, politiyofen, polifuran, poli(N-vinil karbazol) gibi çok sayıda polimer iletkenlik özelliklerinden dolayı bazıları toz, süspansiyon, film veya levhalar halinde üretilip yarı iletken çipler, entegre devreler, hafif pil bileşenleri, sensörler, antistatik kaplama, antistatik ambalaj ve paketleme malzemelerinin yapımında sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca transistör, diyot, düz televizyon

ekranı ve güneş ışığı paneli türü malzemelerin yapımında da uygundur. Tek bir olumsuz nokta ise iletken polimerlerin erimez ve çözünmez oluşları, istenilen amaca yönelik olarak şekillendirilememeleridir (Saçak 2004).

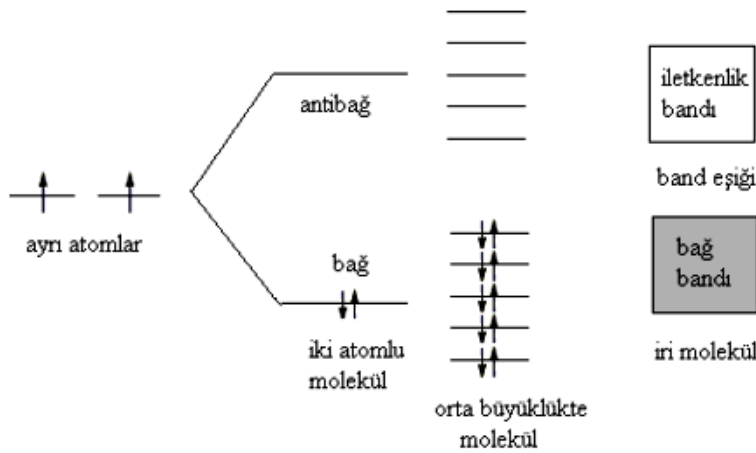
Bu materyallerin özelliklerini anlamak için moleküler yapılarına bakmak ve elektron ve boşluklar için hem enerji seviyelerinin orijini anlamak hem de iletim mekanizmalarını anlamak gerekir. Bu yapıları belirgin özelliklerini vurgulamak için inorganik materyallerle karşılaştıracamız. İletken polimerleri yarıiletken aygıtlarda kullanmak için özelliklerini ortaya koymamız gereklidir.

İletken polimerlerde elektronik iletkenlik kuramsal yaklaşımlardan biri olan band kuramı ile açıklanmaktadır. Bunun için öncelikle band kuramını ele alalım.

### 2.5.1. Band teorisi

Elektronik iletkenliğin açıklanmasına yönelik kuramlardan birisi olan band teorisi ile iletken, yalıtkan ve yarıiletken polimerlerde elektronik iletimin mekanizması açıklanmaktadır (Saçak 2004).

Birer elektronu bulunan benzer iki atomun bir araya gelerek oluşturduğu iki atomlu bir bileşiğin ( $H_2$ ), bağ yapmadan önceki ve bağ yaptıktan sonraki elektron enerji düzeyleri Şekil 2.15’de görülmektedir.



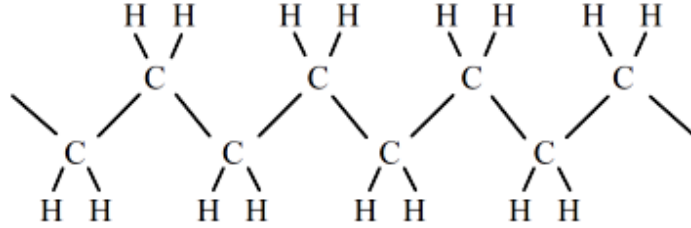
**Şekil 2.15.** Farklı büyüklükteki moleküllerin oluşumunda elektronların buldukları enerji düzeyleri (Saçak 2004)

Bağ oluşumu sırasında iki yeni enerji düzeyi ortaya çıkar. Bunlar, iki elektronun bulunduğu bağ enerji düzeyi (bağ orbitali) ve boş olan antibağ enerji düzeyidir (antibağ orbitali). Bağ enerji düzeyindeki elektronlar, ısı veya ışık etkisiyle yeterli enerjiyi alarak daha yüksek enerjili antibağ enerji düzeyine çıkabilirler. Daha karmaşık moleküller (birden fazla elektronu olan moleküller) arasında bağ oluşumu da aynı şekilde açıklanabilir. Moleküle her yeni atom katılmasında, molekülün elektronik yapısına yeni bir bağ ve antibağ enerji düzeyi eklenir. Bu durum, Şekil 2.15’de orta büyüklükteki bir molekül için gösterilmiştir. Molekül büyüklüğü arttıkça bağ orbitallerinin sayısı artar ve orbital enerji düzeyleri arasındaki fark azalır. Neticede birbirinden net ayrılmış enerji düzeyleri yerine sürekli görünümdeki bir enerji bandı oluşur. Bu banda, bağ bandı veya değerlik bandı denir. Bağ bandı içerisinde bulunan elektronlar kolayca yerlerini değiştirerek band içerisinde hareket edebilirler. Bağ bandı ve iletkenlik bandı arasındaki aralığa band eşiği (veya band aralığı), bu aralığın geçilmesi için gerekli enerjiye ise band eşik enerjisi adı verilir. Maddelerin yalıtkan, yarıiletken ve iletken şeklinde elektriksel iletkenlikleri açısından gruplandırılmasında band eşik enerjisinin büyüklüğü önemlidir (Saçak 2004).

Bağ bandı enerji düzeyleri tamamen elektronlarla dolu olduğunda elektronların bir yöne akımını sağlamak zordur. Böyle bir sistemde ısı veya ışık uyarısıyla serbest elektronlar oluşturulabilir. Yeterli enerjiye ulaşan bağ bandının en üst düzeyindeki elektronlar, band eşiğini geçerek iletkenlik bandının en alt düzeyindeki enerji seviyesine yerleşirler. Yalıtkanlarda band eşiği bu geçişe izin vermeyecek kadar geniştir. Geleneksel polimerlerin çoğu benzer davranış gösterdikleri için yalıtkanlardır. İletken polimerlerde ise band eşiği yarıiletkenlere benzer olarak metaller ile yalıtkanlar arasındaki değerlere sahiptir.

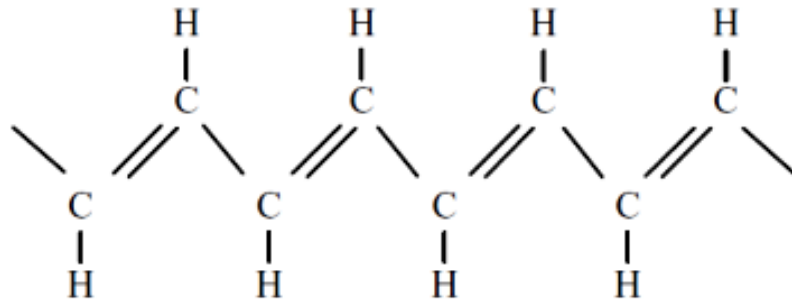
Band yapısını ortaya koyduktan sonra polietilen ve poliasetilen örnek polimerleri üzerinde band oluşumunu açıklayalım. Geleneksel polimerler doymuş yapılardan oluşmuştur. Karbon zincirindeki karbon atomlarının valans elektronları tamamen kullanılmış olup her bir karbon atomu zincirdeki diğer karbon atomuna bağlı durumdadır. Bu şekilde doymuş polimer yapıya en basit örnek polietileni verebiliriz. Polietilen yalıtkan bir polimerdir. Şekil 2.16’da polietilenin moleküler yapısı

görülmektedir. Polietilende bir karbon atomu altı elektrona sahiptir ve enerji durumları  $1s^2 2s^2 2p^2$  şeklinde doludur. Bu yapı inorganik elmas yapıdır, ancak polietilen için de uygundur. Karbon atomlarının bağ simetrisi tetrahedral yapıya çok yakındır ve bağ açısı yaklaşık  $109^\circ$ 'dir. Si yapısı da ilginç olarak bu tetrahedral yapıya benzerlik gösterir.



**Şekil 2.16.** Polietilenin moleküler yapısı. Her karbon atomu en yakın dört komşusu ile bağ yapmış durumda (Kitai 2011)

En basit iletken polimer yapıya ise poliasetileni örnek olarak verebiliriz. Bu yapı Şekil 2.17'de görülmektedir. Bu polimerde  $sp^2 p_z$  olarak ifade edilen üç en yakın komşu hibrid orbitali mevcuttur. Bu hibritleşmede  $\pi$  elektronu olarak adlandırılan yalnız tek bir elektron ile diğer üç elektron vardır. Bu diğer üç elektron en yakın komşusu üç elektronla birlikte bağ oluşumuna katılırken  $\pi$  elektronu ise serbest kalarak sarkar.  $\pi$  elektronu delokalize durumdadır. Polimerin bu şekildeki bağ oluşumuna konjuge denir.

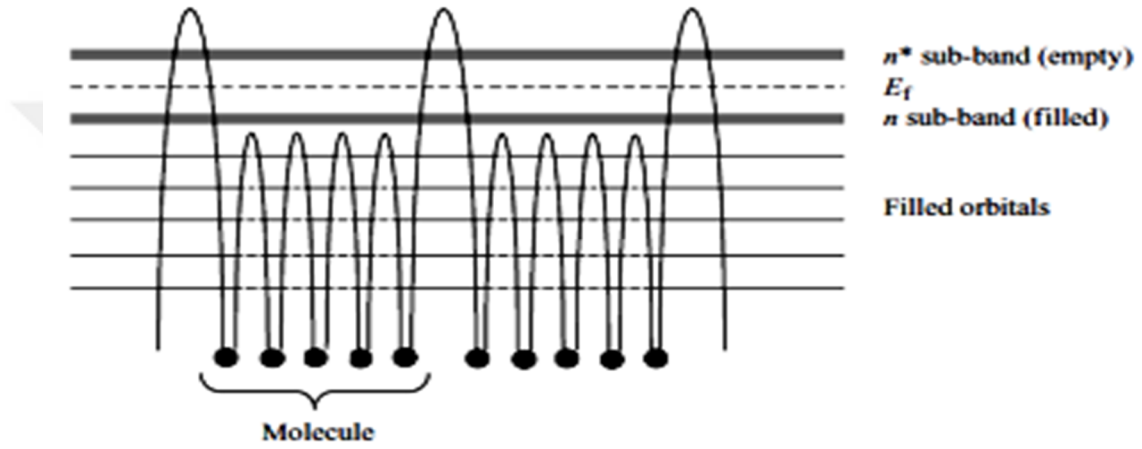


**Şekil.2.17.** Konjuge yapıya sahip en basit molekül poliasetilen (Kitai 2011)

Zincir boyunca karbon atomu kadar çok sayıda  $\pi$  elektronu meydana gelir. Zincirdeki her bir atomun  $\pi$  elektronu bütün diğer  $\pi$  elektronları ile etkileşerek enerji bandını oluşturur. Bu bandlara genel olarak  $\pi$ -alt bandları denir. Aynı zamanda  $\pi$ -alt bandları delokalize olmuş  $\pi$  elektronları içerdiğinden elektriksel iletkenliği artırır.  $\pi$  elektronları

Pauli dışarlama ilkesine göre enerji seviyelerini doldurarak enerji bandlarını meydana getirirler.

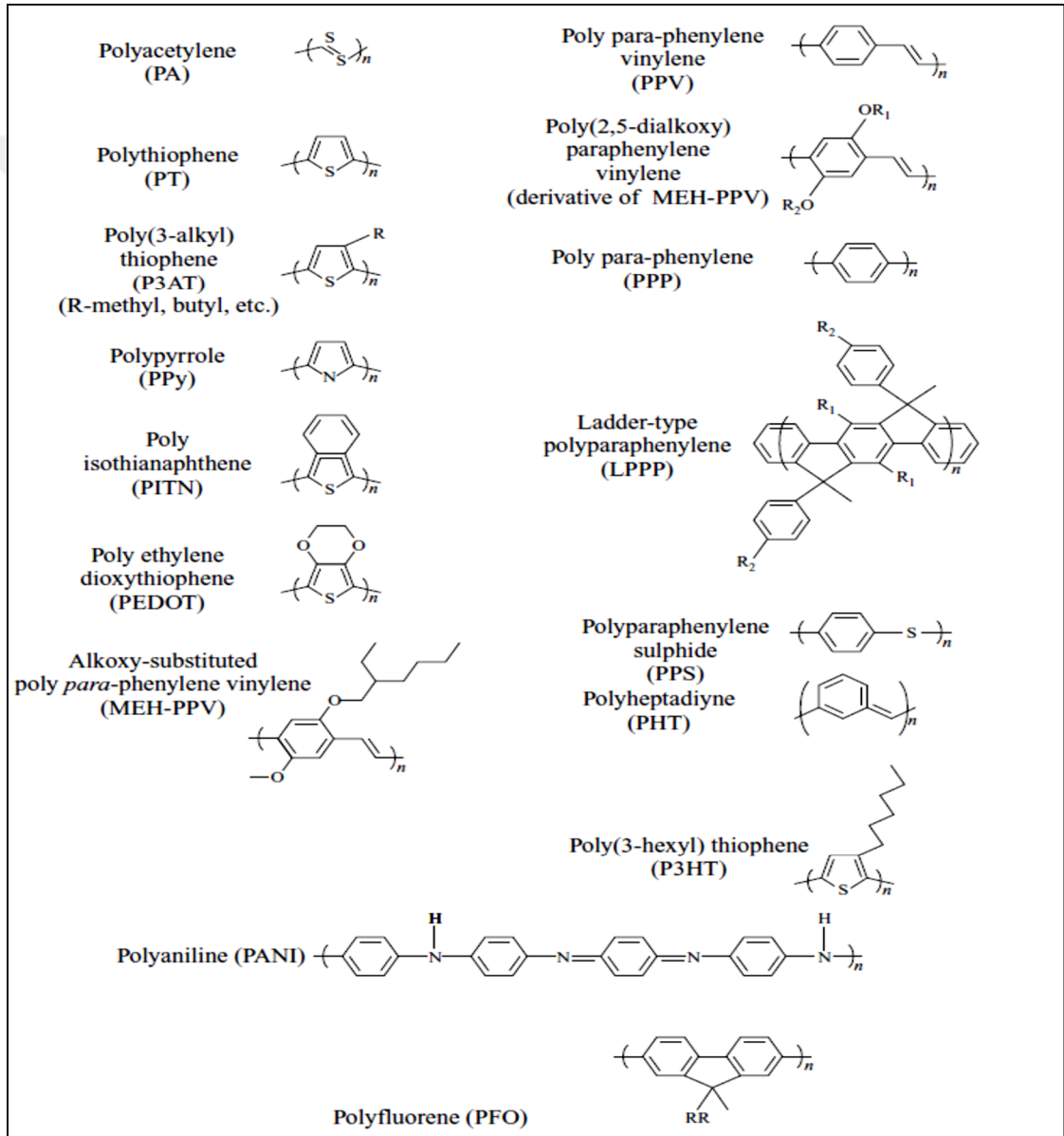
Böyle bir konjuge yapıyı  $\pi$  elektronlarının varlığında bir periyodik potansiyel olarak da ele alabiliriz. Böylece Kronig-Penny modeliyle enerji bandlarını ve oluşan yasak enerji aralığını açıklayabiliriz. Kronig-Penny modelinde tanımlanan periyodik potansiyeldeki bir periyot polimer zincirindeki 1 mer için oluşan periyodik potansiyele karşılık gelir. Şekil 2.18’de birkaç molekül içeren polimerin band diyagramı görülmektedir.



**Şekil 2.18.** Birkaç yakın organik molekülde enerji seviyeleri ve bandları (Kitai 2011)

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi molekül içi bağlar küçük potansiyel enerji bariyerlerine, moleküller arası bağlar ise büyük potansiyel enerji bariyerlerine neden olmaktadır. Molekül içi bağlar normal olarak kovalent veya konjuge bağlardır. Moleküller arası bağlar ise Wan Der Waals bağlarından zayıftır. Temel band teorisi moleküller hem de inorganik materyaller için de uygundur ve periyodisite Kronig –Penny modeli ile açıklanır. Konjuge sistemler de benzer olarak basitçe konjugasyon boyunca tek boyutlu kutuda elektron sınırlandırılmış olarak ele alınabilir.  $\pi$ -alt bandında yer alan elektronlar iletken polimerin elektriksel doğasını belirler. Şekil 2.18’de görülen  $\pi$ -alt bandında en yüksek dolu moleküler orbitale (HOMO),  $\pi^*$ -alt bandında da en düşük boş moleküler orbitale ise (LUMO) denir.  $\pi$ -alt bandındaki (HOMO) ile  $\pi^*$  alt bandındaki (LUMO) seviyesi arasındaki enerji farkına yasak enerji aralığı denir (Kitai 2011).

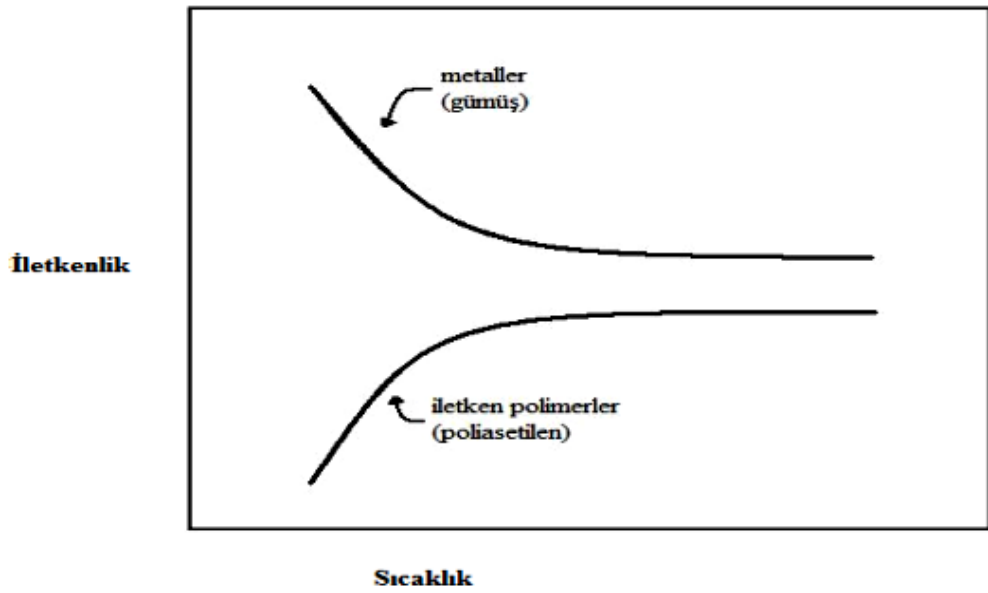
Yarıiletken özellik gösteren çok sayıda iletken polimer vardır. Bunlardan bazıları Şekil 2.19'da görülmektedir. Şekil 2.19'da poliasetilen dışında tüm moleküllerin halkalı yapıya sahip olduğu görülmektedir. Her halka beş veya altı atom içerir. En basit halkalı yapı benzen halkası olup her bir benzen halkası altı karbon atomu ve altı da delokalize olmuş  $\pi$  elektronu içerir. Grafit de yapı taşı olarak benzen halkasına sahip bir materyal olup iletkenidir. Bu yüzden iletken polimerler arasında halkalı yapıya sahip olanların iletkenlik anlamında önemli bir yeri vardır.



Şekil 2.19. İyi bilinen bazı iletken polimerlerin moleküler yapısı (Kitai 2011)

Bir polimerin makroskobik elektriksel iletkenliği hem molekül içi iletkenliğe hem de moleküller arası yük transferi kabiliyetine bağlıdır. Moleküller arası iletkenlik moleküllerin birbirine yakınlığına ve birbirileri ile olan yönelimlerine güçlü bir şekilde bağlıdır. Kristal polimerler genellikle sıkı paketlenmiş yapılarıdır. Bununla birlikte amorf veya kristal fazda olabilirler. Tipik organik yarıiletkenlerin taşıyıcı mobilite değerleri  $10^{-7} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  ile  $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerleri arasında değişkenlik gösterir. Bununla birlikte bu değerler mobilitesi  $10^3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olan inorganik Si gibi bir yarıiletkenden oldukça dūřüktür.

İletken polimerlerin sıcaklık – iletkenlik ilişkisi yarıiletken yapılara benzerlik göstermektedir. Sıcaklığın değişmesiyle birlikte termal etkiyle iletkenlik bandına geçen elektronların sayısı değişir. Sonuç olarak yalıtkan ve yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklık ile artar, tam tersine metallerin iletkenlikleri artan sıcaklık ile dūřer (şekil 2.20.) (Rainde ve Calleja 2004). şekilde görüldüğu gibi iletken polimerlerde metallerden farklı olarak iletkenlik sıcaklık ile üstel olarak artmaktadır.



**şekil 2.20.** Sıcaklığın iletken polimerlerin ve metallerin iletkenlikleri üzerine etkisi

İletken bir polimerin temel özelliği polimerin ana zinciri boyunca konjuge (ardışık sıralanmış) çift bağların olmasıdır. Konjugasyonda, karbon atomları arasındaki bağlar birbiri ardı sıra değişen tek ve çift bağlar şeklinde dizilmiştirlerdir. Her bir bağ kuvvetli

bir kimyasal bağ olan “sigma” bağı içerir. İlâveten, her çift bağda daha zayıf ve daha az l kalize olmuş, konjugasyondan sorumlu bir “pi” bağıının varlığını belirtmiştik. Ancak, konjugasyon, polimer maddeyi iletken yapmak için yeterli değildir. Fakat bunlara katkı maddeleri girdirilerek iletkenliği artırılabilir. Katkı malzemelerinin yaptığı Őey malzeme içerisinde elektron ve boşlukların sayısını arttırmaktır. Bir boşluk komşu bir konumdan atlayan bir elektronla doldurulduğunda yeni bir boşluk oluşturur ve bu durumun böyle devam etmesiyle yükün uzun bir mesafeye göç etmesi sağlanır (Saçak 2004).

### **2.5.2. İletken polimerlerde katkılama işlemi**

Konjuge  $\pi$  bağlarına sahip olan bir polimere uygun yöntemlerle elektron verilmesi veya uzaklaştırılması yöntemiyle iletkenlik düzeyinin arttırılması işlemine katkılama işlemi denir. Katkılama işlemi neticede bir indirgeme veya yükseltgeme işlemidir. Katkılama amacıyla kullanılan kimyasallara katkı malzemesi denir. Katkılama işlemiyle polimer yapısına iletkenliği sağlayacak Şekilde ya elektron verilir ya da elektronlar alınarak polimer örgüsünde artı yüklü boşluklar oluşturulur. Artı yüklü bir boşluğa başka bir yerden atlayan elektron, geldiği yerde de artı yüklü bir boşluk oluşturacaktır. Bu işlemin ard arda zincir boyunca yinelenmesiyle elektriksel iletim sağlanır.

Polimerler aşağıdaki tekniklerle katkılanabilirler (Bernasik ve ark. 2005):

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








Bu tekniklerden gaz fazında katkılama, çözelti ortamında katkılama ve elektrokimyasal katkılama yöntemleri daha az maliyetli olduğu için tercih edilmektedir. Gaz fazında katkılama işleminde, polimerler vakum altında katkı malzemesinin buharına maruz bırakılır. Çözelti ortamında katkılama işlemi ise, katkı maddesinin çözünebildiği bir çözücünün kullanılması ile gerçekleştirilebilir. Polimerlerde katkılama yoluyla iletkenliğin sağlanabilmesi Őu Şekilde açıklanabilir: Polimerlerde değerlik kabuğundaki



elektronlar ya yükseltgen bir reaktif ile koparılabilir ve değerlik kabuğu pozitif hale gelir ya da indirgen bir reaktif ile boş iletkenlik bandına bir elektron verilebilir. Bu işlemler yükseltgenmeye karşılık olmak üzere p- türü katkılama, indirgenmeye karşılık olmak üzere n- türü katkılama olarak adlandırılır. Katkılama işlemi sırasında katkı moleküllerinin hiç birisi polimer atomları ile yer değiştirmez, katkı molekülleri yalnızca elektronların enerji kabuklarından geçişlerine yardımcı olurlar. Katkı malzemeleri ya güçlü indirgen ya da güçlü yükseltgen maddelerdir. Bunlar kolaylıkla iyon oluşturabilen inorganik tuzlar veya bileşikler, nötral moleküller, organik ve polimerik katkı malzemeleri olabilirler (Randriamahazaka ve ark., 2005).

Katkılama işlemi geri dönüşümsüz bir işlem değildir. İletken polimerlerin katkılanmış halden katkı atomlarından arındırılarak yeniden yalıtkan formlarına dönüştürülmesi mümkündür. Katkı malzemelerinin yapısı iletken polimerlerin kararlılığında önemli rol oynar. Çizelge 2.2’de katkılanmış bazı iletken polimerlerin yapıları ve iletkenlikleri görülmektedir.

**Çizelge 2.2.** Katkılanmış bazı iletken polimerlerin yapıları ve katkı maddeleri (Aydın 2012)

Polimer	Tekrareden 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>		

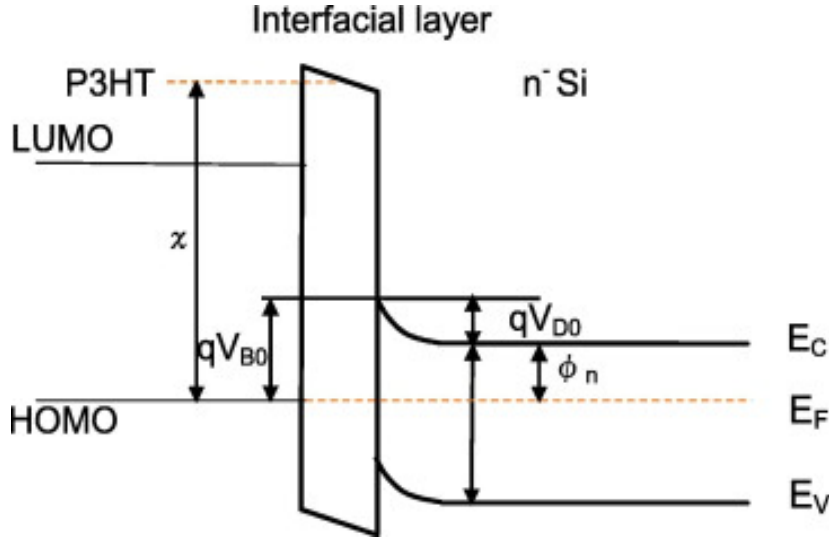
### 2.5.3. İletken polimerlerin sentez yöntemleri

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 (Aydın 2012).

### 2.6. 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 ara yüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Metal-Polimer-Yarıiletken (MPY) yapı Şekil 2.21’de gösterilmiştir (Crowell ve Sze 1966). Metal/n tipi yarıiletken kontak için metal kısım omik kontakta göre pozitif olduğu zaman doğru beslem, metal kısım omik kontakta göre negatif olduğunda ise ters beslem oluşur.

Bu çalışmada kullanılan polimerler p-tipi polimerlerdir. Bu polimerler ışığı absorbe 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 yarıiletkene transfer edilir. Organik güneş pilleri eksitonik güneş pilleri olarak da adlandırılmaktadır. Çünkü güneş pili tarafından absorbe edilen ışık elektron-boşluk çifti olan eksitonları oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan n-tipi organik yarıiletken özellik gösteren PCBM ise yine iyi bir p-tipi organik yarıiletken özellik gösteren MEH-PPV ile belli oranda karıştırılarak MEH-PPV:PCBM karışımı polimer olarak kullanılmıştır.



**Şekil 2.21.** Metal-polimer-yarıiletken (MPY) diyodun enerji band diyagramı (Crowell ve Sze 1966)

## 2.7. Schottky Diyotlarında Doğru Beslem I-V Karakteristikleri

Termoionik emisyon teorisine göre (TE) Schottky diyotlarında doğru beslem altındaki akım yoğunluğu-gerilim ilişkisi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$J_n = \left( A^* T^2 \exp \left[ \frac{-q\phi_B}{kT} \right] \right) \left( \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \quad (2.55)$$

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 yukarıdaki akım ifadesi,  $\exp(qV_D/nkT) \gg 1$  durumu da göz önüne alınırsa;

$$I = AA^* T^2 \exp \left( \frac{q\phi_{B0}}{kT} \right) \exp \left[ \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] \quad (2.56)$$

şeklinde yeniden yazılabilir.

Doğrultucu kontaklarda voltajın artmasıyla birlikte çeşitli faktörlerden dolayı ideal I-V karakteristiğinden kayda değer sapma meydana gelebilir. İdealden bu sapmaya ara yüzey durum yoğunluğu ve seri direnç neden olur. Seri direnç etkisi metal ile yarıiletken arasında yer alan organik ara yüzey tabakanın varlığından kaynaklanmakta ve bu tabaka lineer olmayan davranışa neden olmaktadır (Türüt ve ark. 1995, Soylu ve ark. 2013). Seri direnç ( $R_s$ ) Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli bir parametredir.  $R_s$  ile birlikte idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi diyot parametreleri Cheung fonksiyonları yardımıyla elde edilebilir (Cheung ve Cheung 1986). Cheung fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n \left( \frac{kT}{q} \right) \quad (2.57)$$

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA * T^2} \right) \quad (2.58)$$

ve  $H(I)$  ise;

$$H(I) = IR_s + n\Phi_{b0} \quad (2.59)$$

ile verilir. Burada  $R_s$  seri direnci ifade etmektedir.

Öte yandan Norde fonksiyonları seri rezistans değeri ve engel yüksekliğini elde etmemiz için alternatif bir metot sunmaktadır (Norde 1979, Aydın ve ark. 2011). Norde fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I(V)}{AA * T^2} \right) \quad (2.60)$$

Burada  $\gamma$  idealite faktöründen büyük boyutsuz bir tamsayıdır. Eşitlik (2.60)'dan görüldüğü gibi  $F(V)$  fonksiyonu I-V değerlerine bağlı bir fonksiyondur. V'ye karşı  $F(V)$  grafiğinin minimum değerinden aşağıda verilen eşitlik yardımıyla engel yüksekliği hesaplanabilir:

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.61)$$

Burada  $F(V_0)$ ,  $F(V)$ 'nin minimum değeri ve böylece  $V_0$  da buna karşılık gelen voltajdır.  $V_0$  ve  $F(V_0)$  değerleri V-F(V) grafiğinden elde edilebilir.

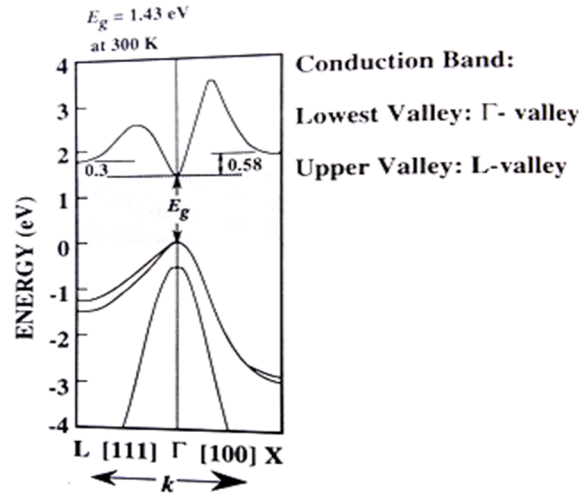
Seri direnç ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (2.62)$$

Eşitlikteki  $I_0$  değeri V-F(V) grafiğinde  $V_0$ 'a karşılık gelen akım değeridir.

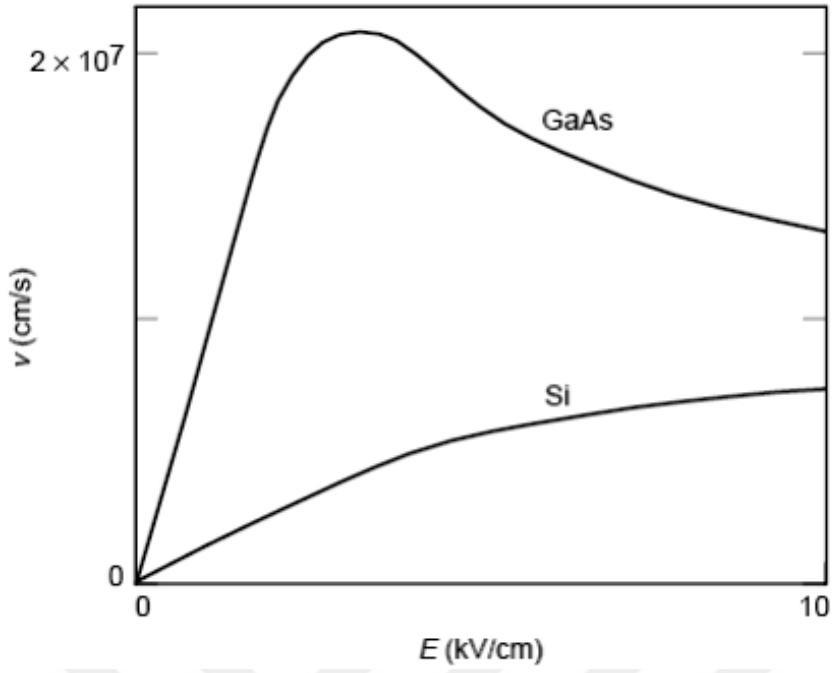
## 2.8. GaAs Yarıiletkeninin Bazı Temel Özellikleri

GaAs periyodik cetvelde III. grupta bulunan galyum (Ga) ve V. grupta bulunan arsenik (As) elementlerinden oluşan III-V grubu bileşik yarıiletkenidir. Şekil 2.22'de GaAs'ın enerji band diyagramı görülmektedir. GaAs için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında  $E_g = 1,42$  eV'tur. Yasak enerji aralığı sıcaklığa, yarıiletkenin saflığına ve katkılanma durumuna bağlıdır.



**Şekil 2.22.** GaAs'ın band yapısı (Singh 1995)

GaAs Şekil 2.22'de görüldüğü gibi doğrudan band geçişli olup küçük etkin kütleye sahiptir. GaAs'ın bu özelliği elektronlara yüksek mobilite sağlar. Böylece yüksek mobiliteye sahip GaAs optoelektronik uygulamaları için en önemli materyaldir. Tipik elektron mobilitesi  $8500 \text{ cm}^2/\text{V-s}$  olup, Si'un elektron mobilitesinin ( $1500 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ ) beş katından daha büyüktür (Singh 1995 ). GaAs elektronik özelliklerinden dolayı birçok uygulamada diğer yarıiletkenlere göre daha fazla avantajlara sahiptir. Tümleşik devre elemanları ile düşük ve yüksek frekans devre elemanlarının yapımında GaAs yaygın olarak kullanılmaktadır. GaAs yüksek elektron mobilitesine sahip olması nedeniyle, dijital devre elemanlarının yapılarında kullanılabilir. Yapılan çalışmalar Şekil 2.23'de görüldüğü gibi GaAs dijital devre elemanlarının silisyumdan yapılanlara göre 2 ile 5 kat arasında daha hızlı çalıştığını ve daha düşük güç kaybı gösterdiğini ortaya koymuştur.



**Şekil 2.23.** Elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs taşıyıcı hızlarının değişimi (Vural 2011)

GaAs yarıiletkeninin oda sıcaklığında bazı temel özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir (Kwok 1995).

**Çizelge 2.3.** Oda sıcaklığında GaAs'e ait bazı fiziksel özellikler

ÖZELLİK		GaAs
Asal taşıyıcı konsantrasyonu (cm <sup>-3</sup> )		2,1 x 10 <sup>6</sup>
Yasak band aralığı (eV)		1,43
Örgü sabiti ( Å )		5,6533
Molekül yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )		4,42x10 <sup>22</sup>
Dielektrik sabiti		13,1
İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )		4,7x10 <sup>17</sup>
Valans bandı etkin durum yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )		7,0x10 <sup>18</sup>
Elektron etkin kütlesi (m <sub>e</sub> /m <sub>o</sub> )		0,067
Boşluk etkin kütlesi (m <sub>h</sub> /m <sub>o</sub> )	Ağır m <sub>hh</sub>	0,074
	Hafif m <sub>lh</sub>	0,50
Elektron yakınlığı, $\chi$ (eV)		4,07
Erime noktası (K)		1238
Elektron mobilitesi (cm <sup>2</sup> /V-s)		8500
Boşluk mobilitesi (cm <sup>2</sup> /V-s)		400
Molekül kütlesi (g/mol)		144,63
Band geçişi		Direkt
Termal genleşme katsayısı (°C <sup>-1</sup> )		6,86 x 10 <sup>-6</sup>
Termal iletkenlik katsayısı (W/cm-°C)		0,46
Kırılma indisi		3,3
ÖZİSİSİ (J/g-°C)		0,35
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )		5,32

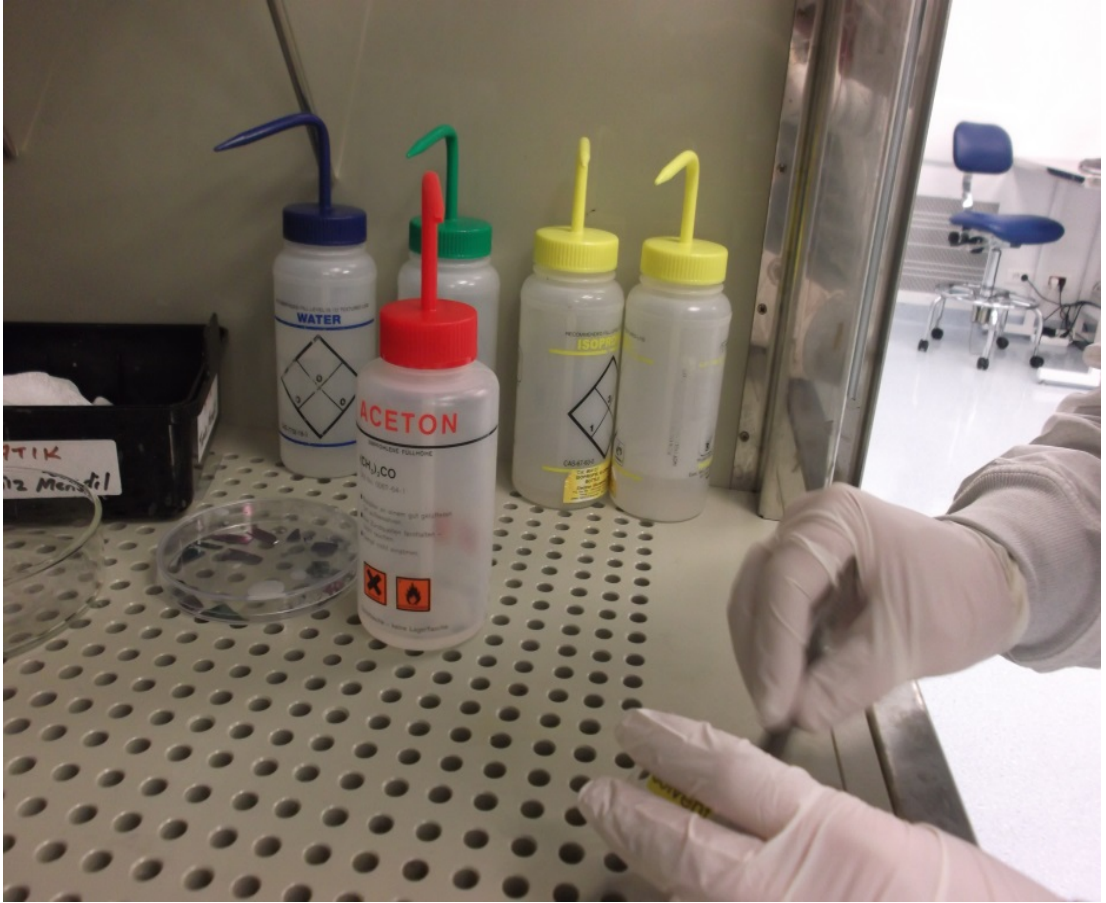


### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar

Çalışmada kullanılan malzeme ve kimyasallar aşağıdaki gibidir:

n-tipi GaAs yarıiletkeni, cam tüp, petri kabı, mikropipet, manyetik balıklar, etanol, metanol, izopropil alkol, aseton, saf su, sülfürik asit, hidroklorik asit, hidrojen florür hidrojen peroksit, klorobenzen kimyasalları ile P3HT poly(3-hexylthiophene), MEH-PPV poly [2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene], PCBM [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester), GO (Graphene Oxide) organik iletken materyalleri kullanılmıştır. Şekil 3.1'de kullanılan bazı kimyasallar görülmektedir.



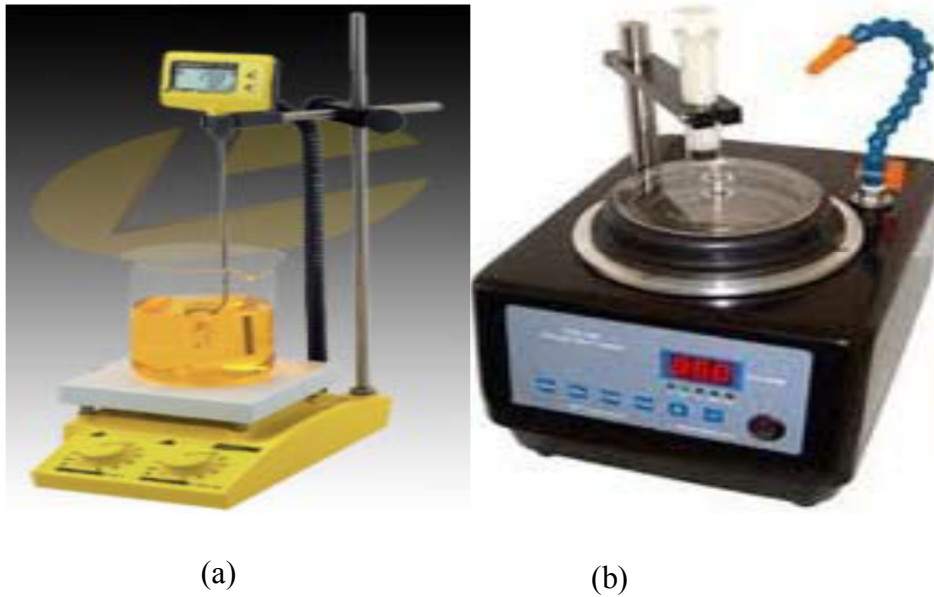
Şekil 3.1. Kullanılan bazı kimyasallar

Kimyasal malzemeleri tartmak için kullandığımız hassas tartı ve temizleme aşamasında altlıkları titrestirdiğimiz ultrasonik titrestirici Şekil 3.2’de görülmektedir.



**Şekil 3.2.** a)“Radwag” hassas tartı ve b)“Transsonic TS 540” ultrasonik titrestirici

Çözelti hazırlama aşamasında sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı kullanıldı. Polimer kaplama işlemi ise Spin coater VTC-100 cihazı ile gerçekleştirildi. Yellowline manyetik karıştırıcı ve Spin coater VTC-100 cihazı Şekil 3.3’de görülmektedir.



**Şekil 3.3.** a) “Yellowline” manyetik karıştırıcı ve b) numunelerin kaplanmasında kullanılan “Spin coater VTC-100” cihazı

Omik kantağın ve doğrultucu kontakların hazırlandığı sistemler Şekil 3.4'de görülmektedir.



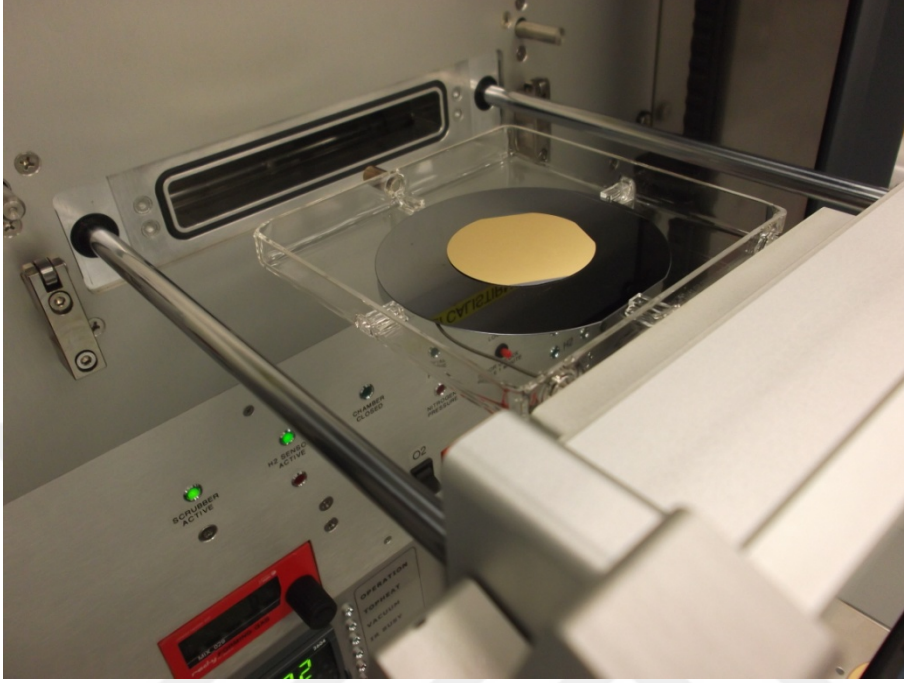
(a)



(b)

**Şekil 3.4.** a) Omik kantağın gerçekleştirildiği VK-0814 Midas Termal Buharlaştırıcı  
b) Doğrultucu kontakların oluşturulduğu Univex 450 metal buharlaştırma sistemi

Hazırlanan omik kantağın hızlı termal tavlama işleminin (RTA) gerçekleştirildiği cihaz Şekil 3.5’de görölmektedir.



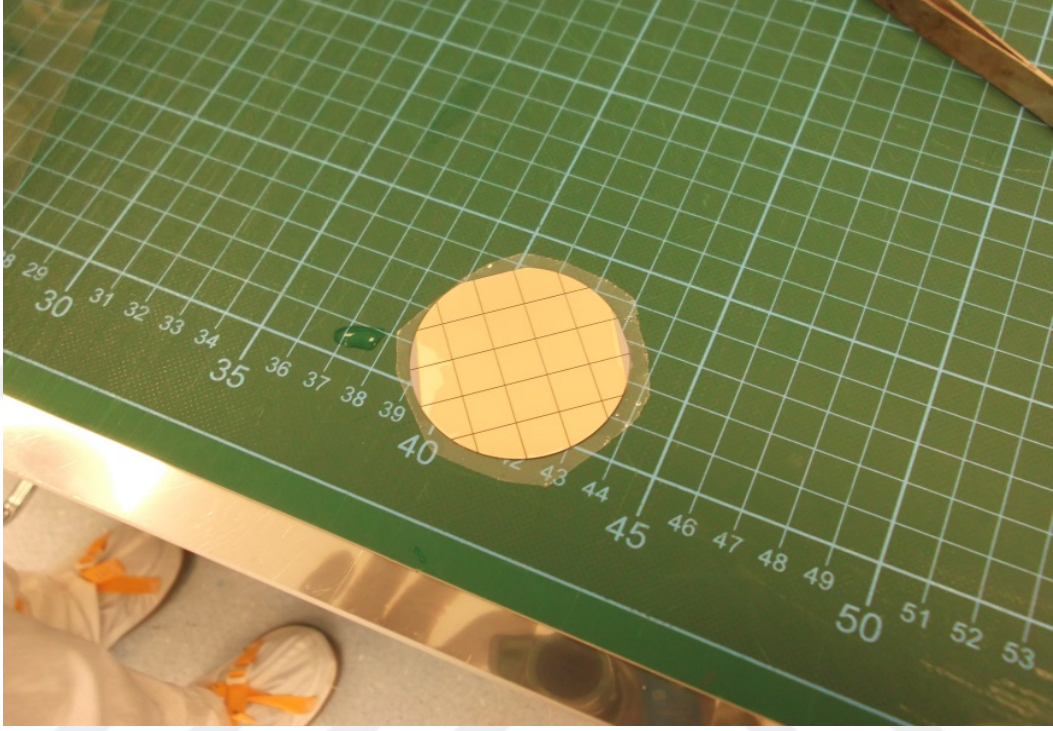
Şekil 3.5. Hızlı termal tavlama (RTA) cihazı

Hazırlanan ince filmlerin tavlama için kullanılan fırın ve malzemeleri korumak için vakum odası (Glovebox) Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. a) “Aldrich” fırın ve b) malzemeleri korumak için vakum odası Glovebox

Omik kontak hazırlandıktan sonra numune bilgisayar kontrolünde 1cm<sup>2</sup> lik eşit yüzeyli parçalar halinde kesme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.7).



**Şekil 3.7.** Omik kontaklı numunenin bilgisayar kontrolünde eşit parçalara kesilmesi

## **3.2. Deneysel Yöntem**

### **3.2.1. İnce film kaplama yöntemleri**

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

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

Vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan altlık malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanan fiziksel kaplama yöntemi “Buharlaştırma” ve “Sıçratma” olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

### 3.2.1.1.1. Vakum içinde buharlaştırma

Her maddenin kendine has erime, kaynama ve buharlaşma sıcaklıkları gibi ayırt edici fiziksel özellikleri vardır. Bu teknikte ince bir film halinde kaplama yapmak istediğimiz malzeme öncelikle buharlaşması için gereken sıcaklığa kadar ısıtılır. Daha sonra ısıtılarak buharlaştırılan malzemenin daha soğuk sıcaklık bölgesindeki altlıklar üzerine taşınarak yoğunlaştırılması işlemi ile kaplama gerçekleşir. Buharlaştırma yöntemine göre malzeme çeşitli şekillerde ısıtılarak buhar fazı oluşturulur. Oluşan buhar, düşük sıcaklık bölgesine doğru taşınır ve burada bulunan taşıyıcılar üzerine yoğunlaşır. Bu işlem yüksek vakum ortamında yapılabildiği gibi asal bir gaz ortamında da gerçekleştirilebilir. Buharlaştırma işlemi kullanılarak elde edilen Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) kaplamalar rezistans, indüksiyon, ark, elektron bombardımanı ve lazer ile buharlaştırma olarak gruplandırılmaktadır.

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. Bunlar ( Sönmezoğlu 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.

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.

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

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

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

Sıçratma yöntemi, hedef malzeme yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilerek, atomların yüzeyden sıçratılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların buhar fazına geçerek altlık malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır. Sıçratma tekniği yaygın olarak yüzey temizlemede, yüzey aşındırmada, ince film biriktirmede ve yüzey analizinde kullanılmaktadır.

Sıçratma tekniği ile birçok malzeme başarılı bir şekilde kaplanmasına rağmen, birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması ve altlık sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır. Son yıllarda sıçratma teknolojisindeki gelişmelerin çoğu, manyetik alanda yapılmıştır. Bunun nedeni, manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamaların, mikroelektronik, optik, türbin bıçakları, manyetik ve optik diskler ve kesici takımlar gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmasıdır. Sıçratma yönteminin en önemli avantajı farklı buhar basınçlarında farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirebilmesidir. 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. Çünkü sıçratma yöntemindeki elektrik tüketimi buharlaştırmaya nazaran çok daha fazladır (Sönmezoğlu ve ark. 2012).

### **3.2.1.2. Kimyasal kaplama yöntemleri**

Kimyasal kaplama yöntemlerini; sol-jel yöntemi, anodizasyon yöntemi, kimyasal buhar biriktirimi, elektro kaplama, kimyasal banyo birikimi olmak üzere beş grupta toplayabiliriz.

#### **-Sol-Jel yöntemi**

Sol-jel solüsyon-jelleşme (solution-gelation) kelimelerinin kısaltmasıdır. Bir solüsyonun veya süspansiyonun jelleşebildiği tüm sistemleri içermektedir. Yöntem çözeltinin hazırlanması, jelleşmesi ve çözücünün sistemden uzaklaştırılması esasına dayanır. Bu yöntem, seramik ve cam üretiminde kullanılan kimyasal bir işlemdir. Özellikle toz, kaplama ve fiber üretiminde önemli bir uygulama potansiyeline sahiptir.

Sol-jel işlemi, inorganik bileşiklerin belirli oranlarda su ve asitle birleştirilerek bir solüsyon meydana getirilmesidir. Bu solüsyonun belirli sıcaklıklarda karıştırılıp içerisinde bir dizi kimyasal reaksiyon oluşturulduktan sonra, taneciklerin sahip olduğu yüzey yüklerinin elektrokimyasal etkileşmeleri ile bir bağ meydana getirmesidir (jelleşme). Bu bağ sistemin bütün noktalarına ulaşır ve giderek büyüyerek jel yapı tamamen oluşur. Hazırlanan çözelti daldırma, döndürme ve püskürtme gibi yöntemlerle ince film şeklinde kaplanır (Sönmezoğlu ve ark. 2012).

#### - Anodizasyon

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

#### - Kimyasal buhar biriktirimi

Bu yöntemde vakum içine yerleştirilen malzemenin buharlaştırılarak taşıyıcı malzeme üzerine yoğunlaşması temel alınır. Kaplaması yapılacak malzemenin buharı kimyasal tepkimeler sonucu oluşturulur. Fiziksel kaplama tekniği olan vakumda buharlaştırma yönteminde buharlaşma işlemi sisteme enerji vererek gerçekleştirilirken bu yöntemde buharlaşma kimyasal tepkimeler sonucu oluşur.

#### - Elektrokimyasal yöntem (elektroliz)

Elektrokimyasal (elektroliz) biriktirme tekniği ile çözeltilerden ince filmlerin kaplanması, maddenin ya metalik ya da metalik olmayan tabanlar üzerinde toplanmasıyla gerçekleştirilir. Özellikle istenilen şekillerin oluşturulması ve büyük alanların kaplanmasında bu yöntem büyük bir avantaj sağlamaktadır. Kaplanacak metal devrenin katoduna, kaplama malzemesi ise anoduna yerleştirilir. Devreye akım verildiğinde zamanla katottaki metal malzeme kaplanır. Bu yöntemde denetlenen değişkenin potansiyel ya da akım olmasına göre elektroliz yöntemleri potansiyel kontrollü ve akım kontrollü elektrolizler olarak adlandırılır.

#### - Kimyasal banyo birikimi

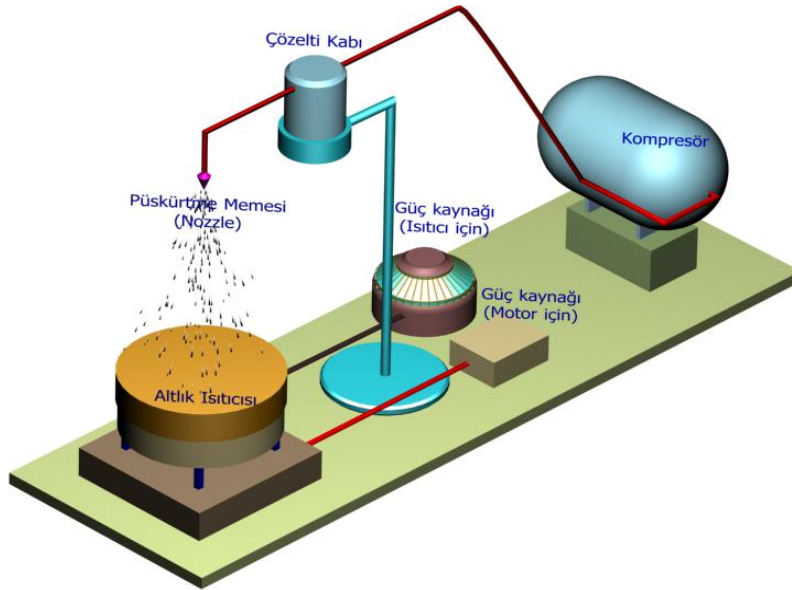
Bu metotta kaplama işlemi, çözelti içerisinde kaplanacak malzemenin yerleştirilmesi suretiyle kimyasal tepkimeler sonucu gerçekleşir. Kimyasal banyo biriktirme metodu, çözeltideki filmi oluşturacak iyonların reaksiyonunun yavaşlatılması esasına dayanmaktadır. Temizlenmiş cam alt tabanlar, hazırlanmış çözelti içerisinde belirli bir zaman daldırılarak camın yüzeyinde ince filmler oluşturulur. İnce filmi hazırlamak için

kullanılan teknikler arasında kimyasal banyo birikimi metodu maliyeti oldukça ucuz ve basit olan bir yöntemdir.

#### - Püskürtme yöntemi

Spray pyrolysis tekniği, kimyasal püskürtme veya sıcak püskürtme yöntemi olarak da bilinen bir yöntemdir. Bu yöntemde, elde edilecek ince film için hazırlanan uygun çözeltiler karıştırılarak ısıtılmış tabakalar üzerine basınçlı azot gazı veya hava yardımıyla bernoulli prensibine uygun şekilde atomize edilerek püskürtülür (Şekil 3.8). Sonuçta sıcak taban üzerine gelen püskürtülmüş tanecikler film yüzeyine buharlaşarak yapışır, yapışmayan tanecikler ise gaz olarak ortamdan uzaklaşır. Bu yöntemle elde edilen filmler genelde polikristal yapıda oluşmaktadır.

Kimyasal püskürtme yöntemi, ince film elde etme yöntemleri arasında en kolay ve en ucuz olan yöntemdir. Kimyasal püskürtme yönteminde elde edilen filmlerin fiziksel özellikleri değişik parametrelere bağlıdır. Bunlar; altlık sıcaklığı, püskürtme cihazı, altlık ile püskürtme başlığı (nozzle) arasındaki mesafe, çözeltilerin bileşim oranları, püskürtme zamanı ve püskürtülen toplam çözeltiler miktarıdır. Bu yöntemde taşıyıcı gaz olarak basınçlı hava yerine azot gazı kullanılması, bazı istenmeyen kimyasal reaksiyonların ortaya çıkmasını önlemede etkilidir (Öztürk 2003).



Şekil 3.8. Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Tomakin 2008)

Püskürtme yönteminde taban olarak soda-lime camlar, silisyumlu camlar ve metaller kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan metal tabanlar paslanmaz çelik, titanyum, tungsten ve alüminyum gibi metallerdir. Ayrıca taban olarak payreks cam, seramik, plastik ve polimerler de kullanılabilir. Püskürtme yöntemi ile film elde etmenin diğer yöntemlere göre bazı dezavantajları olmasına karşın; ekonomik ve kolay bir yöntem olmasının yanında elde edilecek filmlerin çözelti olarak hazırlanıp püskürtülmesinden dolayı, çözeltiye istenen miktarda katkı yaparak filmin fiziksel özelliklerini değiştirebilmek gibi avantajları da vardır.

#### - Daldırma yöntemi (Dip coating)

Bu metot genelde saydam tabakalar üretmek için kullanılır. Daldırarak kaplama metodu, hazırlanan çözelti içine kullanılan altlık malzemesinin belirli bir hızla daldırılıp ve yine aynı hızla geri çekilmesi esasına dayanır. Daldırma ile kaplama metodu beş aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar:

1. Daldırma,
2. Yukarı çekme,
3. Kaplama,
4. Süzülme ve
5. Buharlaştırma şeklindedir.

Bu işlemler sonucunda film oluşturulur.

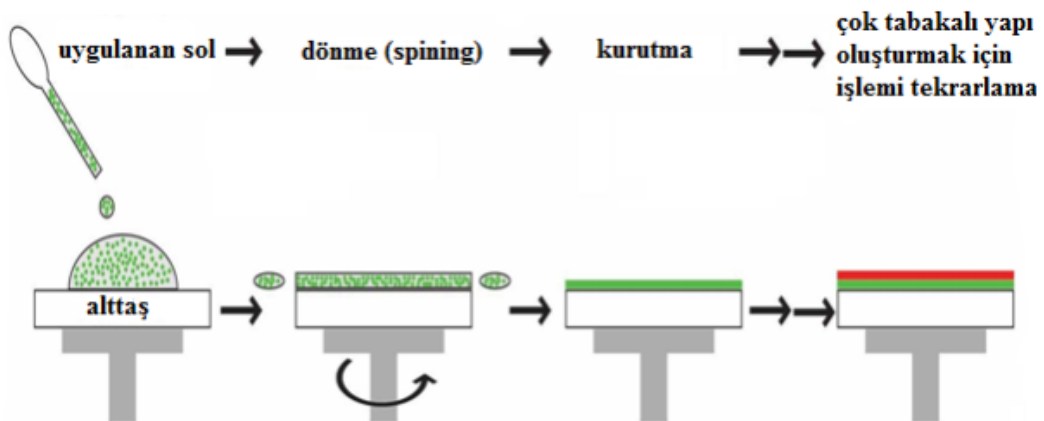
Daldırma aşamasında taban sabit bir hızla solün içine daldırılır, yukarı çekme aşamasında ise, daldırıldığı hızla beklenmeden yukarı çekilir. Üçüncü safha olan kaplamada ise, taşıyıcının sol ile teması giren kısımları kaplanmış olur. Bu aşamada yer çekimi kuvveti, sol ile taban arasındaki taşıyıcı kuvveti ile yüzey gerilim kuvvetleri etkilidir. Daldırma sonunda, fazla olan sol damlacıkları taban kenarlarından süzülerek yüzeyi terk ederken süzülme işlemi ile yüzeyi terk edemeyen sol damlacıkları buharlaşarak uçar. Tüm bu aşamaların ardından taban üzerinde kalan sol tavlama işlemi sonucunda film haline dönüşmektedir.

Daldırarak kaplamanın bir avantajı, her şekilde ve boyutta tabanların kaplanmasının mümkün olmasıdır. Bu işlem ile düzgün ve kontrol edilebilen bir kalınlık elde edilebilir. Bunun sonucu olarak da film kalınlığı, yüzey boyunca homojen bir özellik göstermektedir (Bilgen 2015).

- Döndürme yöntemi ile film kaplama (Spin coating)

Döndürme ile kaplama tekniği ince film üretiminde uzun yıllardan beri kullanılan bir yöntemdir. Kaplama işlemi, bir çözelti damlasının bir altlığın merkezine damlatılması ve daha sonra altlığın yüksek dönme hızlarında (1200-4000 dev/dak) döndürülmesine dayanan bir kaplama tekniğidir. Kullanılan altlığın tek yüzüne kaplama yapılır. Kaplanan filmin kalınlığı döndürme hızına bağlıdır ve bu hızlandırma, fazla çözeltinin altlık yüzeyinden uzaklaştırılmasına ve kalan çözeltinin altlık yüzeyine ince film şeklinde yayılmasına neden olur.

Kaplama işlemi sonucunda oluşan filmin kalınlığı hıza bağlılığının yanında viskozite, kuruma hızı, katı oranı ve yüzey gerilimi gibi çözelti özelliklerine de bağlıdır. Döndürerek kaplama işlemi üç adımdan oluşur (Şekil 3.9). İlk adım; hazırlanan çözeltinin altlık üzerine damlatılması, ikinci adım; yüksek hızlı döndürme ile fazla çözeltinin kaplanan altlık yüzeyinden uzaklaştırılması ve çözeltinin altlık yüzeye yayılması, üçüncü adım ise; kurutma ile altlık yüzeyde kalan çözeltinin buharlaştırılmasıdır. Bu adımlar gerçekleştiğinde kaplama işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 3.9. Döndürme yöntemi ile kaplamanın işlem basamakları (Göknil 2013)

Kaplama aşamasında, altlık yüzeyi üzerine bir miktar sıvı damlatılır. İkinci adım olan döndürme aşamasında, damlatılan sıvı merkezciil kuvvetin etkisiyle radyal bir şekilde altlık yüzeyinin dışına doğru akar. Dönme sonunda, fazla gelen sıvı altlık yüzeyinden taşarak yüzeyi terk eder. Film kalınlığının azalmasıyla yüzeyden taşan sıvının miktarı azalır. Bu olayın sebebi filmin kalınlığının incilmesi ile akışkanlığa karşı olan direncin artması yani viskozitenin yükselmesi olarak açıklanabilir. Aynı zamanda uçucu olmayan madde konsantrasyonundaki artış, akışkanlığa karşı direncin artmasına neden olur. Buharlaşıma (kurutma) aşaması ise, cam altlık üzerinde buharlaşmanın etkisiyle fazla çözeltinin yüzeyden uzaklaştırılması ve böylece oluşan filmlerin incelmesindeki son ve en önemli safhadır. Bu aşamalar bittiğinde tek tabaka olarak oluşan ince filmin çoklu tabaka halinde oluşması isteniyorsa bu aşamaları tekrar etmek gerekmektedir (Şekil 3.9).

Bu yöntemle elde edilen filmin kalınlığının düzgün olmasında iki ana kuvvet etkindir. Bu kuvvetler; merkezciil kuvvet ve ters yöne doğru olan sürtünme kuvvetidir. Döndürme aşamasındaki merkezciil kuvvet, yer çekimi kuvvetinin ihmal edilmesine neden olur. Böylece oluşan filmin dönme aşamasında sadece merkezciil kuvvet vardır.

Döndürerek kaplama yönteminin avantajı, ince film oluşurken altlık yüzeyde oluşmaya başlayan ince filmin yüzeyde düzgün bir şekilde dağılmasıdır. Bunun sonucu olarak film kalınlığı, yüzey boyunca homojen bir özellik gösterir. Solün viskozitesi değişmedikçe film kalınlığı aynı kalır (Göknil 2013).

Çalışmada yukarıda verilen yöntemler içerisinde omik ve doğrultucu kontak hazırlanmasında vakumda buharlaştırma metodu, polimer kaplama işleminde ise spin coating (döndürme) metodu kullanılmıştır.

### 3.3. Kullanılan Polimerler

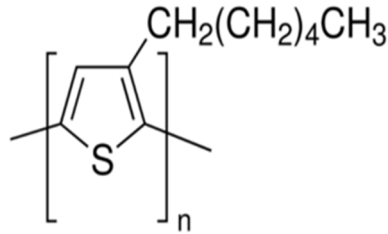
Bu çalışmada P3HT poly(3-hexylthiophene), MEH-PPV poly [2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] iletken polimerleri, fulleren türevi PCBM [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) ve GO (Graphene Oxide) iletken materyalleri kullanılmıştır.

#### 3.3.1. P3HT

P3HT thiophene türevi p-tipi özelliğe sahip iletken bir polimerdir. 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) (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 yükseltgenmiş, hem de nötral (katkısız) formlarında suda ve havada kararlıdır. Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) yeterli çözünürlüğe, diğer konjuge polimerlere göre düşük band aralığına ve yüksek mobilite ( $\mu_h = 0,1$ - $0,2$  cm<sup>2</sup>/Vs) değerlerine sahiptir (Al-İbrahim ve ark. 2005). P3HT çeşitli organik çözücülerde çözünebilir ve bu özelliği ile çözelti oluşturma işlemleri düşük maliyetlidir (Kitai 2011). P3HT elektron zengini polimerdir ve kolaylıkla yükseltgenebilir. Yüksek HOMO seviyesine sahip olup tipik boşluk iletken bir materyaldir (Krebs 2008). P3HT ışığı kolayca absorbe edebilme özelliğine sahiptir. Polimerin ışığı absorbe etmesi sonucu elektronlar  $\pi$ 'den  $\pi^*$  orbitaline geçerler. Bu geçişler genelde elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde mümkündür. Görünür bölgede absorpsiyon ve ışımaya yapabilen bu polimer güneş pilleri, fotodetektörler, Ledler, lazerler gibi çeşitli optoelektronik uygulamalarda kullanılmaktadır.

Şekil 3.10'da P3HT polimerinin bağ oluşum şeması verilmiştir. P3HT Poli(3-heksiltiyofen) polimeri kimyasal yonden kararlı olmakla birlikte aynı zamanda farklı çözeltilerde iyi çözünürdür. P3HT polimeri  $E_g = 1,7$  eV band aralığına (LUMO = -3,3 eV ve HOMO = -5eV) ve  $\sigma = 10^{-10}$  (S/cm) gibi iletkenlik değerine sahip olması

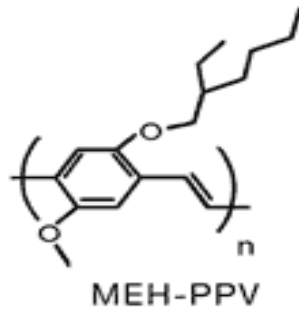
önemli özelliklerindedir (Anonim 2007). P3HT düşük üretim maliyeti, kararlı yapısı, yüksek mobilite, geniş soğurma spektrumuna sahip ve oksitlenmeye karşı dayanıklı olduğu için elektrik ve elektronik açıdan birçok uygulama alanına sahiptir.



**Şekil 3.10.** P3HT'nin kimyasal yapısı

### 3.3.2. MEH-PPV

PPV Poly (Phenylene-vinylene) polimerinin kendisi çözünmez oluşundan dolayı oldukça inatçı bir materyaldir. Alkyl veya alkoxy zincirlerinin phenylen halkalarına eklenmesiyle MEH-PPV poly [2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] yapısı elde edilir. Phenylen halkalarına eklenen bu yan gruplar aynı zamanda polimerin band aralığını da modifiye eder. PPV'nin sarı-yeşil olan emisyon rengi turuncuya kayar. MEH-PPV hazırlamak için Gilch polimerizasyonu kullanılır. Polimerizasyon sonucu elde edilen polimerde  $\pi$  elektron bulutu molekül içi Coulomb etkileşmesi sonucu band aralığının etkin bir şekilde düşmesine ve emisyon renginin kırmızıya doğru kaymasına neden olur. Farklı oranlardaki yan gruplar PPV'nin yeşil olan emisyon rengini kırmızıya doğru kaydırır. MEH-PPV; chloroform, chlorobenzene veya 1,2-dichlorobenzene gibi çeşitli organik çözücülerde kolaylıkla çözünebilir ve işlenebilirler (Pei 2007, Krebs 2008). MEH-PPV'nin kimyasal yapısı Şekil 3.11'de görülmektedir.



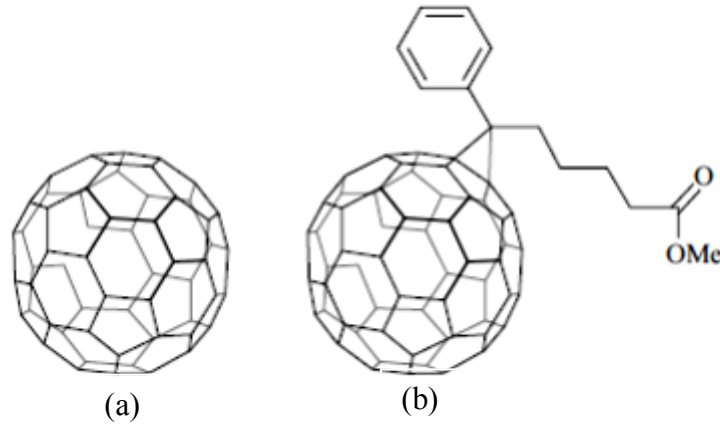
**Şekil 3.11.** MEH-PPV polimerinin kimyasal yapısı



MEH-PPV p-tipi iletken polimer olup, sırasıyla LUMO ve HOMO değerleri -3,2 eV ve -5,4 eV'tur (Anonim 2007). MEH-PPV çeşitli organik çözeltilerde iyi çözünür olması, kolay üretimi ve oksitlenmeye karşı dayanıklı olması gibi önemli özelliklere sahip iletken bir polimerdir. Bu özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir.

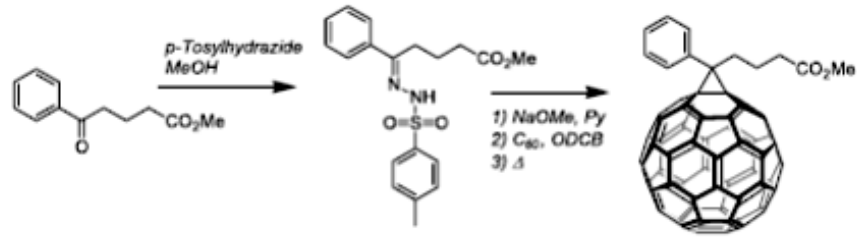
### 3.3.3. PCBM

PPV ve P3HT organik polimerleri elektron zengini malzemelerdir ve kolaylıkla yükseltgenbilirler. Yüksek HOMO seviyelerine sahip olan bu polimerler tipik boşluk iletken p-tipi materyallerdir. Buna karşın yüksek elektron yakınlığına sahip organik polimerler çok nadir bulunur. Bu nadir elektron iletken materyallerden biri de  $C_{60}$  ve türevleridir (Krebs 2008).  $C_{60}$  bir fullerendir. Grafit benzeri yüzeye sahip  $C_{60}$ , moleküler orbitallerinde yer alan delokalize elektronlar sayesinde etkin elektron iletimi sağlar.  $C_{60}$  ve türevi [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) (PCBM)'nin kimyasal yapısı Şekil 3.12'de görülmektedir (Kitai 2011).



**Şekil 3.12.** (a) Fullerene  $C_{60}$  ve (b) fulleren türevi [6,6]-phenyl-61C-butric acid methyl ester) (PCBM)'nin kimyasal yapısı (Kitai 2011)

$C_{60}$  kendisi çözünmez bir materyaldir. Ancak türevi PCBM çözünürdür. PCBM ilk defa Hummelen ve ark. tarafından tanımlanmıştır. Şekil 3.13'de PCBM'nin sentezi görülmektedir. Burada methyl ester 4 benzoylbutyric acid tosylhdrazone sodyum methoxide ile işleme tabi tutulmuştur. PCBM mor ötesinden görünür bölgeye 210, 258, 328, 430, 492 ve 696 nm'de soğurma özelliğine sahip altı farklı çözelti serisine sahiptir (Krebs 2008).



**Şekil 3.13.**  $C_{60}$ 'ın çözünebilir türevi PCBM'nin sentezi (Krebs 2008)

Fullerenler mükemmel akseptörlerdir. Çünkü vakum seviyesinin oldukça altında LUMO seviyesine sahiptirler. Her bir molekül çok sayıda elektronu kabul edebilecek boş LUMO seviyelerine sahiptir. Böylece elektron iletimi molekül içinde çok hızlı ve etkili olur (Kitai 2011). PCBM  $-3,7$  eV LUMO ve  $-6,1$  eV HOMO değerlerine sahip olup band aralığı  $2,4$  eV'tur ( Anonim 2007).

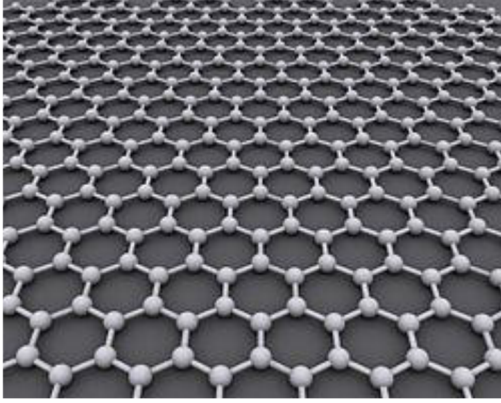
Fullerenler en iyi bilinen n-tipi organik yarıiletkenler arasında yer alır. Üstelik elektron vericilerle fullerenlerin kovalent bağ yapmaları sonucu oluşan moleküler heterokavşaklar veya fotoaktif makromoleküller gerçek p/n-tipi yarıiletken özellik göstermektedir. PCBM uygulanabilir etkin bir n-tipi organik yarıiletken çözüldür. PCBM uygun p-tipi konjuge polimerlerle karıştırılarak fotovoltaiik hücre üretiminde, ince film organik alan etkili transistör (OFET) yapımında ve aynı zamanda fotodedektör üretiminde kullanılabilir. PCBM mükemmel p-tipi özellik gösteren MDMO-PPV, MEH-PPV ve P3HT gibi organik yarıiletkenlerle aynı çözücüde çözünür. Böylece PCBM'nin belirttiğimiz bu organik yarıiletkenlerle olan karışım çözüldür kolaylıkla hazırlanabilir. PCBM'nin yüksek elektron alınganlığına sahip olmasından ötürü OFET'lerde ışık etkisiyle hem p-tipi yarıiletkenden hem de metal elektrotlarından elektron transferinin kolaylıkla sağlandığı literatürde belirtilmiştir (Anonim 2007). Aynı zamanda PCBM ile yapılan fotovoltaiik uygulamalarda güç dönüştürme verimliliğinin % 11'e kadar elde edildiğı literatürde bildirilmiştir (González ve ark. 2015).

Çalışmada n-tipi organik yarıiletken PCBM iyi bir p-tipi organik yarıiletken özellik gösteren MEH-PPV ile belli oranda karıştırılarak elde edilen yapı MEH-PPV:PCBM

karışımı polimer olarak kullanılmıştır. Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyodu çalışmanın ikinci aşamasını oluşturmuştur.

### 3.3.4. GO (Graphene oxide)

Grafen en basit ifade şekliyle, grafiti ve diğer boyutlardaki karbon allotroplarını oluşturan temel maddedir. İki boyutlu (2D) grafeni futbol topu şeklinde paketlediğimizde sıfır boyutlu fullerenleri, bir eksen etrafında silindir şeklinde katladığımızda bir boyutlu (1D) karbon nanotüpleri ve düzlem tabakaları birbirlerine paralel üst üste istiflediğimizde üç boyutlu (3D) grafiti oluşturmaktadır. Grafen 2 boyutlu bir malzeme olup  $sp^2$  karbon hibrit orbitaline sahip sıkı paketlenmiş hegzagonal arı peteği yapısındadır (Şekil 3.14).



**Şekil 3.14.** Grafen tek tabakanın şematik görüntüsü

Her bir karbon atomu üç tane komşu karbon atomuyla kovalent bağ yaparak iki boyutlu bir yapı oluşturmuştur. Her tabaka ise kendi arasında Van der Waals bağı ile bağlanmıştır. Van der Waals bağ kuvveti kovalent bağ kuvvetinden çok daha zayıf olduğu için grafit her bir tabaka yönünde kolayca ayrılabilir.

2004 yılında Manchester üniversitesinden A. Geim ve K. Novoselov grafeni ayırmak için bir metot geliştirmişlerdi (Novoselov ve ark. 2004). Bu metotda, tek tabaka grafenlerin ayrılmasını sadece yapışkan bir bant kullanarak sağlamışlardı. Bu yüzden bu yöntemin diğer bir ismi de "Selo bant" yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen grafen tabakalar yalnızca birkaç atom kalınlığında olmasına karşın çevre koşulları

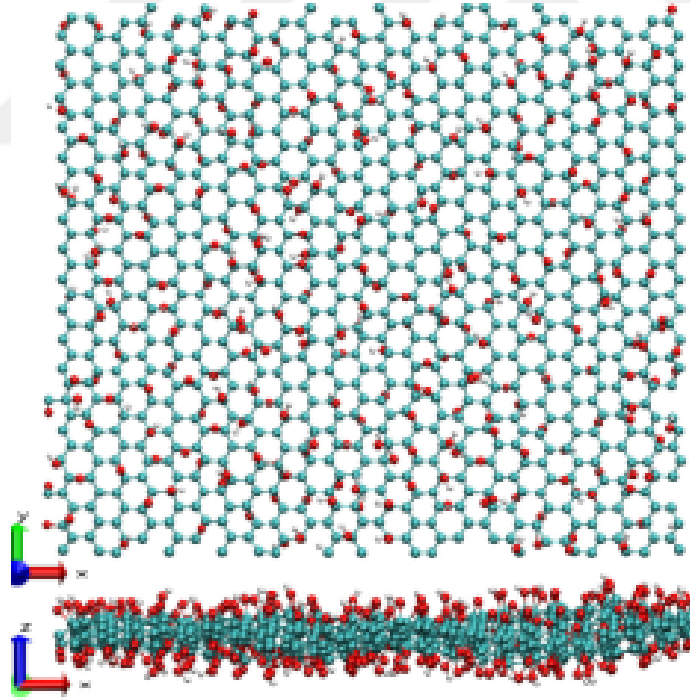
altında kararlı ve yüksek nitelik göstermiştir. A. Geim bu tabakaları, tek tabaka kristal filmler olarak ifade etmiştir. Bu filmlerin, iletim bandı ve valans bandı arasında çok ince aralık bulunan iki boyutlu yarımetal olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu ince filmlerin güçlü bir ambipolar elektrik alan etkisi sergilediğini tespit etmişlerdir. Bu filmlerin  $\text{cm}^2$  başına  $10^{13}$ 'e kadar varan elektron ve boşluk konsantrasyonuna sahip olduğunu göstermişlerdi (Novoselov ve ark. 2004). Bulunan tek tabaka grafenlerin elektrik alan etkisine sahip olup böylelikle yük taşıyıcılarının elektron veya boşluk olarak ayarlanabileceğini ifade etmişlerdi. Hatta oda sıcaklığında bu tabakaların balistik iletim gösterdiğini kanıtladılar. Uygulanan bir kapı gerilimi ile oda sıcaklığındaki mobilitesinin  $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olduğunu gözlemlemişlerdi. Daha sonra A. Geim ve ark. grafen tabakaları elde etmek için yüksek yönelimli pirolitik grafiti (HPOG) kullanmışlardı. Bu şekilde grafen üretimi oldukça güvenilir bulundu ve  $10 \mu\text{m}$  boyutlarına kadar tek tabaka grafen filmler hazırlamaya izin vermişti. Ayrıca daha kalın filmler için (kalınlık  $> 3 \text{ nm}$ ) boyutları  $100 \mu\text{m}$ 'ye kadar çıkarılabilmiş ve çıplak gözle bile görülebilir boyutlara ulaşılmıştır (Novoselov ve ark. 2004). A. Geim ve K. Novoselov yapmış oldukları bu buluş nedeniyle 2010 Nobel Fizik ödülünü almaya hak kazanmışlardır.

Grafende band aralığı çok küçük olup, iletim ve valans bandı arasındaki enerji farkı  $\delta\varepsilon$  kadardır. Grafenlerin tabaka kalınlığı değiştikçe bu değer  $4 \text{ meV}$  den  $20 \text{ meV}$ 'a kadar değişmektedir. Üç boyutlu grafitte, iki boyutlu grafene nispeten bu band aralığı değeri çok daha yüksektir ve yaklaşık olarak  $40 \text{ meV}$  değerindedir. Tabaka sayısının giderek azalmasıyla  $\delta\varepsilon$  aralığının giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuçta tek tabaka grafen sıfır band aralıklı yarıiletken olarak tanımlanmıştır (Novoselov ve ark. 2004).

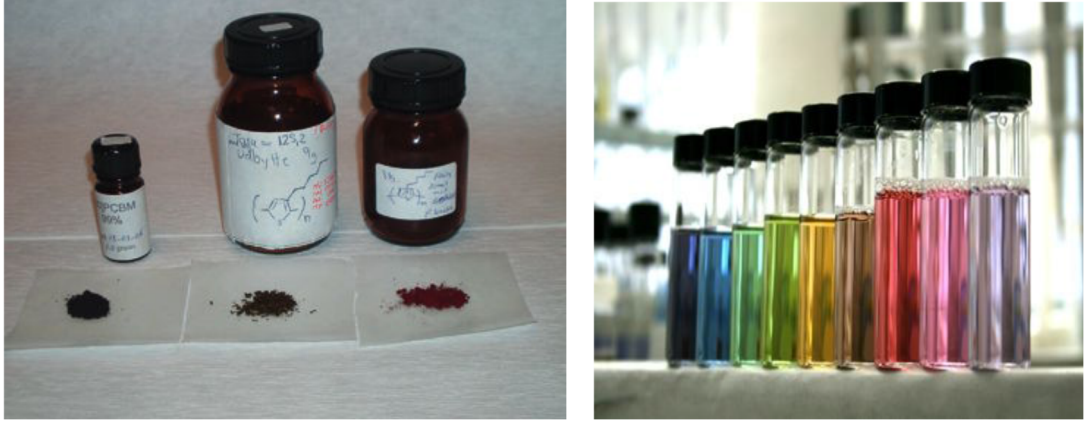
Grafen birim yapısı, düşük direnci, oldukça yüksek mobilitesi ve yaklaşık sıfır yasak band aralığı gibi birçok özelliğinden dolayı ilgi merkezi olmuştur (Huang ve ark. 2010, Contreras ve ark. 2015). Grafenin oda sıcaklığında mobilitesi  $15000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  olup, ayarlanabilir yasak band aralığı, görünür bölgede yüksek geçirgenlik özelliği ve yüksek mekanik dayanıklılığa sahiptir (Phan ve ark. 2012). Grafenin diğer özellikleri arasında görünür bölgeden kızılötesine güçlü band içi geçişleri ve oldukça hızlı tepki vermesiyle foton soğurma özelliği yer alır. Bu özelliği grafeni fotovoltaik uygulamalar için oldukça

çekici yapmaktadır. Diğer taraftan grafen oksit ise hem grafenin iskelet yapısına sahip olması hem de temel yapıda veya tabaka kenarlarında tutunan oksijen içeren fonksiyonel gruplara sahip olması malzemeyi kimyasal, optik ve elektronik özellikleri bakımından büyüleyici kılmaktadır. Özellikle oksijen içeren grupların kolay modifikasyonu ile farklı özelliklere sahip grafen oksit yapılar üretilebilmesi bu yapıya ilgiyi daha da artırmıştır. Üstelik oksijen içeren grupların tamamen ortadan kaldırılmasıyla sıfır yasak band aralığına bile ulaşmak mümkündür ki bu durumda oksijen içeren grupların yerini metal ya da yarıiletken nano parçacıklar almaktadır (Contreras ve ark. 2015).

Grafen oksit, grafenin okside hali olup hidroksil, epoksid ve karboksil grup gibi birçok fonksiyonel grup içerir. Şekil 3.15’de grafen oksitin yapısı görülmektedir (Fonseca ve ark. 2015). Bu fonksiyonel gruplarla çeşitli uygulamalar için grafen oksit nano tabakasının özelliklerini modifiye etmek mümkün olmaktadır (Çaldıran ve ark. 2015).



**Şekil 3.15.** Epoksid ve hidroksil gruplar içeren GO yapısının üstten ve yandan görünüşü. Karbon, oksijen ve hidrojen atomları sırasıyla cyan, kırmızı ve beyaz renkte belirtilmiştir (Fonseca ve ark. 2015)



**Şekil 3.16.** Toz ve çözelti haldeki farklı polimerlerin görünümü (Krebs 2008)

### 3.4. Deneysel İşlemler

Diyotların oluşturulmasında bütün aşamalarda deneysel araçların ve kullanılan malzemelerin temizliği konusunda hassasiyet gösterildi. Çünkü bu diyotların sağlıklı bir şekilde oluşması için önem arz etmektedir.

Çalışmada (100) doğrultusunda büyütülmüş 50,8 mm çapında ve 400  $\mu\text{m}$  kalınlıkta n-GaAs altlık kullanılmıştır. Numune hazırlama sırasında kullanılacak malzemeler bir takım kimyasal temizleme işlemlerine tabi tutulmuştur.

#### 3.4.1. 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 (deiyonize su 18  $\text{M}\Omega\text{-cm}$ ) ile temizlenip yüksek sıcaklıktaki fırında kurutuldu.

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.
- g. N<sub>2</sub> gazı uygulanarak kurutuldu.

3. GaAs altlıkların temizliği RCA temizleme işlemine uygun olarak aşağıdaki gibi yapılmıştır. Üretim aşamasında, öncelikle GaAs altlıklar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> karışımı çözelti içerisinde yaklaşık 10 dakika kaynatılmış, bunu takiben HCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 6H<sub>2</sub>O çözeltide 10 dakika bırakıldıktan sonra 1 dakika % 20 HF çözeltisinde tutulup 18 MW-cm özdirençli deiyonize suda yıkanmıştır. Son olarak yüksek saflıkta N<sub>2</sub> gazı ile kristal kurutulmuştur.

#### **3.4.2. Omik kontağın oluşturulması**

Omik kontak n-GaAs altlığın mat yüzeyine aşağıdaki işlem basamakları takip edilerek gerçekleştirilmiştir:

1. VK-0814 Midas Termal Buharlaştırıcı cihazının metal eritme potası kimyasal olarak ultrasonik banyoda temizlendi ve deiyonize su ile iyice durulandı. Pota saf azot gazı ile kurutuldu.
2. Omik kontak için % 88 Au ve % 12 Ge kullanılmıştır (Schroder 1990, Kwok 1995).
3. Kimyasal olarak temizlenen Au ve Ge parçacıkları yine kimyasal olarak temizlenmiş olan pota içerisine yerleştirildi.
4. GaAs altlık termal buharlaştırma sisteminde arka yüzü (mat yüzü) aşağıya bakacak şekilde özel bir bantla sabitlenerek yerleştirildi.
5. Altlık ve buharlaştırılacak malzemeler termal buharlaştırma sistemine yerleştirildikten sonra vakumlama işlemine geçildi.

6. Vakum seviyesi  $5,1 \times 10^{-6}$  Torr'un altına indiğinde pota üzerinden akım geçirilerek ( $>> 255$  A) % 99.995 'lik saflığa sahip Au ve yine yüksek saflıktaki Ge parçacıkları, buharlaştırılarak omik kontak oluşturuldu.
7. n-GaAs altlıkların mat yüzeyine gerçekleştirilen omik kontağın (Au:Ge) kalınlığı  $\sim 1875$  Å dür. Kalınlık bilgisayar kontrolünde tam otomatik olarak gerçekleştirildi.
8. Kaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra altının yarıiletken içerisine çökmesini sağlamak üzere numune hızlı tavlama işlemine (RTA) tabi tutulmuştur. Bunun için öncelikle numuneye 1 dakika  $N_2$  gazı uygulandıktan sonra  $450$  °C'de 5 dakika kuvarz fırında tutulup ardından 2 dakika tekrar  $N_2$  gazı uygulanarak tavlama işlemi gerçekleştirildi. Böylece omik kontak işlemi tamamlanmış oldu.
9. Omik kontak hazırlandıktan sonra numune bilgisayar kontrolünde  $1\text{cm}^2$  lik eşit yüzeyli parçalar halinde kesme işlemine tabi tutulmuştur.

### **3.4.3. Polimer tabakanın oluşturulması**

#### **3.4.3.1. Çözelti hazırlanması**

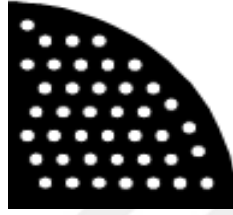
Çalışmada P3HT, 1:4 kütle oranına (0,0048 g MEH-PPV; 0,0192 g PCBM) sahip karışım MEH-PPV:PCBM ve GO iletken organik materyalleri kullanılmıştır. Çözelti hazırlama işleminde P3HT ve MEH-PPV:PCBM iletken polimerleri 10 mg/ml polimer ve 5 mg/ml klorobenzen ile karıştırılarak  $50^\circ\text{C}$ ' de, 1 saat süreyle manyetik karıştırıcı kullanılarak çözüldü. Karıştırma esnasında çözeltinin ışık almaması için cam tüplerin etrafı folyo ile kapatıldı. GO çözeltisi ise doğrudan GO tozunun suda ultrasonik olarak dağıtılması ile hazırlanmıştır. Sıcaklık ve süre kriterleri kullanılarak çözeltilerin hazırlanması sağlandı.

#### **3.4.3.2. İnce film hazırlanması**

Hazırlanan P3HT, MEH-PPV:PCBM ve GO çözeltileri GaAs altlıkların üzerine mikropipetle yüzeye tam olarak dağıtıldı ve döndürerek kaplama (spin-coating) yöntemi ile kaplandı. İletken polimerler, 1200 rpm döndürme hızıyla 60 s döndürülerek, GaAs altlıkların ön yüzeyine kaplandı. Daha sonra numuneler  $150$  °C'de 10 dakika süreyle

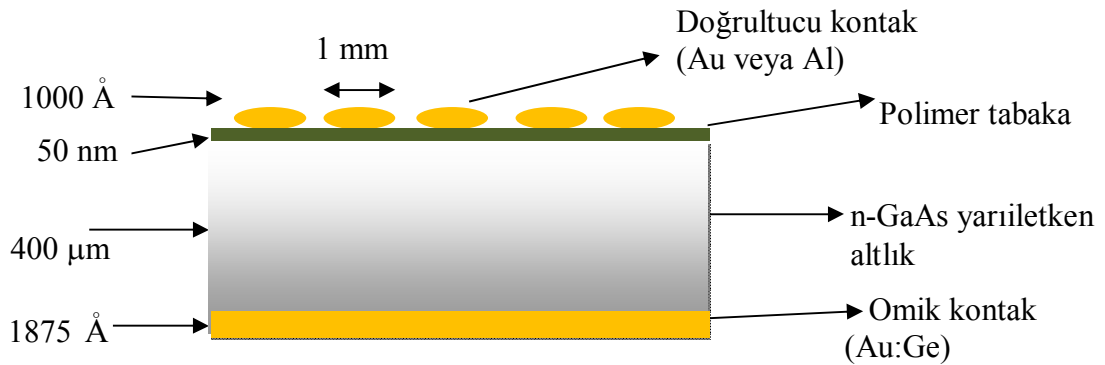


fırında tavlandı. Son olarak doğrultucu kontaklar Univex 450 buharlaştırma sisteminde oluşturuldu. Polimer kaplamalı ön yüzeye doğrultucu kontak oluşturma işlemi yaklaşık 1000 Å kalınlığında % 99.995 saflıkta Au veya Al buharlaştırılarak gerçekleştirildi. Doğrultucu kontak için Şekil 3.17'ye benzer bir maske kullanılmıştır. Böylece Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au, Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al ve Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyotları elde edilmiştir.



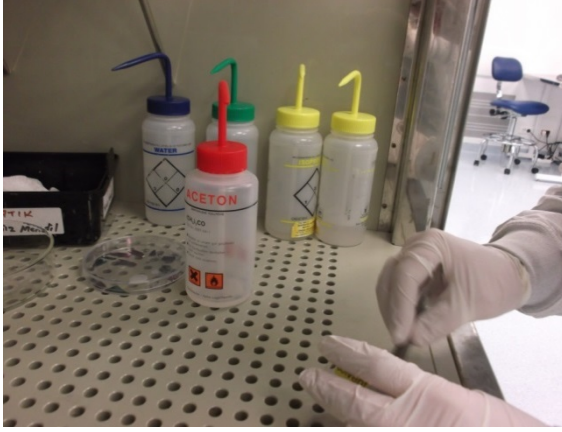
**Şekil 3.17.** Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske

Hazırlanan diyotların şematik gösterimi Şekil 3.18'de verilmiştir. Polimer tabakanın kalınlığı 50 nm olarak elde edilmiştir.

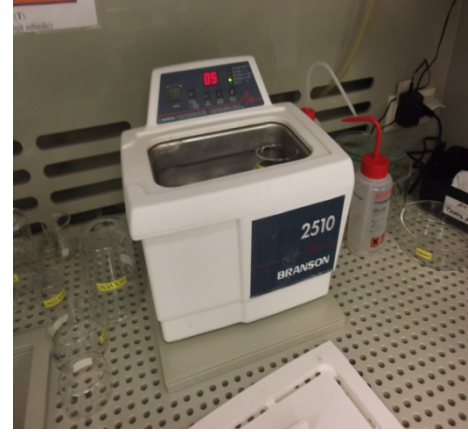


**Şekil 3.18.** Üretilen Metal/Polimer/Yarıiletken diyotların şematik gösterimi

Diyotların üretim aşamaları Şekil 3.19-23 arasında adım adım verilmiştir. Şekil 3.24'de ise üretilen diyotların son hali görülmektedir.

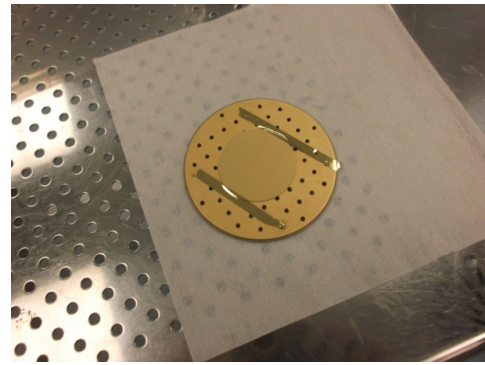
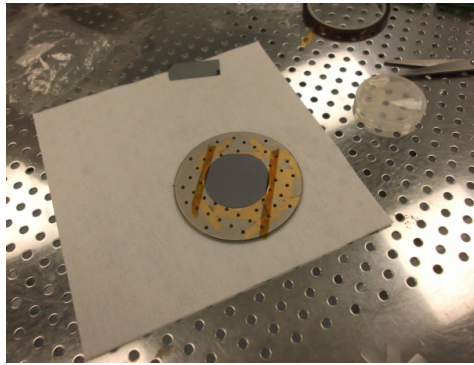
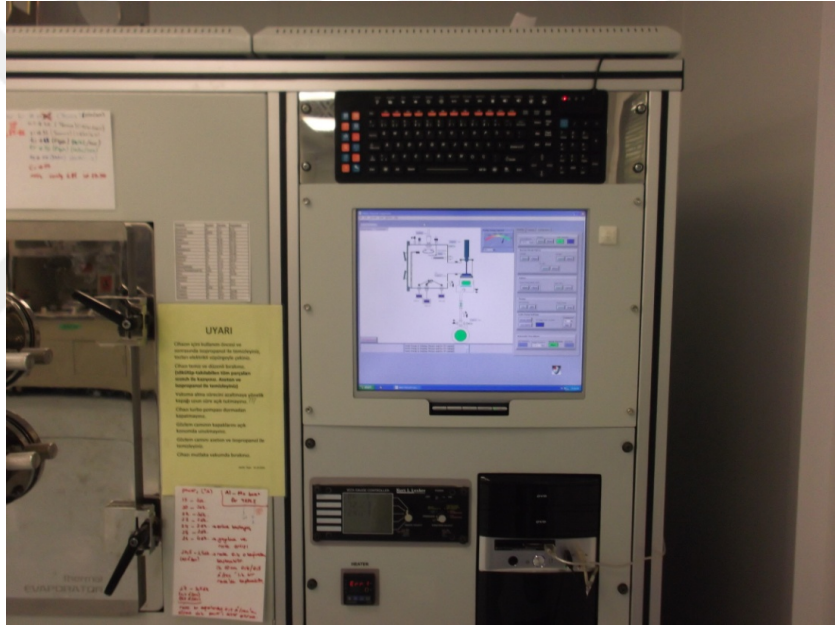


(a)



(b)

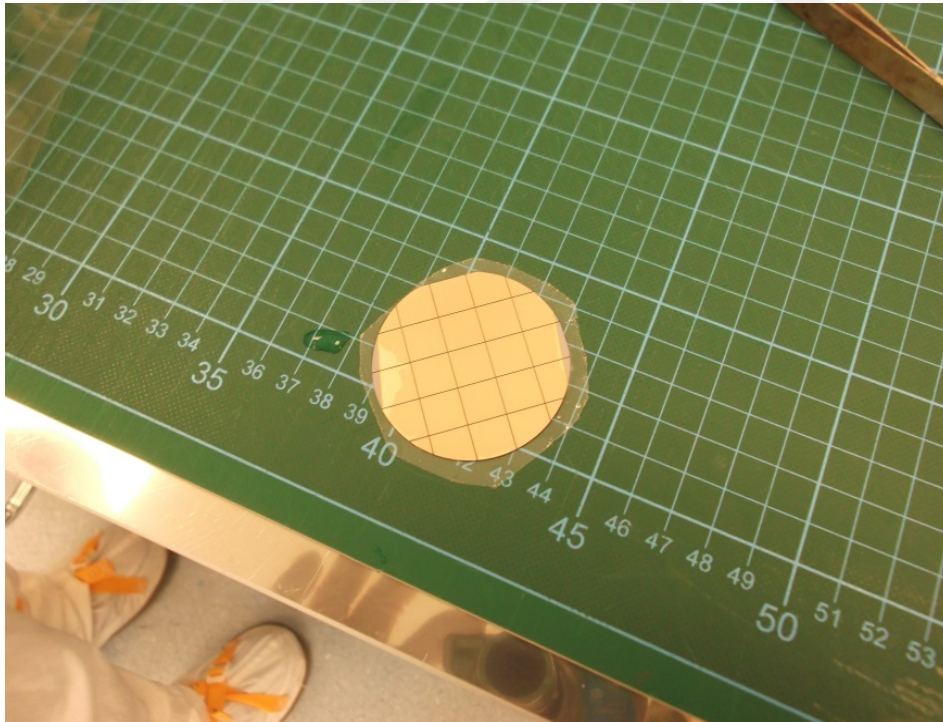
**Şekil 3.19.** Kimyasal temizlik aşaması; a) çeker ocakta altlıkların temizlenmesi, b) Deiyonize suda ultrasonik temizleme



**Şekil 3.20.** Omik kontağın VK-0814 Midas Termal Buharlaştırıcıda oluşturulma aşaması



(a)



(b)

**Şekil 3.21.** a) Hızlı termal tavlama (RTA) ve b) omik kontaklı numunenin bilgisayar kontrolünde kesilme aşaması

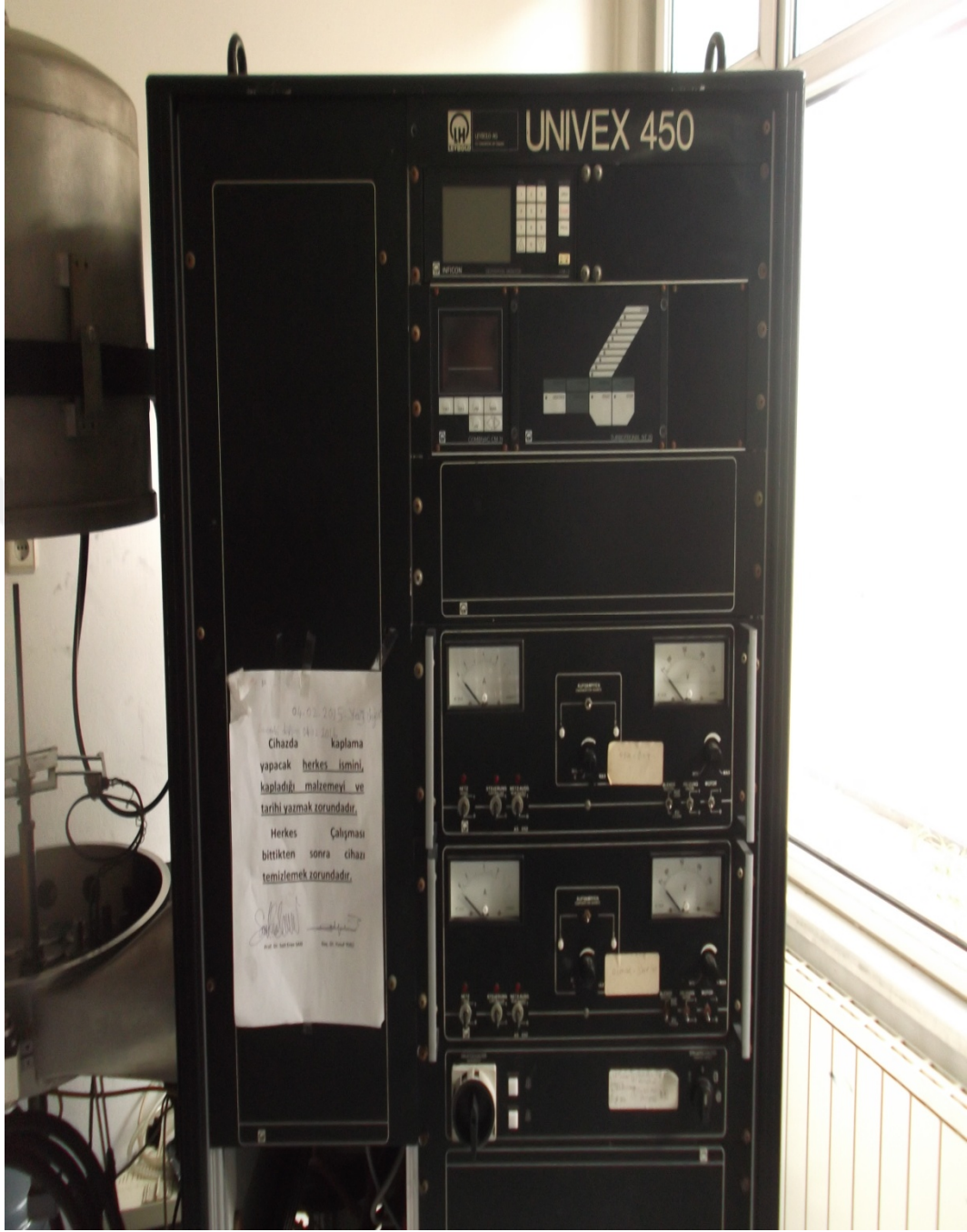


(a)



(b)

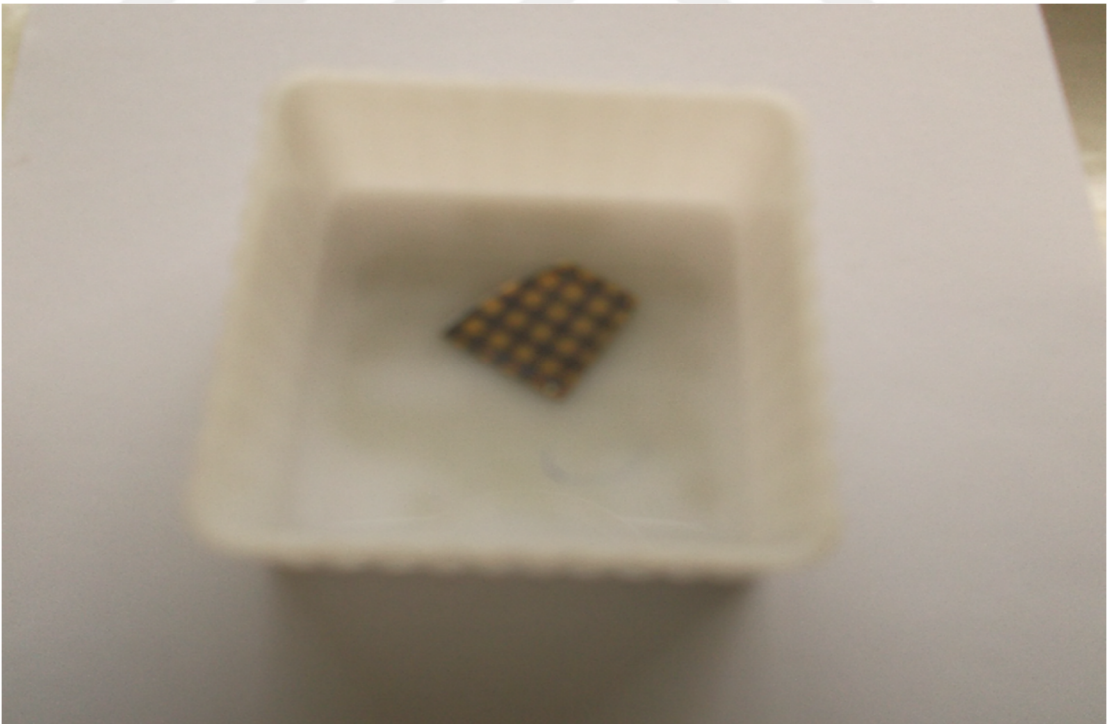
Şekil 3.22. a) Spin Coater cihazı ile polimer kaplama b) ve fırınlama aşaması



**Şekil 3.23.** Son olarak doğrultucu kontaktların Univex 450 buharlaştırma sisteminde oluşturulma aşaması



(a)



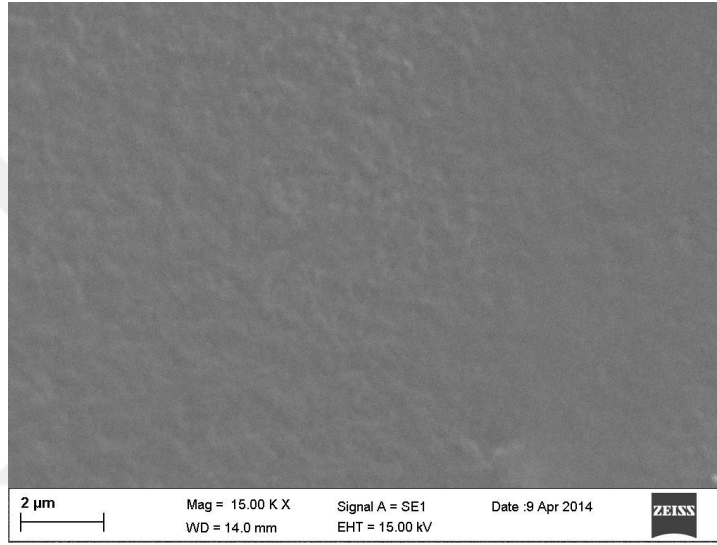
(b)

**Şekil 3.24.** Üretilen diyotların son hali a) Au/n-GaAs/P3HT/Au, Au/MEH-PPV:PCBM/Al ve b) Au/n-GaAs/GO/Au

### 3.5. Kullanılan Ölçüm Düzenegi

#### 3.5.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

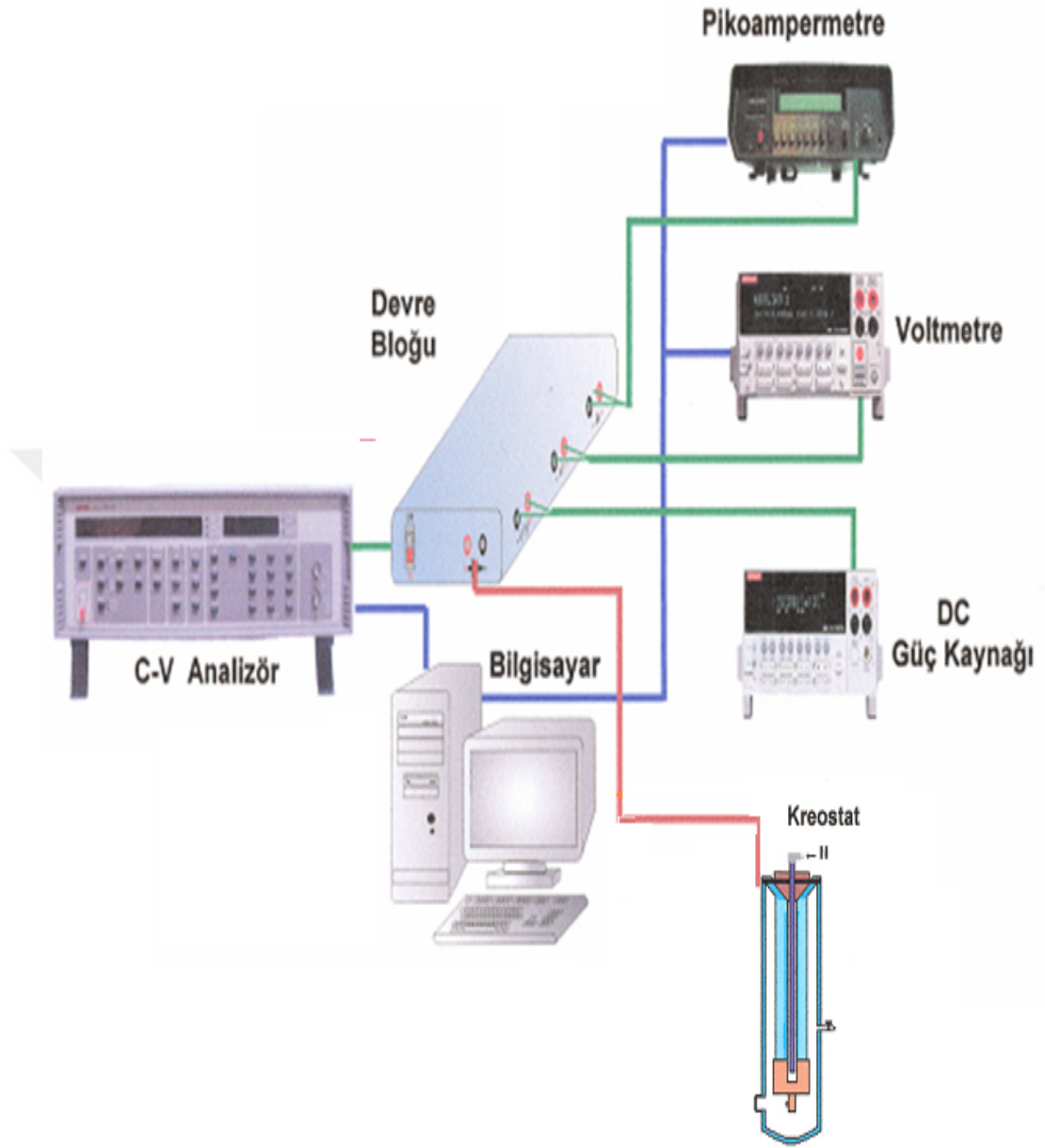
Altın kaplanmış numunelerin yüzey mikrografları değişik büyütmelerde 1 milyon büyütme kapasitesine sahip olan CARL ZEISS EVO 40 Model taramalı elektron mikroskobu ile alındı. 15 kV gerilim altında alınan görüntülerde polimer tabakanın GaAs altlığı üzerine homojen şekilde dağıldığı görülmektedir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Au/n-GaAs/P3HT/Au Schottky diyodun SEM görüntüsü

#### 3.5.2. Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzenegi

Fiziksel karakterlerin ölçülmesi, Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Akım-Voltaj (I-V) ölçümleri için Keithley 2400 Sourcemeeter kullanıldı. Ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına bağlı bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.26.** Deneysel ölçümler için kullanılan düzenek



### 3.5.3 Kapasitans-Voltaj ölçüm sistemi

Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümleri Empedans Analizörü (HP 4194) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler bilgisayara bağlı bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kontrol edilerek alındı. C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri farklı frekanslarda yapılarak analiz edilmiştir.

Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneği Şekil 3.27’de görülmektedir.



Şekil 3.27. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümlerinin gerçekleştirildiği Empedans Analizörü (HP 4194)

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

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

#### 4.1.1 Oda sıcaklığında Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının I-V karakteristiklerinin incelenmesi

Bu bölümde öncelikle iletken polimer tabakanın geleneksel Au/n-GaAs/Au Schottky diyodunun elektriksel özelliklerine etkisini ortaya koymak amacıyla Au/n-GaAs/Au ve iletken polimer ara yüzeyli Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotları üretildi. Diyotlar imal edildikten sonra Au/n-GaAs/Au referans Schottky diyodunun elektriksel özelliklerinin modifikasyonunu belirlemek için referans Au/n-GaAs/Au ve ara yüzey polimer tabakalı Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının I-V ölçümleri kullanılarak elektrik özellikleri incelendi.

Termoionik emisyon teorisine göre Schottky diyodun akım-gerilim ifadesi aşağıdaki gibidir (Sze 1981, Schroder 1990):

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

Burada I ölçülen akım, V uygulanan gerilim, n idealite faktörü, k Boltzman sabiti, T sıcaklık, q elektronun yükü ve  $I_0$  da doyma akımıdır.  $I_0$  lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin sıfır gerilimdeki değeri olup;

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

ile verilir. Burada A diyot alanı,  $A^*$  Richardson sabiti olup n-tipi GaAs için  $8,16 \text{ A cm}^{-2}\text{K}^{-2}$  dir (Singh 1995, Karataş ve Türüt 2006).  $\Phi_B$  ise sıfır beslemde etkin bariyer yüksekliğidir.

Eş. (4.1) ifadesinin her iki tarafının ln'i alınır;

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

elde edilir. Bu ifade akımın gerilimin bir fonksiyonu olarak doğru denklemdir. Bu doğrunun eğiminden idealite faktörü hesaplanabilir. Bu denkleme göre lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin eğimi q/nkT ifadesini verir. Buna göre idealite faktörü;

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

olarak elde edilir.  $I_0$  doyma akımı değeri de, lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının lnI eksenini kestiği noktadan bulunabilir.

$\Phi_B$  ise sıfır beslemde etkin bariyer yüksekliği olarak bilinir ve  $I_0$  doyma akımını veren Eş. (4.2) aşağıdaki gibi düzenlenerek;

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

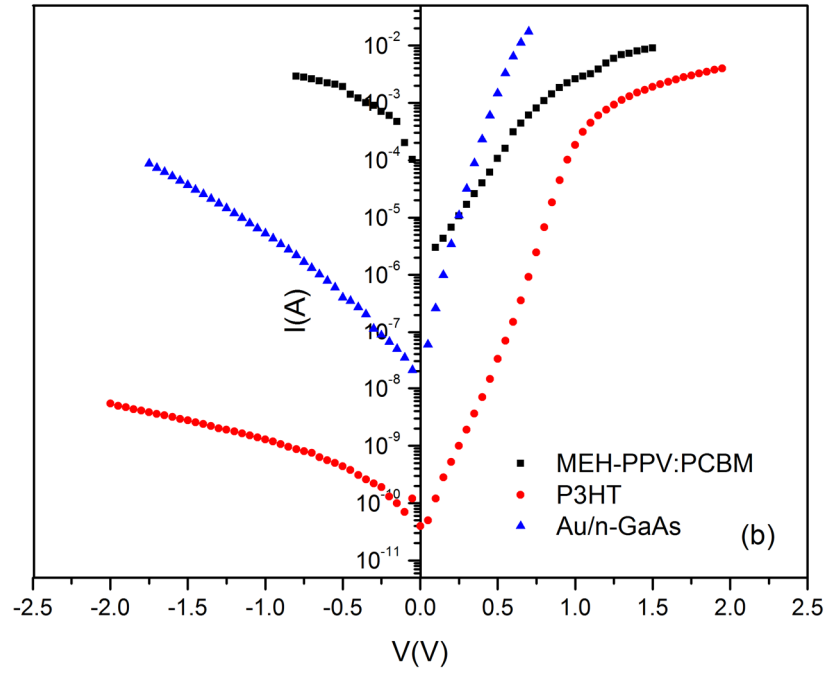
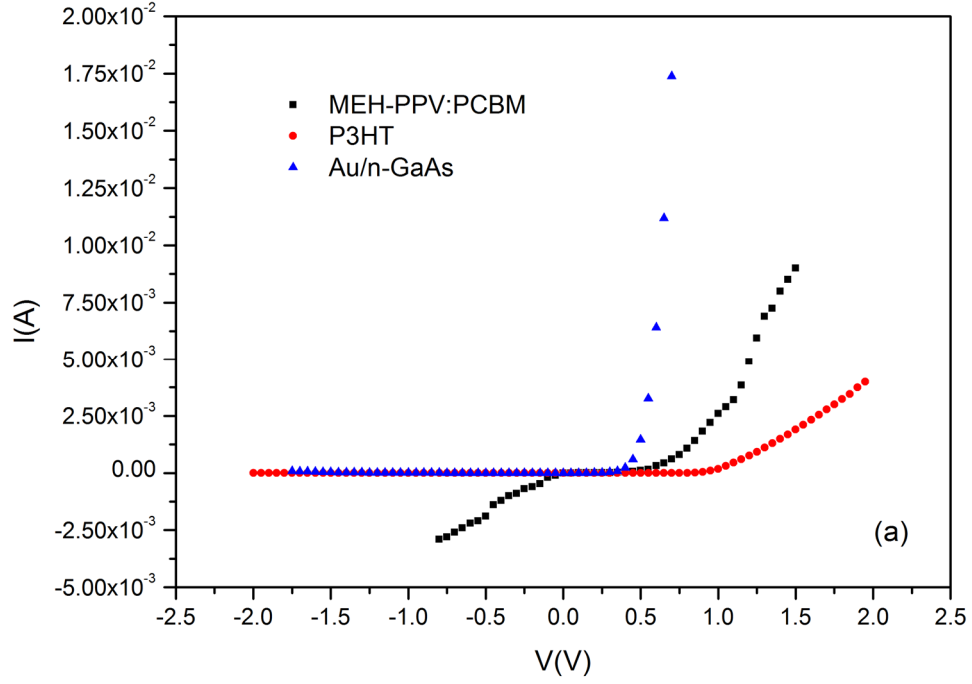
$$\ln\left(\frac{I_0}{AA^*T^2}\right) = \ln\left[\exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right)\right] \quad (4.5a)$$

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

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

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.6)$$

elde edilir. Böylece bu ifade yardımıyla  $\ln I$ - $V$  grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının  $\ln I$  eksenini kestiği noktadan bulunan  $I_0$  değeri de kullanılarak engel yüksekliği değeri hesaplanabilir.



**Şekil 4.1.** Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının; a) I-V ve b)  $\ln(I)$ -V grafikleri

Çalışmada üretilen Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının akım-gerilim ölçümleri oda sıcaklığında alınmış ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

Grafiklerden, elde edilen aygıtların diyot karakteristiği gösterdiği anlaşılmaktadır. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri Şekil 4.1’de verilen lnI-V grafiklerinin yardımıyla sırasıyla Eş. (4.4) ve Eş. (4.6) kullanılarak hesaplanmıştır.  $I_0$  doyma akımı değeri de, lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının lnI eksenini kestiği noktadan belirlenmiştir. Elde edilen doyma akımı ( $I_0$ ), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Üretilen diyotların I-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metotları yardımıyla elde edilen diyot parametreleri

DİYOTLAR	n	$I_0$ (A)	$\Phi_B$ (eV)	H (I)-I		V-F(V)		$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )		
				$dV/d\ln(I) - I$		$V-F(V)$				
				n	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_B$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )			
Au/n-GaAs/Au	1,64	$2,5 \times 10^{-7}$	0,68	1,93	5,65	0,69	6,49	0,77	9,30	$7,04 \times 10^{11}$
Au/P3HT/n-GaAs/Au	2,45	$2,53 \times 10^{-11}$	0,85	2,51	217	0,85	206	1,05	214	$7,09 \times 10^{11}$
Au/MEH-PPV:PCBM/n-GaAs/Al	4,39	$1,5 \times 10^{-6}$	0,57	4,54	51	0,57	53	0,63	50,93	$1,09 \times 10^{12}$

Çizelge 4.1’i incelediğimizde Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının idealite faktörlerinin 1’den büyük olduğu görülmektedir. İdeal bir diyot için  $n = 1$ ’dir. Bununla birlikte idealite faktörü genellikle 1’den büyüktür. İdealite faktörünün 1’den büyük olmasına ara yüzey durum yoğunluğu, ara yüzey yüklerinin düzensizliği ve seri direnç gibi çeşitli faktörlerin neden olduğu düşünülebilir (Sze 1981, Kwok 1995). Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi polimerli yapı içeren Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının idealite faktörleri oldukça büyük olup Au/n-GaAs/Au diyodunun idealite faktörünün sırasıyla yaklaşık 1,5 ve 2,7 katıdır. Bu ise P3HT ve MEH-PPV:PCBM organik ara yüzey film kalınlığı, tüketim bölgesindeki güçlü rekombinasyon etkisi veya termiyonik emisyon

ile açıklanamayan tünelleme akımları gibi akımların varlığı ile açıklanabilir (Rhoderick ve Williams 1988).

Diyotların doğru yön beslemde I-V karakteristiklerini incelediğimizde artan voltaj değerleri ile birlikte ideal doğrultucu kontak özelliğinden kayda değer bir şekilde sapma gözlenmektedir (Şekil 4.1). İdealden bu sapmaya ara yüzey durum yoğunlukları ve seri direnç sebep olmaktadır. Seri direnç etkisi metal ile yarıiletken arasında yer alan organik ara yüzey tabakanın varlığından kaynaklanmakta ve bu tabaka lineer olmayan davranışa neden olmaktadır (Türüt ve ark. 1995, Soylu ve ark. 2013). Seri direnç  $R_s$  Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli bir parametredir.  $R_s$  ile birlikte idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi diyot parametreleri Cheung fonksiyonları yardımıyla elde edilebilir (Cheung ve Cheung 1986).

$V > 3kT/q$  değerleri için Eş.(4.1)'deki 1 değeri ihmal edilebilir (Rhoderick ve Williams 1988). Böylece Eş. (4.1) basitçe;

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (4.7)$$

olur. Seri direnç etkisi ( $R_s$ ) de hesaba katıldığında Eş.(4.7)

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (4.8)$$

olarak yazılabilir. Eş. (4.2) ile verilen  $I_0$  ifadesi de Eş. (4.8)'de yerine yazılırsa;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] \quad (4.9)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade aşağıdaki gibi düzenlenip her iki tarafın ln'i alınırsa;

$$\frac{I}{AA^*T^2} = \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] \quad (4.10)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{q\Phi_B}{kT} + \frac{q(V - IR_s)}{nkT} \quad (4.10a)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = \frac{-qn\Phi_B + qV - IR_s}{nkT} \quad (4.10b)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \frac{nkT}{q} = -n\Phi_B + V - IR_s \quad (4.10c)$$

buradan potansiyel ifadesi;

$$V = \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \frac{nkT}{q} + n\Phi_B + IR_s \quad (4.11)$$

olarak elde edilir. Bu eşitliğin de  $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.12)$$

sonucu elde edilir. Bu ifade Cheung fonksiyonlarının ilkidir. İfadeden görüldüğü gibi  $dV/d(\ln I)$ ,  $I$ 'nın bir fonksiyonu olup aralarında doğrusal bir ilişki vardır.  $I$ 'ya karşı  $dV/d(\ln I)$ 'nın grafiği çizilirse bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi doğrudan seri direnç  $R_s$ 'yi verir. Denklemin düşey  $y$  eksenini kestiği nokta ise  $nkT/q$  değerine eşittir. Sabit  $k$ ,  $T$  ve  $q$  değerleri denklemin düşey eksenini kestiği değerlerde yerlerine konularak  $n$  idealite sabiti hesaplanabilir.

Engel yüksekliği ifadesi  $\Phi_B$ 'yi bulmak için ise aşağıda verilen diğer Cheung fonksiyonları kullanılır.

$$H(I) = V - n \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.13)$$

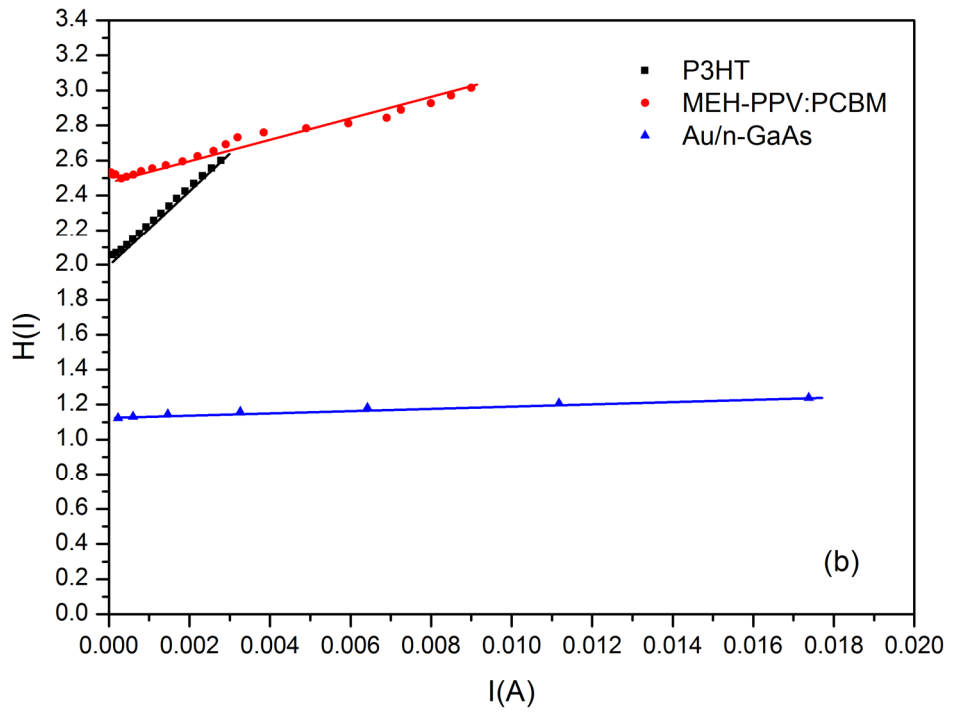
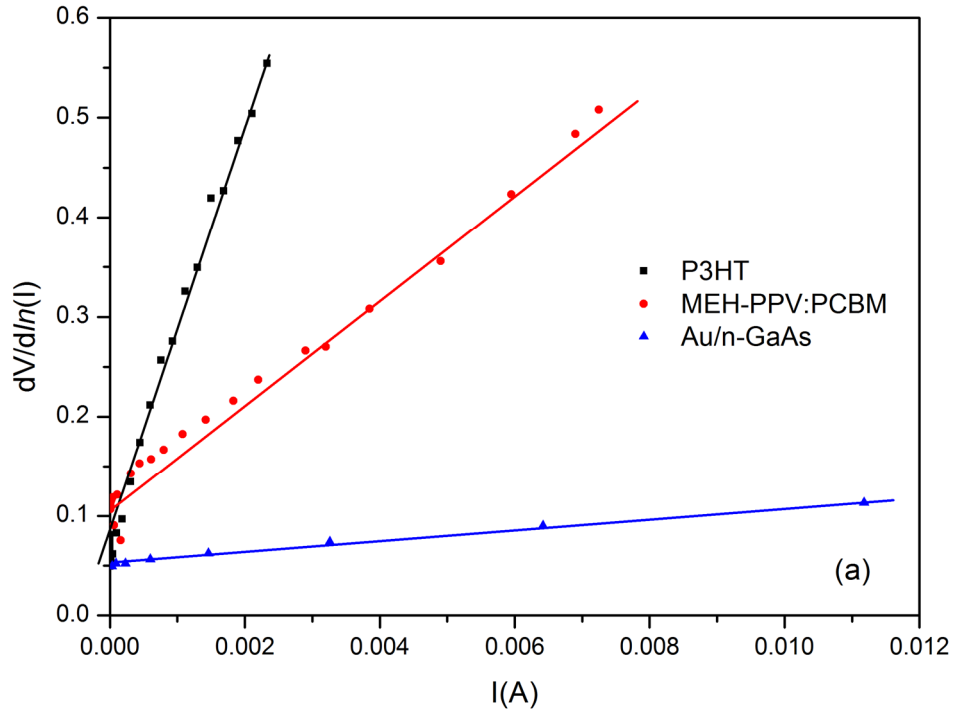
H(I) değerleri Eş. (4.12)'den elde edilen n değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Elde edilen H(I) değerleri aşağıda verilen son Cheung fonksiyonunda kullanılır.

$$H(I) = IR_s + n\Phi_B \quad (4.14)$$

Bu Cheung fonksiyonundan da görüldüğü gibi H(I) değerleri ile I değerleri arasında doğrusal bir ilişki vardır. H(I)'nın I'ya karşı grafiği çizilirse yine bir doğru elde edilir. Bu doğrunun eğimi doğrudan seri direnç  $R_s$  değerini verir. Doğrunun y eksenini kestiği değer ise  $n\Phi_B$  çarpımına eşittir. Bu değer, değer bilinen idealite faktörü n'ye bölünürse, engel yüksekliği  $\Phi_B$  değerini elde edilir.

şekil 4.2'de Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının  $dV/d\ln(I)$ -I ve H(I)-I grafikleri verilmiştir. Bu grafikleri kullanarak Eş. (4.12), (4.13) ve (4.14) ile verilen Cheung fonksiyonları yardımıyla idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'den I-V metot ve Cheung metodu ile elde edilen engel yüksekliği değerlerinin uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerleri de uyum içindedir.  $dV/d\ln(I)$  - I grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri  $\ln I$ -V grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerlerinden büyüktür. Bu durum seri rezistans ve ara yüzey durumlarının varlığı ve ara yüzeye voltaj düşümüne atfedilmektedir (Sönmezoğlu ve ark. 2010).





**Şekil 4.2.** Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının a)  $dV/d\ln(I)$ -I ve b)  $H(I)$ -I grafikleri

Öte yandan Norde fonksiyonları seri rezistans değeri ve engel yüksekliğini elde etmemiz için alternatif bir metot sunmaktadır. Norde fonksiyonları aşağıdaki gibidir (Norde 1979, Aydın ve ark. 2011):

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.15)$$

Burada  $\gamma$  idealite faktörü n'den büyük bir tamsayıdır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre  $\gamma$  değerleri Au/n-GaAs/Au için 2, Au/n-GaAs/P3HT/Au için 3 ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapısı için 5'tir. Eş. (4.15)'den görüldüğü gibi F(V) fonksiyonu I-V değerlerine bağlı bir fonksiyondur. V'ye karşı F(V) grafiğinin minimum değerinden aşağıda verilen eşitlik yardımıyla engel yüksekliği hesaplanabilir.

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.16)$$

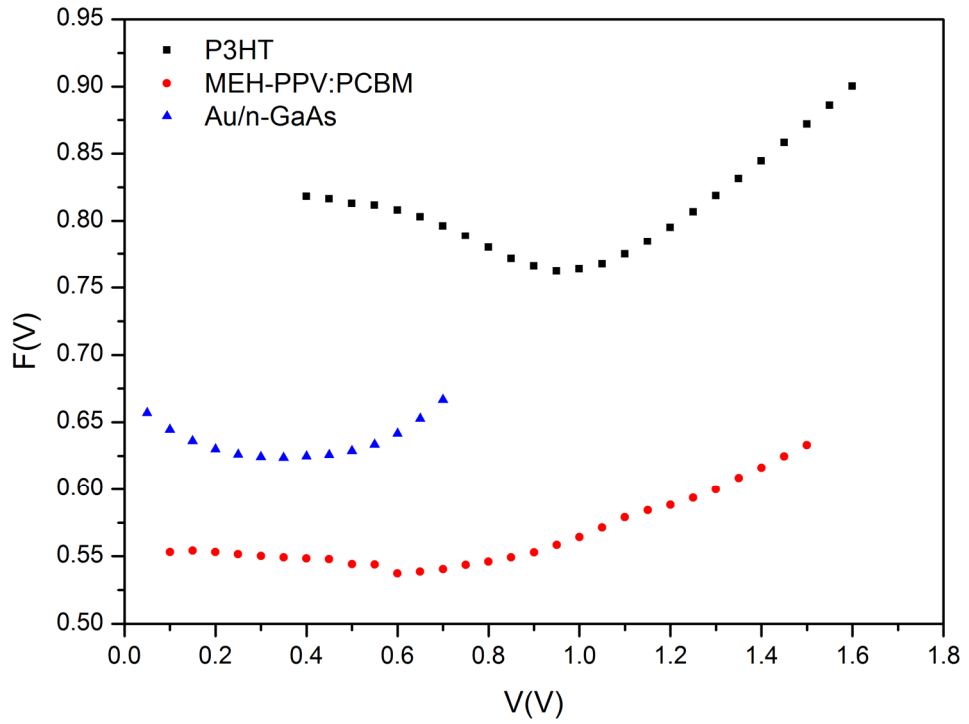
Burada F(V<sub>0</sub>), F(V)'nin minimum değeri ve böylece V<sub>0</sub> da buna karşılık gelen voltajdır. Şekil 4.3'de F(V)-I grafiği görülmektedir. V<sub>0</sub> ve F(V<sub>0</sub>) değerleri Şekil 4.3'den elde edilebilir.

Seri direnç ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (4.17)$$

Eşitlikteki I<sub>0</sub> değeri V-F(V) grafiğinde V<sub>0</sub>'a karşı gelen akım değeridir.

Eşitlik (4.16)'dan engel yüksekliği ve Eşitlik (4.17)'den elde edilen seri direnç değerleri Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapıları için hesaplanarak Çizelge 4.1'de verilmiştir.



**Şekil 4.3.** Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının V'ye karşı F(V) grafikleri

Çizelge 1'den görüldüğü gibi Norde metottan elde edilen bazı seri direnç değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinden daha büyüktür. Bunun nedeni Cheung fonksiyonları yüksek doğru beslem voltaj değerlerini alarak, Norde fonksiyonları ise tüm doğru beslem voltaj değerlerini alarak seri direnç değerlerini hesaplamalarıdır. LnI-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metottan elde edilen engel yükseklikleri arasında farklar görülmektedir. Bu farka ara yüzey yalıtkan tabaka, kenar kaçak akımları ve derin kirlilik seviyelerinin neden olabileceği düşünülmektedir (Sze 1981).

İdealite faktörünün birden büyük olması yalıtkan ara yüzey tabakasının bir sonucu olduğundan idealite faktörü ara yüzey parametrelerine de bağlı olmalıdır (Sze 1981). Yarıiletken ile dengede olan ara yüzey durumları için durum yoğunluğu  $N_{ss}$ 'i idealite faktörü ve oksit tabaka kalınlığı ( $\delta$ ) niceliklerine bağlayan ifade (Sze 1981, Schroder 1990),

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[ \frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.18)$$

ile verilir. Burada  $\delta$  tabaka kalınlığı,  $W_D$  uzay yük tabakasının genişliği,  $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_i$  sırasıyla yarıiletkenin ve yalıtkan tabakanın dielektrik sabitleridir. n-GaAs için  $\varepsilon_s = 13,1\varepsilon_0$  (Karataş ve Türüt 2006), polimersiz yapı için  $\varepsilon_i = 4\varepsilon_0$  (Karataş ve Türüt 2006), P3HT için  $\varepsilon_i = 4,4 \varepsilon_0$  (Cho ve ark. 2012) ve MEH-PPV:PCBM (1:4) için  $\varepsilon_i = 3\varepsilon_0$  dır (Minnaert ve ark. 2007). İfadedeki tüketim tabakası genişliği  $W_D$  ise;

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s V_d}{qN_D}} \quad (4.19)$$

ile verilir. Polimer tabaka kalınlıkları  $\delta$  deneysel C-V ve G/ $\omega$ -V ölçümlerinden yararlanarak hesaplandı.

Polimer tabaka kalınlığı  $\delta$  hesabı için öncelikle C-V ve G/ $\omega$ -V ölçümlerine bağlı  $C_{ox}$  ara yüzey tabaka kapasitesi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir (Dökme ve ark. 2011):

$$C_{ox} = C_{max} \left[ 1 + \left( \frac{G_{max}}{\omega C_{max}} \right)^2 \right] \quad (4.20)$$

Burada  $C_{max}$  ve  $G_{max}$  sırasıyla kapasite ve iletkenlik değerlerinin pik değerleridir.  $C_{ox}$  aynı zamanda;

$$C_{0x} = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 A}{\delta} \quad (4.21)$$

şeklinde de verilebilir.

Eş. (4.20)'den belirlenen  $C_{0x}$  değeri Eş (4.21)'de kullanılarak polimer tabaka kalınlığı yaklaşık 50 nm olarak hesaplanmıştır.

Eş. (4.18) ile verilen  $N_{ss}$  ifadesindeki  $n(V)$  ise;

$$n(V) = \frac{qV}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) kT} \quad (4.22)$$

ile verilir.

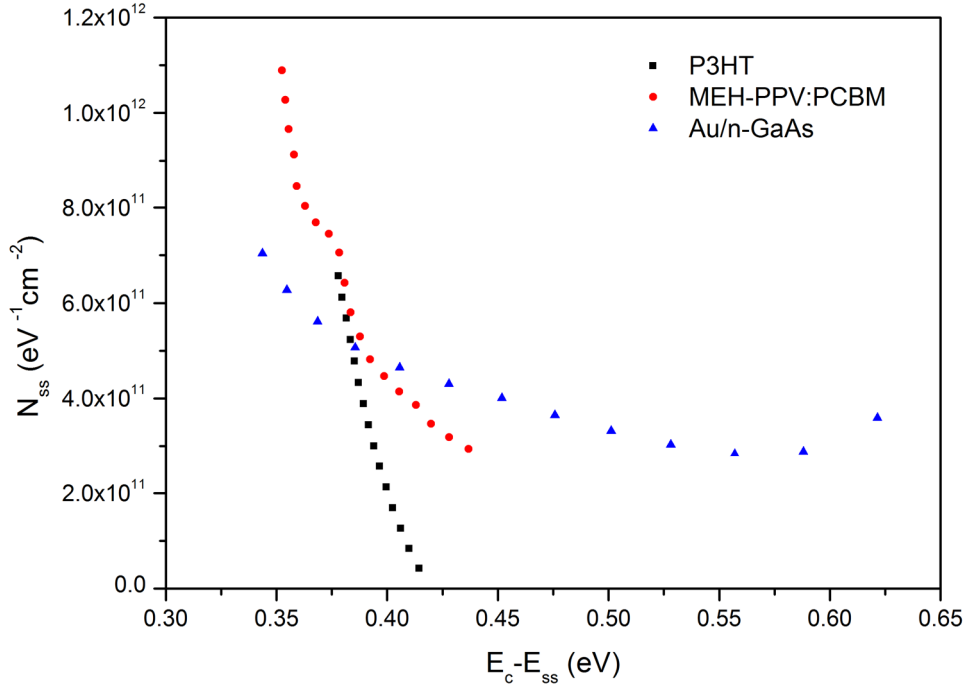
n-tipi bir yarıiletkende ara yüzey durumlarının enerjisi ( $E_{ss}$ ), iletim bandının tabanına göre,

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.23)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\Phi_e$  etkin engel yüksekliğidir. Ara yüzey 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:

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)V \quad (4.24)$$

Şekil 4.4'de Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının oda sıcaklığında doğru beslem I-V karakteristiklerinden Eş. (4.18), Eş. (4.19), Eş. (4.22), Eş. (4.23) ve Eş. (4.24) kullanılarak elde edilen ara yüzey durumlarının enerji dağılımı görülmektedir.



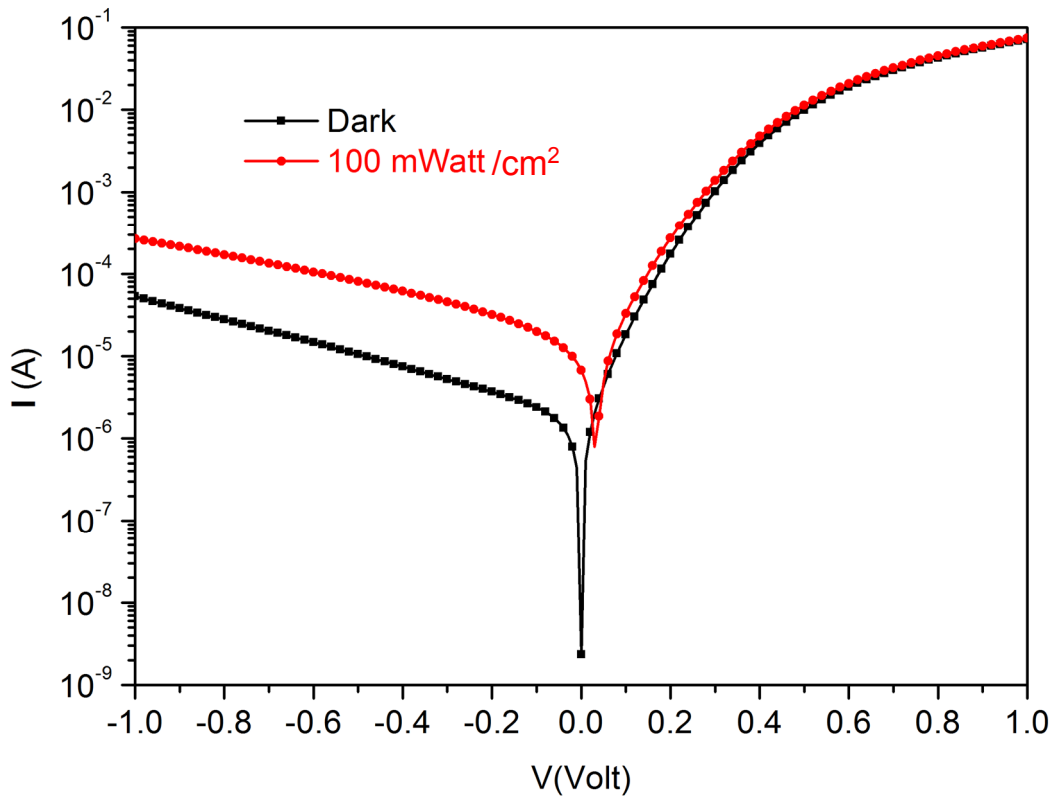
**Şekil 4.4.** Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapılarının oda sıcaklığında doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen ara yüzey durumlarının enerji dağılım grafikleri

Şekil 4.4'den görüldüğü gibi her 3 diyot için de enerji durum yoğunlukları iletkenlik bandından yasak band aralığının ortasına doğru eksponansiyel olarak azalmaktadır. Bu durum enerji durum yoğunluklarının uygulanan doğru beslem voltaja bağlı olarak değiştiğini ve her bir voltaja yasak band aralığında farklı bir durumun karşılık geldiğini doğrular. Şekil 4.4 ve Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapısı  $1,09 \times 10^{12} eV^{-1}cm^{-2}$  gibi en yüksek ara yüzey durum yoğunluğu değerlerine sahiptir. Bu durum bu yapının en yüksek idealite faktörü değerine sahip olmasının nedenleri arasında olup, ara yüzey durum yoğunluğu  $10^{11}$  mertebelerinde olan Au/n-GaAs/P3HT/Au yapısının idealite faktöründen daha büyük değere sahip olmasını açıklar.

#### 4.1.2. Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodunun oda sıcaklığında karanlık ve ışık altındaki akım-gerilim karakteristiğinin incelenmesi

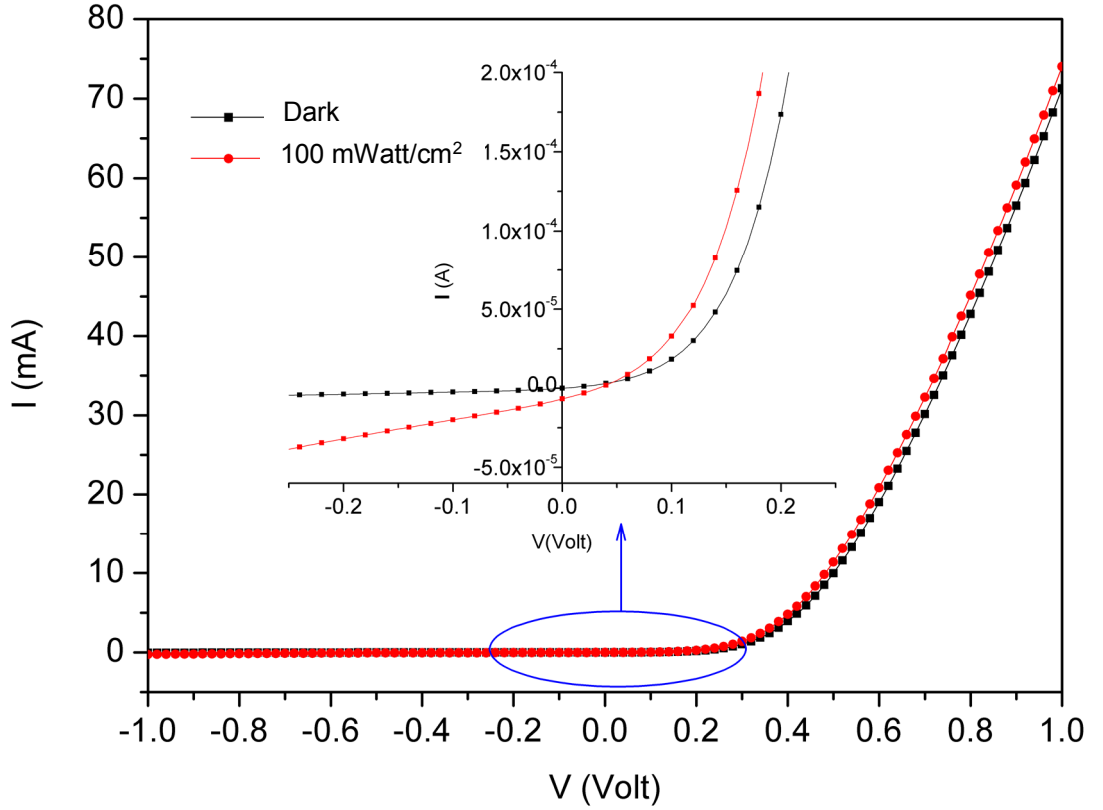
Çalışmanın bu bölümünde ara yüzey tabaka olarak grafen oksit kullanarak üretilen Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodunun karanlık ve ışık altındaki akım-gerilim (I-V) karakteristiği incelenmiştir. Fotovoltaik ölçümler 200 W halojen lamba kullanılarak yapıldı. Lambanın ışık yoğunluğu lambadan geçen akımla kontrol edildi. Işık yoğunluğu ise TM-206 güneş simülatörü ile ölçüldü. Hazırlanan Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodunun I-V ölçümleri oda sıcaklığında karanlık ve ışık altında alındı.

Şekil 4.5’de Au/n-GaAs/GO/Au diyodun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki yarılogaritmik I-V karakteristiği görülmektedir.



**Şekil 4.5.** Au/n-GaAs/GO/Au diyodun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki yarılogaritmik akım-gerilim karakteristiği

Şekil 4.5’den görüldüğü gibi diyot hem doğrultucu özellik hem de ışığa duyarlılık göstermektedir. Işık altında ölçülen ters beslem akım değerleri karanlıkta ölçülen ters beslem akım değerlerinden yüksektir. Yani diyot üzerinde ışık etkisi vardır.



**Şekil 4.6.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky bariyer diyodun karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki I–V karakteristiği (Şekil içinde ayrıca orijin civarındaki değerler büyütülerek çizilmiştir)

Şekil 4.6’da işaretlenmiş bölge değerleri kullanılarak açık devre gerilimi  $V_{oc} = 0.033$  V ve kısa devre akımı  $I_{sc} = 6.77$   $\mu$ A olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu fotovoltaik değerler güneş pili uygulamaları için fakir ancak fotodiyot uygulamaları için yeterlidir. Au/n-GaAs/GO/Au yapısı ışığa oldukça duyarlı olup optik sensör uygulamalarında kullanılabilceği değerlendirilmektedir. Üstelik güneş pilleri fotovoltaaj üretmek için dizayn edilirken fotodiyotlar spektral cevap almaya veya hızlı cevap almaya yönelik üretilirler (Phan ve ark. 2012).

Şekil 4.5’deki gibi bir I-V davranışı termiyonik emisyon teorisiyle açıklanabilir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla Eş. (4.4) ve Eş. (4.6) kullanılarak Şekil 4.5’de verilen I-V grafiğinden yararlanarak karanlık ve ışık altındaki ölçümler için



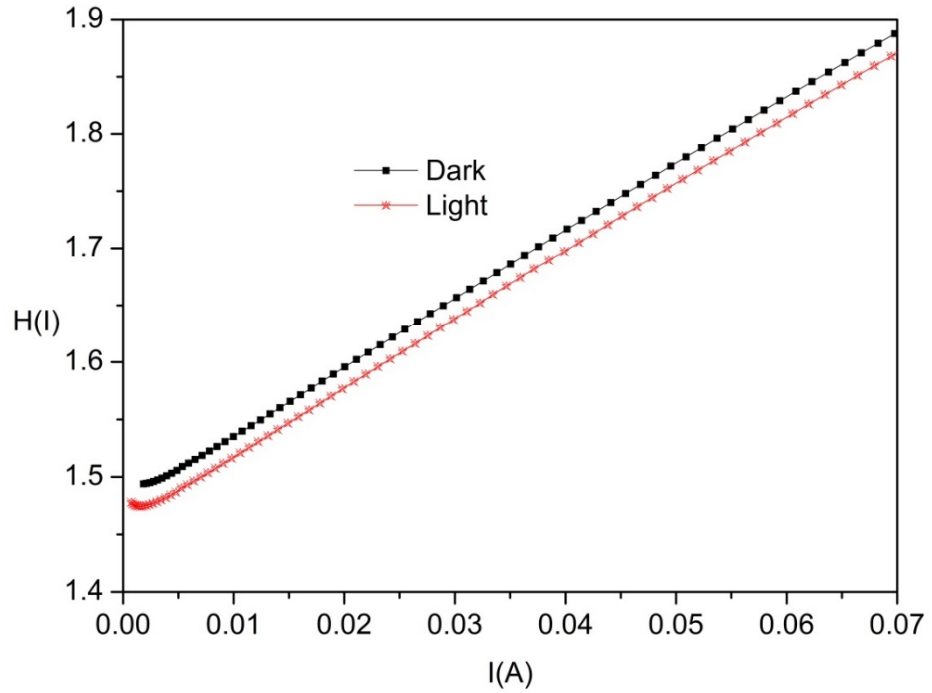
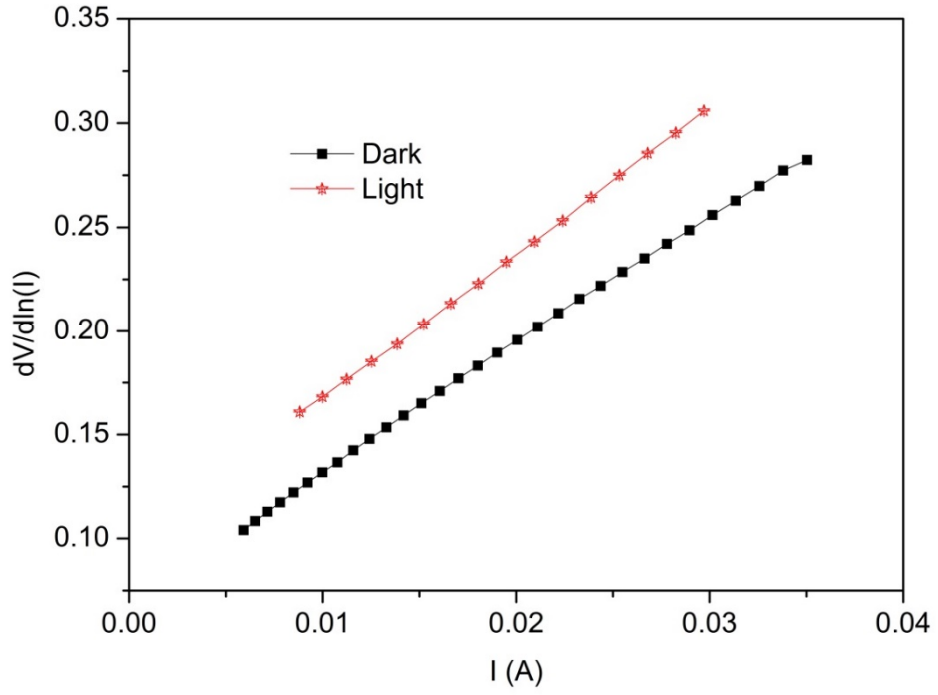
ayrı ayrı hesaplandı. Elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodunun karanlık ve ışık altında I-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metotları yardımıyla elde edilen diyot parametreleri

Au/n- GaAs/GO/Au Diyot	n	$\Phi_B$ (eV)	dV/dLn(I)-I		H (I)-I		V-F(V)	
			n	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_B$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_B$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )
Karanlık	2.51	0.56	2.73	6.15	0.54	5.91	0.61	7.87
Işık	1.64	0.59	1.54	6.51	0.57	5.87	0.64	7.98

Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi idealite faktörü değerleri 1’den oldukça büyüktür. İdealite faktörünün 1’den büyük olmasına GO film kalınlığının homojen olmaması, ara yüzey yüklerinin düzensizliği, tüketim bölgesinde yüksek ihtimalli elektron-boşluk rekombinasyonu, tünelleme akımının varlığı ve seri direnç gibi çeşitli faktörlerin neden olduğu düşünülebilir (Sze 1981, Rhoderick ve Williams 1988, Kwok 1995).

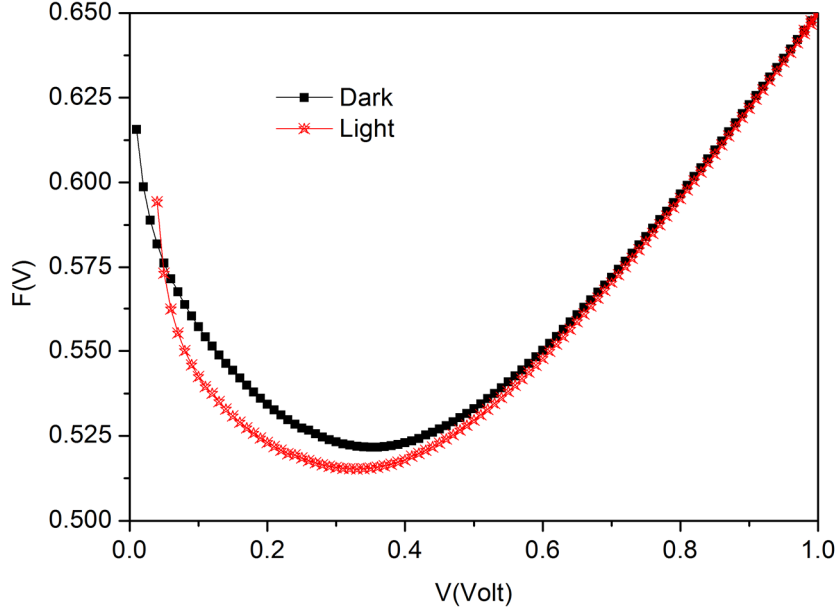
Seri direnç diyodun elektrik özelliklerini etkileyen önemli bir parametre olduğu için Eş. (4.12) ve Eş. (4.14) ile verilen Cheung fonksiyonları kullanılarak seri direnç ile birlikte idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri karanlık ve ışık ortamı için ayrı ayrı hesaplandı. İdealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin hesabında Şekil 4.7 ile verilen diyodun dV/dln(I) - I ve H(I) – I grafikleri kullanıldı. Hesaplanan diyot parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



**Şekil 4.7.** Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki  $dV/d\ln(I) - I$  ve  $H(I) - I$  grafikleri

Çizelge 4.2'den açıkça görüldüğü gibi Cheung fonksiyonlarından elde edilen  $R_s$  seri direnç değerleri arasında oldukça iyi bir uyum vardır.

Au/n-GaAs/GO/Au yapısının seri direnç ve engel yüksekliği değerleri hem karanlık hem de ışık altında Norde fonksiyonları kullanılarak da elde edilmiştir.



**Şekil 4.8.** Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun oda sıcaklığında karanlık ve 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altındaki V-F(V) grafikleri

Şekil 4.8’de diyodun karanlık ve ışık altındaki V-F(V) grafikleri görülmektedir. Bu grafik yardımıyla Eş. (4.16)’dan engel yüksekliği ve Eş. (4.17)’den seri direnç değerleri karanlık ve ışık altındaki ölçümler için hesaplanarak Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi Norde metotdan elde edilen seri direnç değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinden daha büyüktür. Bunun nedeni Cheung fonksiyonları sadece yüksek doğru beslem voltaj değerlerini alarak, Norde fonksiyonları ise tüm doğru beslem voltaj değerlerini alarak seri direnç değerlerini hesaplamalarıdır. Çizelge 4.2’den LnI-V ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen engel yükseklikleri arasında uyum; LnI-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metotdan elde edilen engel yükseklikleri arasında ise farklar görülmektedir. Bu farka önceki bölümde de değindiğimiz gibi ara yüzey yalıtkan tabaka, kenar kaçak akımları ve derin kirlilik seviyelerinin neden olabileceği düşünülmektedir (Sze 1981).

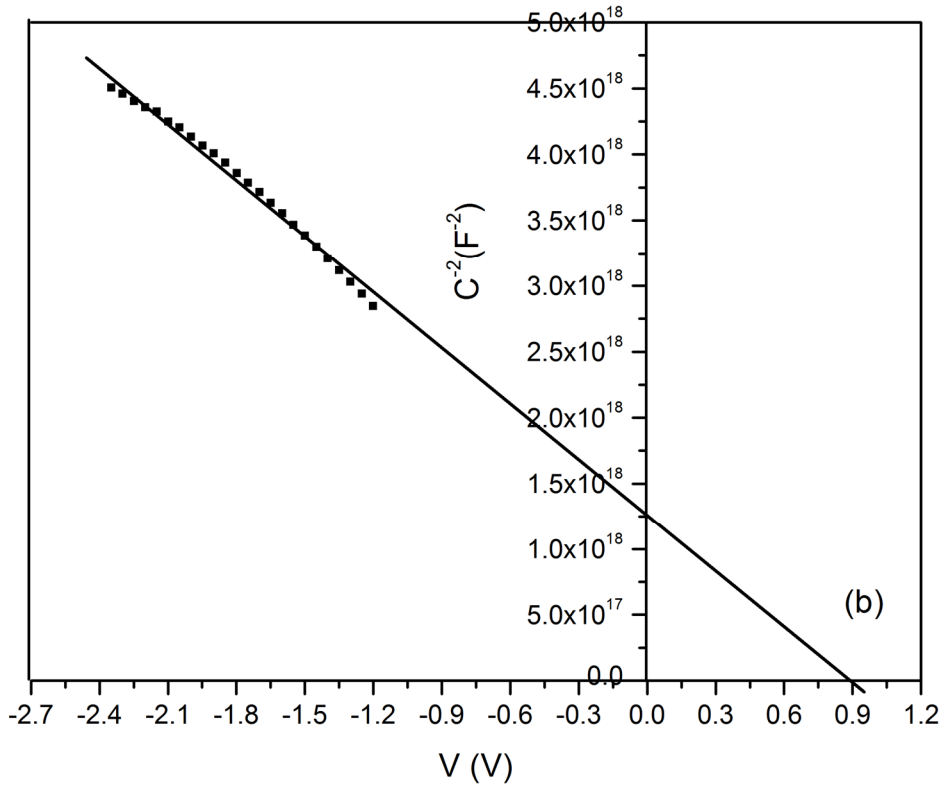
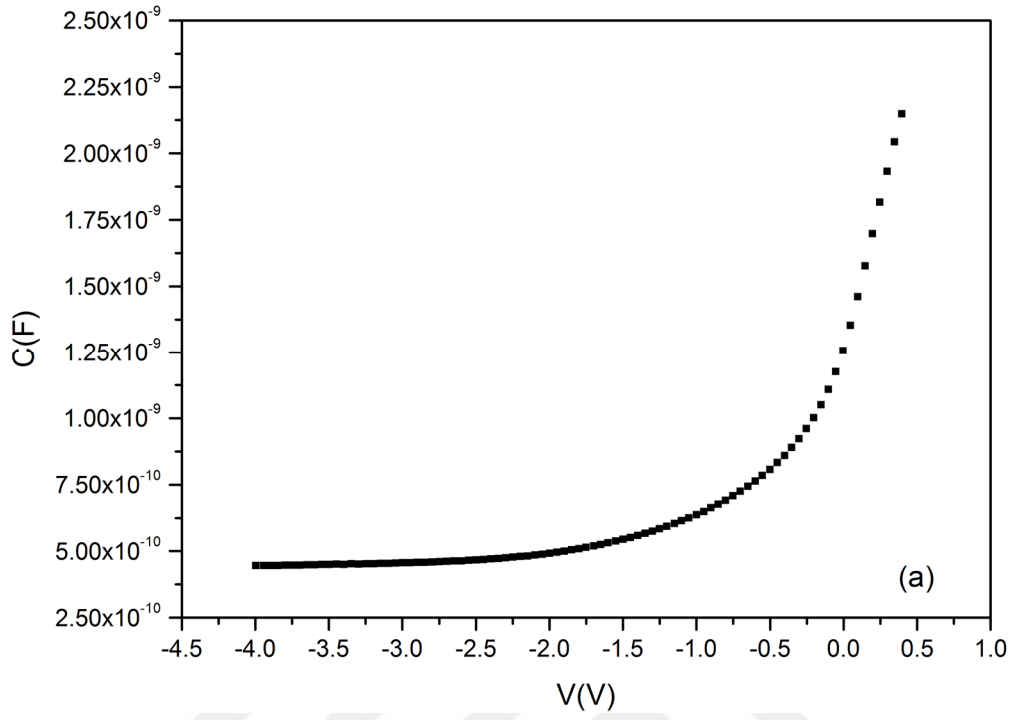
Çizelge 4.2'den görüldüğü gibi karanlıktaki idealite faktörü değerleri ışık altındaki idealite faktörü değerlerinden daha büyüktür. Yani idealite faktörü değerleri ışık etkisiyle azalmaktadır.

Işık etkisi tüketim bölgesinde elektron-boşluk çifti oluşmasına neden olur. Işık yoğunluğu arttıkça elektron-boşluk çifti oluşumu artar. Yük oluşumundaki artış metal ile yarıiletken arasındaki farklı elektron yakınlıklarına bağlıdır. Netice olarak diyot üzerine ışık düşürüldüğünde değerlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandına kolaylıkla geçebilirler. İdealite faktörünün ışık etkisiyle azalmasına ışıkla iletkenlik bandına daha fazla elektron taşınmasının neden olduğu düşünülmektedir.

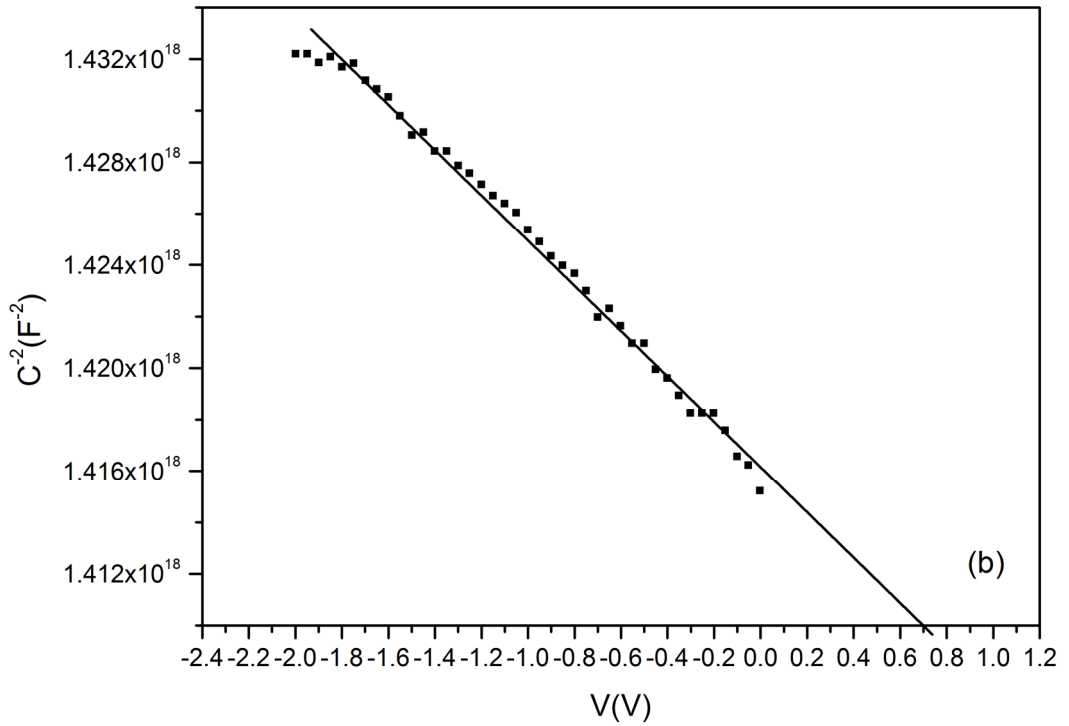
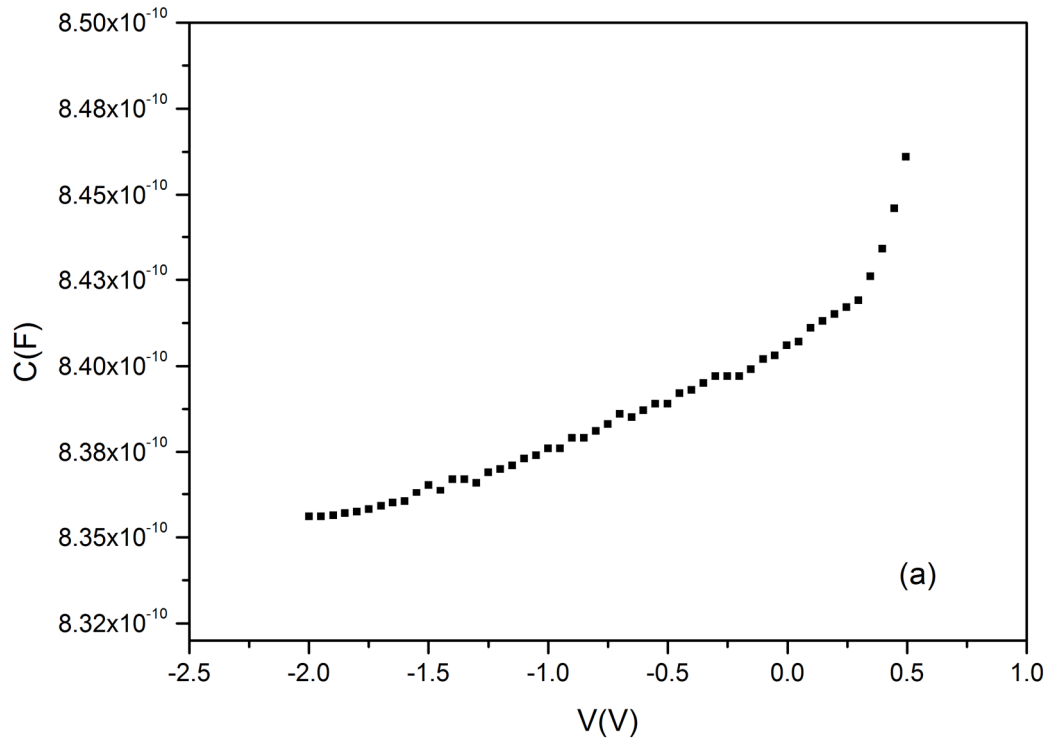
## **4.2. Kapasite-Voltaj (C-V) Karakteristikleri**

### **4.2.1 Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/MEH-PPV:PCBM/Al Schottky diyotlarının kapasite-voltaj (C-V) karakteristikleri**

Diyot parametrelerini elde etmek için kullanılan bir başka yöntem de C-V analizleridir. Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapıları için C-V ölçümleri oda sıcaklığında ve 100 kHz frekansta yapılmıştır. Sırasıyla Şekil 4.9'da Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Şekil 4.10'da da Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapılarına ait C-V ve  $1/C^2$ -V grafikleri verilmiştir. Bu ölçümlerden; difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ), potansiyel engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), Fermi enerjisi ( $E_F$ ), verici (donor) yoğunluğu ( $N_D$ ), tüketim bölgesi genişliği ( $W_D$ ) gibi fiziksel diyot parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Au/n-GaAs /P3HT/Au yapısının; a) C-V ve b)  $1/C^2 - V$  grafikleri



**Şekil 4.10.** Au/ n-GaAs /MEH-PPV:PCBM/Al yapısının; a) C-V ve b)  $1/C^2 - V$  grafikleri

Diyodun C-V karakteristiği aşağıdaki eşitlikler yardımıyla analiz edilebilir (Kwok 1995, Demirezen ve ark. 2012).

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_0 + V_r)}{q\epsilon_s A^2 N_D} \quad (4.25)$$

Buna göre  $C^{-2}-V$  grafiğinin eğimi;

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_D} \quad (4.26)$$

ile verilir. Burada  $V_r$  ters beslem gerilimi,  $V_0$  kesme potansiyeli olup,  $V-1/C^2$  grafiğinin voltaj eksenini kestiği noktaya grafik üzerinden ekstrapolasyon yapılarak bulunabilir.  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabiti olup n-GaAs için  $\epsilon_s = 13,1\epsilon_0$  (Karataş ve Türüt 2006),  $q$  elektronun yükü,  $A$  diyot alanı ve  $N_D$  ise donör konsantrasyonudur. Eş. (4.26) kullanılarak her iki diyot için verilen  $C^{-2}-V$  grafiklerinin eğiminden donör konsantrasyonları hesaplanarak Çizelge 4.3'de verilmiştir. Tüketim tabakasının genişliği ( $W_D$ ) ve Fermi seviyesi ( $E_F$ ) ise aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir (Kwok 1995, Singh 1995, Demirezen ve ark. 2012):

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_s V_d}{qN_D}} \quad (4.27)$$

Burada  $V_d$  difüzyon potansiyeli olup;

$$V_d = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (4.28)$$

ile verilir. Oda sıcaklığı için Fermi seviyesi ( $E_F$ ) ise,

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (4.29)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada  $N_C$ , iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu olup sıcaklığa,

$$N_C = \left[ \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right]^{3/2} \quad (4.30)$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada  $m_e^*$  GaAs için elektronların etkin kütlesi,  $m_0$  elektronların durgun kütlesi olup,  $m_e^* = 0.067m_0$  değerine eşittir (Singh 1995).  $V_0$  kesme potansiyeli  $1/C^2-V$  grafiğinin  $V$  eksenine ekstrapolasyonundan her iki diyot için belirlenmiştir. Böylece, Eş. (4.28) kullanılarak difüzyon potansiyelleri de her iki diyot için hesaplanmıştır. Elde edilen kesme potansiyeli ve difüzyon potansiyeli değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Eş. (4.27) yardımıyla da tüketim tabakası genişlik değerleri hesaplanmıştır. Engel yüksekliği  $\Phi_B$  (C-V) ise aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$\Phi_B(C-V) = V_d + E_F \quad (4.31)$$

Eş.(4.31) yardımıyla engel yükseklikleri hesaplanmıştır. Her iki diyot için hesaplanan tüketim tabakası genişliği ve engel yükseklik değerleri de Çizelge 4.3'de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotları için C-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel diyot parametreleri

DİYOTLAR	$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$V_0$ (V)	$V_d$ (V)	$\Phi_B$ (eV)	$W_D$ (cm)
Au/n-GaAs/P3HT/Au	$1,92 \times 10^{17}$	0,9	0,925	0,95	$8,35 \times 10^{-6}$
Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al	$2,13 \times 10^{19}$	0,7	0,725	0,63	$6,77 \times 10^{-7}$

Çizelge 4.3'den görüldüğü gibi Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al yapıları için C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri önceki bölümde I-V ölçümlerinden elde ettiğimiz sırasıyla P3HT'li yapı için 0,85 eV ve MEH-PPV:PCBM'li yapı için 0,57 eV değerlerinden büyüktür. Bu farkın diyotlarda ara yüzey tabakası olarak kullanılan sırasıyla P3HT ve MEH-PPV:PCBM polimer tabakaları ile engel homojensizliğinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir (Sze ve Kwok 2007).



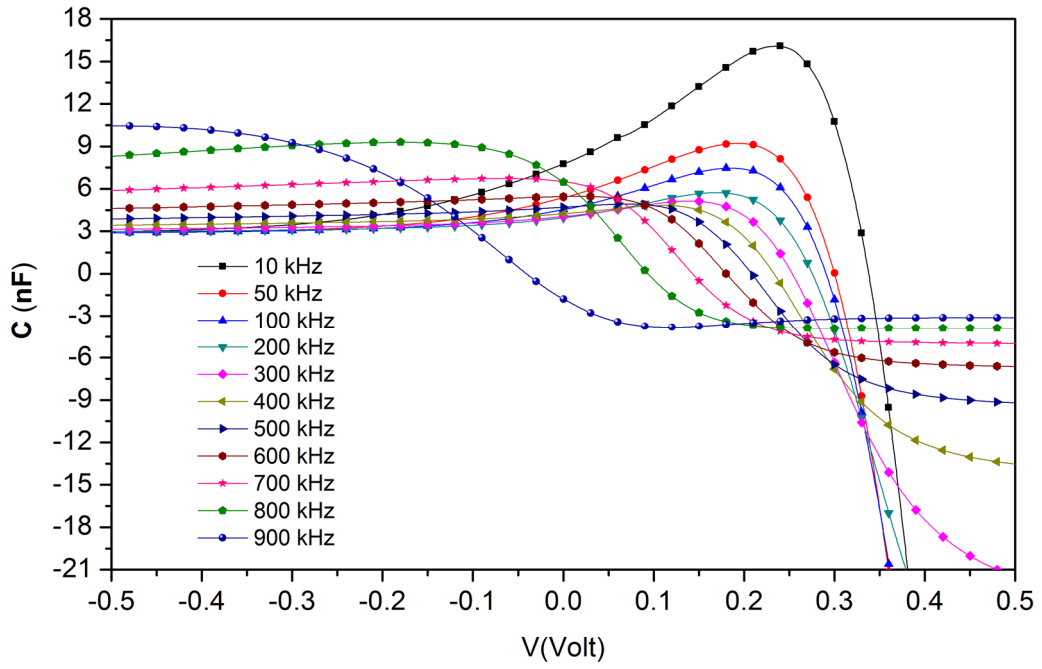
#### 4.2.2. Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun kapasite-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) karakteristikleri

Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri oda sıcaklığında 10 kHz – 1 MHz frekans aralığında gerçekleştirildi. Diyodun C-V and  $G/\omega$ -V karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.

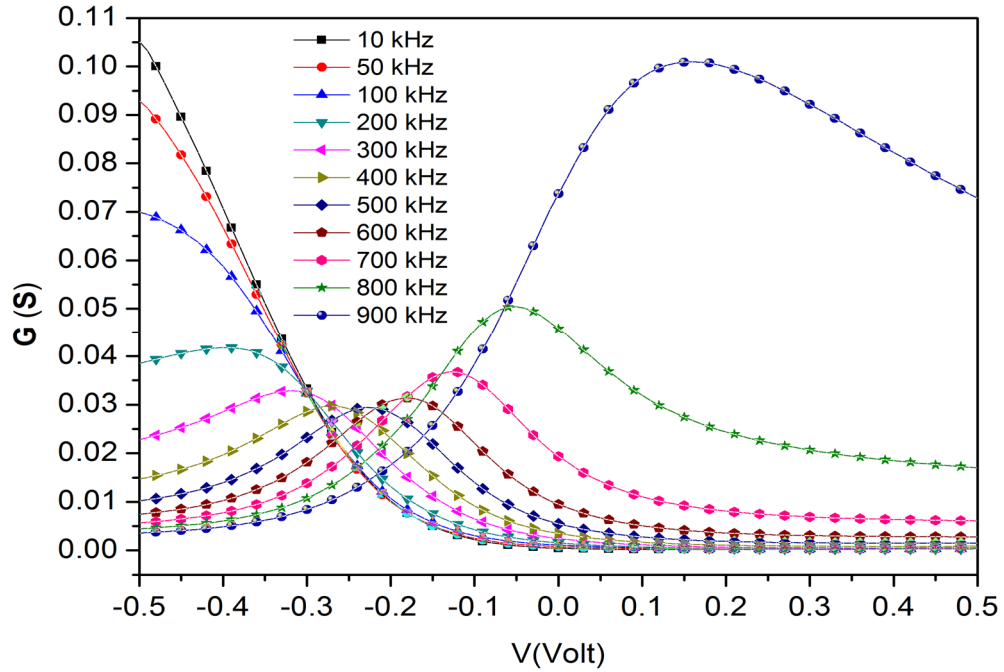
Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’den görüldüğü gibi hem C-V hem de  $G/\omega$ -V karakteristikleri yığılma, tüketim ve tersinim bölgelerine sahiptir. Grafiklerden açıkça görüldüğü gibi tersinim bölgesinde C değerleri frekans arttıkça artarken  $G/\omega$  değerleri azalmaktadır. Tüketim ve yığılma bölgelerinde ise frekansın artmasıyla C değerleri azalmakta,  $G/\omega$  değerleri artmaktadır. Yüksek frekanslarda, ara yüzey halleri ac sinyali takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla toplam sığa ve sığanın pik değeri artan frekansla azalır.

Aynı zamanda Şekil 4.11’den diyodun her bir frekans için uygulanan doğru yön gerilimin artmasıyla negatif kapasitans (NC) davranışı gösterdiği görülmektedir. NC değerleri özellikle düşük frekanslarda daha dikkat çekici olup frekansın düşmesiyle kapasite değerlerinin mutlak değeri artmaktadır. Au/n-GaAs/GO/Au diyodun kapasite değerleri 10 kHz-500 kHz frekans aralığında doğru beslem geriliminin artmasıyla artarak bir maksimuma ulaşır ve buradan azalarak sonunda negatif değerlere (NC) ulaşır. 600 kHz-900 kHz frekans değerlerinde ise doğru beslemde kapasite değerleri hemen azalarak negatif değerlere (NC) ulaşır (Şekil 4.11).

Literatürü incelediğimizde negatif kapasitans aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır. NC gözlenmesi doğru beslem voltajındaki artışın elektrotlar üzerindeki yükte bir azalma oluşturduğunu göstermesi bakımından önemlidir (Jones ve ark. 1998, Gökçen ve ark. 2012, Korucu ve ark. 2013). NC çeşitli aygıtlarda; ara yüzey durumlarına, kontak ve azınlık taşıyıcı enjeksiyonu, gibi etkilere atfedilmiştir. Ayrıca NC, iyonizasyon etkisinden ötürü Fermi seviyesinin altındaki dolu durumlarda meydana gelen ara yüzey yük kaybı dikkate alınarak da yorumlanabilir. NC bulk durum elektrotlarına olan atlama oranlarının artmasıyla  $N_{ss}$ ’in metalin Fermi seviyesi ile birlikte denge durumundan ayrıldığında meydana gelir.



**Şekil 4.11.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki C-V karakteristiği



**Şekil 4.12.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki  $G/\omega$ -V karakteristiği

NC'nin mikroskobik fiziksel mekanizması farklı aygıt ve yapılar için farklılıklar gösterir. Genel olarak NC, kontak enjeksiyonu, ara yüzey durumları veya azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna atfedilebilir. NC etkiler dış indüktans veya yapının bir parçasını

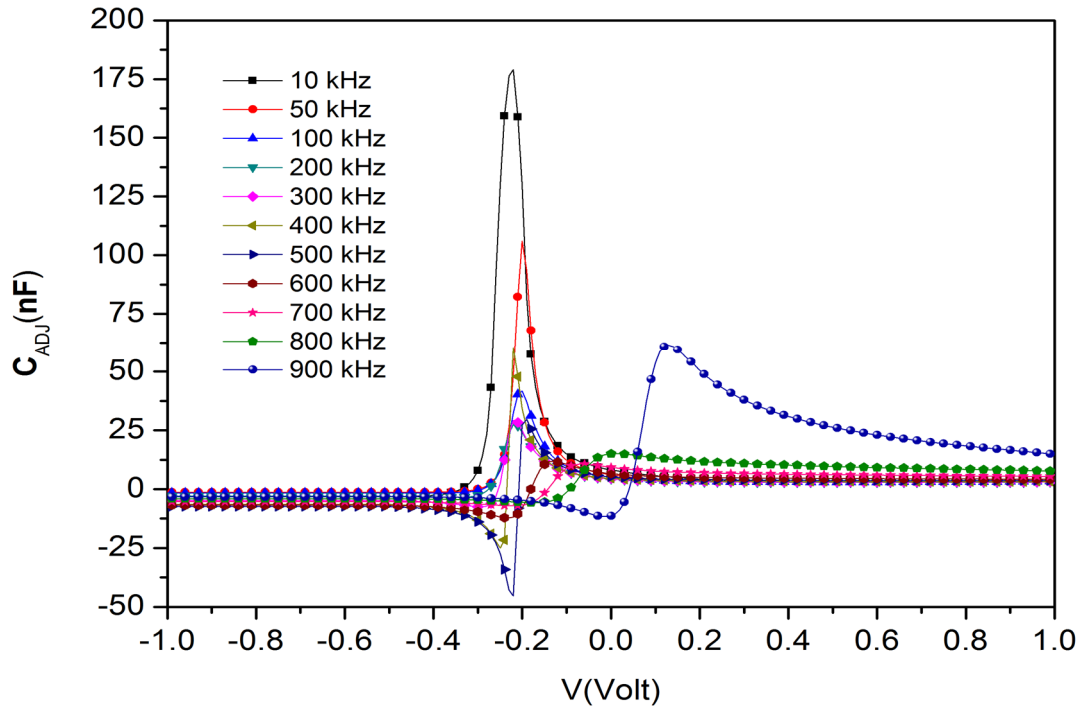
oluşturan seri ve parazitik dirençler tarafından oluşturulabilir (Butcher ve ark. 1996, Korucu ve ark. 2013).

Doğru beslemede yüksek frekanslarda iletkenliğin yüksek değerleri yüksek frekanslardaki düşük  $R_s$  değerleri ile açıklanabilir. Yüksek frekanslarda empedansa indüktif bir katkı vardır. Çünkü yüksek frekanslarda bulk yarıiletken içerisinde üst seviye azınlık taşıyıcı akımının artışı meydana gelir. Bu artış da  $R_s$ 'de azalmaya neden olur (Vural ve ark. 2012).

Kapasitans üzerine seri rezistans etkisi, düzeltilmiş kapasitans ( $C_{ADJ}$ ) kullanılarak elimine edilmiştir.  $C_{ADJ}$  aşağıdaki gibi verilir:

$$C_{ADJ} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.32)$$

Burada,  $a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s$  ve  $C_{ADJ}$  seri rezistans telafi edilmiş, düzeltilmiş kapasite değeridir.  $C_{ADJ}$  üzerine voltaj ve frekans etkisi Şekil 4.13'de görülmektedir.  $C_{ADJ}$ -V grafiğinden görüldüğü gibi  $C_{ADJ}$  değerleri frekansın artmasıyla azalmaktadır. Aynı zamanda her bir frekans için ara yüzey durumlarının varlığından kaynaklanabilen bir pik gözlenmektedir ve bu piklerin frekansın artmasıyla birlikte yüksek voltajlara doğru kaydığı görülmektedir. Ayrıca piklerin şiddetleri frekansın artmasıyla azalmaktadır. Bu da bize diyotda ara yüzey durumlarının varlığını gösterir (Dökme ve ark. 2010).



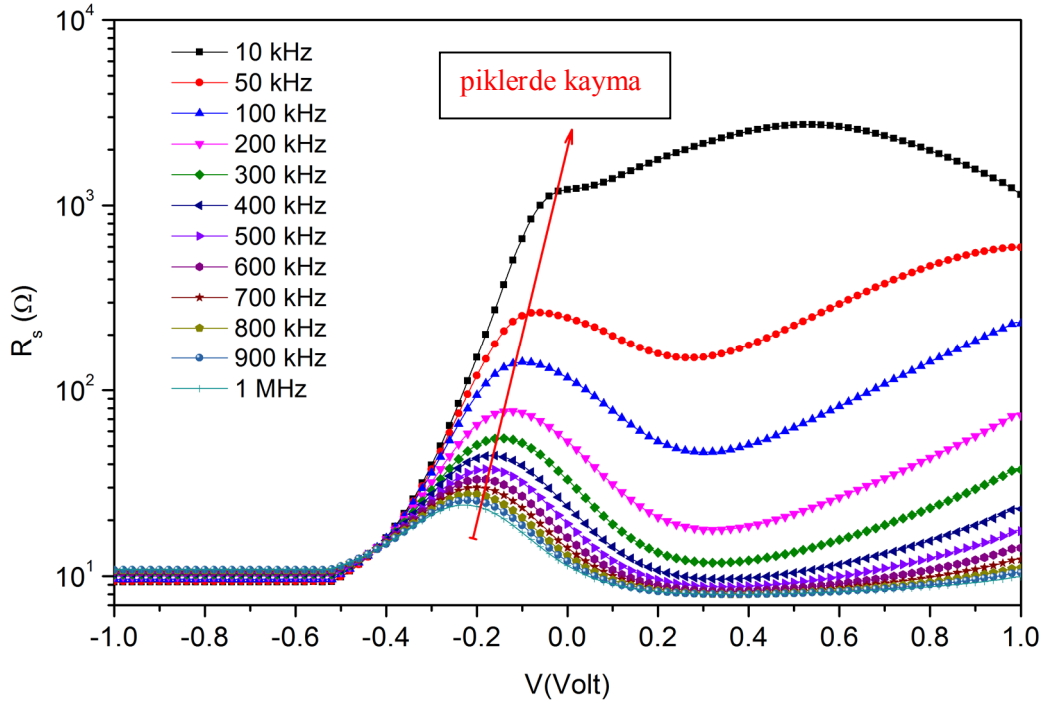
**Şekil 4.13.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki  $C_{ADJ}$ -V karakteristiği

Çalışmada ayrıca Schottky diyodun elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli bir parametre olan seri direncin frekansa bağlı seri direnç – gerilim ilişkisi de incelenmiştir. Böylece diyodun farklı frekanslardaki seri direnç davranışı ortaya konmuştur.

Bunun için diyodun seri direnci aşağıdaki eşitlikten elde edilmiştir:

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.33)$$

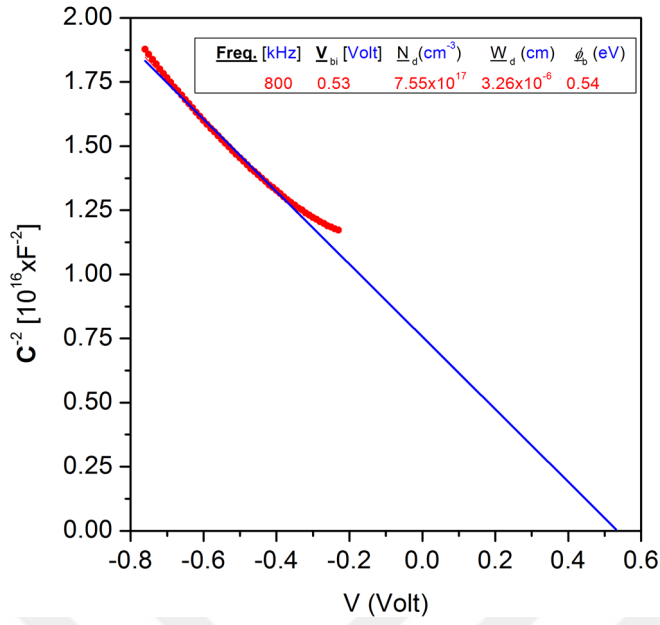
Au/n-GaAs/GO/Au Schottky bariyer diyodunun  $R_s$  değerleri Eş. (4.33) yardımıyla hesaplanarak, Şekil 4.14’de çeşitli frekanslar için elde edilen V-  $R_s$  grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.14.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun çeşitli frekanslardaki  $R_s$ - $V$  karakteristikleri

Şekil 4.14'den görülebildiği gibi  $R_s$  değerleri yığılma bölgesinde (bu bölgede NC gözlenmişti) doğru beslem voltajının artmasıyla azalmaktadır. Diğer taraftan,  $R_s$  değerleri frekansın azalmasıyla eksponansiyel olarak artmaktadır.  $R_s$ 'nin bu davranışı tuzak yüklerinin GaAs band aralığında metal ve yarıiletken arasında lokalize olmuş tuzaklardan kaçmak için yeterli enerjiye sahip olduklarını gösterir. Bu durumda  $R_s$  ideal olmayan Schottky diyodun elektriksel karakteristiklerini etkileyen en önemli parametre olarak görünmektedir (Korucu ve ark. 2013, Tecimer ve ark. 2014). Aynı zamanda Şekil 4.14'den görülebildiği gibi her bir frekans değeri için  $R_s$  bir pik değerine sahip olmakta ve bu pikler frekansın azalmasıyla yüksek voltajlara doğru kaymaktadır.

Çalışmada son olarak Au/n-GaAs/GO/Au Schottky bariyer diyodunun donör konsantrasyonu ( $N_D$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ), tüketim bölgesi genişliği ( $W_D$ ) gibi bazı temel elektriksel parametreleri 800 kHz frekans için elde edilmiştir. Bu parametreler Şekil 4.15'de verilen  $1/C^2$ - $V$  grafiğinden yararlanarak Eş. (4.26), Eş. (4.27) ve Eş. (4.31) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler Şekil 4.15'de görülmektedir.



**Şekil 4.15.** Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyodun 800 kHz frekanstaki  $C^2 - V$  grafiği

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada Au/n-GaAs/Au, Au/n-GaAs/P3HT/Au, Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al ve Au/n-GaAs/GO/Au Schottky diyotları üretilmiş, diyotların I-V ve C-V ölçümleri oda sıcaklığında alınarak analiz edilmiştir. Au/n-GaAs/Au diyodu referans diyodu olarak kullanılmış, polimer ara yüzey tabakanın diyot özelliklerine etkisi incelenerek diyodun elektriksel özelliklerinin iletken polimer ara yüzey tabaka kullanarak kontrol edilebileceği görülmüştür. Üretilen diyotların I-V ölçümlerinden idealite faktörü, engel yüksekliği, doyum akımı, seri direnci, ara yüzey durum yoğunluğu gibi temel parametreleri I-V metot, Cheung metot ve Norde metotları kullanılarak hesaplanmıştır.

Elde ettiğimiz idealite faktörü değerleri 1'den büyüktür. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasına ara yüzey durum yoğunluğu, ara yüzey yüklerinin düzensizliği ve seri direnç gibi çeşitli faktörlerin neden olduğu düşünülebilir (Sze 1981, Kwok 1995). Polimerli yapı içeren Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının idealite faktörleri ise oldukça büyük olup 2,45 ve 4,39 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Au/n-GaAs/Au diyodunun idealite faktörünün (1,64) sırasıyla yaklaşık 1,5 ve 2,7 katıdır. Bu ise P3HT ve MEH-PPV:PCBM organik ara yüzey film kalınlığı, tüketim bölgesindeki güçlü rekombinasyon etkisi veya termoyonik emisyon ile açıklanamayan tünelleme akımları gibi akımların varlığı ile açıklanabilir (Rhoderick ve Williams 1988).

Seri direnç Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli bir parametredir. Seri direnç ile birlikte idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi diyot parametreleri Cheung fonksiyonları kullanılarak; diğer alternatif metot Norde fonksiyonları yardımıyla da yine seri direnç ve engel yüksekliği değerleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır. I-V metot ve Cheung metottan elde edilen engel yükseklikleri ile Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerleri arasında mükemmel bir uyum olduğu gözlenmiştir.

$dV/d\ln(I) - I$  grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri  $\ln I - V$  grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerlerinden büyük olarak elde edilmiştir. Bu durum seri direnç ve ara yüzey durumlarının varlığı ve ara yüzeye voltaj düşümüne atfedilmektedir

(Sönmezoğlu ve ark. 2010). Ayrıca bir diğer faktör her iki yöntem için I-V karakteristiğinin farklı bölgelerinden idealite faktörü hesabı yapılmasıdır.

Norde metottan elde edilen bazı seri direnç değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinden daha büyük olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni Cheung fonksiyonları yüksek doğru beslem voltaj değerlerini alarak, Norde fonksiyonları ise tüm doğru beslem voltaj değerlerini alarak seri direnç değerlerini hesaplamalarıdır. LnI-V, Cheung fonksiyonları ve Norde metodu kullanarak üç ayrı yöntemden elde edilen engel yükseklikleri arasında ise farklar görülmektedir. Bu farka ara yüzey yalıtkan tabaka, kenar kaçak akımları ve derin kirlilik seviyelerinin neden olabileceği düşünülmektedir (Sze 1981).

Au/n-GaAs/P3HT/Au, Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al ve Au/n-GaAs/GO/Au diyotlarının C-V analizlerinden yararlanarak da, donör yoğunluğu, difüzyon potansiyeli, tüketim tabakası genişliği ve engel yüksekliği gibi temel diyot parametreleri elde edilmiştir. Au/n-GaAs/P3HT/Au ve Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al diyotlarının C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri I-V ölçümlerinden elde edilen değerlerden büyük olarak bulunmuştur. Bu farkın diyotlarda ara yüzey tabakası olarak kullanılan sırasıyla P3HT ve MEH-PPV:PCBM polimer tabakaları ile engel homojensizliğinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir (Sze ve Kwok 2007).

Au/n-GaAs/GO/Au Schottky bariyer diyodu ışık etkisi göstermiş olup, idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi bazı diyot parametreleri diyodun I-V ölçümleri kullanılarak karanlıkta ve ışık altında hesaplanmıştır. Işık etkisiyle idealite faktörünün azaldığı tespit edilmiştir. Diyot üzerine ışık düşürüldüğünde değerlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandına kolaylıkla geçebilirler. İdealite faktörünün ışık etkisiyle azalmasına ışıkla iletkenlik bandına daha fazla elektron taşınmasının neden olduğu düşünülmektedir. Netice olarak Au/n-GaAs/GO/Au yapısı ışık etkisine duyarlı olup, özellikle ters beslemde akım değerlerini artırmaktadır. Elde edilen  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerlerine göre diyot güneş pili uygulamaları için yeterli değil, ancak fotodiyot uygulamaları için



uygundur. Au/n-GaAs/GO/Au diyodu ışığa oldukça duyarlı olup, fotosensör olarak kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Çalışmada ayrıca Au/n-GaAs/GO/Au diyodunun C-V ve  $G/\omega-V$  karakteristikleri oda sıcaklığında ve 10 kHz -1 MHz frekans aralığında elde edilmiştir. Düşük frekanslarda ara yüzey halleri ac sinyali takip ettiği için kapasite vermektedir. Yüksek frekanslarda ise, ara yüzey halleri ac sinyali takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla toplam sığa ve sığanın pik değeri artan frekansla azalmaktadır. Diyodun C-V ölçümlerinde doğru beslem bölgesinde negatif kapasitans (NC) gözlenmiştir. NC özellikle düşük frekanslarda daha dikkat çekici olup, kapasite değerlerinin mutlak değeri frekansın düşmesiyle artmaktadır. Öte yandan seri direnç değerleri yığılma bölgesinde (bu bölgede NC gözlenmiştir) düşük frekanslar için yüksek, frekansın artmasıyla birlikte düşmektedir. Doğal olarak seri direncin tersine,  $G/\omega-V$  değerleri aynı bölge için frekansın artmasıyla artmaktadır. Diyodun NC karakteristiğinin, iyonizasyon nedeniyle Fermi seviyesinin altındaki dolu durumlarda meydana gelen ara yüzey yük kaybından kaynaklandığı düşünülebilir. Aynı zamanda NC'ye özellikle düşük frekanslarda meydana gelen polarizasyondaki artış ve yapıya daha fazla taşıyıcı girişi atfedilebilir.

Sonuç olarak; Schottky diyotlar birçok elektronik ve optoelektronik aygıtın temel elemanıdır. Schottky bariyer diyotlar endüstride sayısız uygulama alanına sahiptir. Son yıllarda organik iletken polimer sentezi ve bunların metallerle kontak yapılarak aygıt geliştirme çalışmalarına hız verilmiştir. Özellikle iletken polimerlerin düşük maliyetli, kolay sentezlenebilmeleri, dayanıklı ve kararlı bir yapıya sahip olmaları bu malzemelere olan ilgiyi daha da artırmıştır. Son yıllarda özellikle grafen ve grafen oksitinin 3. bölümde vurguladığımız birçok ilgi çekici elektronik ve optik özellikleri bakımından büyüleyici olması elektronik aygıt üretiminde bu malzemelerin kullanımını giderek yaygınlaştırmaktadır. Bu nedenlerle çalışmada farklı yöntemler ve farklı maddeler kullanılarak diyotlar incelenmiştir. Bu çalışmada, Au/n-GaAs/P3HT/Au, Au/n-GaAs/MEH-PPV:PCBM/Al ve Au/n-GaAs/GO/Au yapıları üretilmiş, diyotların I-V ve C-V karakteristikleri incelenmiştir. Değişik metotlarla bulunan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kullanılan polimer ara

yüzev tabakanın diyot özelliklerine etkisi incelenerek diyodun elektriksel özelliklerinin iletken polimer ara yüzev tabaka kullanarak kontrol edilebileceği görülmüştür. n-GaAs altlığı üzerine iletken organik materyallerin uygulanmasıyla elde edilen yapıların iyi birer doğrultucu kontak özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Au/n-GaAs/GO/Au yapısının ışığa duyarlı olup fotosensör olarak kullanılabilereği değerlendirilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Al-İbrahim, M., Roth, H. K., Zhokhavets, U., Gobsch, G., Sensfuss, S. 2005.** Flexible large area polymer solar cells based on poly(3-hexylthiophene)/fullerene. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 85: 13-20.
- Anonim, 2007.** Organic and printed electronics. <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/pcbm.html> (Erişim tarihi: 21.07.2015).
- Aydın, M. E., Soyulu, M., Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A. 2011.** Controlling of electronic parameters of GaAs Schottky diode by poly(3,4-Ethylenedioxiophene)-block-poly(ethylene glycol) organic interlayer. *Microelectronic Engineering*, 88: 867-871.
- Aydın, Y. 2012.** İletken polimerlerin içerisinde enzim tutuklamasıyla yapılan biyosensörler. Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kimya Anabilim Dalı, Karaman.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Türüt, A. 2005.** Current-Voltage and capacitance - voltage characteristics of polypyrrole/p-INP Structure. *Vacuum* 77: 269-274.
- Bernasik, A., Haberko, J., Włodarczyk-Mi'sikiewicz, J., Raczowska, J., Lu'zny, W., Budkowski, A., Kowalski, K., Rysz, J. 2005.** Influence of humid atmosphere on phase separation in polyaniline-polystyrene thin films. *Synthetic Metals*, 155: 516-522.
- Bilgen, Y., 2015.** İnce film teknikleri. <https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri/> (10.06.2015).
- Böhler, A., Urbach, P., Schöbel, J., Dirr, S., Johannes, H. H., Wiese, S., Ammermann, D., Kowalsky, W. 1998.** Organic heterostructures for electronic and photonic devices. *Physica E*, 2: 562-572.
- Butcher, K.S.A., Tansley, T.L., Alexiev, D. 1996.** An Instrumental Solution to the Phenomenon of Negative Capacitances in Semiconductors. *Solid-State Electronics*, 39: 333-336.
- Cheung, S. K., Cheung, N. K., 1986.** Extraction of Schottky diode parameters from forward current- voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49: 85-87.
- Cho, Y. S., Franklin, R. R. 2012.** Conducting polymer material characterization using high frequency planar transmission line measurement. *Transactions on electrical and electronic materials*, 13 (5): 237-240.
- Contreras, J. G., Briones, F. C. 2015.** Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers Method. *Materials Chemistry and Physics*, 153: 209-220.
- Crowell, C. R., Sze, S. M. 1966.** Current transport in metal-semiconductor barriers. *Solid-State Electronics*, 9: 1035-1048.
- Çaldıran, Z., Şinforoğlu, M., Metin, Ö., Aydoğan, Ş., Meral, K. 2015.** Space charge limited current mechanism (SCLC) in the graphene Oxide-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites/n-Si heterojunctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 631: 261-265.
- Demirezen, S., Sönmez, Z., Aydemir, U., Altındal, Ş. 2012.** Effect of Series Resistance and Interface States on the I-V, C-V and G/w-V Characteristics in Au/Bi-

Doped Polyvinyl Alcohol (PVA)/n-Si Schottky Barrier Diodes at Room Temperature. *Current Applied Physics*, 12: 266-272.

**Dökme, İ., Altındal, S., Tunc, T., Uslu, İ. 2010.** Temperature Dependent Electrical and Dielectric Properties of Au/Polyvinyl Alcohol (Ni, Zn-Doped)/n-Si Schottky Diodes. *Microelectron Reliability*, 50: 39-44.

**Dökme, İ., Tunç, T., Uslu, İ., Altındal, Ş. 2011.** The Au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped)/n-type silicon Schottky barrier devices. *Synthetic Metals*, 161: 474-480.

**Fonseca, A. F., Zhang, H., Cho, K. 2015.** Formation energy of graphene oxide structures: A molecular dynamics study on distortion and thermal effects. *Carbon*, 84: 365-374.

**González, D. M., Körstgens, V., Yao, Y., Song, L., Santoro, G., Roth, S. V. 2015.** Improved power conversion efficiency of P3HT:PCBM organic solar cells by strong spin-orbit coupling-induced delayed fluorescence. *Advanced Energy Materials*, 5: 1401770 (1-10).

**Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, S., Özcelik, S. 2012.** Frequency and Voltage Dependence of Negative Capacitance in Au/SiO<sub>2</sub>/n-GaAs Structures. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 15: 41-46.

**Göknil, B. 2013.** Sol-jel yöntemiyle elde edilen bor katkılı ZnO ince filmlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu 2011/37 nolu Sonuç Raporu, Tokat.

**Huang, X., Boey, F. and Zhang, H. 2010.** A brief review on graphene – nanoparticle composites. *Cosmos*, 6: 159-166.

**Jones, B.K., Santana J., and McPherson, M. 1998.** Negative Capacitance Effects In Semiconductor Diodes. *Solid State Communications*, 107: 47-50.

**Karataş, Ş., Türüt, A. 2006.** The determination of electronic and interface state density distributions of Au/n-type GaAs Schottky barrier diodes. *Physica B*, 381: 199-203.

**Kvasoğlu, A. S., Yakuphanoğlu, F., Kvasoğlu, N., Pakma, O., Birgi, Ö., Öktik, Ş. 2010.** The analysis of the charge transport mechanism of n-Si/MEH-PPV device structure using forward bias  $I-V-T$  characteristics. *Journal of Alloys and Compounds*, 492: 421-426.

**Kitai, A. 2011.** Principles of solar cells, LEDs and diodes. Jhon Wiley&Sons Ltd., West Sussex, United Kingdom, 316 pp.

**Korucu, D., Türüt, A., Altındal, S. 2013.** The Origin of Negative Capacitance in Au/n-GaAs Schottky Barrier Diodes (SBDs) Prepared by Photolithography Technique in the Wide Frequency Range. *Current Applied Physics*, 13: 1101-1108.

**Krebs, F. C. 2008.** Polymer photovoltaics a practical approach. SPIE Press, Bellingham, Washington, USA, 333 pp.

**Kwok, K. Ng. 1995.** Complete guide to semiconductor devices. McGraw-Hill, Inc., New York, 677 pp.

- Minnaert, B., Burgelman, M. 2007.** Modelling MEH-PPV:PCBM (1:4) bulk heterojunctions solar cells. Proceeding of NUMOS, 28-30 March 2007, University of Gent, Belgium.
- Norde, H. 1979.** A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *J. Appl. Phys.* 50: 5052-5053.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., S. V., Morozov, Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A. 2004.** Electric field effect in atomically thin carbon flims. *Science*, 306: 666-669.
- Öztürk, K. 2003.** Kimyasal püskürtme yöntemiyle ZnS ince filmlerinin üretimi ve karakteristik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Trabzon.
- Pakma, O., Serin, N., Serin, T., Altındal, Ş. 2011.** On the energy distributions profile of interface states obtained by taking into account of series resistance in Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures. *Physica B*, 406: 771-776.
- Pei, Q. 2007.** Poly (1,4-phenylene vinylene) PPV. [www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Aldrich/Brochure/al\\_material\\_matters\\_v2n3.pdf](http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Aldrich/Brochure/al_material_matters_v2n3.pdf) (Erişim tarihi: 21.07.2015).
- Phan, D. T., Gupta, R.K., Chung, G.S., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hartomy, O. A., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu, F. 2012.** Photodiodes based on graphene oxide-silicon junctions. *Solar Energy*, 86: 2961-2966.
- 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.
- Rhodecik, E.H., Williams, R.H. 1988.** Metal–semiconductor contacts. Clarendon, Oxford, 257 pp.
- Riande, E., Calleja, R. D. 2004.** Electrical properties of polymers. Marcel Dekker Inc., New York, 638 pp.
- Saçak, M. 2004.** Polimer kimyası. Gazi Kitabevi, Ankara, 525 s.
- Schroder, D. K. 1990.** Semiconductor material and device characterization. Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, 599 pp.
- Schroder, D. K. 2006.** Semiconductor material and device characterization. 3rd ed., Jhon Wiley & Sons, Inc., New jersey, 779 pp.
- Sharma, B. L. 1984.** Metal-semiconductor Schottky Barrier junctions and their applications. Plenum Press, New York, 370 pp.
- Singh, J. 1995.** Semiconductor optoelectronics physics and technology. McGraw, Hill Inc., New York, 725 pp.
- Soylu, M., Al-Hartomy, O. A., Al Said, S. A. F. A., Al-Ghamdi, A., Yahia, I. S., Yakuphanoglu, F. 2013.** Controlling of conduction mechanism and electronic parameters of silicon–metal junction by mixed methylene blue/2'-7'-dichlorofluorescein. *Microelectronics Reliability*, 53:1901-1906.

**Sönmezoğlu, S., Senkul, S., Taş R., Çankaya, G., Can, M. 2010.** Electrical and interface state density properties of polyaniline–poly-3-methyl thiophene blend/p-Si Schottky Barrier Diode. *Solid State Sciences*, 12: 706-711.

**Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S. 2012.** İnce film üretim teknikleri. Erciyes Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28:389-401.

**Sze, S.M. 1981.** Physics of semiconductor devices. 2nd ed., Jhon Wiley and Sons Inc., New York, 868 pp.

**Sze, S. M., Kwok, K. Ng. 2007.** Physics of semiconductor devices. 3rd ed., Jhon Wiley and Sons Inc., New Jersey, 815 pp.

**Tecimer, H., Uslu, H., Alahmed, Z. A., Yakuphanoğlu, F., Altındal, S. 2014.** On the Frequency and Voltage Dependence of Admittance Characteristics of Al/PTCDA/P-Si (MPS) Type Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Composites: Part B*, 57: 25-30.

**Tomakin, M. 2008.** CdS ince film örneklerinin soğuk altlık üzerine üretilmesi, yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Trabzon.

**Türüt, A., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Yalçın, N., Yıldırım, M., Abay, B. 1995.** Interpreting the nonideal reverse bias C-V characteristics and importance of the dependence of Schottky barrier height on applied voltage. *Physica B*, 205: 41-50.

**Vural, Ö. 2011.** Al/Rhodamine-101/n-GaAs Schottky engel diyotlarının hazırlanması ve iletim mekanizmalarının geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara.

**Vural, Ö., Şafak, Y., Türüt, A., Altındal, Ş. 2012.** Temperature Dependent Negative Capacitance Behavior of Al/Rhodamine-101/n-GaAs Schottky Barrier Diodes and  $R_s$  Effects on the C-V and  $G/\omega$ -V Characteristics. *Journal of Alloy and Compounds*, 513: 107-111.

**Zeyrek, S., Acaroğlu, E., Altındal, S., Birdoğan, S., Bülbül, M.M. 2013.** The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C-V and  $G/w$ -V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes. *Current Applied Physics*, 13: 1225-1230.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Ahmet KIRSOY	
Doğum Yeri ve Tarihi	: Denizli, 12/04/1971	
Yabancı Dili	: İngilizce	
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)		
Lise	: Buldan Akın Lisesi	1988
Lisans	: UÜ Necatibey Eğitim Fakültesi Fizik	1992
Yüksek Lisans	: BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik	1997
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl		
Halitli Ortaokulu Fizik Öğretmeni Delice/KIRIKKALE		:1993
BAÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Araştırma Görevlisi		:1994
Hava Harp Okulu Komutanlığı		:1996
Işıklar Askeri Hava Lisesi		:2010
Hava Harp Okulu Komutanlığı		:2014 DEVAM
İletişim (e-posta)	: akirsoy@hho.edu.tr	

## Yayınlar

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

1. **Kırsoy, A., Ahmetoğlu, M., Asimov, A., Kucur, B. 2015.** The electrical properties of Au/P3HT/n-GaAs Schottky barrier diode. *Acta Physica Polonica A*,127:170-173.
2. **Kırsoy, A., Ahmetoğlu, M., Okutan, M., Yakuphanoğlu, F. 2015.** Electrical properties inorganic-on-organic hybrid GaAs/Graphene oxide Schottky barrier diode. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*,(Basıma Kabul edildi)
3. **Asimov, A., Ahmetoğlu, M., Kırsoy, A., Özer, M., Yasin, M. 2015.** The electrical properties of Au/P3HT/N-Type Si Schottky barrier diode. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*,(Basıma Kabul edildi)
4. **Özdemir, Z. G., Canlı, N., Y., Yılmaz, Ö., Kırsoy, A., Okutan, M., Köysal, O. 2015.** The electrical properties of nickel (II) phthalocyanine and phenyl-C<sub>61</sub>-butric-acid-methyl ester doped nematic liquid crystals under laser light. *Polymer For Advanced Technologies*, DOI: 10.1002/pat.3585.