GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

Au/P3HT/n-Si (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA SICAKLIĞA VE AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI İNCELENMESİ

Esra YÜKSELTÜRK

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2016

Esra YÜKSELTÜRK tarafından hazırlanan "Au/P3HT/n-Si (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA, SICAKLIĞA VE AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……..

Başkan : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ……

Üye : Prof. Dr. Bora ALKAN

Fizik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...…….……...

Üye : Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Üye : Doç. Dr. Muharrem GÖKÇEN

Fizik Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Tez Savunma Tarihi: 25/11/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Esra YÜKSELTÜRK

25/11/2016

Au/P3HT/n-Si (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA, SICAKLIĞA VE AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Esra YÜKSELTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2016

ÖZET

Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların (SBD) elektriksel özellikleri, akım-voltaj (I-V), kapasitans- voltaj (C-V) ve iletkenlik- voltaj (G/ω-V) ölçümleri kullanılarak geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında incelendi. Doğru öngerilim I-V ölçümlerinden; Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD'nun ters-beslem doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), sıfır-beslem engel yüksekliği (Φ_{Bo}), seri ve kısa devre dirençleri (R_s ve R_{sh}) sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edildi. Ayrıca ara yüzey durumlarının dağılım profili (N_{ss}); engel yüksekliği ve idealite faktörünün voltaja bağlı değişimi ve diyotun seri direnci dikkate alınarak tüm sıcaklıklar için elde edildi. Frekansa ve sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümlerinden; difüzyon potansiyeli (V_D), fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakasının genişliği (W_D) ve engel yükseliği (Φ_B (C-V)) gibi temel diyot parametreleri elde edildi. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD'nun sıcaklığa bağlı C-V ölçümleri negatif kapasitans (NC) davranışı göstermiştir. Negatif Kapasitansa sebep olan etkenler incelenmiştir. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun metal ile yarıiletken arasındaki polimer tabaka için dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε''), kayıp tanjantı (tanδ) ve ac elektrik iletkenlik (σ_{ac}) ile reel ve imajiner elektrik modülü (M' and M'') gibi dielektrik özellikleri geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında C-V ve G/ω-V ölçümleri kullanılarak incelendi. ε', ε'', tanδ, σ_{ac} ve M' ve M'' değerlerinin frekans ve sıcaklığa oldukça bağlı olduğu gösterildi. Ayrıca, Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun I-V karakteristikleri hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri (0-250 W) altında oda sıcaklığında elde edildi. Aydınlatma şiddetine bağlı olarak deneysel I-V ölçümlerinden de I_o, n, Φ_{Bo}, R_s, R_{sh} ve N_{ss} gibi temel diyot parametreleri hesaplandı. Elde edilen deneysel sonuçlar mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi.

Bilim Kodu	:	20227
Anahtar Kelimeler	:	MPS Diyotlar; Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu; Negatif Kapasitans; Elektriksel Özellikler; Dielektrik Özellikler; Organik polimer; Aydınlatma şiddeti
Sayfa Adedi	:	153
Danışman	:	Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF Au/P3HT/n-Si (MPS) SCHOTTKY BARRIER DIODES DEPENDING ON FREQUENCY, TEMPERATURE AND ILLUMINATION INTENSITY

(Ph.D. Thesis)

Esra YÜKSELTÜRK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2016

ABSTRACT

The electrical characteristics of Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky barrier diode (SBD) have been investigated by current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) measurements in the wide range of frequency and temperature. The temperature dependent electrical parameters such as reverse-bias saturation current (I_o), ideality factor (n), barrier height (Φ_B), series and shunt resistance (R_S and R_{sh}) of Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD have been investigated by using the forward and reverse bias current-voltage (I-V). The frequency and temperature dependent electrical properties of the Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky barrier diode have been investigated using C-V and G/ω-V measurements. The frequency and temperature dependence of electrical characteristics, such as diffusion potential (V_D), fermi energy (E_F), depletion layer width (W_D) and barrier height (Φ_B(C-V)) were obtained. Temperature dependent capacitance-voltage (C-V) measurements of Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky barrier diode (SBD) showed negative capacitance (NC) behavior. The reasons of NC behavior were investigated. The frequency and temperature dependent dielectrical properties such as dielectric constant (ε'), dielectric loss (ε''), dielectric loss tangent (tanδ), ac electrical conductance (σ_{ac}) and real and imaginary part of electric modulus (M' and M'') of the Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD have been investigated using C-V and G/ω-V measurements. The experimental results show that the ε', ε'', tanδ, σ_{ac}, M' and M'' values were found a strong function of frequency and temperature. Also, the illumination dependence of the experimental I-V characteristics of the Au/P3HT/n-Si SBD was obtained from the measurements for both darkness and different illumination intensities (0-250 W) at room temperature. The values of I_0, n, Φ_{Bo}, R_s, R_{sh} and N_{ss} were also calculated, dependending on illumination intensity. Experimental results were compared with literature.

Science Code : 20227
Key Words : MPS diodes; Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky barrier diode, Negative Capacitance; Electrical properties; Dielectric properties; Organic Polymer; Illumination intensity
Page Number : 153
Supervisor : Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde hazırlanmıştır. Bu çalışma Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL'ün yöneticiliğinde yapılmıştır. Çalışmalarım boyunca verdiği destek ve katkılarından dolayı değerli tez danışmanı hocam Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL'e teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde bulunan Sayın Prof. Dr. Bora ALKAN'a ve Sayın Doç. Dr. Adem TATAROĞLU'na tez çalışmalarım süresince değerli öneri ve desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde her konuda vaktini ve bilgisini benimle paylaşan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca benden maddi, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, dualarıyla sürekli yanımda olan ve bana her zorluk karşısında üstesinden gelebileceğim inancını aşılayan değerli annem Gülser YÜKSELTÜRK, babam Yaşar YÜKSELTÜRK, abilerim Hamza Yılmaz ve Ömer YÜKSELTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu zorlu tez sürecim boyunca üzüntülerimde, sevinçlerimde, heyecanlarımda kısacası her anımda moral ve desteklerini esirgemeyen, A.Saliha, F.Zehra, Ayşe, Kamile, Hürrem, Gülizar, Tuba ve sayamadığım bir çok arkadaşıma da minettarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. TEORİK BİLGİLER 9

2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar 9

2.2. Metal/ n-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar 10

2.3. Metal/ n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar 13

2.4. Metal- Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken Schottky Diyotların Yapısı 14

2.5. İdeal MIS/MPS Tipi Schottky Diyotların Yapısı 16

2.5.1. Yığılma 18

2.5.2. Tüketim bölgesi 18

2.5.3. Tersinim bölgesi 19

2.6. Gerçek MPS/MIS Yapı 20

2.6.1. Ara yüzey durumları 21

2.6.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri 22

2.6.3. Hareketli iyonlar 22

2.7. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi 23

Sayfa

2.8. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları 26
2.8.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi 27
2.8.2. Difüzyon teorisi 30
2.8.3. Tünelleme 31
2.8.4. Deplasyon bölgesi jenerasyon-rekombinasyonu 33
2.8.5. T_o etkili akım iletimi 34
2.9. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Schottky Kapasitesi 35
2.10. Schottky Diyotların İdeal Durumdan Sapma Nedenleri 36
2.11. Dielektrik Özellikler 41
2.11.1. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör 41
2.11.2. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör 42
2.11.3. Dielektrik kutuplanma 43
2.11.4. Kutuplanma mekanizmaları 44
2.11.5. Dielektrik sabiti ölçme yöntemi 45
3. İLETKEN POLİMERLER 49
3.1. Politiyofen ve Türevleri 55
3.1.1. Poli (3-hekziltiyofen) (P3HT) 56
4. DENEYSEL YÖNTEM 59
4.1. Au/P3HT/n-Si (MPS) Yapıların Hazırlanması 59
4.1.1. Kristal temizleme 59
4.1.2. Spin kaplama yöntemi ile P3HT hazırlanması 60
4.1.3. Au/P3HT/n-Si (MPS) schottky engel diyotunun (SBD) hazırlanması 61
4.2. Deneysel Ölçüm Sistemi 63
4.2.1. Akım-gerilim kaynağı (Keithley 2400) 64

Sayfa

4.2.2. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi 65

4.2.3. Kriyostat ve sıcaklık kontrol sistemi 66

4.2.4. Aydınlatma ve güç kaynağı 66

4.3. XRD Ölçüm Sistemi 67

5. DENEYSEL BULGULAR 69

5.1. Üretilen P3HT Filmlerinin XRD Ölçümleri ile Yapı Analizi 69

6. AKIM-VOLTAJ (I-V) KARAKTERİSTİKLERİ 71

7. KAPASITANS-VOLTAJ (C-V) VE İLETKENLIK-VOLTAJ (G/ω-V) KARAKTERİSTİKLERİ 81

7.1. Frekansa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristikleri 81

7.2. Sıcaklığa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristikleri 89

8. Au/P3HT/n-Sİ (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTUNUN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ 101

8.1. Frekansa Bağlı Dielektrik Özellikleri ve Ac Elektriksel İletkenlik Ölçümleri .. 101

8.1.1. Frekansa bağlı modülüs 107

8.2. Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Özellikleri ve Ac Elektriksel İletkenlik Ölçümleri .. 111

8.2.1. Sıcaklığa bağlı modülüs 116

9. AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI AKIM-VOLTAJ (I-V) KARAKTERİSTİKLERİ 119

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 127

KAYNAKLAR 133

ÖZGEÇMİŞ 152

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontaklar 10

Çizelge 6.1. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için farklı sıcaklıklarda elde edilen I_o, n ve Φ_{Bo}, değerleri 74

Çizelge 7.1. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun C^{-2}-V eğrilerinden hesaplanmış bazı temel diyot parametreleri 86

Çizelge 7.2. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun ~0 V'da frekansa bağlı arayüzey durumları ve C_m ve G_m/ω değerleri 88

Çizelge 7.3. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun sıcaklığa bağlı C^{-2}-V eğrilerinden hesaplanmış bazı temel diyot parametreleri 97

Çizelge 7.4. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun sıcaklığa bağlı C_m ve G_m/ω ölçümleri ve Hill-Coleman metodu kullanılarak elde edilen arayüzey durumları 99

Çizelge 9.1. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde elde edilen I_o, n ve Φ_{Bo} değerleri 124

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için enerji-bant diyagramı: kontak edilmeden ve (b) kontak edildikten sonra termal denge 10

Şekil 2.2. Metal ve n-tipi yarıiletkene ait enerji-bant diagramları (a) Yarıiletkene uygulanan $V=-V<0$ doğru beslem (b) Yarıiletkene uygulanan $V=+V>0$ ters beslem..... 13

Şekil 2.3. Φm < Φs durumu için metal/n tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramı: (a) kontak edilmeden ve (b) kontak edildikten sonra termal denge durumu..... 14

Şekil 2.4. Bir MPS (MIS) yapının şematik gösterimi..... 15

Şekil 2.5. Metal-polimer-yarıiletken (MPS) diyodun enerji bant diyagramı..... 15

Şekil 2.6. V=0' da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken..... 16

Şekil 2.7. Bir MPS kapasitansının eşdeğer devresi..... 17

Şekil 2.8. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması (a) yığılma (b) tüketim (c) terslenim..... 18

Şekil 2.9. V≠ 0 durumunda n-tipi yarıiletken için ideal MPS yapının enerji-bant durumu: (a) yığılma (b) tüketim (c) tersinim..... 20

Şekil 2.10. İdeal olmayan MIS yapıda ara yüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması 20

Şekil 2.11. Arayüzey tuzaklar ve seri direnç etkisini içeren eşdeğer devre..... 23

Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi 25

Şekil 2.13. MS kontaklarda doğru ön-gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları..... 27

Şekil 2.14. a) AE ve b) TAE mekanizmalarının oluşumu 33

Şekil 2.15. Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren nkT/q-kT/q grafiği..... 35

Şekil 2.16. Bir metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotun belli bir gerilim altındaki enerji- bant diyagramı..... 35

Şekil 2.17. Sabit bir elektrik alanda imaj kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme (a) İmaj yükü (b) Schottky engelinin imaj yükü alçalması..... 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.18. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi 39

Şekil 2.19. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi 40

Şekil 2.20. Homojen engel yüksekliğine sahip olmayan bir Schottky kontağın *V* gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı 41

Şekil 2.21. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör 41

Şekil 2.22. Dielektrikli Kondansatör 42

Şekil 2.23. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri 44

Şekil 2.24. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (Ic) ile kayıp akımı (I_R) arasındaki ilişki 47

Şekil 3.1. İletken polimerler: (a) poliasetilen (b) polipirol (c) politiyofen (d) polifenilen vinilen ve (e) polianilin 50

Şekil 3.2. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerin bant yapısı..... 52

Şekil 3.3. Bir iletken, bir yarıiletken ve bir yalıtkanın HOMO ve LUMO arasındaki enerji seviyelerinin gösterimi..... 52

Şekil 3.4. Kuvarsdan (yalıtkan) gümüşe (iletken) iletken polimerlerin iletkenliğinin yalıtkan,yarıiletken ve iletkenlerle karşılaştırılması 53

Şekil 3.5. (a) en basit konjuge π-elektron sisteme örnek olan etende σ ve π bağları (b) π konjuge molekülün enerji seviyelerini gösterir. En düşük elektronik uyarılmaları bağ π-orbitali ve π*-antibağ orbitali arasındadır 54

Şekil 3.6. (a) Tiyofen ve (b) Politiyofen'in morfolojik gösterimleri 56

Şekil 3.7. Poli(3-hekziltiyofen)'in molekül yapısı..... 57

Şekil 3.8. P3HT'nin kimyasal bağ oluşum şeması 57

Şekil 3.9. P3HT'nin kimyasal yapısı 58

Şekil 4.1. Spin kaplama yöntemindeki aşamalar 61

Şekil 4.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi 62

Şekil 4.3. (a) Omik ve (b) doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler..... 62

Şekil 4.4. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD'ların şematik gösterimi 63

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi 64

Şekil 4.6. XRD ölçüm sistemine ait blok şema ve sistemin görüntüsü 67

Şekil 5.1. Si alttabaka üzerindeki P3HT polimerinin X-ışını kırınım desenleri 70

Şekil 6.1. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyot (SBD) için farklı sıcaklıklarda doğru ve ters ön gerilim ln(I)-V eğrileri 74

Şekil 6.2. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim grafiği 76

Şekil 6.3. Au/P3HT/n-Si MPS SBD'nun 80 K-400 K sıcaklık aralığında Ohm yasasıyla elde edilen R_i -V eğrileri 77

Şekil 6.4. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için farklı sıcaklıklarda N_{ss}-$(E_c$-$E_{ss})$ eğrileri 79

Şekil 7.1. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ölçülen C-V karakteristikleri..... 82

Şekil 7.2. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ölçülen G/ω-V karakteristikleri 82

Şekil 7.3. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ölçülen C^{-2}-V eğrileri 85

Şekil 7.4. Au/P3HT/n-Si yapının 10 kHz-1 MHz aralığında frekans değerleri için direnç-voltaj (R_i -V) eğrileri 87

Şekil 7.5. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için arayüzey durumlarının frekansa bağımlılığı 88

Şekil 7.6. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky diyotunun 1 MHz frekansta 80-400 K sıcaklık aralığındaki C-V karakteristikleri..... 90

Şekil 7.7. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky diyotunun 1 MHz frekansta 80-400 K sıcaklık aralığındaki G/ω-V karakteristikleri..... 90

Şekil 7.8. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD için sırasıyla C-V ve G/ω-V karakteristiklerinin bir arada çizimi 92

Şekil.7.9. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyot için farklı sıcaklıklarda ve 1 MHz'de direncin (R_i) değişimi..... 94

Şekil.7.10. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların 1MHz'de T=300 K'de voltaja bağlı olarak ölçülen C_m-V ve düzeltilmiş Cc-V karakteristikleri 95

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.11. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların 1MHz'de T=300 K'de voltaja bağlı olarak ölçülen G_m/ω-V ve düzeltilmiş G_c/ω -V karakteristikleri 95

Şekil 7.12. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD için 80-400 K aralığında ölçülen C^{-2}-V eğrileri 96

Şekil 7.13. Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyot için I-V ve C-V metotlarından elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi 98

Şekil 7.14. Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyot için Hill Coleman metodu kullanılarak elde edilen sıcaklığa bağlı Nss profili 99

Şekil 8.1. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun ε'-V karakteristiklerinin oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi 103

Şekil 8.2. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun ε"-V karakteristiklerinin oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında voltaja bağlı değişimi 103

Şekil 8.3. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında kayıp açı tanδ'nın 10 kHz-1 MHz frekans aralığında voltaja bağlı değişimi 104

Şekil 8.4. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında ε' karakteristiklerinin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi 105

Şekil 8.5. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında ε" karakteristiklerinin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi 105

Şekil 8.6. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında kayıp açı tanδ'nın farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi 106

Şekil 8.7. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında σ_{ac}'nin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi 107

Şekil 8.8. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün gerçel M' kısmının farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi 108

Şekil 8.9. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün imajiner M" kısmının farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi 109

Şekil 8.10. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün gerçel M' kısmının farklı voltajlarda frekansa bağlı değişimi 110

Şekil 8.11. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün imajiner M" kısmının farklı voltajlarda frekansa bağlı değişimi 110

Şekil 8.12. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki ε'-V karakteristikleri 113

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.13. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki ε"-V karakteristikleri 113

Şekil 8.14. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki tanδ-V karakteristikleri 114

Şekil 8.15. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki σ_{ac}-V karakteristikleri 114

Şekil 8.16. 1 MHz'de Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için ln σ_{ac}-1000/T karakteristiği 116

Şekil 8.17. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki M'-V karakteristikleri 117

Şekil 8.18. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki M"-V karakteristikleri 117

Şekil 9.1. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde ln(I)-V eğrileri 122

Şekil 9.2. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde I-V eğrileri 122

Şekil 9.3. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için maksimum güçte verim eğrisi 123

Şekil 9.4. Au/P3HT/n-Si (MPS) SB diyotunun aydınlatma şiddetine bağlı bariyer yüksekliği ve idealite faktörü eğrileri 124

Şekil 9.5. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde R_i-V eğrileri 125

Şekil 9.6. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde N_{ss}- E_c-E_{ss} eğrileri 126

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Spin kaplama cihazı..... 61

Resim 4.2. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı..... 65

Resim 4.3. HP 4192 LF empedans analizörü..... 65

Resim 4.4. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (solda) ve Janis vpf-475 kriyostat..... 66

Resim 4.5. (a) Newport-Oriel 67011 aydınlatma ve (b) Newport-Oriel 69931 güç kaynağı 66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
Å	Angstrom
A^*	Etkin Richardson sabiti
C	Kapasitans
C_o	Boş kondansatörün sığası
C_i	Ara yüzey tabakanın kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans değeri
C_c	Düzeltilmiş kapasitans değeri
G_c	Düzeltilmiş iletkenlik değeri
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_i	Saf durumdaki enerji seviyesi
ε_o	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ε_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ε'	Reel dielektrik sabiti
ε''	İmajiner dielektrik sabiti
Hz	Frekans birimi (Hertz)
I	Akım
I_o	Ters beslem doyma akımı
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin cinsinden sıcaklık

Simgeler	Açıklamalar
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	Deşiğin etkin kütlesi
m_o	Serbest elektron kütlesi
M'	Reel elektrik modülü
M''	İmajiner elektrik modülü
n	İdealite faktörü
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_c	İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
N_v	Değerlik bandındaki durumların yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
Q_{sc}	Uzay yükü
q	Elektrik yükü
R_i	Direnç
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Kısa devre direnci
T	Mutlak sıcaklık
$\tan\delta$	Kayıp açı
V	Gerilim
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	Doğru öngerilim
V_R	Ters öngerilim
V_y	Ara yüzey veya polimer üzerine düşen gerilim
V_{yi}	Yarıiletken üzerine düşen gerilim
V_G	Doğrultucu kontağa uygulanan gerilim
W_D	Tüketim tabakasının genişliği
Y	Admittans
Z	Empedans
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Simgeler	Açıklamalar
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
δ	Polimer ara yüzey tabaka kalınlığı
Ω	Ohm
ρ	Özdirenç
χ_s	Elektron yakınlığı
Ψ_s	Yüzey potansiyeli

Kısaltmalar	Açıklamalar
a.c.	Alternatif akım
AE	Alan emisyonu
C-V	Kapasitans-voltaj
d.c.	Doğru akım
FET	Alan etkili transistör
G/ω-V	Kondüktans-voltaj
HOMO	En yüksek işgal edilen moleküler orbital seviyesi
I-V	Akım-voltaj
LUMO	En düşük işgal edilmemiş moleküler orbital seviyesi
MESFET	Metal yarıiletken alan etkili transistör
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken
OLED	Organik ışık yayan diyot
OTFT	Organik ince film transistörler
P3HT	Poli (3-hexylthiophene)
SBD	Schottky engel diyotu
TFT	İnce film transistör

1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisi son yüzyılımıza damgasını vuran en önemli bilimsel buluşlara zemin hazırlayan bir alan olmuştur. 1800'lerin ortalarında başlayan bu serüvenin çıktıları günümüzde yaygın ve kullanışlı elektronik aygıtlarının temel yapı taşını oluştururlar. İlk yarıiletken aygıtlar 19. yy sonlarında yapılan metal-yarıiletken nokta kontak diyotlarıydı. Braun'un 1874 yılında yaptığı araştırmaların metal-yarıiletken kontaklarla ilgili yapılan ilk çalışma olduğu bilinmektedir. F.K. Braun; demir, bakır ve kurşun sülfür kristaller üzerine metalik kontaklar yapmış ve kontakların doğrultucu özellik sergilediğini, toplam direncin uygulanan gerilime ve yüzey durumlarına bağlı olduğu göstermiştir [1, 2].

O dönem doğrultma mekanizması tam olarak bilinmese de metal-yarıiletken kontaklar, entegre devrelerde anahtar hızını arttırmak için radyo ve radar dedektörü gibi bir çok cihazda kullanılmıştır. 1900 yılının başında nokta-kontak doğrultucuların diğer pratik uygulamaları da başlamıştır. Örneğin Sir J. C. Bose, radyo dalgalarının tespit edilebilmesi için yarıiletken bağlantı kullanan ilk kişi olmuştur ve hem kısa dalgaboylu radyo dalgaları hem de beyaz ve ultraviyole ışık için galen (kurşun sülfür) kristallerinin kullanımını geliştirmiştir [3, 4]. Elektromanyetik radyasyonun algılanmasına yönelik yaptığı dedektör 1904 yılında patente layık görülmüştür. [5]. Halen orijinal ekipmanları Kolkata'daki Bose Enstitüsünde bulunmaktadır. Ayrıca Arizona (ABD)'da bulunan NRAO 12 metre teleskopundaki 1.3 mm multi ışın alıcısı da 1897'de yazılmış orijinal kağıtlardaki konsepti ile kullanılmaya devam edilmektedir [3]. Sir Nevill Mott, 1977 yılında katı hal elektroniğine katkılarından dolayı Nobel ödülü aldığında Bose hakkında şunları söyleyecektir: "Jagadish Chandra Bose zamanının en az altmış yıl ilerisindeydi. Aslında P tipi ve N tipi yarıiletkenlerin varlığını öngörmüştü." [6].

Bose (1904)'u takip eden yıllarda bu konularda patente layık görülen başka bilim insanlarına da rastlarız. 1906 yılında G.W. Pickard, silisyumun kullanıldığı metal-yarıiletken kristal dedektörler için patente layık görülmüştür. Pickard'ın dedektörü "kedi bıyığı (cat's whisker)" olarak adlandırılan ince metal teli bulduğu için devrim niteliğindedir [7, 8]. Kristal dedektörler yapı olarak hassas ve ucuzdur. Bu sebeple amatör telsizciler, pek çok ilk ticari telsiz istasyonları ve 1920′nin başlarında basit alıcılar tarafından kullanılmıştır. İkinci Dünya Savaşından bu yana geliştirilen ve bugün elektronik

mühendisliğinin her sahasında kullanılan yarıiletkenler, bunun doğrudan doğruya bir devamıdır. George W. Pierce 1907'de Physical Review'de yayınlanan makalesinde birçok yarıiletken yüzey üzerine farklı metal püskürtme ile yapılan diyotların doğrultma özelliği gösterdiğini kanıtlamıştır [9]. 1926 yılında Lilienfeld bugün modern transistörlere de kaynak olabilecek şekilde metal- yarıiletken doğrultucu kontakları kullanarak oluşturduğu alan etkili transistör (FET) ile patente layık görülmüştür [10]. Yarıiletken ve metalin ara yüzey oluşumundaki etkilerine dair çalışma ve patentler 1930'lara doğru hız kazandı. 1931 yılında Alan Wilson, modern katı hal fiziğinin kurucularından biri kabul edilir, metal, yalıtkan ve yarıiletkenler arasındaki ayrımı açıklamak ve yarıiletkenlerde iletim mekanizmasını aydınlatmak için katıların bant teorisini formüle etmiştir [11, 12]. Bu çalışmalar günümüz mikro elektronik teknolojisinin de temelini oluşturmaktadır.

Metal-yarıiletken kontakların doğrultucu etkilerinin anlaşılması için ilk önemli çalışmalar Schottky ve Mott tarafından gerçekleştirilmiştir. Schottky, metal yarıiletken yapıdaki potansiyel engelin, kimyasal bir tabaka olmayıp, sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını ileri sürmüştür [13-17]. Adına atfen metal-yarıiletken kontaklara Schottky diyotlar veya Schottky kontaklar denilmektedir. Potansiyel engeli ile ilgili diğer bir model Mott tarafından geliştirilmiştir [18-20]. Mott, yarıiletken ve metalin iş fonksiyonları arasındaki farkın bir potansiyel engel oluşturduğunu söyler. Elektrik alanın sabit kaldığı ancak potansiyelin lineer olarak değiştiğini kabul etmiştir. Schottky ise, ara yüzeyde kirlilik atomlarının olduğunu ve elektrik alanın doğrusal olarak arttığını söylemiştir [21].

Doğrultucu metal-yarıiletken kontakların temel teori ve tarihsel gelişimi, "Doğrultucu Yarıiletken Kontaklar" adlı bir kitapta 1957 yılında Henisch tarafından bir araya getirildi [22]. Silisyum ve Germanyum doğrultucu yarıiletken kontaklardan yapılan mikrodalga radarların İkinci Dünya Savaşı sırasında kullanılması, metal-yarıiletken kontak yapıların gelişmesinde önemli bir adım olmuştur. Kontak yapıların savaş yıllarındaki en yaygın kullanımı, frekans dönüştürücüsü ve düşük seviye mikrodalga dedektör diyotlardır [23, 24]. Bethe'nin ortaya koyduğu "Termiyonik emisyon teorisi" bu döneme yapılan en önemli katkılardan biridir [20, 25, 26]. Bu teoriye göre; elektronların engelden geçişi, metaldeki elektronların vakum düzeyine geçişi gibidir. Mott ve Schottky'nin savundukları gibi yarıiletkende akım, sürüklenme ve difüzyondan değil, elektronların metale geçiş süreci ile belirlenmektedir [26]. Buna ilave olarak yüzey seviyelerinin belirli bir düzeye

ulaşmasıyla engel yüksekliği değerinin kontakta kullanılan metalin cinsinden bağımsız olacağını gösteren araştırma Bardeen tarafından yapılmıştır [27]. Crowell ve Sze, MS kontaklarda akım iletim mekanizmalarını açıklayan Schottky'nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin termiyonik emisyon teorisini (TE), tek bir termiyonik emisyon difüzyon modelinde birleştirmiştir (TED) [19]. İdeal Schottky diyotlarda akım iletim olayında termiyonik emisyon ile difüzyon teorisi ve iki teorinin kombinasyonu ile elde edilen termiyonik emisyon difüzyon teorileri önemli yer tutmaktadır [28]. Schottky diyotların yapısının iyice anlaşılması için yapılan teorik ve deneysel birçok çalışma mevcuttur. Örneğin; bu konuda iki farklı ara yüzey seviyesini tanımlayan Heine'i [29] ve ara yüzeyin elektronik yapısı üzerine çalışmalar yapan Bardeen [30] vb. birçok çalışmayı sayabiliriz. Cowley ve Sze farklı metallerle yapılan Schottky diyotların engel yüksekliklerinin kontak metallerinin iş fonksiyonlarına bağlılığını araştırmışlar ve yarıiletken yüzeyindeki yüzey durumlarının yalnızca yarıiletken yüzeyinin bir özelliği olduğu ve metalden bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır [31]. Card ve Rhoderick ara yüzey durum yoğunluğu belirleyip, ara yüzey durum yoğunluğunun ve ara yüzey tabakasının I-V karakteristiklerinin idealite faktorü üzerine etkilerini açıklamışlardır [32]. Metal-yarıiletken yapılarda ara yüzeydeki doğal oksit tabakası üzerine yine deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır [33]. Bu yapıların sıcaklığa bağlı olarak karakteristiklerinin ilişkisi araştırılmıştır [19, 20, 26, 32, 34]. Schottky kontaklarında malzemeler kontak haline getirilirken ara yüzeylerde istenmeyen bir oksit tabaka meydana gelmektedir. Bu tabaka varlığının diyot parametrelerini önemli şekilde etkilediği bilinmektedir.

Metal-yarıiletken (MS), ara yüzey tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi Schottky engel diyotları (SBDs) elektronik endüstrisinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Son yıllarda bu yapılarla ilgili birçok çalışma yapılmıştır [16, 20, 26, 35-44]. Bu çalışmalarda organik yarıiletkenlerin kullanımı ise, son zamanlarda organik iletken polimerlerin icadıyla oldukça önem kazanmıştır.

1980'li yıllarda başlayan yarıiletken organik polimer araştırmalarının başarıyla sonuçlanmasının ardından 2000 yılında kimya dalında Alan G. MacDiarmid, Hideki Shirakawa ile Alan J. Heeger adlı araştırmacılara nobel ödülü verilmiştir. Heeger, MacDiarmid ve Shirakawa ince bir poliasetilen filminin üzerine iyodu buharlaştırmayla oksitleyerek onun elektriksel iletkenliğinin oldukça arttığını tesadüfen bulmuşlardır [45].

Bu şekilde elde edilen poliasetilenin iletkenliği, bakır ve gümüş gibi metallerin iletkenliği ile karşılaştırılacak kadar yüksektir.

Polimerler, elektriksel ve mekanik özelliklerinden dolayı, elektronik endüstrisinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Mekanik olarak dayanıklı, malzemelerin ucuz, kolay hazırlanabilir oluşu ve bu sebeple büyük alanlı numuneler hazırlayabilme imkanı sunması bilim dünyasının teknolojik gelişmeler ışığında polimerler üzerine eğilmesinin önemini açıklar [46].

Günümüzde elektronik aygıtların yaygın ve kullanışlı olmasını sağlayan mikro elektronik teknolojisinin temel malzemesi olan silisyum, halen üretilen çiplerin %95'inden fazlasının hammaddesi olup yüksek maliyetli işletim ve altyapı nedeniyle daha yüksek hacim ve düşük fiyat gerektiren durumlarda piyasaya hitap edememektedir. İşte bu noktada alternatif yeni malzeme arayışları, organik yarıiletken malzemeleri daha da ilgi çekici hale getirmiştir.

Yarıiletken cihazları oluşturan organik/polimer malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar yüksek güç verimliliği, düşük sıcaklık işleme ve hafif ve esnek alt taşlarıyla geniş alan uygulamalarında kullanabilirliği gibi birçok avantajları vardır [47, 48]. Sadece bu değil aynı zamanda araştırmacıları organik yarıiletken üzerine çalışmaya yönelten birçok sebep vardır. Bunlar; organik yarıiletkenlerin spin kaplama ve baskı gibi ucuz ve tek seferde oldukça fazla üretim yapılabilen kaplama teknikleriyle ucuz maliyetle üretilebilmeleri, esnek olmaları ve yüksek nonlineerlik gibi daha birçok özelliğe sahip olmaları şeklinde sıralanabilir [49]. Ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirmeye olan ihtiyaç, verimli ve düşük maliyetli fotovoltaik cihazların geliştirilmesi için bilimsel araştırmalara hız kazandırmıştır [50]. Ayrıca iletken polimerler metalle kontak haline getirildiği zaman fotovoltaik, elektrolüminesans ve doğrultucu etki gösterdiğinden dolayı son zamanlarda elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahip olmaya başlamışlardır [51, 52]. Bu özellikleri sayesinde elektronik ve optoelektronik alanında organik ışık yayan diyot (Organic Light Emitting Diode-OLED) [53], organik ince film transistörler (Organic Thin Film Transistor-OTFT), organik Schottky engel diyotları, organik alan etkili transistörler (Organic Field Effect Transistor-OFET) [49, 53-59], polimer güneş pilleri, metal yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET), yarıiletken dedektörler, hızlı anahtar (switching) uygulamaları, varaktörler (kapasiteleri uygulanan

gerilimle değişen kondansatörler) ve mikrodalga devre elemanlarında gibi teknolojik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Yakın gelecekte ise cep telefonu ve MP3 çalarınızı üzerinize giydiğiniz polimer güneş pilleriyle şarj edebilir, sevdiğiniz filmi yüksek görüntü kalitesi ile OLED TV'nizden izleyebilirsiniz. Bu ve buna benzer birçok yeniliği hayal olmaktan çıkaran organik yarıiletken teknolojisi araştırmaya ve geliştirmeye açık bir alan olmaya devam edecektir.

İletken polimerleri diğer polimerlerden ayıran en önemli özellik, her adımda değişen tek ve çift bağlardan oluşan bir zincir yapısına sahip olmalarıdır. Her adımda değişen bağ yapısına konjugasyon denir. Sadece konjuge olmuş polimerler elektriği iletebilirler [49, 60, 61]. Konjuge polimerlerin en önemli uygulamalarından biri de Schottky diyotlardır. Konjuge olmuş polimerler, metaller ile Schottky engeli oluşturur. Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan veya polimer tabakanın varlığı ara yüzey tabaka ve ara yüzey durumlarını etkiler ve metal-yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerinin değişmesine neden olur [62]. Bu polimer ara yüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Ayrıca ara yüzey tabakaları yüzeyi pasivize eden, sızıntı akımını en aza indiren, doğrultucu özelliğe yaklaşacak yüksek dielektrik sabitli malzemelerden seçilir. Bu yüzden ara yüzeyde polimer kullanılması diyodun doğrultma davranışına katkıda bulunmaktadır.

Polimer malzemeler yüksek alan etki mobilitesi ve kolay işlenebilirlik içinde tercih edilmektedir. Bunların arasında Poli(3-hexylthiophene) (P3HT) mükemmel kimyasal ve fiziksel özellikleri ile endüstriyel uygulamalarda oldukça dikkat çekmektedir. Poli(3-hexylthiophene) (P3HT) uygulanabilirliği açısından en yüksek potansiyele sahip iletken polimerlerden biri olarak kabul edilmiştir [63, 64]. P3HT diğer polimerler ile karşılaştırıldığında kendi kendine organizasyonu ve yüksek hol mobilitesi gibi bazı eşsiz özelliklere sahiptir [41]. Bu nedenle poli (3-hexythiophene) (P3HT), organik elektronik cihazlar için iyi bir aday gibi görünmektedir [65].

MIS Schottky diyotların temel elektriksel parametreleri, frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri kullanılarak belirlenir. Son yıllarda, MS, MIS veya MPS yapılı Schottky diyotların C-V ve

G/ω-V özellikleri N_{ss}, R_s ve yalıtkan tabaka etkileri göz önüne alınarak araştırılmaktadır. R_s, aygıtın C ve G/ω özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemektedir.

Bu çalışmada, hazırlanan metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi Au/P3HT/n-Si (100) yönelimine sahip 0,01 Ω.cm özdirençli, 275 μm kalınlıklı, 3 inç çapında fosfor (P) katkılı (n-tipi) Si tek kristal üzerine oluşturulan Schottky diyotların muhtemel akım-iletim mekanizmaları, geniş bir sıcaklık (80-400 K) ve voltaj (± 3 V) aralığında elde edilen deneysel akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak ayrıntılı incelendi ve mevcut literatür ile kıyaslandı. Hazırlanan bu diyotların temel elektriksel parametreleri yapının direnci, ara yüzey durumları, voltaj ve sıcaklık dikkate alınarak detaylıca incelendi. Doğru beslem *I-V* ölçümlerinden; temel diyot parametreleri olan ters-beslem doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), sıfır-beslem engel yüksekliği (Φ_{Bo}), seri ve kısa devre dirençleri (R_s ve R_{sh}) sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edildi. Ayrıca ara yüzey durumlarının dağılım profili (N_{ss}); engel yüksekliği ve idealite faktörünün voltaja bağlı değişimi dikkate alınarak tüm sıcaklıklar için elde edildi.

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotlarının oda sıcaklığında, -3 V ve +3 V aralığında ve geniş frekans aralığında (10 kHz-1 MHz) elde edilen deneysel *C-V* ve *G/ω-V* ölçümleri HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile yapılmıştır. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinden; V_D, E_F, W_D *ve* Φ_B *(C-V)* gibi temel diyot parametreleri elde edildi.

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotunun *C-V* ölçümleri 80-400 K sıcaklık aralığında, 1 MHz frekansta, -3 V ve +3 V aralığında, Hewlet Packart 4192 A empedans analiz cihazı ile alınmıştır. Sıcaklığa bağlı *C-V* ve *G/ω-V* ölçümleri sonucu çizilen C^{-2}-V grafiği yardımıyla V_D, E_F, N_D ve Φ_B değerleri hesaplanmıştır. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotu için; V_D, 0.94–0.15 V; E_F, 0.04–0.23 eV; N_D, 7.10×10^{16}–2.88×10^{16} cm^{-3} ve Φ_B, 0.94–0.56 eV aralığında değişmektedir. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların (SBD) sıcaklığa bağlı *C-V* ölçümleri negatif kapasitans (NC) davranışı göstermiştir. Negatif kapasitansa sebep olan etkenler incelenmiştir.

Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun metal ile yarıiletken arasındaki polimer tabaka için kompleks geçirgenliğin gerçel kısmı ε′ (dielektrik sabiti), imajiner kısmı ε″

(dielektrik kayıp) ve tanδ (kayıp açı) frekansa bağlı olarak incelenmiştir. *C-V*, *G/ω-V* ölçümlerinin frekansa bağımlığı ±3 V ve 10 kHz-1 MHz frekans aralığında oda sıcaklığında incelendi. Elektriksel özelliklerden a.c. elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) gibi temel parametreler frekansa ve voltaja bağlı olarak hesaplandı. Dielektrik özelliklerden ise dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp tanjantı (tanδ) frekansa ve voltaja bağlı olarak hesaplandı. Deneysel sonuçlar, Schottky engel diyotun ε′, ε″, kayıp tanjantı (tanδ), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) ve σ_{ac} değerlerinin tersinim bölgesinden ziyade özellikle tüketim ve yığılım bölgelerinde frekansın ve uygulanan ön gerilimin güçlü fonksiyonları olduğunu göstermiştir.

Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun metal ile yarıiletken arasındaki polimer tabaka için kompleks geçirgenliğin gerçel kısmı ε′ (dielektrik sabiti), imajiner kısmı ε″ (dielektrik kayıp) ve tanδ (kayıp açı) sıcaklığa bağlı olarak incelenmiştir. C-V, G/ω-V ölçümlerinin sıcaklığa bağlılığı ±3 V ve 80-400 K sıcaklık aralığında incelendi. Elektriksel özelliklerden a.c. elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) gibi temel parametreler frekansa ve voltaja bağlı olarak hesaplandı. Dielektrik özelliklerden ise dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp tanjantı (tanδ) sıcaklığa ve voltaja bağlı olarak hesaplandı. Deneysel sonuçlar, Schottky engel diyotun ε′, ε″, kayıp tanjantı (tanδ), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) ve σ_{ac} değerlerinin tersinim bölgesinden ziyade özellikle tüketim ve yığılım bölgelerinde sıcaklığın ve uygulanan ön gerilimin güçlü fonksiyonları olduğunu göstermiştir.

Son olarak Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun akım-voltaj (I-V) ölçümlerinin ışığa bağımlılığı hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri için ölçülerek ilgili grafikler ve çizelgeler elde edildi. *I-V* ölçümleri hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri (0-250 W) için, ± 3 V aralığında, 20 mV' luk adımlarla oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Aydınlatma şiddetine bağlı olarak *I-V* ölçümlerinden I_o, n, Φ_{Bo}, R_s , R_{sh} *ve* N_{ss} gibi temel diyot parametreleri elde edildi. Elde edilen deneysel sonuçlar mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi.

Doktora tezi olarak sunduğumuz bu çalışmanın birinci bölümü konu ile ilgili bir literatür çalışmasını içeren ve konunun amacı ile önemini belirten "Giriş" bölümü; ikinci bölümü, "Teorik Bilgiler"; üçüncü bölümü, "İletken Polimerler"; dördüncü bölümü, Au/P3HT/n-Si

(MPS) Schottky bariyer diyotunun hazırlanması ve üretilmesi için gerekli olan malzemeler ve deney sistemi ile ölçülerin alınmasında kullanılan cihazlar hakkında bilgiler içeren "Deneysel Yöntem"; beşinci bölümü "Deneysel Bulgular"; altıncı bölümü, Au/P3HT/n-Si yapısının frekansa bağlı I-V, karakteristikleri ile bunlardan hesaplanan temel diyot karakteristik parametrelerinin yorumlandığı bölüm; yedinci bölümü Au/P3HT/n-Si yapısının sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω-V karakteristikleri ile bunlardan hesaplanan temel diyot karakteristik parametrelerinin yorumlandığı bölüm; sekinci bölümü Au/P3HT/n-Si yapısının frekansa ve sıcaklığa bağlı dielektrik özelliklerinin yorumlandığı bölüm ve dokuzuncu bölüm ise aydınlatma şiddetine bağlı I-V karakteristikleri ve yorumlandığı bölüm ve onuncu bölümü ise sonuçların değerlendirilmesini içeren "Sonuç ve Öneriler" bölümlerinden oluşmaktadır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar adından da anlaşılacağı gibi bir metal ile bir yarıiletkenin sıkı kontak edilmesi ile oluşur. Metal-yarıiletken (MS) kontaklar literatürde Schottky kontaklar olarak da bilinir. Schottky kontakların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi ve iletkenlik özelliklerinin araştırılabilmesi için metal-yarıiletken kontakların incelenmesi gerekir. Kontak haline getirilen yüzeylerin temiz, pürüzsüz ve kontak olarak kullanılan metallerin yeterince yüksek saflıkta oluşu kontağın ideal olduğunun göstergelerinden biridir [20, 32]. Kontak yapılacak metal malzeme ile yarıiletken kristali çok küçük bir dirençle atomik boyutta temas etmelidirler. İki madde kontak haline getirildiği zaman Fermi Enerji seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar yük alış-verişi olur [66]. Schottky-Mott modeline göre potansiyel engel, iki maddenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Metal-yarıiletken Schottky diyotların yapımında alt (omik) ve üst (doğrultucu) metal kontakların seçimi son derece önemlidir.
Metal-yarıiletken kontaklar, her iki maddenin iş fonksiyonuna bağlı olarak ikiye ayrılır. Metal-yarıiletken kontakta iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (holler ve elektronlar) bir yönde diğerine göre (metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale doğru) çok daha kolay iletiliyorsa *doğrultucu kontak* denir. Doğrultucu kontak Schottky kontak diye de adlandırılır. *Omik kontak* ise metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel oluşmadığı için taşıyıcıların bir maddeden diğer maddeye kolaylıkla geçebildiği davranıştır.

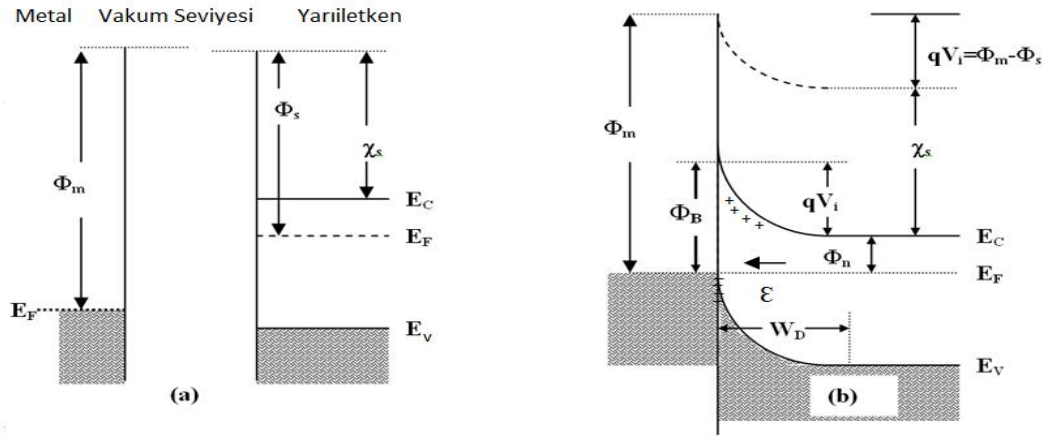
Kontağın omik veya doğrultucu olması, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlıdır. *Metalin iş fonksiyonu (Φ_m)*; bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli minimum enerjidir. İş fonksiyonları kuantum mekaniğine göre hacim ve yüzey katkıları olarak iki kısımdan oluşur. Kristalin periyodik potansiyeli ve elektronun diğer elektronlarla etkileşmesinden kaynaklı enerji kısmını hacim katkısı ile açıklarız. Yüzey katkısını ise yüzeyde bulunan dipol tabakanın varlığından açıklarız.
Φ_m metalin, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, doğrultucu ve omik kontakların oluşumu Çizelge 2.1' de gösterildiği gibidir.

Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaklar

İş Foksiyonları İlişkisi	Yarıiletken Türü	Kontak Türü
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Doğrultucu
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Omik
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Doğrultucu

2.2. Metal/ n-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar

Doğrultucu kontak (Schottky kontak) akımın bir doğrultuda diğer doğrultuya göre daha kolay aktığı, $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda oluşan kontaktır. Doğrultucu kontak durumunda elektron ve hollerin bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki hareketleri, kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli yüzünden zorlaşır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilgilidir [66]. Örneğin n-tipi yarıiletkende çoğunlukta olan elektronlar difüzyon yoluyla metalin ön yüzeyine geçerken arkalarında holler bırakarak yarıiletkende elektron konsantrasyonunun azalmasına neden olurlar. Metal ile yarıiletken arasında bu yük geçişleri nedeniyle Şekil 2.1' de görüldüğü gibi, bir potansiyel fark veya diğer adıyla bir doğal elektrik alan oluşur. Özellikle, bu engel ve yarıiletkendeki katkı atomlarının konsantrasyonu ve numunenin sıcaklığı akım iletim mekanizmalarını kontrol eder [16, 20, 26, 35, 36, 66]. Yük geçişleri sonucunda metal ile yarıiletken arasında hareketli yüklerden arınmış yüksek dirençli bir bölge (tüketim tabakası) oluşur. Bu iki yük tabakasının toplam genişliği ise tüketim tabakası olarak adlandırılır [16, 36]. Bu konudaki ilk çalışan bilim adamına atfen bu tabakaya *Schottky tabakası* denilir.



Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için enerji-bant diyagramı: (a) kontak edilmeden ve (b) kontak edildikten sonra termal denge durumu

İş fonksiyonu Φ_m olan metal ile iş fonksiyonu Φ_s olan n-tipi bir yarıiletken ($\Phi_m > \Phi_s$) (doğrultucu kontak) arasında termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramları Şekil 2.1'de görülmektedir. Şekil 2.1'de temsil edilen bazı temel fiziksel parametreleri aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

Fermi Enerjisi: İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında (T=0 K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviye *Fermi enerjisi* olarak tanımlanır. n tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi iletim bandından itibaren ölçülürken p tipinde ise valans bandından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olarak tanımlanır.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu(Φ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi katkılanan katkı atomlarının (alıcı veya verici) yoğunluğu ile değiştiğinden Φ_s de değişen bir niceliktir.

Elektron yakınlığı (χ): Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanır.

Şekil 2.1, $\Phi_m > \Phi_s$ olan metal ve n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın elektron enerji-bant diyagramını göstermektedir. Kontaktan önceki durumda, Şekil 2.1 (a)'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden (Φ_m-Φ_s) kadar yukarıdadır. Kontaktan sonra yük değişimi ortaya çıkar ve yarıiletken yüzeyden metale elektronlar geçerken, geride iyonize olmuş donorlar bırakırlar. Yük değişimi tamamlandıktan sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Yani yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi Şekil 2.1 (b)'de görüldüğü gibi (Φ_m-Φ_s) kadar düşer. Böylece yarıiletkenin metale bakan ön yüzeyinde ince bir pozitif yük ve metalin yarıiletkene bakan yüzeyinde ise ince bir

negatif yük tabakası oluşur ve bu tabakalara sırasıyla pozitif ve negatif uzay yük bölgesi denilir. Bu iki yük tabakasının toplam genişliği ise *tüketim tabakası* olarak adlandırılır. Termal denge durumunda, metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri durur. Ancak esas olan bu yük geçişlerinin sürekli olmasıdır. Termal denge durumunda kurulma voltajı (built-in) diye adlandırılan qV_i, metal ile yarıiletken materyallerin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir ($qV_i = \Phi_m - \Phi_s$). Yani yarıiletkenden metale geçecek olan yüklerin (elektron veya hol) gördüğü potansiyel engel yüksekliği qVi kadardır. Bununla birlikte metalden yarıiletkene geçecek olan yüklerin gördüğü potansiyel engel yüksekliği, yarıiletken tarafından gözüken engel yüksekliğinden büyüktür ve

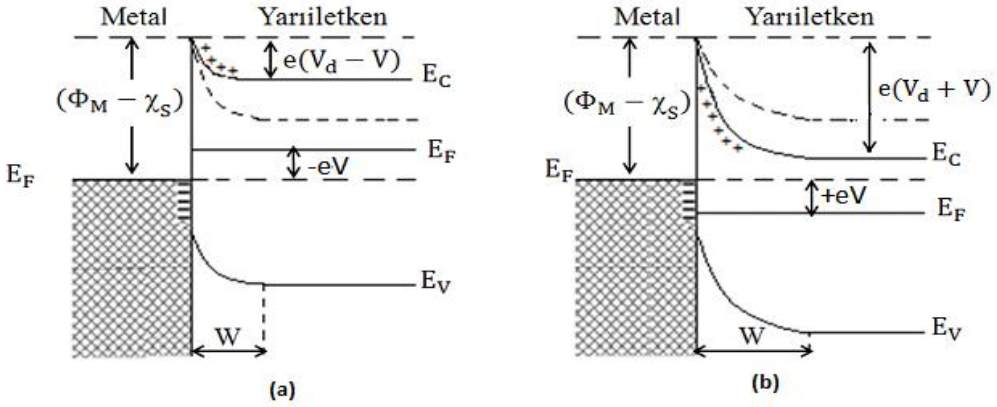
$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \tag{2.1}$$

ile verilir [16, 20, 26, 35, 36]. Şekil 2.1.b'de görüldüğü gibi oldukları dikkate alınırsa Eş. 2.1 ifadesi

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \tag{2.2}$$

olarak yazılabilir. Burada $\Phi_n = (E_C - E_F)$ olup, iletim bandının alt kenarı E_C referans alındığında yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ve q elektronik yüktür. Eş. 2.1 birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir [19, 26]. Schottky'e göre yarıiletken homojen bir şekilde katkılanır ve ara yüzey tükenim bölgesinde homojen bir yük yoğunluğu verir. Bu sabit uzay yük için elektrik alan şiddeti uzay yük tabakasının kenarından olan uzaklık ile artar ve oluşan parabolik engel "Schottky Engeli" olarak bilinir. Yarıiletkenin hiç yük içermeyen ince bir tabakası Mott'a göre, düzenli olarak katkılanan bir yarıiletken ile metal arasına yerleştirilirse bu ince bölgedeki elektrik alan büyüklüğü sabittir. Bu bölgeye doğru geçerken potansiyel doğrusal olarak artar. Engelin bu tipi "Mott Engeli" olarak bilinir [67].

Termal dengede metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engelini aşmasına yetebilecek büyüklükte olduğunda, kontaktan eşit ve zıt yönde bir I_0 akımı geçer. Şekil 2.2 (a)'da görüldüğü gibi, n-tipi yarıiletkene bir negatif voltaj uygulanırsa metalden yarıiletkene geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu nedenle bu elektronların oluşturacakları akım da değişmez.



Şekil 2.2. Metal ve n-tipi yarıiletkene ait enerji-bant diagramları (a) Yarıiletkene uygulanan $V=-V<0$ doğru beslem (b) Yarıiletkene uygulanan $V=+V>0$ ters beslem [66]

Fakat yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır. Dolayısıyla metalden yarıiletkene doğru akan akım exp(eV/kT) faktörü kadar artacaktır. Sonuç olarak termoiyonik emisyon teorisine göre net akım [26];

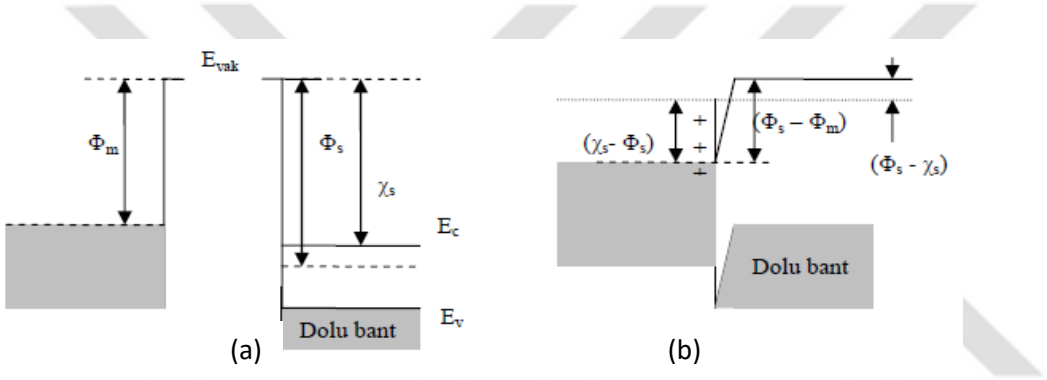
$$I = I_0 \left[exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.3}$$

ile verilir. Burada I_0 doyma akımıdır. I net akımı ise pozitiftir. Bu doğrultucu kontaktır. Tüketim bölgesinin genişliği artmıştır. Şekil 2.2 (b)'de görüldüğü gibi, yarıiletken tarafına pozitif gerilim uygulandığında tüketim bölgesinin genişliği artar. İletkenlik bandı eV kadar alçalır ve yarıiletkenden metale elektron akımı termal dengedeki değerine göre azalır. Böylece uygulanan doğru veya ters ön gerilim voltajı termal denge durumundaki enerji-band diyagramını değiştirir. Bu değişim, tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesi ve bant bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur.

2.3. Metal/ n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik kontak, iki doğrultuda da elektronların kolayca hareket edebildiği kontaklardır. Daha öncede belirttiğimiz gibi kontak yapımında n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s, metalin iş fonksiyonu Φ_m'den büyük ise ($\Phi_s>\Phi_m$) omik kontak oluşur [20, 66]. Bir metalle bir n tipi yarıiletkenin kontak haline getirildiği $\Phi_s>\Phi_m$ durumunu dikkate alırsak, kontaktan önce, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden Φ_s-Φ_m kadar aşağıdadır. Metal ve

yarıiletkenin kontaktan önceki enerji-bant diyagramları Şekil 2.3(a)'daki gibidir. Kontaktan sonra bir yük değişimi gerçekleşir. Elektronlar metalden, kontağın metal kısmında bir pozitif yüzey yükü bırakıp yarıiletken kısmına akarlar ve kontağın yarıiletken kısmında bir negatif yüzey yüküne neden olurlar. Sonuçta kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.3(b)'de görülmektedir. Yük değişimi bittikten sonra yarıiletken gövdedeki Fermi seviyesi (Φ_s-Φ_m) kadar yükselir. Bir V potansiyeli uygulanırsa, bu potansiyel farkı kontak bölgesinde değil yarıiletken boyunca dağılacaktır. Metal kısmına pozitif bir gerilim, yarıiletken kısmına negatif bir gerilim uygulanırsa yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler.

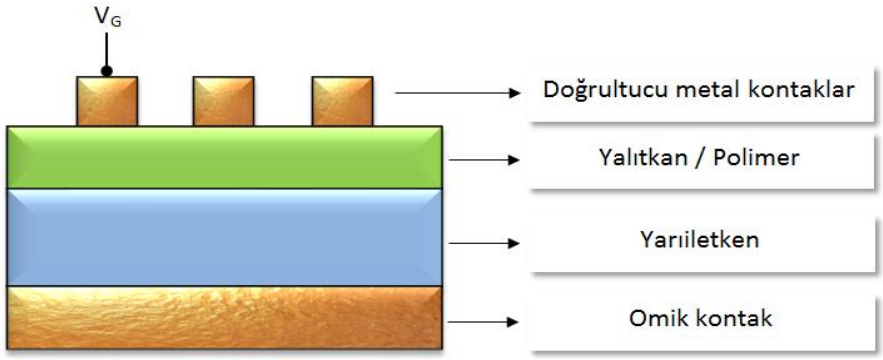


Şekil 2.3. Φ_m<Φ_s durumu için metal/n tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramı: (a) kontak edilmeden ve (b) kontak edildikten sonra termal denge durumu

2.4. Metal- Yalıtkan/Polimer-Yarıiletken Schottky Diyotların Yapısı

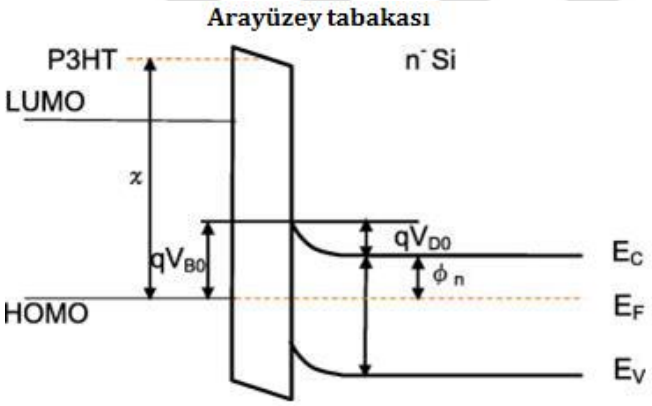
Metal/yarıiletken arasında bazen kendiliğinden, bazen de amaca yönelik yalıtkan bir tabaka oluşturulur. Metal ile yarıiletken arasına yalıtkan ya da polimer bir tabaka kaplanırsa, metal/yarıiletken (MS) yapı, metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS veya MPS) yapıya dönüşür. Böyle yapılarda yalıtkan tabaka polimer ise metal/polimer/yarıiletken (MPS) yapıları olarak isimlendirilir. Bu yapılar, yarıiletken yüzeylerini ve yüzey durumlarını incelemek için yararlıdır. Bu yalıtkan veya polimer arayüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Metal/yarıiletken Schottky diyotlar, hem ara yüzey tabakaya hem de bir seri dirence sahip ise diyot üzerine uygulanan voltaj (V_G); bu ara yüzey tabaka, yapının seri direnci ve diyot tarafından ($V= V_i+V_{Rs}+V_D$) bölüşülecektir. Bu nedenle MIS veya MPS yapılarda akım-iletimi MS yapılardan oldukça farklı olacaktır. MPS yapılar genelde

Şekil 2.4'de görüldüğü üzere silisyum bir alt tabaka, bu alt tabakaya kontak yapılmış bir arka omik kontak ve bir yalıtkan tabakası üzerine yer alan bir metal kontaktan oluşur.



Şekil 2.4. Bir MPS (MIS) yapının şematik gösterimi

Metal/Polimer/Yarıiletken (MPS) yapı Şekil 2.5'de gösterilmiştir [19]. Burada δ polimer tabakanın kalınlığıdır. n-tipi yarıiletken kullanıldığında doğrultucu metal kontaklara pozitif, yarıiletkenlere de negatif potansiyel uygulandığında doğru beslem, bağlamanın yönü değiştirildiğinde ise ters beslem oluşur.

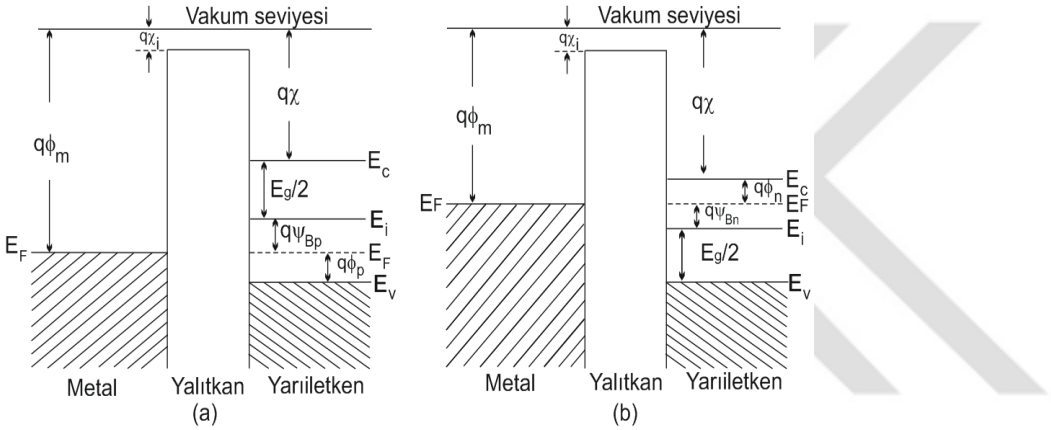


Şekil 2.5. Metal-polimer-yarıiletken (MPS) diyodun enerji bant diyagramı [19]

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

2.5. İdeal MIS/MPS Tipi Schottky Diyotların Yapısı

İdeal bir MIS/MPS tipi Schottky diyot yapının, seri direnç ve ara yüzey durumları ihmal edilecek kadar küçük ve kısa devre direncinin ise MΩ'lar mertebesinde olması gerekir. Bu tür yapılarda diyot sıfır ön-gerilimde iletime geçerken ters yönde hemen hemen hiç akım geçirmez ve idealite faktörü 1'dir. MIS/MPS yapılarda iki ayrı bölgede ara yüzey söz konusudur. Bunlardan biri metal-yalıtkan/polimer ara yüzeyi ve diğeri de yalıtkan/polimer-yarıiletken ara yüzeyidir. d.c. gerilim uygulandığında yalıtkan içinden akım geçmez. İdeal bir MIS tipi Schottky diyot yapının, V=0 durumunda enerji-bant diyagramı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. V=0' da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı. (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken

Sıfır beslem voltajında, metal iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) veya iş fonksiyonu farkı sıfırdır.

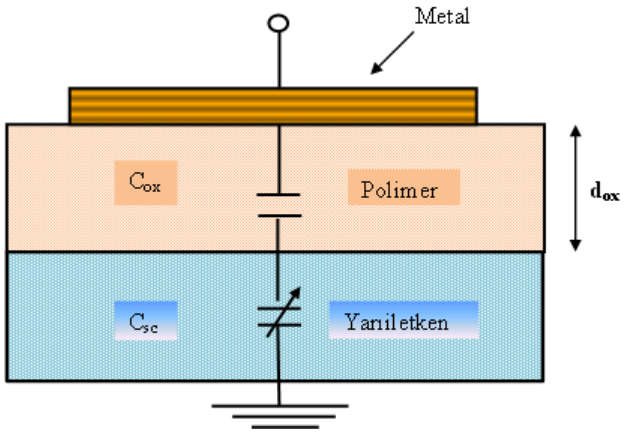
$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi + \frac{E_g}{2q} - \Phi_{Bn}) = 0 \qquad \text{(n-tipi)} \qquad (2.4)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi + \frac{E_g}{2q} + \Phi_{Bp}) = 0 \qquad \text{(p-tipi)} \qquad (2.5)$$

Burada χ yarıiletken elektron yakınlığı, E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve Φ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır. Herhangi bir ön-gerilim altında yarıiletkende ve yalıtkana yakın metal yüzeyinde yükler mevcut olabilir

fakat eşit ve zıt işaretlidir. d.c. ön-gerilim altında yalıtkanın direnci sonsuzdur yani yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur.

MPS kontaklar paralel plakalı kondansatöre benzetilebilir. Çünkü metal ile yarıiletken arasındaki bir yalıtkan/polimer tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans C oluşur. Bu kapasitans MPS kapasitansı olarak adlandırılır. Bir MPS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer elektronik devresi Şekil 2.7'de gösterilmiştir. MPS yapının toplam kapasitansı, yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc}'den oluşur ve C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasının eşdeğeridir [35].



Şekil 2.7. Bir MPS kapasitansının eşdeğer devresi

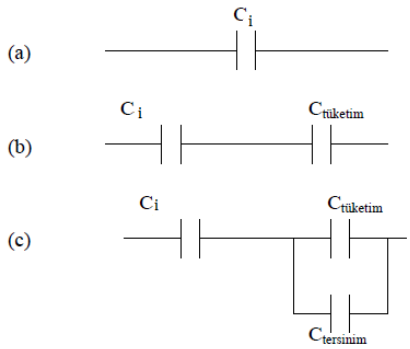
Buna göre Şekil 2.7'deki eşdeğer devrenin toplam kapasitansı aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \tag{2.6}$$

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}} A \tag{2.7}$$

ile verilir. Burada ε_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} ara yüzey tabakanın kalınlığı, A ise doğrultucu kontağın alanıdır [16, 26, 36]. Bunlar uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox}'de uygulanan gerilimle değişmez. Buna göre MPS kapasitansındaki değişimi sadece uzay yükü kapasitansının belirlediğini söyleyebiliriz. Uygulanan gerilime bağlı olarak ideal bir MPS diyotta Şekil 2.8'de görüldüğü gibi üç

eşdeğer devre söz konusudur. Bu sistemler yığılma (accumulation), tüketim (depletion) ve tersinim (inversion) adını alır.



Şekil 2.8. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması (a) yığılma (b) tüketim (c) terslenim

2.5.1. Yığılma

MPS yapısının metal elektroduna negatif bir gerilim $V_G<0$ uygulanırsa holler yarıiletken-yalıtkan ara yüzeyine doğru çekilecektir. Bu ise yarıiletken yüzeyinde hollerin yığılmasına neden olacaktır. Değerlik bandı dolayısıyla Fermi seviyesi de yukarı kayacaktır. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere bantlarda aşağı doğru bükülmeye neden olacaktır. İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına (E_c-E_f) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan elektronların yığılmasına sebep olur. İletkenlik bandının yarıiletken ara yüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı valans bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların ara yüzeyde birikmelerinden dolayı "*yığılma*" adı verilir [26, 36]. Bu durumda ara yüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle yüzey yük kapasitansı sonsuza gider ($C_{sc} \rightarrow \infty$). Dolayısıyla ölçülen kapasitans yalıtkan tabakanın kapasitansı olacaktır ($C \rightarrow C_{ox}$).

2.5.2. Tüketim bölgesi

Metal tabakaya küçük bir pozitif gerilim ($V_G>0$) uygulandığı zaman, yalıtkan içerisinde metale doğru elektrik alan yarıiletken ara yüzeyindeki holleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki boşluk yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki boşluk yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve enerji bantları (E_c *ve* E_v) yukarı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen W_D genişliğinde bir bölgede,

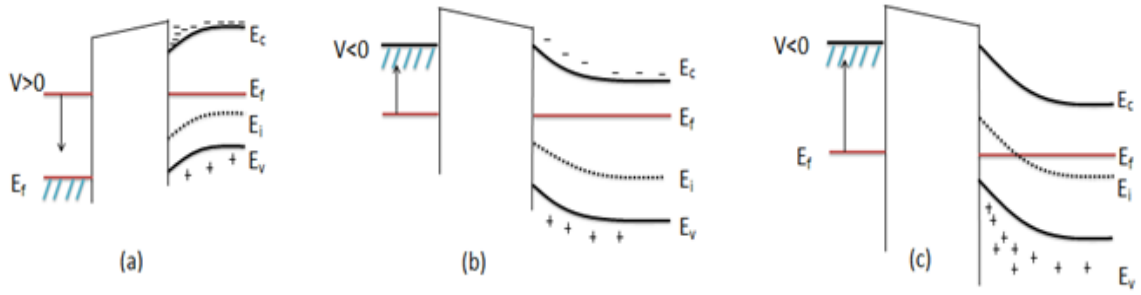
boşlukların azaldığı bir tüketim bölgesi oluşur. Yarıiletken ön yüzeyinde elektronların azalmasından (tükenmesi) dolayı bu bölge "*tüketim bölgesi*" olarak adlandırılır (Şekil 2.9 (b)).

$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} (\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}}) \tag{2.8}$$

Burada ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede MPS kapasitansını, uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler.

2.5.3. Tersinim bölgesi

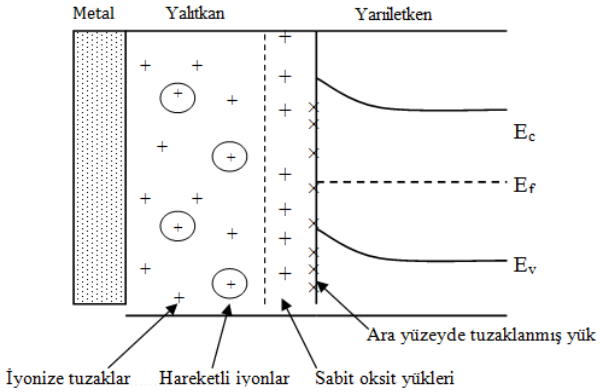
Metal elektrotuna daha büyük bir ön-gerilim ($V_G>>0$) uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru iyice bükülür. Saf durumdaki enerji seviyesi E_i, Fermi enerji seviyesinin altına geçmeye başlar. Yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar. Elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra n-tipi yarıiletken yüzeyi p-tipi yarıiletken gibi davranır. Yani başlangıçta n-tipi yarıiletkenin yüzeyinde elektronlar çoğunlukta iken, bu yüklerin metal tarafına geçmesi ile arkasında pozitif yükler bırakarak yarıiletkenin ön yüzeyinde hollerin çoğunlukta olmaya başladığı bir bölge oluşur. Bu olay, yarıiletken yüzeyindeki yüklerin işaret değiştirmesinden dolayı "tersinim" olarak adlandırılır. Şekil 2.9(c)'de bu durum şematik olarak gösterilmiştir. Tersinim durumunda, MPS kapasitansını elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Küçük frekanslarda elektron yoğunluğu a.c. sinyalini takip edebilir ve kapasitans artan gerilimle C_i değerine ulaşır. Yüksek frekanslarda ise elektron yoğunluğu a.c. sinyalini takip edemez, kapasitans C_{min} değerini alır. İdeal bir durumda yükler yarıiletkende ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde bulunur. İdeal bir MPS/MIS yapı için; yapının yığılma, tüketim ve terslenim durumları sırasıyla Şekil 2.9' da verilmiştir [16, 20, 26, 35, 66].



Şekil 2.9. V≠ 0 durumunda n-tipi yarıiletken için ideal MPS yapının enerji-bant durumu: (a) yığılma (b) tüketim (c) tersinim

2.6. Gerçek MPS/MIS Yapı

İdeal bir yalıtkanda, yalıtkan içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir hareketli yük yoktur. Gerçek bir MIS yapıda ise yalıtkan ve yarıiletken ara yüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Ara yüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığından dolayı MIS yapı ideal durumdan sapacaktır. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan/yarıiletken ara yüzeyindeki ara yüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış çok sayıda yük ve ara yüzey tabakanın oluşturulması yönteme bağlı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve ara yüzey yüklerinin bulunması MIS yapının elektriksel özelliklerini oldukça değiştirerek ideal durumdan sapmasına yol açar [26, 68]. Gerçek bir MIS yapıda birçok ara yüzey durumu ve yükler mevcuttur. Bu arayüzey durumları ve yükler genelde Şekil 2.10'da ki gibi sınıflandırılabilir [26].



Şekil 2.10. İdeal olmayan MIS yapıda ara yüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

İdeallikten sapmanın sebepleri; yalıtkan/yarıiletken ara yüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan ara yüzey durumları, yarıiletken yüzeyinde veya

yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri, yalıtkan içindeki hareketli iyonlar ve numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşabilen iyonize tuzaklardır diyebiliriz.

2.6.1. Ara yüzey durumları

Ara yüzey durumu yalıtkan/yarıiletken ara yüzeyinde girilebilir bir enerji seviyesidir. Ara yüzey durumları, alıcı veya verici tipte olabilirler ve iletim bandı ve valans bandıyla yük alış-verişi yapabilirler. Ara yüzey durumlarında bulunan yükün yoğunluğu Q_{SS}, yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve yalıtkan kalınlığından etkilenmez. Ara yüzey durumları, uzay yükü kapasitesine ek bir kapasite ve direnç etkisi oluştururlar. Ara yüzey durumlarının elektriksel etkileri şu niceliklere ayrılabilir:

Kapasitans: Bir ara yüzey duruma, ara yüzeyde izin verilen başka bir durumun eklenmesiyle meydana gelir. Bu yüzden durum başına temel yükün kapasitansı artar. Bu kapasitans uygulanan gerilimin keskin bir pikidir. Fermi seviyesi ara yüzey durum seviyesini aştığı için pik gerilim için görülür.

İletim: Ara yüzey durumları tarafından taşıyıcıların salınması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi meydana gelir. Bu zaman gecikmesi ara yüzey durumunun bir RC devresine eş değer olduğunu ifade eder. Bu zaman kayması aynı zamanda dolum boşalım zamanıdır ve $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve burada R_{ss} ara yüzey direncidir. Devredeki ara yüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \tag{2.9}$$

Ara yüzey potansiyeli: Yukarıda ifade ettiğimiz kapasite ve iletim ac etkisindedir. Ara yüzey durumları bunlara ek olarak bir dc etkisine sebep olur. Ara yüzey durumlarında depolanmış yük, ara yüzey elektrik alanını değiştirir. Ara yüzey durumları varken ara yüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasitans-voltaj genişlemesini zorunlu hale getirir. Ara yüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına sebep olur.

2.6.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

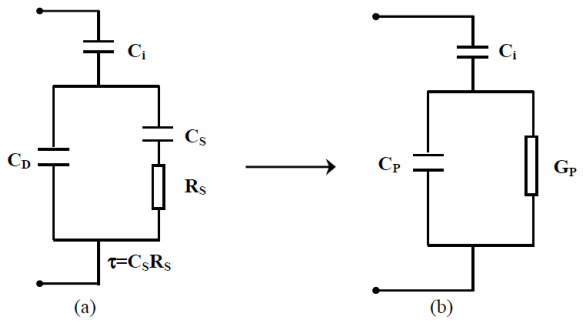
Sabit oksit ve arayüzey yükleri yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Sabit oksit yükleri adından da anlaşılacağı üzere sabittir. Sabit oksit yükleri oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönüne bağlıdır. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuş yükler gibi görülebilir. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için ideal C-V eğrisine göre, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru C-V eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_f$), C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ($-Q_f$) sebep olurlar [35, 69]. Büyük pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar oksit-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Büyük negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal/yalıtkan arayüzeyine çekilir ve C-V eğrisini değiştirmez.

2.6.3. Hareketli iyonlar

Oksit yükünün bir başka türü hareketli iyonik yüktür. Hareketli iyonlar (yükler) bir MIS yapıda ya metal/yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Bu iyonlar genellikle Na+, K+, Li+, H+, H_3O+ gibi iyonlarıdır [70]. Bu yüke çoğunlukla sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur. Hareketli yükler ya metal-oksit ara yüzeyinde ya da yarıiletken-oksit ara yüzeyinde lokalize olmuşlardır. Böyle iyonlar nispeten düşük sıcaklıklarda yalıtkan içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Yapıdaki hareketsiz yükler beslem sıcaklığı ile hareketli iyonlardan ayrılabilir. Yalıtkanda sabitleşmiş yükün yoğunluğu bu işlem esnasında değişebilir. Bununla beraber hareketli iyonik yük, metal/yalıtkan ve yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyi arasında ileri geri gidip gelebilir ve bunun neticesinde iyonik akım gözlenebilir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden yalıtkan içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alan altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

2.7. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi

Gerçek bir MIS yapıda; idealden farklı olarak birçok ara yüzey durumları ve yalıtkan yüklerinin varlığı MIS yapının karakteristiklerinin idealinden farklı olmasına neden olmaktadır. Bir MIS yapıda; hem yarıiletkenin kendisi büyütülürken oluşan örgü kusurları ve safsızlıklar, hem de MIS yapıyı oluşturmak için yarıiletken üzerine herhangi bir yöntemle yalıtkan büyütülürken oluşan örgü kusurları ve ara yüzeydeki safsızlıklar, izinli olmayan yasak enerji aralığında birçok enerji seviyesinin oluşmasına neden olur. Yasak enerji aralığındaki bu izinli seviyelere *ara yüzey durumları* adı verilir [26, 35, 71].
Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletken/polimer arayüzeyinde, yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki enerji durumlarına sahiptir. Bu enerji durumları kısa bir sürede yarıiletkenin iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alış verişi yapabilmektedirler. Bu yüzden bu arayüzey durumlarına *yüzey rekombinasyon (yeniden birleştirme) merkezleri* de denir. Bir beslem altında, valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar arayüzey tuzak seviyeleri yukarı veya aşağı yönlü hareket eder. Bu değişme MIS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur. İdeal durumdan sapma olduğu zaman ön görülen eşdeğer devre de değişir. Arayüzey tuzaklarının etkisi ile değişen durumun eşdeğer devresi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Arayüzey tuzaklar ve seri direnç etkisini içeren eşdeğer devre [69]

Burada C_i ve C_D sırası ile arayüzey tabakanın (yalıtkan veya polimer) kapasitans ve yarıiletken tüketim tabaka kapasitanslarıdır. C_sR_s çarpanı ise arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanır ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını etkiler. Şekil 2.11 (a)'nın paralel kolu, Şekil 2.11 (b)'deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_P ve ona paralel bağlı frekans bağımlı iletkenlik G_P şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_S + \frac{1}{j\omega C_S}} = G_P + j\omega C_P \tag{2.10}$$

şeklindedir. Burada iletkenlik G_P ve kapasitans C_P,

$$G_P = \frac{1}{R_P} = \frac{C_S \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \tag{2.11}$$

$$C_P = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \tag{2.12}$$

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans Z ise,

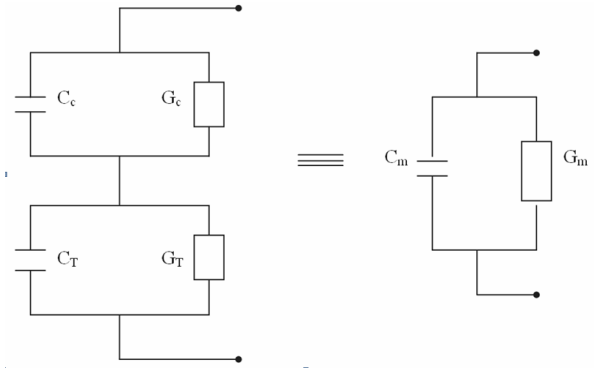
$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_P + j\omega C_P} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_P}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2}\right) + \frac{G_P}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2} \tag{2.13}$$

ve buradan toplam admittans, Y_{top} , Eş. 2.14' deki gibi yeniden düzenlenebilir [26, 72].

$$Y_{top} = \left(\frac{G_P^2 + \omega^2 C_P^2}{G_P}\right) + j\omega\left(\frac{(G_P^2 + \omega^2 C_P^2) C_i}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2 + \omega C_P}\right) = G_{in} + j\omega C_{in} \tag{2.14}$$

Eğer diyot bir seri dirence sahipse, ölçülen iletkenlik G_m ve kapasitans C_m diyotun gerçek değerleri değildir [72]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.12'de ki gibi temsil edilebilir. Böyle bir durumda diyotun gerçek G_m ve C_m değerlerini elde etmek için empedans ifadesi Eş. 2.15' teki gibi ifade edilebilir.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \qquad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \qquad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \tag{2.15}$$



Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi

Şimdi ayarlanmış veya diğer bir adıyla düzeltilmiş (corrected) C_c ve G_c analitik çözümünü yapılabilir. $Z=Z_1+Z_2'$ den $Z_1=Z-Z_2$ olur ve buna göre,

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T}\right)^{-1} \tag{2.16}$$

$$\frac{1}{Z_1} = \left(\frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)}\right) \tag{2.17}$$

Eş. 2.17 denkleminin paydası eşleniği ile çarpılır, $G_T = 1/R_s$ alınır ve C_T değeri ihmal edilirse düzeltilmiş iletkenlik için Eş. 2.18 elde edilir.

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \tag{2.18}$$

Burada seri direnç R_s, Eş. 2.20' deki devrenin empedansı Z'nin reel kısmı olup, yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir [35].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \tag{2.19}$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \tag{2.20}$$

Eş. 2.17'in düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı ise bize Eş. 2.21'deki gibi düzeltilmiş kapasitans değerini verir.

$$C_c = \frac{C_m}{(1-G_m R_s)^2+\omega^2 C_m^2 R_s^2} \tag{2.21}$$

Eş. 2.18 ve Eş. 2.21 denklemlerinde, $G_m-(G_m^2+\omega^2C_m^2)R_s$ ifadesi *a* ile temsil edildiğinde düzeltilmiş C_c ve G_c değerleri sırasıyla Eş. 2.22 ve 23'deki gibi olacaktır [35].

$$C_c = \frac{(G_m^2+\omega^2C_m^2)C_m}{a^2+\omega^2C_m^2} \tag{2.22}$$

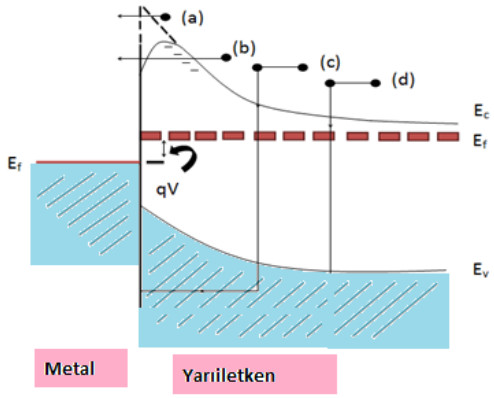
$$G_c = \frac{(G_m^2+\omega^2C_m^2)a}{a^2+\omega^2C_m^2} \tag{2.23}$$

Burada C_m ve G_m *sırasıyla* ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir ve $R_s=0$ olması durumunda $C_c = C_m$ ve $G_c = G_m$ olacağı açıkca görülmektedir.

2.8. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontakların dış gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları tayin edilebilir. Schottky diyotlarda hangi durumda, hangi iletim mekanizmasının oluştuğunu belirlemek için kontağın arayüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerin etkisini dikkate almalıyız. MS ve MIS yapılı kontaklarda başlıca akım-iletim mekanizmaları aşağıdaki gibidir [16, 22, 36];

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme Termiyonik Alan Emisyonu (TAE)
- Alan Emisyonu (AE), Çok katlı tünelleme
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Elektron veya hol enjeksiyonu
- To etkili akım iletimi
- Gaussian dağılımı



Şekil 2.13. MS kontaklarda doğru ön-gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları

Şekil 2.13'de doğru ön-gerilim altında metal/n-tipi yarıiletkende termal iletim mekanizması gösterilmiştir. Burada, (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi (TE), (b) elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi (TAE veya AE) ki bu mekanizma yüksek katkılanmış ($N_d \geq 10^{17}$ cm^{-3}) yarıiletkenler ve düşük sıcaklıklar için bir modeldir, (c) Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme (yüksek katkılı yarıiletkenler ile çoğu omik kontaklar için uygun bir modeldir), (d) doğal bölgede hol enjeksiyonunu ifade eder [73].

2.8.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi

Potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi Schottky kontaklarda termiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Termiyonik emisyon sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların (elektronlar-holler) yayınlanması anlamına gelir [20, 66]. Bu olay metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yeterince (engeli aşmaya yetecek kadar) termal enerji kazanan taşıyıcıların, potansiyel engel üzerinden, metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmeleri olarak bilinir [19]. Bu olay metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektron, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda holler tarafından sağlanır. Termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin kT/q enerjisinden büyük ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarını çok küçük olduğu kabul edilmektedir [20]. Termal enerjileri nedeniyle metal tarafındaki engeli aşan elektronların oluşturduğu akım I_o termiyonik akımıdır. Bethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu TE teorisinin temel varsayımları şunlardır [26] :

- Potansiyel engelinin yüksekliği (Φ_B), kT/q enerjisinden çok büyüktür.
- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin genişliğinden büyüktür.
- Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte, engelin biçimi önemsiz olup akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır.

$J_{s\rightarrow m}$ akım yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle,

$$J_{sm} = \int_{E_F+q\Phi_B}^{\infty} q\vartheta_x dn \tag{2.24}$$

şeklinde yazılabilir. Burada E metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, v_x taşınma yönündeki hızdır.

Kontak yüzeyine dik doğrultuda elektronların x yönündeki hız bileşeni v_x ile gösterilirse, yarıiletken yapıda hızları v_x ile $v_x+\Delta v_x$ arasında olan elektronların yoğunluk ifadesi;

$$dn_x = N_d\left(\frac{m_n^*}{2\pi kT}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{m_n^* v_x^{\,2}}{2kT}\right)^{1/2} dv_x \tag{2.25}$$

eşitliği ile verilir. Burada N_d yarıiletkene katkılanan verici atomların yoğunluğu, m_n^* elektronun etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır. Yarıiletkene bir dış gerilim uygulandığında elektronlar için yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu, hızları $\frac{1}{2}m_n^* v_x^2 > eV_D$ şartını sağlayan elektronların birim zamanda birim yüzeyden geçen sayısının e ile çarpımı;

$$J_{sm} = \int_{v_{0x}}^{\infty} qv_x dn_x = \int_{v_{0x}}^{\infty} qN_d\left(\frac{m_n^*}{2\pi kT}\right)^{1/2} v_x \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right) dv_x$$

$$= qN_d\left(\frac{kT}{2\pi\, m_n^*}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right) = qN_d\left(\frac{kT}{2\pi\, m_n^*}\right)^{1/2}\exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right) \tag{2.26}$$

şeklinde olacaktır. Burada V_D difüzyon potansiyelidir. Metal tarafında yarıiletkenin

iletkenlik bandının kenarına göre görülen potansiyel engel yüksekliği;

$$q\Phi_{Bn} = qV_D + E_F \tag{2.27}$$

dir. Elektronlar için etkin Richardson sabiti *A**,

$$A^* = \frac{4\pi\, q\, m_n^* k^2}{h^3} \tag{2.28}$$

eşitliği ile verilir. Yarıiletkenden metale olan akım yoğunluğu ifadesi için

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \tag{2.29}$$

eşitliği elde edilir. Metal n-tipi yarıiletken Schottky kontağı doğru beslemde iken engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu değeri exp(*eV/kT*) çarpanıyla orantılı olarak artacaktır. Bu yüzden yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu J_{sm}

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \tag{2.30}$$

ifadesine dönüşür. Termal denge durumunda, yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru akım yoğunlukları eşittir ve toplam akım yoğunluğu ifadesi;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right] \tag{2.31}$$

olur. Burada, köşeli parantez önündeki tüm ifade sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyma akım yoğunluğu ifadesidir. Yani doyma akım yoğunluğu ya da diğer adıyla ters doyum akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \tag{2.32}$$

ile verilir [20]. Schottky etkisi uygulanan gerilim ve holler ile elektronlar arasındaki elektrostatik etkileşmeden dolayı engel yüksekliğinde $q(\Delta\Phi_{Bn})$ kadar bir alçalma olur. Bu engel alçalması ise,

$$q(\Delta\Phi_{Bn})=\alpha_o(V_D+V)^{1/4} \tag{2.33}$$

şeklinde yazılır. Dolayısıyla akım yoğunluğu ifadesinde $e\Phi_{Bn}$'nin yerine $(\Phi_{Bn}-\Delta_{Bn})$ yazılırsa;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)\exp\left(\alpha_0(V_D+V)^{1/4}\right) \tag{2.34}$$

eşitliği elde edilir. Görüldüğü gibi doyma akım yoğunluğu gerilime bağlıdır. Burada Φ_{Bn} sıfır beslemde ve Schottky etkisi olmadığı durumdaki engel yüksekliği ve α_0 sabiti ise;

$$\alpha_0 = \left\{\frac{q^4 N_d}{8(\varepsilon_s\varepsilon_0)^3\pi^2}\right\}^{1/4} \tag{2.35}$$

olup buradaki ε_s ve ε_o sırasıyla yarıiletkenin ve boşluğun dielektrik sabitleridir.
Potansiyel engel yüksekliği Eş.2.36'daki gibi elde edilir;

$$\Phi_{Bn} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{A^*T^2}{J_o}\right) \tag{2.36}$$

2.8.2. Difüzyon teorisi

Aralarında yoğunluk gradiyenti bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru olan yük geçişlerine *difüzyon* denir. Potansiyel engelinden taşıyıcıların difüzyonuna dayanan bu teori 1938 yılında Schottky tarafından geliştirilmiştir [13, 20, 26] :

- Potansiyel engel yüksekliği, kT/q enerjisinden çok büyüktür.
- Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma ihtimalleri dahil edilmiştir.

- x = 0 ve x = W deki taşıyıcı konsantrasyonu termal denge değerlerine sahip olup, akımdan etkilenmez.
- Akım difüzyon ve sürüklenme ile sınırlanmıştır.
- Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu homojendir yani katkı atomların yoğunluğu değişmez.

Bu varsayımlardan hareketle tüketim tabakasındaki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım-voltaj karakteristiğini çıkarmak için tüketim (arınma) bölgesinde akım yoğunluğu metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için;

$$J_x = J_n = q\left[n(x)\mu_n E(x) + D_n \partial_n / \partial_x\right] = qD_n\left\{\left[-qn(x)/kT\right]\left[\partial V(x)/\partial x\right] + \partial n/\partial x\right\} \tag{2.37}$$

yazılabilir. Burada D_n elektron difüzyon sabiti, $E(x)$ Schottky bölgesinde elektrik alanı, μ_n taşıyıcı hareketliliği (mobilite) ve $n(x)$ herhangi bir x noktasındaki taşıyıcı yoğunluğudur. Buna göre difüzyon teorisine göre akım yoğunluğu;

$$J = J_{SD}\left[\exp(qV/kT) - 1\right] \tag{2.38}$$

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

$$J_{SD} = (q^2 N_c D_n / kT)\left[q(V_d - V)2N_D/\varepsilon_s\right]^{1/2} \exp(-q\Phi_B/kT) \tag{2.39}$$

şeklinde ifade edilir. Burada Nc iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, ε_s yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Yukarıda bağıntılarda $n(x)$ yerine $p(x)$, D_n yerine D_p, N_c yerine N_v, N_D yerine N_A yazılarak benzer işlemler metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için de geçerlidir.

2.8.3. Tünelleme

Tünelleme, metal-yarıiletken Schottky kontaklarda önemli olan diğer bir akım iletim mekanizmasıdır. Elektronlar engel genişliğinin (deplasyon bölge genişliği) kalın olmadığı durumlarda engelin üzerinden atlamaksızın Schottky engeli boyunca tünellenebilirler [26]. Schottky engeli boyunca olan elektronların tünellenmesi ya yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale doğru (alan emisyonu, AE) elektron tünellemesiyle ya da yüksek

enerjilere uyarılabilecek ve dar üçgen potansiyel boyunca tünellenebilecek olan elektronların termal enerjisi yardımıyla (Termiyonik alan emisyonu, TAE) akıma katkıda bulunur [74]. Alçak sıcaklıklarda, Fermi seviyesine çok yakın elektornlar yarıiletkenden metale doğru tünelleme yapabilir. Buna *Alan Emisyonu (AE)* adı verilir. Alan emisyonu (AE) veya doğrudan tünellemenin oluşumu, yarıiletkenin aşırı oranda katkılandığı durumda Fermi seviyesinin iletkenlik bandı ile çakışması sonucu kuvvetle muhtemeldir (Şekil 2.14). Dolayısıyla burada termiyonik alan emisyonu mekanizması ayrıntılı olarak incelenecektir.

Alan emisyonu ve termiyonik alan emisyon için akım,

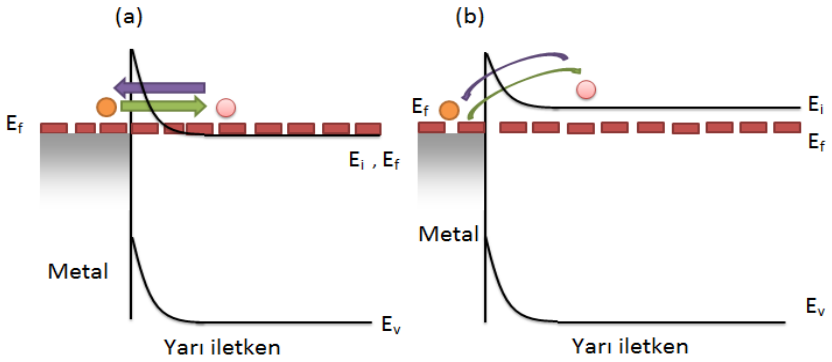
$$I = I_0 \exp(-\frac{qV}{E_0}) \tag{2.40}$$

ile verilir. Bu ifadede

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{qE_{00}}{kT}\right) \tag{2.41}$$

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2}\left(\frac{N_d}{m^* \varepsilon_s}\right)^{1/2} \tag{2.42}$$

dır. Burada E_{00} tünelleme olasılığını temsil eden karakteristik enerji, m^* elektron etkin kütlesi, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, N_d donor konsantrasyonudur. kT/qE_{00} ifadesi termiyonik emisyon ve tünelleme mekanizmaları hakkında önemli bilgiler verir. E_{00}, deplasyon bölgesi kenarında iletkenlik bandının tabanıyla çakışan enerjiye sahip bir elektron için karşı tarafa geçme ihtimaliyetinin 1/e' ye karşılık gelen Schottky engelinin difüzyon potansiyelidir. $kT<<qE_{00}$ ise alan emisyonu (AE), $kT\sim qE_{00}$ ise termiyonik alan emisyon (TAE) ve $kT>>qE_{00}$ ise termiyonik emisyon (TE) mekanizmalarının olması beklenir [26, 31, 36, 74].



Şekil 2.14. a) AE ve b) TAE mekanizmalarının oluşumu [26]

2.8.4. Deplasyon bölgesi jenerasyon-rekombinasyonu

Deplasyon bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon etkileri termiyonik emisyon akım iletim mekanizması bileşenine paralel bir artış verir. Bu etki özellikle orta sıcaklık bölgesinde önemli bir mekanizmadır [26]. Yu ve arkadaşları uzay yükü bölgesindeki rekombinasyonun önemini ayrıntılı olarak açıklamıştır [75]. Rekombinasyon olayı genel anlamda lokal durumlar sonucunda ortaya çıkar. Shockley-Read ve Hall teorilerine göre, band aralığının ortasına yakın enerjilere sahip merkezler, en etkin olan rekombinasyon merkezleridir. Schottky diyotlarda rekombinasyonun olduğu durumlardaki akım iletim mekanizması pn eklem diyotun akım iletim mekanizmasına benzemektedir. Düz beslemdeki küçük gerilim bölgesinde baskın olan rekombinasyon akım yoğunluğunun yaklaşık olarak;

$$J_r = J_{r0}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\left[1\text{-}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] \tag{2.43}$$

ile verilebileceğini açıklanmıştır [76]. $J_{r0}= qn_iw/2\tau_r$ olup buradaki n_i, asal elektron konsantrasyonudur ve n_i α $-qE_g/2kT$ şeklinde bir orantı vardır. Ayrıca burada w, deplasyon bölgesinin genişliği, τ_r elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zamandır. Homojen dağılıma sahip merkezlerden dolayı, elektron ve holler için yakalama tesir kesitleri eşit olur.

Rekombinasyon akımının termoiyonik emisyon akımına oranı,

$$T^2\tau_r\exp\left[q\left(\frac{E_g+V-2\Phi_B}{2kT}\right)\right] \tag{2.44}$$

ile verilmektedir. Bu oran τ_r, V ve E_g ile artarken, Φ_B ile azalmaktadır. Düz beslemdeki rekombinasyon akımının sıcaklıkla ters orantılı değişimi yüksek ve düşük sıcaklıklarda iki farklı eğimi olan bir doğru verir. Bu bölgelerde, düşük sıcaklıklarda aktivasyon enerjisi (E_g-V)/2 değerine ve yüksek sıcaklıklarda ise Φ_B-V değerine yaklaşık olarak eşittir. Bu durumlar dikkate alındığında Schottky diyotlarda ideal durumdan sapmaların bir nedeni de rekombinasyon akımıdır. İdeal durumdan sapmalar özellikle düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğu için düşük sıcaklıklardaki ölçülerin de dikkate alınması gerekir.

Şayet tünelleme ve imaj kuvvet azalması düşük bir donor konsantrasyonu ile önemli derecede azaltılırsa, deplasyon bölgesinde elektron-hol çiftlerinin oluşmasından dolayı fark edilebilir derecede bir ters akım oluşabilir. Bu işlem rekombinasyonun tersi bir işlem olup, jenerasyon mekanizmasıyla oluşan akım (J_g), $J_g=qn_iw/2r\tau$ ile verilir. Deplasyon bölgesinin genişliği V_d+V ile orantılı olduğu için, akım yoğunluğu ters uygulama gerilimi ile artar. Jenerasyon akımı yüksek engel yüksekliği durumlarında ve kısa ömürlerin söz konusu olduğu yarıiletkenlerde çok önemlidir. Özellikle yüksek sıcaklıklardan ziyade düşük sıcaklılarda çok önemlidir. Çünkü, termoiyonik emisyon bileşeninden daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptir. Deplasyon bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon etkileri, termoiyonik emisyon akım taşınma mekanizması bileşenine paralel bir artış verir. Özellikle orta dereceli sıcaklıklarda bu durum önemli bir mekanizmadır [26].

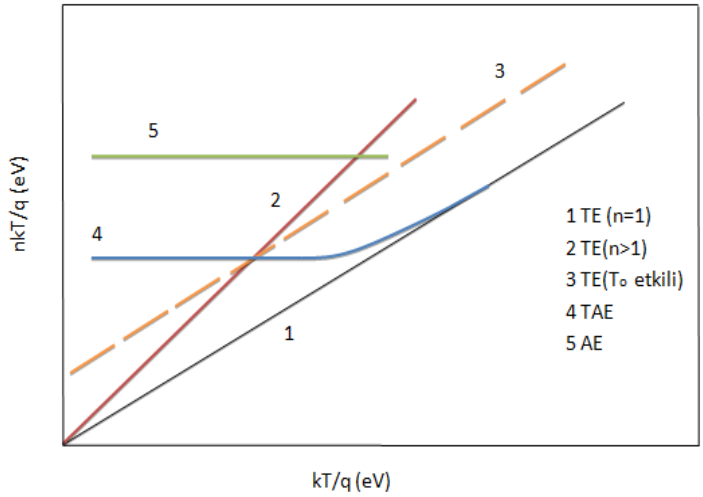
2.8.5. T_o etkili akım iletimi

İdealite faktörünün birden büyük olması hayali kuvvet ya da arayüzey durumlarından ortaya çıkıyorsa n sıcaklıktan bağımsız olmalıdır. Fakat n'nin birden büyük olması eğer termoiyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa, idealite faktörü n sıcaklığa bağlıdır. Schottky diyotların çoğunluğunda n sıcaklığa bağlıdır. T_o etkili J-V karakteristiği,

$$J = A^{**} \cdot T^2 exp\left[-\frac{q\phi_B}{k(T+T_0)}\right] \cdot \left\{\exp\left[\frac{qV}{k(T+T_0)}\right] - 1\right\} \tag{2.45}$$

şeklinde ifade edilir [16, 20, 26, 31, 66]. Burada T_o geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve voltajdan bağımsız olan sabit bir parametredir. n'nin sıcaklığa bağlılığı deneysel olarak $n=1+T_o/T$ olarak ifade edilir. Voltajın fonksiyonu olarak değişik akım-iletim mekanizmaları Şekil 2.15'de görüldüğü gibi olabilir 1,2,3 eğrileri, TE teorisinin baskın

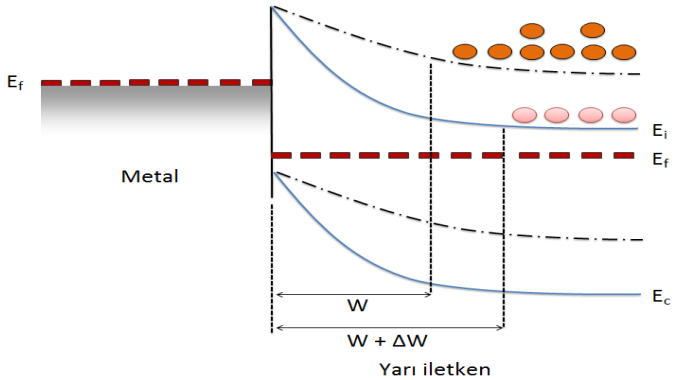
olduğu mekanizmaları belirtir. Bunlar n= 1, n > 1 ve T_o etkili durumlarına karşılık gelir. 4 eğrisi TAE ve 5 eğrisi AE iletim mekanizmalarının etkin olduğu durumları gösterir [16].



Şekil 2.15 Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren nkT/q-kT/q grafiği

2.9. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Schottky Kapasitansı

Metal-yarıiletken kontaklarda tüketim bölgesi, yarıiletken tarafındaki uzay yükleri (iyonize olmuş donorlar) ve metal tarafındaki yüzey yüklerinden (negatif) dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslemde gerilim artarsa tüketim bölgesinin genişliği $W+\Delta W$ kadar artar (Şekil 2.16). Deplasyon bölgesindeki yük değişir ve sığa değişimine sebep olur [20, 66]. Bu sebepten dolayı bu diyotlar kapasitör olarak kullanılırlar. Yarıiletkende, metale yakın önemli bir hol yoğunluğu mevcutsa, yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesi ile çakışacağından hol yoğunluğu düşecektir.



Şekil 2.16. Bir metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotun belli bir gerilim altındaki enerji-bant diyagramı

Kapasitans-gerilim (*C-V*) ölçümleri genellikle bir d.c. sinyal üzerine küçük genlikli bir a.c. sinyal bindirilerek gerçekleştirilir. Bu deneysel şartlar altında, süreklilik ve Gauss denklemleri çözülerek ters beslem geriliminin fonksiyonu olarak birim alan başına Schottky kapasitansı ile verilir [20, 26, 36].

$$C = \left[\frac{q\varepsilon_s N_d}{2(V_{b0}+V)}\right]^{1/2} \tag{2.46}$$

Eğer $1/C^2$ beslem voltajının bir fonksiyonu olarak ölçülürse ve doping konsantrasyonu homojense, $1/C^2$ beslem voltajına lineer olarak bağlıdır. Katkılama konsantrasyonu $1/C^2$ grafiğinin eğiminden,

$$N_D = \frac{2}{q\varepsilon_s}\left[\frac{d}{dV}\left(\frac{1}{C^2}\right)\right]^{-1} \tag{2.47}$$

olarak ve built-in voltajı V_{bi}, $1/C^2$ grafiğinin V=0'a ektrapolasyonu ile bulunur. Buradan Schottky engel yüksekliği;

$$\Phi_{Bn} = V_{bi} + V_n + \frac{kT}{q} - \Delta\Phi \tag{2.48}$$

olarak hesaplanabilir. Burada ΔΦ düz-bant ve sıfır-beslem durumları arasındaki imaj kuvvet etkisinden dolayı engel düşmesidir. Katkılamanın, homojen olmayan katkılama derinlik profilinin C-V spektroskopisiyle belirlenebildiğini dikkate alabiliz. $1/C^2$ ye karşı beslem grafiğinin eğrisi artık düz bir eğri olmaz ve değişen bir eğim sergiler. Verilen bir beslem voltajında, uzay yükü bölgesinin sınırında yük (iyonize olmuş donor ve akseptörler) kapasitans ölçümleriyle test edilir. Ancak, bu prensip yalnızca uzay yükü bölgesinin derinliğinin beslem voltajıyla değişmesiyle çalışır. Yöntem, bu yüzden δ-katkılanmış tabakalar veya kuantum kuyuları gibi sistemlere direkt olarak uygulanamaz.

2.10. Schottky Diyotların İdeal Durumdan Sapma Nedenleri

İmaj-kuvvet (Schottky) etkisi: İdeal bir Schottky diyot için engel yüksekliği ifadesi;

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \tag{2.49}$$

ile verilmektedir. Fakat bazı etkiler teorik olarak verilen bu gerçek Schottky engel yüksekliği ifadesini değiştirebilir. Bu etkilerden ilki; Schottky etkisi veya imaj kuvvet etkisinden dolayı engel yüksekliğinin azalmasıdır.

Bir elektron metale belli bir uzaklıktan yaklaşırken metal yüzeyine dik bir elektrik alan oluşturur. Elektrik alan çizgileri metalin yüzeyinden iç kısma doğru x kadarlık bir mesafede yerleşmiş bir +q imaj yükününki ile aynı olacaktır. Bu imaj etkisi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Metalden ayrılan elektron ile metalde oluşan imaj yükünün Coulomb etkileşmesi,

$$F = \frac{-q^2}{4\pi\varepsilon_s(2x)^2} = -qE \tag{2.50}$$

ifadesi ile verilir [36]. Potansiyel ifadesi ise,

$$-\Phi(x) = +\int_x^{\infty} E dx = +\int_x^{\infty} \frac{q}{4\pi\varepsilon_s 4(x)^2} dx = \frac{-q}{16\pi\varepsilon_s x} \tag{2.51}$$

ile verilir. Burada *x* integral değişkeni olup, *x* =∞ için potansiyel sıfır olarak kabul edilmektedir. Elektronun potansiyel enerjisinin *–qΦ(x)* değişimi başka elektrik alanın olmadığı kabul edilerek Şekil 2.17'de gösterilmektedir.

Metal/yarıiletken ara yüzeyindeki toplam potansiyele, bu imaj potansiyeli de katkıda bulunacağından toplam potansiyel ifadesi yeniden şu şekilde düzenlenir.

$$-\Phi(x) = \frac{-q}{16\pi\varepsilon_s x} - E.x \tag{2.52}$$

Sabit bir elektrik alanın varlığında elektronun potansiyel enerji değişimi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi potansiyel engelin maksimum değeri azalmaktadır. Potansiyel engelin bu şekilde azalması imaj-kuvvet etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir.

Toplam potansiyelin türevi, değerinin maksimum olduğu noktada sıfır olacağından,

$$\frac{d(q\Phi(x))}{dx} = 0 \tag{2.53}$$

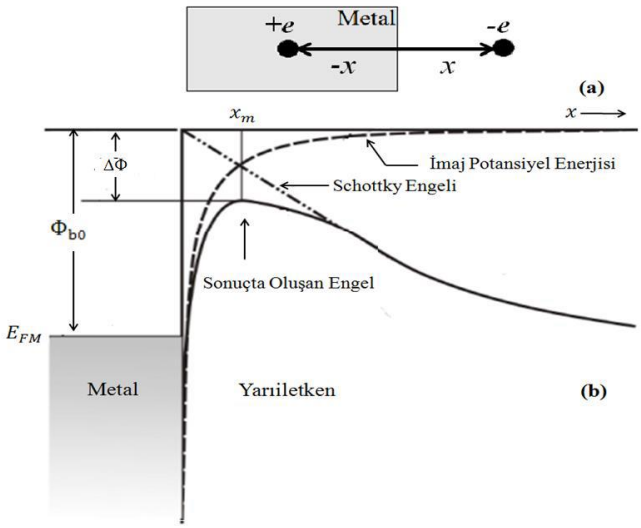
yani potansiyel engelinin maksimum olduğu konum,

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\varepsilon_s E}} \tag{2.54}$$

olur ve imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması,

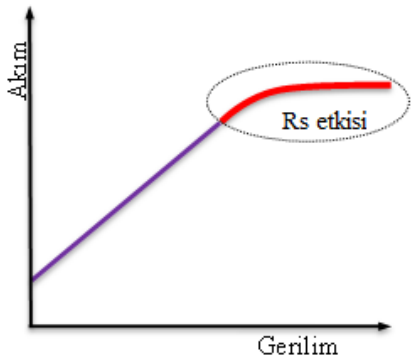
$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\varepsilon_s}} \tag{2.55}$$

ile verilir [20].



Şekil 2.17. Sabit bir elektrik alanda imaj kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme (a) İmaj yükü (b) Schottky engelinin imaj yükü alçalması [20]

Seri direnç etkisi: Schottky diyotlarda kontak oluştuktan sonra yarıiletken tarafında oluşan deplasyon (tüketim) bölgesi dışında kalan bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği bir dirence seri direnç denir ve R_s ifadesi ile gösterilir. Uygulanan gerilimin düşük değerlerinde etkisi çok fazla görülmezken yüksek değerlerinde yoğun şekilde görülür ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 2.18, bir Schottky diyota yüksek gerilim uygulandığı zaman seri direncin akımda doyum etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir [26].



Şekil 2.18. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

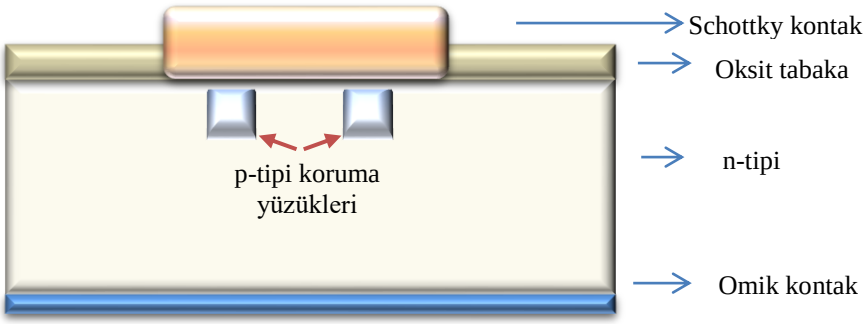
Schottky diyotlarda seri direnç etkisinden dolayı diyot akımında düşme meydana gelir, bu yüzden diyot üzerindeki net akım;

$$I = I_s \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \tag{2.56}$$

şeklinde ifade edilebilir.

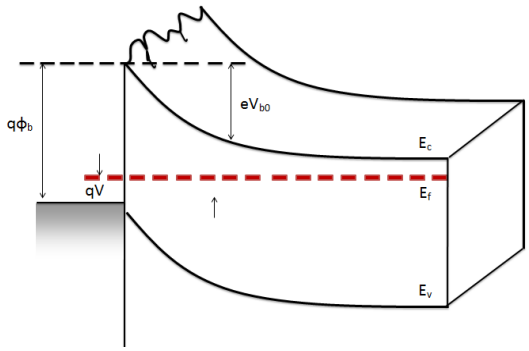
Tünelleme etkisi: Aşırı katkılanmış yarıiletkenlerden yapılan Schottky kontaklarda, düşük sıcaklıklarda baskın durumda olan bir mekanizmadır. Bu mekanizmada yük taşıyıcıları, normal olarak engel üzerinden geçmeyip engeli kuantum mekaniksel tünelleyerek geçerler. Bu mekanizma diyotun elektriksel karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına yol açar [26].

Kenar etkileri: Metal/yarıiletken arasında elektrik alan çizgilerinin ekleme dik olduğu önceki bölümlerde varsayılmıştır. Ancak Schottky kontaklar, genelde geniş bir yarıiletken yüzeyine küçük bir metal nokta yapılarak oluşturulmaktadır. Metal noktanın kenarındaki elektrik alanın değerinin, merkezindeki alandan daha küçük olduğu görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda, Schottky kontakların ters beslem akım değerlerinin teorik değerlerden daha büyük olduğu görüldü. Bu durumun kenar sızıntı akımı ile açıklanabileceği ortaya konuldu. Kenar etkisini yok etmek için metal yarıiletken diyotlar guard (koruma yüzüğü) yapılır. Koruma yüzüğü *n*-tipi bir yarıiletken için *p*-tipi bölgeler oluşturularak yapılır (Şekil 2.19) [26].



Şekil 2.19. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi

Yüzey kusurları: Schottky kontaklarda *I-V* ve *C-V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır. Metal-yarıiletken arayüzeyinin düzgün olmaması, Şekil 2.20'de gösterilen V_i (built-in voltajı) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimleri homojen olmayan bir dağılıma neden olacaktır [34]. Yarıiletken yüzeyinin yapısı, metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tanecik sınırlarının yanı sıra metalin kalınlığının değişimi arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Bu potansiyel değişimlerin bir başka nedeni de alan emisyonundan dolayı yerel engel yüksekliğinin azalması olabilir. Ayrıca arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de bu yerel değişimler ortaya çıkabilir. Bunun yanı sıra yarıiletkendeki donor atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde bu atomlar arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerin bir başka nedeni olabilir [34]. Potansiyel değişim modeli, homojen olmayan Schottky kontaklar için daha önce yapılan çalışmalardan farklıdır [34]. Farklı engel yüksekliğine sahip olan homojen ve homojen olmayan Schottky diyotlar üzerinde farklı çalışmalar yapılmıştır. Ohdomari ve Tuy, farklı diyotların özelliklerini inceleyerek, düşük engelli NiSi/Si ve yüksek engelli PtSi/Si Schottky kontaklara karşılık gelen toplam d.c. akımın, düşük engelli ve yüksek engelli akımlarının toplanması ile modifiye edilebileceğini açıklamışlardır. Buna göre, Schottky engellerinin yüzey boyunca değiştiği ve bir dağılım gösterdiği, dolayısıyla büyük ve küçük potansiyel engellerinin bir çesit bileşkesi olduğunu belirtmişlerdir. *I-V* eğrileri içinde benzer çalışma yapılmıştır. Ohdomari ve Tuy'un modeli, *I-V* ölçümlerinden daha yüksek olan C-V ölçümlerindeki engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla azalmasını açıklar [78]. DC akımı düşük engelli diyotların alanına kuvvetlice bağlıdır. Buna rağmen, bütün bu modellerin düşük ve yüksek engel bölgelerindeki durumu farklıdır. Yani Schottky engellerin düzensiz olarak değiştiği kabul edilerek birbirinden ayrılmış yüksek ve düşük engellerin yüzey yükü bölgelerinin genişlikleri de farklıdır.



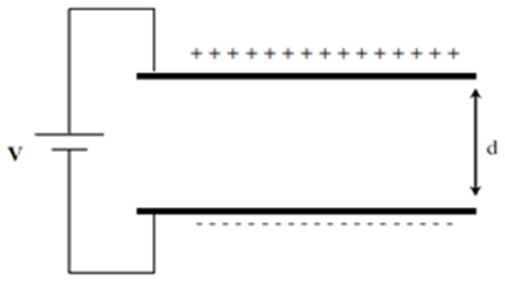
Şekil 2.20. Homojen engel yüksekliğine sahip olmayan bir Schottky kontağın *V* gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı

2.11. Dielektrik Özellikler

Dış elektrik alana maruz kaldığında yük veya enerji depolama yeteneğine sahip maddelere *dielektrik madde* denir. Bir dış elektrik alanın etkisi altında kutuplanabilme, dielektriklerin en önemli özelliğidir. Bu kutuplanma durumu, malzeme içindeki sabit yüklerin elektrik alanı sebebiyle düzenlenmesinden kaynaklanır. Dielektrik, bu olay sonucu bir elektriksel dipol moment kazanmış olur [78]. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğu maddelerde bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlıdır. Bu noktadan hareketle bir dielektriğin kutuplanması incelenebilir.

2.11.1. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Yüzey alanı A ve aralarındaki uzaklık d olan iki paralel plakalı bir kondansatör şekil 2.21'de verilmiştir.



Şekil 2.21. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Plakaların biri +Q diğeri ise -Q yüklü olduğunda bu iki plaka arasına bir yalıtkan madde (dielektrik madde) konulursa, yüklerin bir plakadan diğerine geçişi sınırlanmış olur. Ama bu plakalar bir üretece bağlanırsa kondansatör kolayca yüklenebilir. Bu durumda plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E = \sigma/\varepsilon_0 \tag{2.57}$$

şeklinde verilir. Burada, ε_0 boşluğun geçirgenlik sabiti iken, □ ise her bir plaka üzerinde birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğudur. Aralarında d uzaklığı bulunan plakalar arasında oluşan potansiyel farkı,

$$V = E.d \tag{2.58}$$

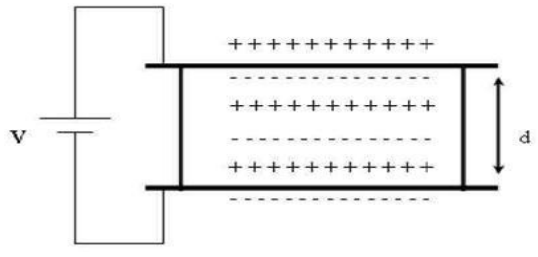
ile ifade edilir. Buna göre her plakanın sahip olduğu toplam yük Q olmak üzere paralel plakalı kondansatörün kapasitesi,

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.59}$$

olarak elde edilir.

2.11.2. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Bir yalıtkan (dielektrik) madde Şekil 2.22'deki gibi kondansatörün plakaları arasına yerleştirilirse, kondansatörün kapasitesi birimsiz ε' çarpanı kadar artar. ε' çarpanına yalıtkanın *dielektrik sabiti* adı verilir. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti (ε_0) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır.



Şekil 2.22. Dielektrikli Kondansatör

Plakalar arasında dielektrik madde yokken paralel plakalı kondansatörün sığası C_0, kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 ve elektrik alanı E_0 ise uygulanan gerilim;

$$V=V_o/\varepsilon' \tag{2.61}$$

ile ifade edilir. Plakalar arasına bir dielektrik madde yerleştirilirse potansiyel farkı ve elektrik alan $1/\varepsilon'$ çarpanı kadar azalır. Yani,

$$E=E_o/\varepsilon' \tag{2.62}$$

olur. Kondansatör üzerindeki Q yükü değişmediğinden, kapasitansın değeri ise ε' çarpanı kadar artmaktadır, yani,

$$C=Q_o/V= \varepsilon'Q_o/ V_o= \varepsilon'C_o \tag{2.63}$$

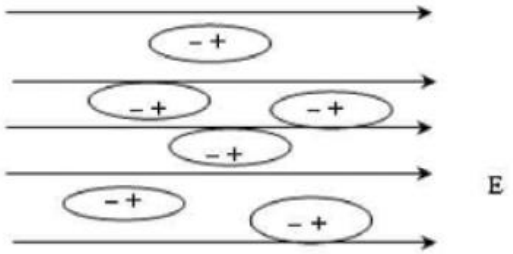
olur. O halde plakalar arasındaki bölge tam olarak dielektrik madde ile dolduğu zaman paralel plakalı kondansatörün kapasitansı aşağıdaki hali alır.

$$C=\varepsilon'\varepsilon_o A/d \tag{2.64}$$

2.11.3. Dielektrik kutuplanma

Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik (yalıtkan) yerleştirildiği zaman potansiyel, dolayısıyla elektrik alan şiddeti (E=V/d) azalır. Elektrik alan şiddetinin ($E=\sigma/\varepsilon_0$) azalmasıyla da birim yüzeydeki net yük azalmış olur. Elektrik alan içine bir iletken yerleştirildiğinde, serbest yükler alanın etkisiyle yer değiştirir. Fakat elektrostatik denge meydana geldiğinde yüklerin elektrik alanı bütün noktalarda dış alanı ortadan kaldırır ve dolayısıyla iletken içinde elektrik alan sıfır olur. Bazı dielektriklerin molekülleri dipol içerirler. Polar denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yükler birbirinden çok az miktarda ayrılırlar. N_2O ve H_2O gibi moleküller polarken, H_2, N_2, O_2 gibi simetrik moleküller polar değildir. Bir dielektrik madde elektrik alan içine yerleştirildiğinde, madde kutuplanır. Böylece dipolar hale geçen molekülün dipol momentleri Şekil 2.23'deki gibi

elektrik alana paralel olacak şekilde yönelirler [78]. Elektrik alan kaldırıldığı zaman atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur.



Şekil 2.23. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri

2.11.4. Kutuplanma mekanizmaları

Elektronik, iyonik, yönelme ve arayüzey-uzay yük kutuplanmaları olmak üzere dielektrik maddelerde dört tip kutuplanma meydana gelmektedir [79, 80].

Elektronik kutuplanma

Elektrik alanın etkisiyle atom ve iyonlarda ortaya çıkan ve hemen hemen bütün dielektriklerde gözlenen kutuplanmadır. Bir atomdaki elektronların oluşturduğu negatif yük dağılımının çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kaymasıdır. Bu kutuplanma elektronun kütlesinin çok küçük olmasından dolayı uygulanan dış elektrik alanla kısa bir zaman içinde oluşur (10^{-15} sn).

İyonik kutuplanma

Elektronik boyutta yer değiştirmenin sonucu olarak ortaya çıkan elektronik kutuplanmanın aksine iyonik kutuplanma çok atomlu bir molekülün bir dış elektrik alanı altında molekülü oluşturan atom merkezlerinin göreceli olarak birbirlerine göre çok küçük miktarlarda yer değiştirmesi neticesinde meydana gelir [81]. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir etkileşmeli dipol moment meydana gelecektir. Bu dielektriğin iyonik kutuplanmasıdır. Elektronik kutuplanmaya göre süre olarak uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma içinde oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13}-10^{-12} sn).

Yönelme kutuplanması

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik dipol momentleri içeren, polar maddeler diye adlandırılan dielektriklerde oluşur. Bazı dielektriklerde kuardropol (dört kutuplu), oktupol (sekiz kutuplu) vb. çok kutuplular da bulunabilir. Fakat bunların kutuplanmaya katkısı oldukça azdır. Böyle elektrik dipol momentlerine (çift-kutuplara) bir dış elektrik alan etki ederse alan yönünde yönelime zorlayacak ve sonuçta yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır. Yönelim kutuplanmasında sıcaklık etkileri de göz önüne alınmalıdır. Yönelim kutuplanmasında dipol momentli moleküllerin, elektrik alan uygulanmadan önceki durumuna yeniden geçmesi için moleküllerin büyüklükleri ve ortamın viskozları ile doğru orantılı olan bir zamana ihtiyaç vardır.

Arayüzey-uzay yük kutuplanması

Elektronik, iyonik ve yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, malzemenin yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelim etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Bunların aksine uzay yükü veya arayüzey kutuplanması ise hareketli yüklerden oluşur. Diğerlerinde atom ve moleküller; kendilerini, çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde ise uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Büyük ölçüde elektrik alan değişikliklerin, malzemenin hacmindeki uzay yüklerinin veya dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikmesine sebep olması arayüzey kutuplanmasını oluşturmaktadır.

2.11.5. Dielektrik sabiti ölçme yöntemi

Dielektriklerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülür. Bu nedenle bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile eşleştirilir. Dielektrik madde ile doldurulmuş bir paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans spektroskopisi ile karakterize edilebilir. Admittans Y ile gösterilir. Buna göre

$$Y = G + jwC \tag{2.65}$$

ile ifade edilir. G iletkenlik, ω açısal frekans, C ise toplam kapasitedir. Bu ifade,

$$Y = G + jw\left(C_0 \varepsilon^*\right) \tag{2.66}$$

şeklinde yazılabilir. C_0 kondansatörün dielektrik madde yok iken sahip olduğu kapasite, □* ise dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik sabitidir.
Bağıl dielektrik sabiti,

$$\varepsilon^* = \varepsilon^{'} - j\varepsilon^{''} \tag{2.67}$$

olarak ifade edilmektedir. Böylece admittansın son hali,

$$Y = G + j\omega C_0\left(\varepsilon^{'} - j\varepsilon^{''}\right)$$

$$Y = \left(G + \omega\varepsilon^{''} C_0\right) + j\omega C_0 \varepsilon^{'} \tag{2.68}$$

olur [79, 82]. Buna göre admittansın gerçel ve imajiner bileşenleri elde edilmiş olur. Empedans ise admittansın tersine eşittir. Yani, Z=1/Y olur. Buna göre,

$$Z = \frac{1}{G + j\omega C} = \frac{1}{G + j\omega C_0 \varepsilon^*} \tag{2.69}$$

ifade edilir. denklem (2.67), denklem (2.69)'da yerine yazılırsa gerçel ve imajiner kısımların çözümleri;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_o} \qquad \text{ve} \qquad \varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_o} = \frac{1}{\omega R C_0} \tag{2.70}$$

olarak elde edilir [83].

Bir dielektrik maddeye ac gerilim ($V=V_0 \cos\omega t$) uygulandığında, numuneden geçen akım,

$$I = \left(\varepsilon^* C_o\right)\frac{dV}{dt} \tag{2.71}$$

olarak ifade edilir.

Bir RC devresi ile eşleştirilen bir numuneden geçen akım ise,

$$I = I_R + jI_C \tag{2.72}$$

olarak ifade edilir.

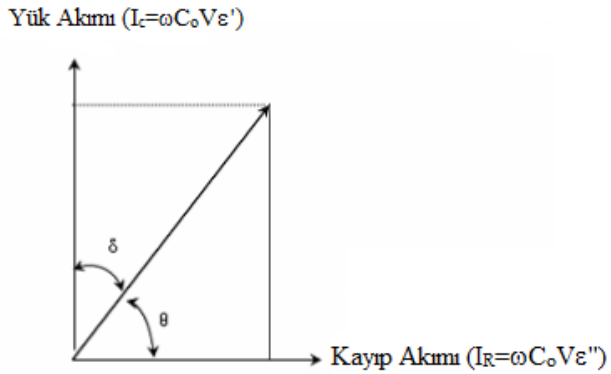
I_R; gerilim ile aynı fazda olan, gerçel ya da dirençsel bileşen olarak adlandırılır. I_C; gerilim ile farklı fazda olan, imajiner ya da sığasal bileşen olarak adlandırılır.
Plakalar arasındaki elektrik alan şiddeti E=V/d (V/m) ve akım yoğunluğu J=I/A (A/m) olduğundan, toplam akım yoğunluğu,

$$J = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt}(E\varepsilon' - iE\varepsilon'') = (i\omega\varepsilon' + \omega\varepsilon'')E \tag{2.73}$$

elde edilir. Böylece öziletkenlik, J/E oranından;

$$\sigma = \frac{J}{E} = i\omega\varepsilon' + \omega\varepsilon'' \tag{2.74}$$

olarak elde edilir.



Şekil 2.24. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_C) ile kayıp akımı (I_R) arasındaki ilişki

Şekil 2.24'de görülen δ terimi, numune üzerindeki ac gerilim etkisi nedeniyle, dielektrik bir maddenin davranışında ifade edilmiş olan periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yer değiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. Tanδ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin kayıp miktarı biçiminde dielektrik tanjant ya da kayıp açı olarak ifade edilir. Kayıp tanjantı, ölçüm esnasında, akımın dirençsel bileşeninin sığasal bileşene oranı olarak elde edilir. Buna göre,

$$\tan\delta = \left|\frac{I_R}{I_C}\right| = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \tag{2.75}$$

kayıp açı faktörünü ifade eder [79, 82, 84].

3. İLETKEN POLİMERLER

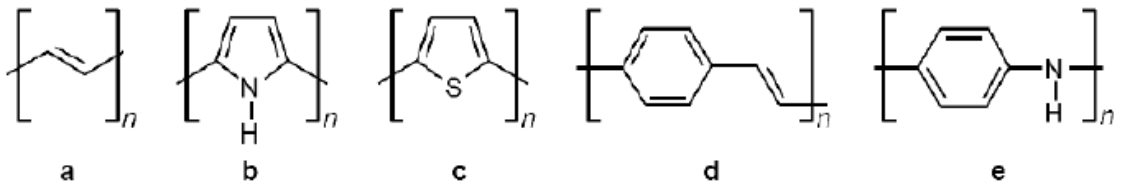
Latincede çok anlamına gelen “polus” ve parça anlamına gelen “meros” kelimelerinden türetilen “Poli” kelimesi, “çok parça” anlamına gelir. Polimerler, aynı yapıda olan çok sayıdaki yüksek moleküllü bileşiklerin (monomerlerin) bir araya gelmesi ve kendi aralarında kovalent bağlarla bağlanması sonucu oluşan organik yapılardır. Polimerler kristal ve amorf yapıya sahiptirler ve kimyasal, fiziksel, elektrik ve optik özelliklerinden dolayı araştırmalarda çok sık kullanılmaktadır. Polimerler metallerle kıyaslandığında, genellikle metallerden daha hafif ve ucuz olduğu, kolay şekil alabildiği fakat iletken olmadıkları göze çarpmaktadır. Metallerin ise zor işlenebilen, ağır ve pahalı olmalarının aksine iletkenlikleri yüksek maddeler olduğu bilinmektedir. Polimerler ile metallerin üstün özellikleri bir araya getirilerek iletkenlik özelliği taşıyan polimerlerin elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu amaçla hazırlanan polimerler, *iletken polimerler* olarak isimlendirilmiştir [85].

Bu amaçla yapılan ilk çalışmalar polimerlerin uygun iletken maddelerle karışımlarının hazırlanmasına yöneliktir. Denenen yollardan birisi polimerlere metal tozları gibi parçacıkların katılması ve iletkenliğin polimer örgüsüne sokulan metal faz üzerinden sağlanması olmuştur [86]. Polimer içerisinde uygun bir tuz çözüp iyonik iletkenlikten yararlanmak bir başka yaklaşımdır. Bahsedilen iki yaklaşımda da polimerin kendisi yalıtkanlık özelliğini korur ve yalnız iletkenliği sağlayan diğer bir bileşen için taşıyıcı faz işlevi yapar. Bir polimerin kendisinin doğrudan elektriği elektronlar üzerinden iletebileceği ilk kez poliasetilen üzerine yapılan çalışmalarla anlaşılmıştır [86].

İletken polimerler, Mc Diarmid, Shirakiwa, Heeger ve çalışma arkadaşlarının, iyot katkılanmış poliasetilenin iletkenliğinin arttığını gözlemelerinden sonra, çok büyük ilgi görmüş ve birçok uygulama alanında önemli yer bulmuştur [45, 87]. Heeger ve arkadaşları bu buluşlarından dolayı 2000 yılında Nobel (Kimya) ödülüne layık görülmüşlerdir [46].

Poliasetilen, Shirakawa ve arkadaşları tarafından 1974 te, Ziegler Natta (K. Ziegler ve G. Nata; Nobel 1966 kimya ödülü) katalizini kullanarak sentezlenmiştir. Asetilen daha gümüş renkli, parlak görünümlü bir film hazırlanana kadar siyah bir toz olarak bilinirdi. Bununla birlikte, 1977 de, Shirakawa, MacDiarmid ve Heeger klor (chlorine) brom (bromine) veya

iyot (iodine) buharı ile yükseltgenme (oxidation) yaptırdıkları polimer filmlerinin, orijinal hallerinden, 109 kez daha iletken olduklarını buldular [45]. Polimerlerin halojenlerle muamelesi yarıiletkenlerdekine benzer biçimde "katkılama" (doping) olarak isimlendirilmiştir. Poliasetilenin "katkılı" hali metre başına 105 siemenslik bir iletkenliğe sahiptir. Bu da daha önce bilinen polimerlerinkinden epeyce yüksek bir değerdir. Bir kıyaslama yaparsak yalıtkan karakterli teflonun iletkenliği 10^{-18} S/cm den çok iken gümüş, bakır gibi metallerinin iletkenliği 10^{6} S/cm'dir. İşlenebilirliğinin zayıf olması ve iletkenliğinin açık hava koşullarında çok hızlı azalması poliasetilenin uygulama alanlarında sınırlamalara neden olmuştur. Bu yüzden, çevresel kararlılığı daha iyi ve hem kimyasal hem de elektrokimyasal yöntemlerle kolaylıkla sentezlenebilen diğer iletken polimerler ilgi çekmiştir. Böylece poliasetilen, polipirol (PPy), politiyofen (PT), polifenilen vinilen ve polianilin (Şekil 3.1) gibi yeni iletken polimerler sentezlenmiştir.



Şekil 3.1 İletken polimerler: (a) poliasetilen, (b) polipirol, (c) politiyofen, (d) polifenilen vinilen ve (e) polianilin [88]

Düşük maliyetli ve ince film oluşturabilme gibi önemli özelliklere sahip olan iletken polimerlerin her geçen gün kullanım alanları biraz daha genişlemektedir. Örneğin, organik fotovoltaik hücreler (OPV), alan etkili transistör (FET), fotodiyot teknolojisi, lazer teknolojisi, yarıiletken çipler, hafif pil bileşenleri, entegre devreler, sensörler, LCD monitörler, bilgisayarlar, antistatik kaplama, antistatik ambalaj ve paketleme malzemelerinin yapımı ve çeşitli teknolojik aygıtlar sayılabilir [89-91].

İletken polimer kavramı yapı içerisindeki elektronlarla yeterli düzeyde elektriksel iletkenliği sağlayan polimerler için kullanılır. Elektronik iletkenlik gösterebilmesi için polimer örgüsünde elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerlerin bulunması gerekir. Bu koşulu ana zincirde konjuge (ardışık sıralanmış) çift bağları bulunan polimerler sağlar [86].

İletkenlik Ohm kanunu ile tanımlanır:

$V = IR$ (3.1)

I, bir dirençten geçen akımdır. Birimi Amperdir. V 'de direncin uçları arasındaki potansiyeldir (Volt biriminde). R'de Ohm (Ω) biriminde iletkenin "direnci" dir. R direncini bulmak için direncin uçları arasına bilinen bir voltaj uygulanır ve devreden geçen akım ölçülür. Direncin tersine (R^{-1}) iletkenlik denir. Ohm kanunu deneye dayalı bir kanundur ve tersinmez termodinamikle ilişkilidir. Potansiyel gradyantının bir sonucu olarak I akımı harcanan enerjiyi belirler (RI^2, Joule s^{-1}). Bütün maddeler Ohm kanununa itaat etmez. Gaz boşalması, vakum tüpler, yarıiletkenler ve bir boyutlu iletkenler (lineer polien zinciri gibi) genellikle Ohm kanunundan saparlar. Ohmik maddede direnç numunenin *l* uzunluğu ile doğru orantılı ve numunenin kesit alanı A ile ters orantılıdır:

$R = \rho -$ (3.2)

Burada ρ, Ω cm (SI biriminde Ω m) biriminde özdirençtir. Öziletkenlik ise $\sigma = \rho^{-1}$ dir. İletkenlik birimi Siemens ($S = \Omega^{-1}$), öziletkenliğin birimi ise Sm^{-1} dir. Öziletkenlik yük taşıyıcıların yoğunluk miktarına (n) ve onların madde içinde ne kadar hızlı hareket edebildiğine (μ hareketlilik) bağlıdır. Bu bağlılık formülle ifade edilir:

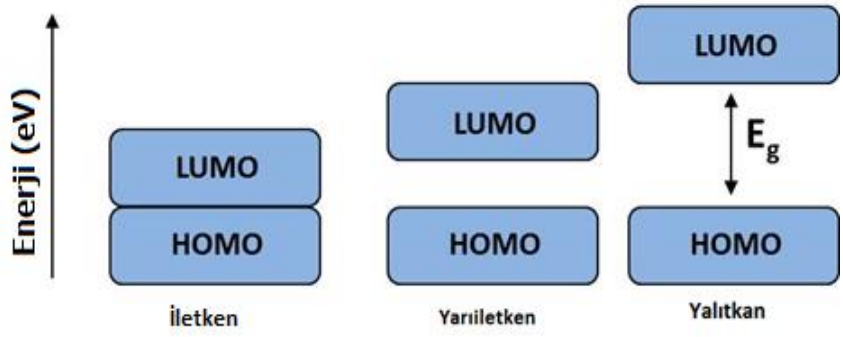
$\sigma = n\mu e$ (3.3)

Burada -e, elektronun yüküdür. Yarıiletkenlerde ve elektrolit çözeltilerde, pozitif yük taşıyıcılarından (holler veya katyonlar) dolayı, Eş 3.3'e fazladan bir terim daha ilave edilmelidir. Öziletkenlik sıcaklığa bağlıdır, yarıiletken ve yalıtkanlarda genellikle sıcaklığın düşmesiyle azalırken, metalik maddelerde ise (bunların bazıları belli bir T_c kritik sıcaklığının aşağısında süperiletken olurlar) sıcaklığın azalmasıyla artar. Katılarda iletkenlik, bant teorisi ile açıklanabilir. Bant teorisinde valans (değerlik) bandı ile iletkenlik bandı olmak üzere Şekil 3.2'de de görüldüğü gibi iki ayrı elektron seviyesi mevcuttur.

Şekil 3.2. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken malzemelerin bant yapısı

Metallerde bu iki seviye çakışık olduğu için, metaller daima iletkendir. Yalıtkanlarda valans ve iletkenlik bandı arasında metallere göre büyük bir seviye farkı bulunduğundan elektronlar normal durumda valans bandından iletkenlik bandına geçemez dolayısıyla elektriksel iletkenliğe sahip değillerdir. Yarı iletkenlerde ise bu seviye farkı yalıtkanlara göre daha azdır dolayısıyla ısı, ışık gibi bir etki ile valans bandından iletkenlik bandına elektronun uyarılarak geçmesi sağlanabilir. Bu durumda, normalde yalıtkan olan yarı iletken, iletken hale geçmiş olur.

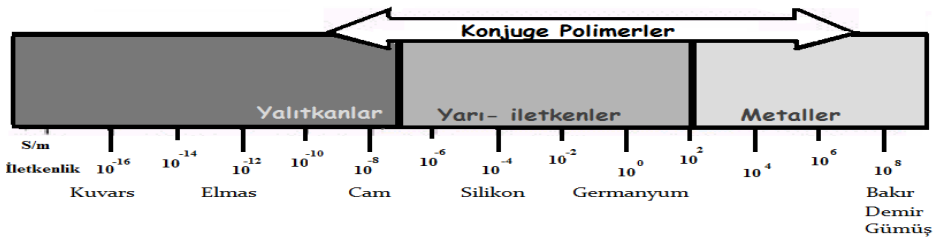
İletken polimer malzemelerde valans ve iletkenlik bandı sırasıyla HOMO ve LUMO seviyeleri olarak adlandırılır. Bu seviyeler arasındaki farka ise bant aralığı denilir. Farklı iletken polimerler Şekil 3.3'de gösterildiği gibi band aralıklarına (Eg) göre sınıflandırılırlar. Bu band aralıkları en yüksek dolu molekül orbitali (HOMO) ya da valans bandı ve en düşük boş molekül orbitali (LUMO) ya da iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyeleri olarak tanımlanır [61, 92, 93].



Şekil 3.3. Bir iletken, bir yarıiletken ve bir yalıtkanın HOMO ve LUMO arasındaki enerji seviyelerinin gösterimi [92]

En yüksek dolu molekül orbitali (Highest Occupied Molecular Orbital) HOMO ile en düşük boş molekül orbitali (Loωest Unoccupied Molecular Orbital) LUMO enerjileri, en çok bilinen kuantum kimyasal parametrelerdir. Sınır orbitalleri adı da verilen bu orbitaller, çoğu kimyasal reaksiyonun yürütülmesinde önemli bir rol oynar. HOMO bir elektron verici orbital gibi davranabilmektedir çünkü elektronları taşıyan en dıştaki (dolu en yüksek enerjili) orbitaldir. LUMO ise bir elektron alıcı orbital olarak rol alabilmektedir çünkü elektronları alabileceği boşluklara sahip en içteki boş (en düşük enerjili) orbitaldir. Sınır molekül orbital kuramına göre, bir geçiş halinin oluşması reaksiyona giren sınır orbitaller (HOMO ve LUMO) arasındaki bir etkileşim sebebiyledir [95]. HOMO enerjisi doğrudan iyonlaşma potansiyeliyle ve LUMO enerjisi ise doğrudan elektron ilgisiyle ilişkilidir. HOMO-LUMO bant aralığı, yani HOMO ve LUMO enerjileri arasındaki fark, önemli bir kararlılık indeksidir [95]. Büyük bir HOMO-LUMO aralığı, kimyasal reaksiyonlarda düşük reaktiflik anlamında olup, molekülün yüksek kararlılığını gösterir [49, 61, 96].

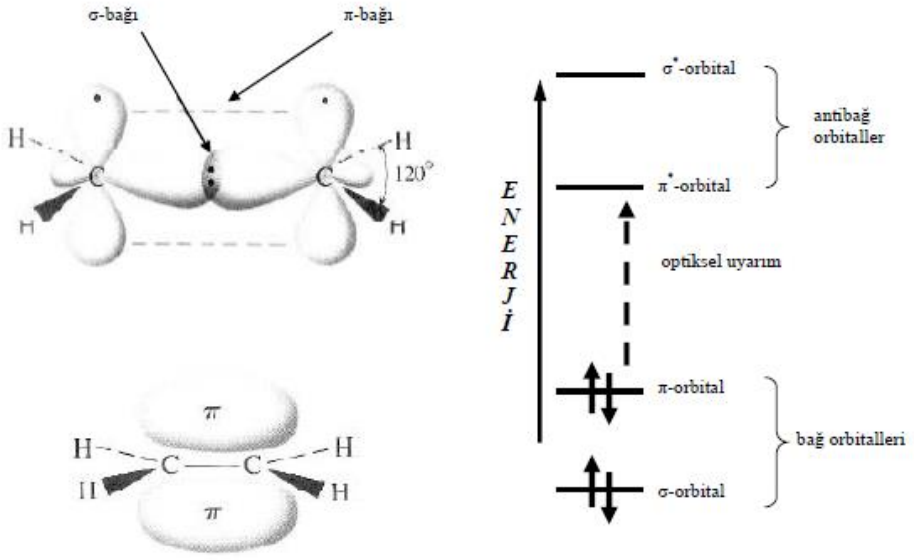
Konjuge polimerler, birbirini takip eden, ardışık tek ve çift karbon-karbon bağları ile bağlanmış, uzun zincirli yapılardır. Her bir bağ kuvvetli bir kimyasal bağ olan tekli bağ sigma (σ) bağı ve her çift bağda daha zayıf ve az lokalize olmuş bir pi (π) bağı içerir. Ana zinciri üzerinde ard arda tek ve çift bağ sıraları içeren konjuge polimerler yarıiletkenlik gösterirler [49]. Elektronlar bu konjüge sistem üzerinde delokalize durumdadır. Konjüge polimerler uygun katkılandırma (doplama) ile iletken hale getirilebilmektedir; yükseltgenerek p-tipi polimer ve indirgenerek n-tipi polimer elde edilebilmektedir. Aynı zamanda p-tipi malzeme elektronu alınmış ve π-orbitallerinde pozitif boşluk bırakılmış malzemedir. Bu boşluk komşu molekülden zıplayan π-elektronları ile doldurulabilmektedir. Bu elektron transferi polimer malzemelerde iletkenliği göstermektedir [61, 97]. Şekil 3.4'de bazı maddelerin ve konjuge polimerlerin iletkenlik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Kuvarsdan (yalıtkan) gümüşe (iletken) iletken polimerlerin iletkenliğininin yalıtkan, yarıiletken ve iletkenle karşılaştırılması

Konjugasyon yüksek düzeyde iletkenlik için yeterli değildir. Konjuge çift bağlı polimerlerin iletkenliği katkılama işlemiyle artırılır. Konjugasyon arttıkça HOMO ve LUMO seviyeleri arasındaki enerji farkı azalacağı için iletkenlik artar. Katkılama işlemiyle polimer yapısına iletkenliği sağlayacak olan elektronlar verilir veya elektronlar alınarak polimer örgüsünde artı yüklü boşluklar oluşturulur. İletken polimerlerde iletkenliğin nasıl sağlandığı çok basit bir yaklaşımla bu boşluklar üzerinden açıklanabilir. Artı yüklü bir boşluğa başka bir yerden atlayan elektron geldiği yerde de artı yüklü boşluk oluşturacaktır. Bu işlemler ardı ardına zincir boyunca veya zincirler arasında yinelenerek elektrik iletilir.

Şekil 3.5'de σ ve π bağları etende gösterilmiştir. Konjuge polimerlerin ışığı absorbe etmesi sonucunda elektronların π seviyesinden π* seviyesine geçmesiyle, birbirine Coulomb etkileşimiyle bağlı olan elektron-boşluk çifti denilen eksitonlar oluşmaktadır (Şekil 3.5 (b)). HOMO seviyesinden LUMO seviyesine geçen elektronlar geride boşluk (kovuk) bırakırlar [98]. Eksitonlar belirli bir bağlanma enerjisine sahip olduğundan yük taşıyıcıların elektroda ulaşmadan ayrılmaları gerekmektedir. Eksitonların bağlanma enerjisi konjuge polimerlerin ve organiklerin opto-elektronik özelliklerini anlamak için önemli bir parametredir ve bu ise organik yarıiletken malzemelerin optoelektronik özelliğini geniş bir bölgede istenildiği gibi ayarlanmasına imkan sağlar [99].



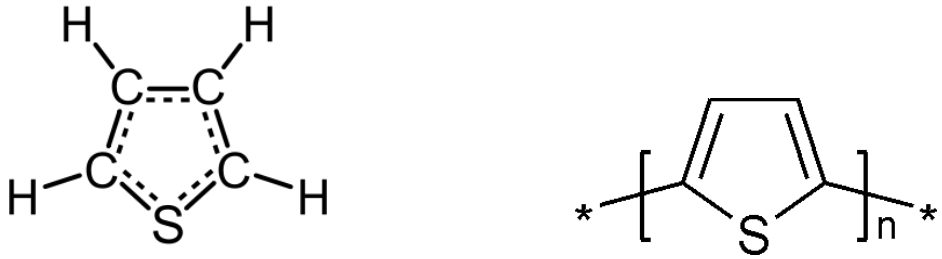
(a) (b)

Şekil 3.5. (a) en basit konjuge π-elektron sisteme örnek olan etende σ ve π bağları. (b) π konjuge molekülün enerji seviyelerini gösterir. En düşük elektronik uyarılmaları π-bağ orbitali ve π*-antibağ orbitali arasındadır [99]

Uzun dalga boylarına sahip düşük bant aralıklı polimer malzemeler daha çok foton absorbe ederek V_{oc}'yi artırır ve buna bağlı olarak verim de artar. Elektronlar donörden akseptöre taşınırlar. Akseptör ve donörün LUMO seviyeleri elektron transferini gerçekleştirmeye yetecek kadar yeterli uzaklıkta olmalıdır. Organik güneş pillerinde enerji seviyelerinin dizilimi polimerden fullerene yeterli yükü taşımak ve yüksek bir V_{oc} elde etmek için oldukça önemlidir [100]. Eksitonlar güneş enerjisi dönüşümü için hayati önem arz ederler. İstenilen fotovoltaik dönüşümün olması için eksitonların güçlü bir elektrik alanıyla ayrılması gerekmektedir. Organik yarıiletkenlerin çoğu hol iletkenliğine sahiptir ve yaklaşık optik bant boşluğu 2 eV'dir. Bu bant boşluğu silikona göre oldukça yüksektir ve bu durum güneş spektrumunun toplanmasını sınırlandırmaktadır. Ancak organik yarıiletken malzemelerin kimyasal sentez yoluyla kimyasal yapıları değiştirilebilir [101].
İletken polimerler; elektrokromik cihazlar [102-106], güneş pilleri [49, 61, 107-109], nanoyapılar [110], biyosensörler [111-113], fotovoltaik cihazlar [114-120], bilgisayar yazıcıları [121-123], ışık yayan diyotlar [53, 120, 124], ve şarj edilebilir piller [125-127] gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadırlar.

3.1. Politiyofen ve Türevleri

Politiyofen sülfirik asit katalizörlüğünde Meyer tarafından ilk olarak 1883 yılında kimyasal olarak sentezlenmiştir [128]. Bu tarihlerde polimerlerin iletken özellik gösterdikleri henüz tam olarak bilinmediği için bu yönde çalışmalar genişletilmemiştir. Ancak 1977'de katkılanmış poliasetilenin iletken özelliğe sahip olduğunun bulunması [87] ve özellikle 1979'da iletken polimer olan polipirolün elektrokimyasal olarak sentezlenmesi [129] ile birlikte tiyofen ve furan gibi heteroaromatik bileşiklerin elektropolimerleşmeleri önem kazanmıştır.
Tiyofen, elektronik ve optiksel özelliklerinin yanı sıra termal ve kimyasal kararlığı açısından organik elektroniğin temel yapıtaşlarından biri olmuştur [130]. Politiyofen, tiyofenin polimerizasyonu sonucu katkılama yolu ile konjuge elektron sistemine elektron aktarıp veya bu sistemden elektron çıkararak iletken hale gelebilen, heteroatom olarak kükürt içeren bir polimerdir. Tiyofen ve Politiyofenin morfolojik gösterşmleri Şekil 3.6 (a ve b)'de gösterilmiştir. Politiyofen, tiyofenden hem kimyasal hem de elektrokimyasal yöntemle sentezlenen bir iletken polimerdir. Ancak, öziletkenliği diğer bazı iletken polimerlere göre daha düşüktür (10^{-3}-10^{-4} S/cm) ve atmosfer koşullarında kararsızdır [86].



(a) Tiyofen (b) Politiyofen

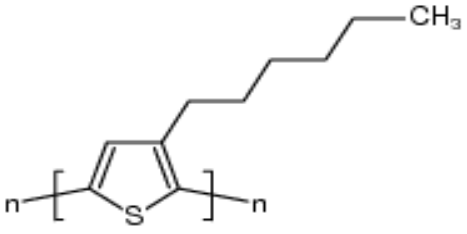
Şekil 3.6. (a) Tiyofen ve (b) Politiyofen'in morfolojik gösterimleri

Politiyofen ile ilgili çalışmalar derlenip 1981 yılında ilk makaleler yazılmaya başlanmış, bunu 1990 ve 1994 yılında Schopf ve Koßmehl'in yaptığı çalışmalar takip etmiştir [131]. Politiyofen ve türevleri, kolay sentezlenmesi, yapısının kolaylıkla modifiye edilebilmesi mükemmel işlenebilirliği, elektrokimyasal davranışlarının kontrol edilebilirliği, termal dayanıklılıkları, yüksek elektrik iletkenliği, normal ve katkılanmış hallerinin kararlılığından dolayı en çok çalışılan iletken polimerlerin başında gelmektedir [49, 60, 132-139]. Örneğin, poli(3-hekziltiyofen)'nin oda sıcaklığındaki iletkenlik değeri 30 S/cm olup, suda kolayca çözünebilmektedir. Poli(3-metiltiyofen) çok daha fazla iletkenliğe sahiptir ve iletkenlik değeri 500 S/cm olarak belirtilmiştir [140].

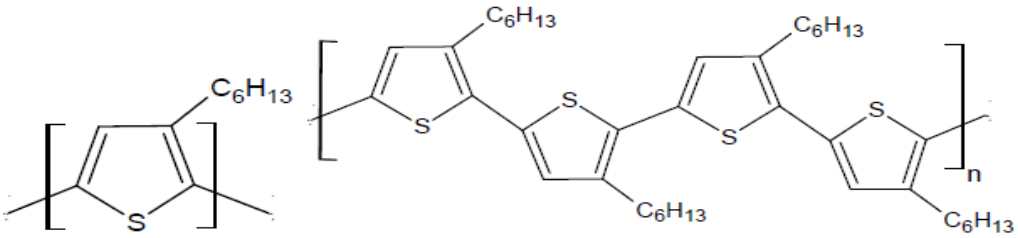
İletken polimerler, optoelektronik aletler, sensörler, antistatik kaplamalar, süperkapasitörler, şeffaf elektrotlar, elektrokromik görüntüler, ışık yayan diyotlar (LEDler), fotovoltaik hücreler, piller gibi alanlar politiyofenin kullanım alanlarına örnek olarak verilebilir. Politiyofenin düşük çözünürlüğü ve eriyebilirliği, araştırmacıları farklı sübstütientler bağlayarak özelliklerini iyileştirmeye yöneltmiştir. Bu sayede politiyofenin işlenebilirliğinin yanı sıra elektronik ve fiziksel özelliklerini de iyileştiği görülmüştür [141].

3.1.1. Poli (3-hekziltiyofen) (P3HT)

Poli (3-hekziltiyofen) Şekil 3.7'de görüldüğü gibi tiyofen monomerinin 3 numaralı karbonuna bir hekzil sübsititüe grubunun bağlanmasıyla elde edilen bir tiyofen türevidir.



Şekil 3.7 Poli(3-hekziltiyofen)'in molekül yapısı [142-144]

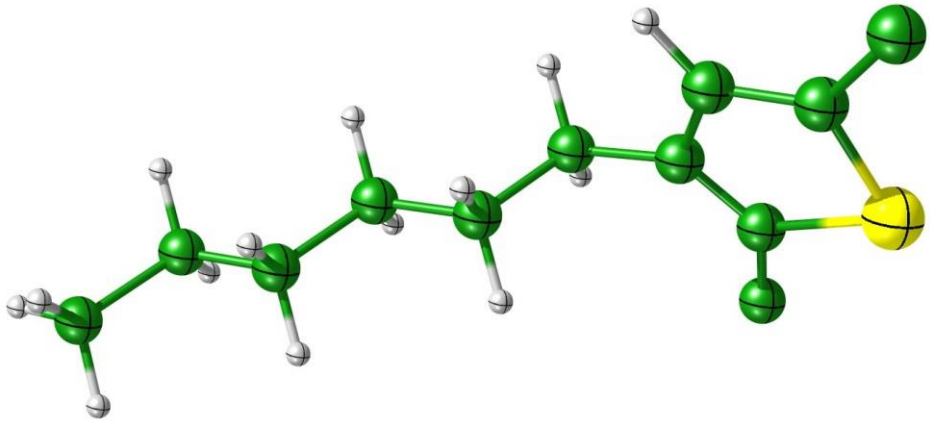


Şekil 3.8 P3HT'nin kimyasal bağ oluşum şeması

P3HT yüksek polimerizasyon derecesiyle yüksek iletkenlik değerine ($1x10^4$ S cm^{-1}) sahip olan bir politiyofen türevidir [145]. P3HT'nin üstün optoelektronik özellikleri ve işlenebilirliği sayesinde elektronik ve optoelektronik cihaz uygulamaları için yoğun bir şekilde çalışılmıştır [41, 119, 146-149]. Güneş ve çalışma grubu, TiO_2 nanopartikülleri ve P3HT'in modifiye yüzeylerini kullanarak hibrit güneş pillerinin fotovoltaik performansı üzerine çalışmıştır [150].

Şekil 3.8'de P3HT polimerinin bağ oluşum şeması verilmiştir. P3HT- Poli(3-hekziltiyofen) polimeri kimyasal yönden kararlı olmakla birlikte aynı zamanda farklı çözeltilerde iyi çözünürdür. Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) yarıiletken polimeri, çoğunluk yük taşıyıcıları holler olan (p-tipi) bir yarıiletkendir. Yasak enerji aralığı (band gap) ~2 eV'tur (LUMO=-3eV ve HOMO=-5eV). Moleküler formülü $C_{10}SH_{14}$'dir. Moleküler ağırlığı ise 166.283 g/mol'dur.

Güneş ışığını soğuran delokalizasyon π-elektron sistemlerine sahip olan konjüge polimerler, yük taşıyıcılarını üretebilir ve onların transferini sağlayabilirler. Organik çözücülerde çözünebilen konjüge polimer ailesinden en kullanışlı polimerlerden biri olan P3HT'nin kimyasal yapısı Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9. P3HT'nin kimyasal yapısı

Güncel literatüre göre P3HT'nin konjuge polimerler arasında yüksek yük taşıyıcı mobilitesine sahip olduğu bilinmektedir [63]. Ayrıca P3HT band aralığı ~2 eV civarında olması güneş ışığına oldukça uygun bir yapıda olmasını sağlar [151]. Bu özellikleri ile P3HT polimer tabanlı organik fotovoltaik hücreler için iyi bir aday haline gelmektedir ve birçok çalışma için önemli bir malzeme olmaktadır [41, 152-154].

P3HT; yüksek derecede kristallenme, regioregular durumda (10^{-4}'ten 10^{-2} cm^2/Vs'ye kadar) yüksek hol mobilitesi, kırmızı bölgeden 650 nm'ye kadar uzanan geniş bir soğurma aralığına sahiptir. Geliştirilmiş çevresel istikrar ve kararlı olması gibi birçok avantaja sahip olması 2000'li yılların başından beri polimer donor malzeme olarak organik elektronik teknolojilerinin geliştirilmesinin her aşamasında P3HT'yi en çok tercih edilen malzeme yapmaktadır [41, 49, 89, 149, 155, 156].

4. DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Au/P3HT/n-Si (MPS) Yapıların Hazırlanması

Bu bölümde Au/P3HT/n-Si Schottky diyotlarının yapımı için gerekli malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi ve yapımını içerir. Yapılan numunelerin parametrelerinin ölçümünde kullanılan cihazlar ve teknikler bu bölümde yer almaktadır.

4.1.1. Kristal temizleme

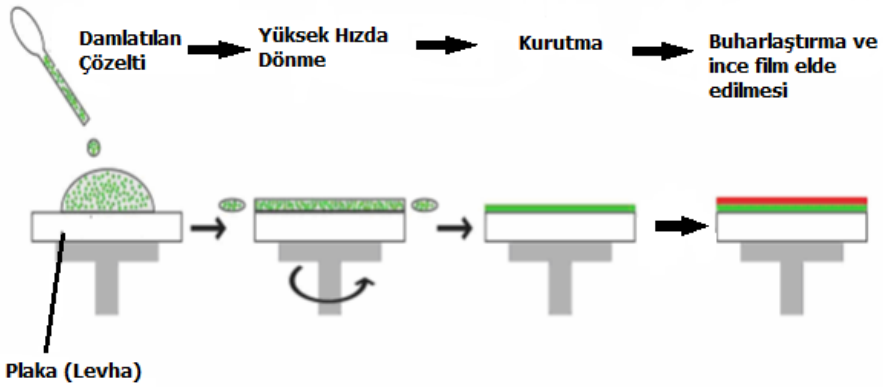
Metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-polimer-yarıiletken Schottky diyotları hazırlarken birçok yüzey kusurunu ortadan kaldırmak için yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. Böylece iyi temizlenmiş olan bir yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusuru ortadan kaldırabilir. Yarıiletkenin kristal yüzeyinde tüm kimyasal temizleme ve durulama işlemleri ultrasonik banyoda gerçekleştirildi. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotları (SBD) üretilirken (100) yüzey yönelimli, 0,01 Ω.cm özdirençli, 275 μm kalınlıklı, 3 inç çapında fosfor katkılı (n-tipi) tek kristal Silisyum yarıiletkeni kullanılmıştır. Kullanılan kristaller Sigma-Aldrich firmasından, fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi parlatılmış olarak satın alınmıştır.
Yarıiletken kristalin temizlenmesinde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Su arıtma sisteminde hazırlanan yüksek dirençli (~16-18 MΩ) deiyonize su kullanılarak temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız v.b. araç ve kaplar asetonla iyice yıkanıp deiyonize su ile durulandıktan sonra etüv fırınında yaklaşık 80 ^{o}C ısıtılarak sterilize edildi ve daha sonra hidrojen peroksit (H_2O_2), aseton ve ardından da deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak yaklaşık 10 dakika kadar yıkandı.
2. Kristaller ilk önce 20 ml trikloretilen (C_2HCl_3), daha sonra 20 ml aseton ve en son da 20 ml metil alkol (CH_3OH) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlendi ve kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
3. 30 ml sülfürik asit (H_2SO_4) ve 30 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.

4. 30 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 10 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
5. 30 ml nitrik asit (HNO_3), 10 ml hidroflorik asit (HF) ve 50 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
6. 40 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
7. Son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika temizlendi. Son olarak kimyasal olarak temizlenmiş n-tipi silisyum kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kurutma işlemi kuru azot (N_2) ile yapıldı.

4.1.2. Spin kaplama yöntemi ile P3HT tabakasının hazırlanması

İnce polimer filmlerin bir yüzey üzerine biriktirilmesinde uzun yıllardır kullanılan güvenilir yöntemlerden biri Spin Kaplama (Coating) yöntemidir. Kaplama işlemini etkileyen faktörler dikkate alınarak yüksek kalitede ince filmler üretilebilmektedir. Bu tip kaplama işlemi, bir çözelti damlasının bir alttaşın merkezine damlatılması ve sonra alttaşın yüksek dönme hızlarında (tipik olarak 3000 dev/dak) döndürülmesi esasına dayanır. Merkezi hızlandırma, fazla çözeltinin uzaklaştırılmasına ve kalan çözeltinin ise alttaş yüzeyine ince film şeklinde yayılmasına neden olur. Nihai film kalınlığı ve diğer özellikler, çözeltinin doğasına (viskozitesine, kuruma hızına, katkı oranına ve yüzey gerilimine) ve işlem şartlarına (devir, hızlandırma) bağlıdır. Spin kaplama işlemi Şekil 4.1'de görüldüğü üzere dört aşamadan oluşur. Hazırlanan alttaşlar üzerine çözelti damlatılmasıyla başlayan işlem, yüksek hızla döndürme ile fazla çözücünün uzaklaşması ve çözeltinin yayılması ve sonra kurutma ile çözücünün buharlaştırılması sağlanarak kaplama işlemi tamamlanır.



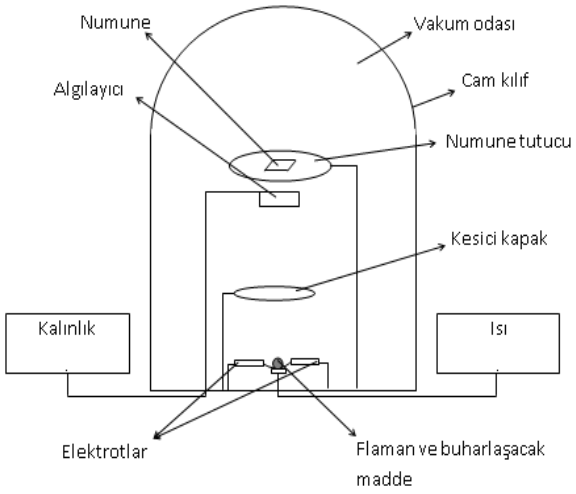
Şekil 4.1. Spin kaplama yöntemindeki aşamalar

P3HT ince filmler birçok yöntem kullanılarak hazırlanabilir. Bu tez çalışmasında P3HT ince filmler spin kaplama tekniği kullanarak hazırlandı. P3HT filmler Resim 4.1'de gösterilen spin kaplama cihazı ile oluşturuldu.

Resim 4.1. Spin kaplama cihazı

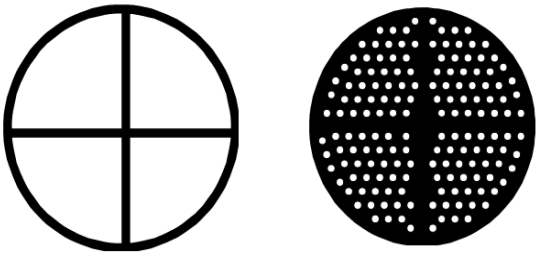
4.1.3. Au/P3HT/n-Si (MPS) schottky engel diyotunun (SBD) hazırlanması

Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotlar hazırlanırken doğrultucu ve omik kontağın oluşturulması için Şekil 4.2'de şematik olarak gösterilen yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı.



Şekil 4.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi

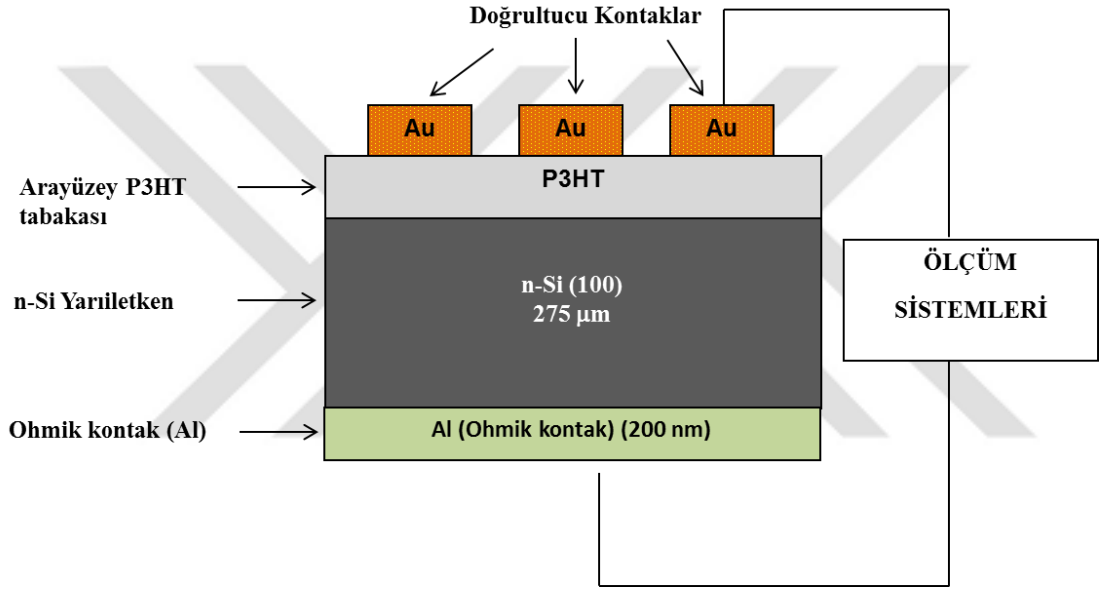
Numune, temizleme işleminin ardından parlatılmamış olan mat kısmına omik kontak yapılmak üzere, buharlaştırma sistemine (Şekil 4.2) yerleştirildi. Omik kontağı oluşturmak için yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine konuldu.



Şekil 4.3. (a) Omik ve (b) doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler

Omik kontak için Şekil 4.3'de gösterilen maskeye benzer bir maske kullanıldı. Vakum sistemi ile elde edilen ~10^{-6} Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile oldukça saf Al (~99,999%) buharlaştırılarak Si yaprağın arka yüzeyine ~2000 Å Al tabaka oluşturuldu. Buharlaştırma ile elde edilen arka kontağın, Si yaprağın üzerine ~400^{0}C de ~5 dakika yüksek vakum ortamında çöktürülmesi ile omik kontak elde edilmiş oldu. Omik kontağın oluşturulmasının ardından 0,87 mg. P3HT, 50^{0}C'de 10 mL Xyelenes içerisine eklenerek ince bir P3HT arayüzey tabakası hazırlandı. P3HT çözeltisi bir gün boyunca karıştırılarak çözülmesi ve homojenleşmesi sağlandı. Elde edilen P3HT çözeltisi Si alt tabakası üzerine spin kaplama tekniği ile kaplanmıştır. P3HT kaplanmış yüzey, üzerinde çok sayıda küçük dairecikler şeklinde delikler bulunan Şekil 4.3 (b)'dekine

benzer bakır maske üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi. Flaman üzerine vakum sisteminde yaklaşık 10^{-7} torr basınç altında % 99.999 yüksek saflıkta altın (Au) metali buharlaştırılarak 1 mm yarıçaplı ($A=3,14x10^{-2}cm^2$) ve ~1500 Å kalınlıklı yüksek saflıkta Au dairesel kontaklar büyütülmüştür. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla Au/P3HT/n-Si şeklinde MPS tipi SBD'ların üretim süreci tamamlanmış oldu. Soğuması için bir süre bekletilen kristal, vakum ortamından çıkartılarak her bir dairecik (diyot) ortada kalacak şekilde, elmas kesici yardımıyla eşit dört parçaya bölündü. MPS yapının şematik gösterimi Şekil 4.4' de verilmiştir.



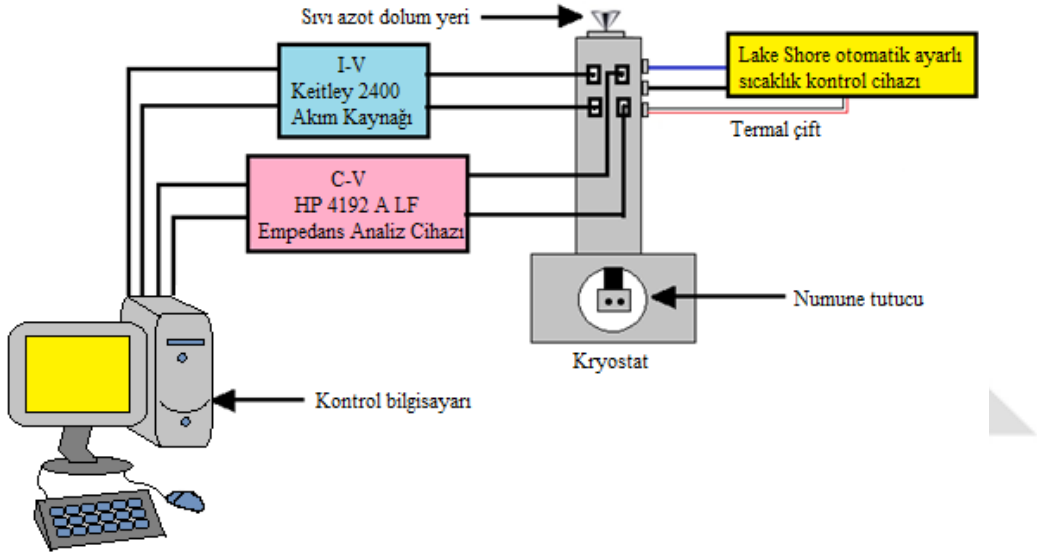
Şekil 4.4. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD'ların şematik gösterimi

Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD'ların üretilmesinden sonra pozitif ve negatif voltajda I-V, C-V ve G/ω-V ölçümlerinin alınabilmesi için numuneler bakır tutucu üzerine iletken pasta yardımıyla yapıştırılmıştır. Üst elektriksel kontaklar için gümüş tutkal ve yine gümüş kaplı ince teller kullanılmıştır.

4.2. Deneysel Ölçüm Sistemi

Elektriksel karakteristikler için gerekli ölçümlerin tamamı Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi laboratuvarında gerçekleştirildi. Kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinde Hawlett Packard 4192A LF Empedaes Analiz metre (5 Hz-13 MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 ac/dc

çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek, dış etkileri ve gürültüyü azaltmak için Janis vpf-475 kriyostat içinde ~10^{-3} Torr basınç altında gerçekleştirildi. Kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinin yapıldığı deneysel ölçüm sistemleri şematik olarak Şekil 4.5'de gösterilmiştir. C-V ve G/ω-V ölçümleri 10 kHz- 1 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Ayrıca tüm ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE488 ac/dc çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen C-V ölçümlerinden yani C_i arayüzey durum kapasitansından ($C_i=\varepsilon'\varepsilon_o A/d_i$), P3HT arayüzey tabakasının kalınlığı (d_i) 59,3 Å olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi

4.2.1. Akım-gerilim kaynağı (Keithley 2400)

Resim 4.2'de Keithley 2400 akım-voltaj ölçüm cihazı görülmektedir ve hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü yapabilmektedir. Bu cihaz ±1 µV' dan ±200 V' a gerilim ölçümü ve ±10 pA' den ±1 A' e kadar akım ölçüm gücüne sahiptir. ± % 0,15 hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Ölçümler Hawlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi.

Resim 4.2. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı

4.2.2. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi

Frekansa bağlı kapasitans-voltaj ve kondüktans voltaj ölçümlerini almak için Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü kullanıldı. Resim 4.3'de verilen HP4192A LF empedans analizörünün frekans ölçüm sınırları 5 Hz-13 MHz olup, osilatör genlik aralığı 5 mV-1 V arasındadır. Doğru akım, ileri ve ters besleme özelliğine sahip cihazın -35 V tan +35 V' a kadar ayarlanması mümkündür. Aynı anda empedans, admitans, kapasitans, indüktans ölçebilmekle birlikte, aralarındaki faz değerlerini ve kalite faktörlerini de ölçebilmektedir. ±% 0,15 hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 arayüzey veri yoluna sahip olup test point yazılımı yardımı ile bilgisayar ile kontrol edebilmek mümkündür.

Resim 4.3. HP 4192 LF empedans analizörü

4.2.3. Kriyostat ve sıcaklık kontrol sistemi

Dış etkenlerin tüm ölçümler üzerindeki etkisini azaltmak için hazırlanan Schottky engel diyotların I-V ölçümleri 4 optik pencereli bir Janis vpf-475 kriyostat içinde yaklaşık 10^{-2} mbar basınçta gerçekleştirildi. Bu cihaz, Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemine sahiptir ve 77 ^{o}K ile 450 ^{o}K sıcaklık aralığında ve ±0,1 ^{o}K hassasiyetiyle ölçüm yapabilmektedir.

Resim 4.4. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (solda) ve Janis vpf-475 kriyostat

4.2.4. Aydınlatma ve güç kaynağı

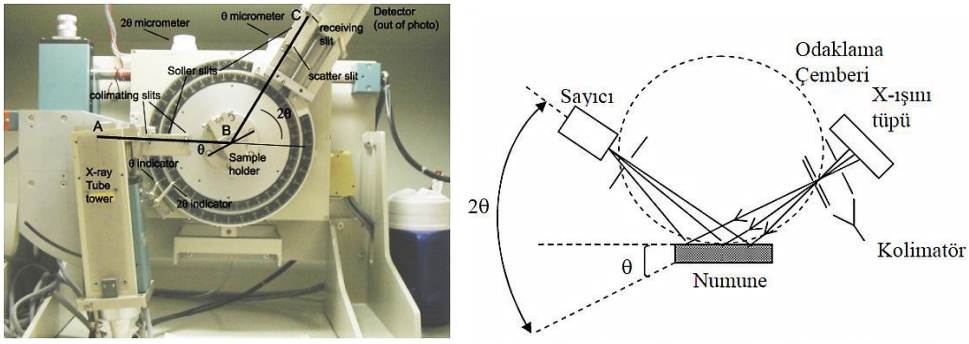
Aydınlatma kaynağı (halojen lamba)-Newport-Oriel 67011 ve güç kaynağı-Newport-Oriel 69931 kullanılarak Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyotları aydınlatma şiddetine bağlı I-V, ölçümleri gerçekleştirildi. 400-700 nm arasında dalga boyuna sahip fotonlar, ışık kaynağından diyot üzerine odaklandıktan sonra ölçümler alındı. 0-250 W'lık aydınlatma şiddeti aralığına sahip olan aydınlatma sistemi ±1 W'lık adımlarla ölçüm almamızı sağlar. Aydınlatma ölçüm sistemi Resim 4.5 (a ve b)'de gösterilmiştir.

(a) (b)

Resim 4.5 (a) Newport-Oriel 67011 aydınlatma ve (b) Newport-Oriel 69931 güç kaynağı

4.3. XRD Ölçüm Sistemi

X-Işınları Kırınım Tekniği (XRD); malzemenin içerdiği fazları, nicel faz analizinde, sıcaklık, basınç v.s. fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinde, tanecik boyutu, tanecik yönelimi, kimyasal komposizyonu ve örgü sabitlerini belirlemede kullanılan bir tekniktir. XRD analizlerinde tek kristal metodu (Single Crystal) ve toz kristal metodu (powder crystal) olmak üzere iki çeşit kırınım metodu bulunmaktadır. Kristal analizinde kullanılan en güçlü kırınım tekniği toz kristal metodudur. Bu metod için λ sabit, θ değişken olmakla beraber monokromatik X-ışını demeti örnek üzerine gönderilir. λ sabit olduğundan kristal düzlemi ile uygun θ açısı denk geldiğinde maksimum yansıma meydana gelir. Bu teknik özellikle gelişi güzel yönelmiş polikristal örnekler söz konusu olduğunda çok kullanışlıdır. Toz kırınımıyla ilgili veriler hem X-ışınlarını örnekten yansıtma ile hem de örnekten geçirme ile elde edilebilir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi numune üzerine gönderilen X-ışını difraksiyonu film üzerine kaydetmek yerine, difraksiyona uğramış ışınları bir dedektör ile sayarak tespit etmek mümkündür. Şekil 4.6'daki prensip şemaya göre monokromatik X-ışını numuneye gönderilir. açısı değiştirilmek suretiyle, numune yavaş yavaş bir ω açısal hızıyla döndürülür. Buna uygun olarak sayıcı da 2ω açısal hızıyla (2θ açısını muhafaza etmek için) odaklama çemberi üzerinde döndürülür.



Şekil 4.6. XRD ölçüm sistemine ait blok şema ve sistemin görüntüsü

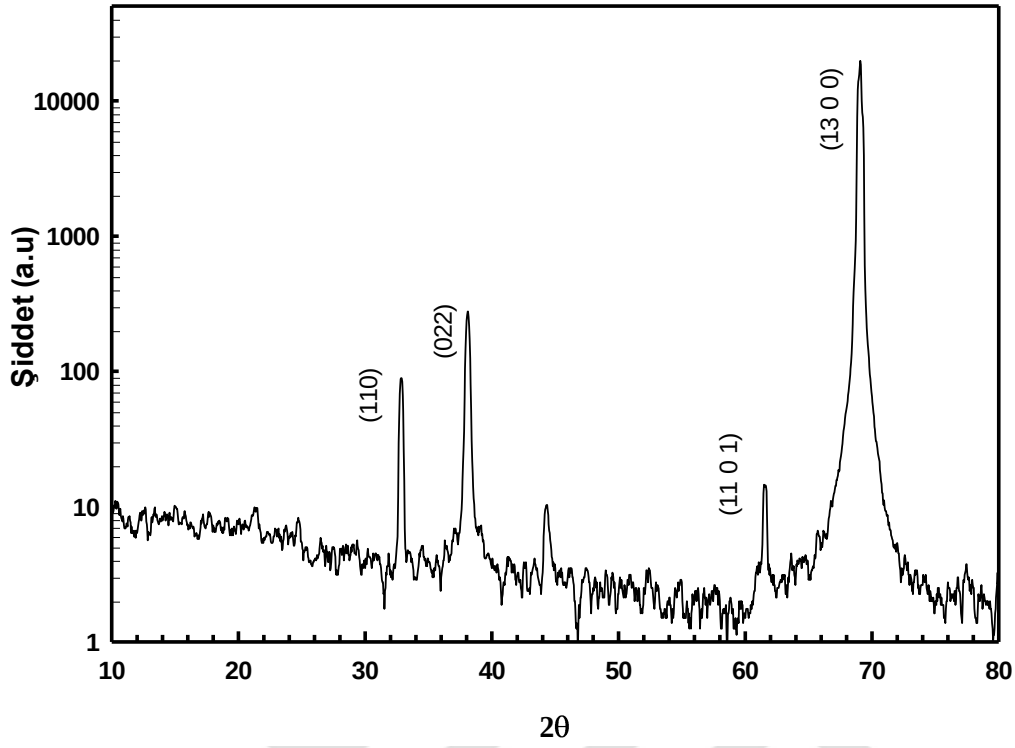
Difraksiyona uğramış ışınların açıları ve şiddeti bir kaydedici (bilgisayar veya yazıcı) aracılığıyla çizdirilir. Her bir difraksiyona ait açıları grafikten ölçülüp d (h, k, l) değerleri ve bu piklerin karşılık geldiği element ya da bileşiklerin kalitatif ve kantitatif analizi belirlenebilir.

5. DENEYSEL BULGULAR

Hazırlanan metal-polimer-yarıiletken (Au/P3HT/n-Si) yapıların bazı temel elektriksel parametreleri hem frekansa hem sıcaklığa bağlı olarak deneysel akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçüm metotları kullanılarak incelendi. C-V ve G/ω-V ölçümleri doğru ve ters ön gerilim altında (-3 V ile + 3V) geniş bir frekans aralığında (10 kHz-1 MHz) oda sıcaklığında frekansa bağlı ve 1 MHz frekansta geniş bir sıcaklık aralığında (80-400K) incelendi. I-V ölçümlerinden yararlanılarak diyodun doyma akımı (I_o), idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B (I-V)) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) dağılımı elde edildi. Deneysel C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları kullanılarak MPS yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplandı. Numunenin C-V ve G/w-V ölçümleri kullanılarak çizilen grafikler ve yapılan hesaplamalar sonucu, arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s), difüzyon potansiyeli (V_d), katkılanan verici atomların sayısı (N_D), tüketim tabakasının genişliği (W_D), Fermi enerjisi (E_F) ve potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) gibi temel parametreler elde edildi. Dielektrik özelliklerden ise dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε''), elektriksel öziletkenlik (σ) ve kayıp açı tanjantı (tanδ) ile M' ve M'' elektrik modülleri frekansa ve sıcaklığa bağlı hesaplandı. C-V ve G/ω-V ölçümleri Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre (5 Hz-13 MHz) ve bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kumanda edilerek gerçekleştirildi. Sıcaklık ölçümlerinde ise, Janes vpf-475 kriyostat içinde yaklaşık $5x10^{-4}$ Torr basınç altında bir Lake Share model 321 sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Ayrıca aydınlatma şiddetine bağlı olarak deneysel I-V ölçümlerinden I_o, Φ_{Bo}, n, R_s ve N_{ss} gibi temel diyot parametreleri elde edildi.

5.1. Üretilen P3HT Filmlerinin XRD Ölçümleri ile Yapı Analizi

P3HT örneği GNR firmasının APD 2000 Pro X-ışınları kırınım cihazı ile tarama yapıldı. Kaynak olarak CuKα spektrası kullanıldı. Spektranın dalgaboyu (λ) 1,5406 Å ve P3HT için XRD taraması Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Si alttabaka üzerindeki P3HT polimerinin X-ışını kırınım desenleri

Burada Si üzerine P3HT büyütmenin kırınım analizinden (110), (022), (1101), (1300) düzlemlerinden yansıma elde edildiği ortaya çıkmıştır. Şekil 5.1'de P3HT'ye ait pikler 2θ= 32, 37, 62, 69°'lerde görülmüştür. P3HT'nin karakteristik piklerinin keskin ve şiddetlerinin oldukça yüksek olması yapının kristalleşmesinin yüksek olduğunu göstermektedir. [001] Si alttaş üzerine [011] yönelimli olarak büyümüştür. P3HT monoklinik yapıda örgü uzunlukları a=16,9 Å, b=4,85 Å, c=7,84 Å olarak PDF048-2040 database'ine karakterize edildi. Tabakanın (011) ve (022) miller düzlemleri yarı genişlikleri 0,09°'dir. Tabakanın kristal olduğu buradan da anlaşılmıştır. Kristal boyutunu Scherrer eşitliğinden hesaplanabilir [157, 158].

$$D = k\lambda/(\beta \cos\theta) \tag{5.1}$$

Buradaki λ, θ ve β sırasıyla X-ışını dalgaboyu, Bragg açısı ve maksimum kırınım çizgisinin yarı genişliğidir. Scherrer eşitliği ile kristalin yanal boyutu 93 nm olarak hesaplandı. Buradan da anlaşılacağı üzere geniş kristal boyutu ile kristalize olduğu aşikardır.

6. AKIM-VOLTAJ (I-V) KARAKTERİSTİKLERİ

Metal-yarıiletken diyotlarda akım-gerilim karakteristikleri termiyonik emisyon teorisine dayanmaktadır [20]. Bu durum doğru beslem voltajlarının küçük değerleri için geçerli olur. I-V ölçümlerinden elde edilen grafiklerden diyotun idealite faktörü, diyotun gösterdiği direnç ve engel yüksekliği bulunur. Bu durum ideal Schottky diyotları için geçerlidir. Termiyonik emisyon teorisinde akım ifadesi eşitlik 6.1'de elde edilmiştir. Arayüzey tabakalı durumda uygulanan gerilimin tümü deplasyon bölgesi boyunca düşmeyeceğinden, burada bir n idealite faktörü tanımlanmalıdır. İdealite faktörünün 1'den büyük ve seri direncin (R_s) mevcut olması durumunda bir MS veya MIS/MPS tipi Schottky engel diyotları için akım-voltaj ilişkisi, $V \geq 3kT/q$ için, aşağıdaki şekilde verilir [16, 20, 26].

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right)-1\right] \tag{6.1}$$

Burada V diyot üzerine uygulanan gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve IR_s terimi ise diyotun seri direnci üzerine düşen voltajdır. Ancak düşük ve orta gerilim bölgelerinde IR_s terimi diyota uygulanan voltaj yanında ihmal edilecek kadar küçüktür. I_o terimi ise ters doyum akımı olup

$$I_o = AA^*T^2\exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \tag{6.2}$$

eşitliği ile verilir. Burada Φ_{Bo} metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır-beslem (ön-gerilim) potansiyel engel yüksekliği, A diyotun doğrultucu kontak alanı ($A=3,14x10^{-2}$ cm^2) ve A* etkin Richardson sabiti olup değeri n-tipi Si için 120 A/cm^2K^2 dir [2].

Schottky diyotlarda, doğru ön-gerilim *lnI-V* eğrileri üç farklı bölgeye ayrılır. Bunlar sırasıyla düşük gerilim ($V \leq 0,1$ V) bölgesi, orta gerilim ($0,1 < V < 0,8$ V) bölgesi ve yüksek gerilim ($V > 0,8$ V) bölgesidir. Düşük gerilim bölgesinde kaçak akımlar etkin olup lineer bir davranış gözlenmez. Yüksek gerilim bölgesinde ise *ln(I)-V* eğrisinde R_s' den dolayı bir bükülme meydana gelir. Orta gerilim bölgesinde *ln(I)-V* eğrisi genelde lineer bir davranış

gösterdiği için, Eş. 6.1 ifadesinde her iki tarafın *ln*' i alınırsa Eş. 6.3' de verilen bir doğru denklemi elde edilir.

$$\ln(I) = \ln(I \qquad —V \tag{6.3}$$

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotun farklı sıcaklıklardaki doğru ve ters ön-gerilim yarı-logaritmik *I-V* eğrileri, Şekil 6.1' de görüldüğü gibi geniş bir voltaj aralığında lineer bir davranış sergilemektedir. İdealite faktörü n doğru öngerilim lnI-V eğrilerinin eğiminden ($tan\theta=q/nkT$) elde edilir ve Eş. 6.1'den

$$-\left(——\right) \tag{6.4}$$

şeklinde hesaplanabilir. İdealite faktörünün değeri, metal ile yarıiletken arasında oluşan bir yalıtkan veya polimer arayüzey tabaka ile potansiyel engel yüksekliğinin biçimi ve homojensizliği, yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}), Schottky engel alçalmasına ve numune sıcaklığına bağlıdır [26]. Eğer yapı, yarıiletkenin gövde direnci, yalıtkan arayüzey tabakası ve kontaklardan dolayı bir seri dirence sahip ise diyot üzerine düşen voltaj,

$$V \qquad V \tag{6.5}$$

şeklinde olacaktır. Schottky diyotlarda *ln(I)-V* grafiğinin, genelde lineer bir doğru olması beklenir [54]. Ayrıca sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{Bo}) Eş. 6.2' den çekilerek

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{AA^{*}T^{2}}{I_{o}}\right) \tag{6.6}$$

olarak yazılır.

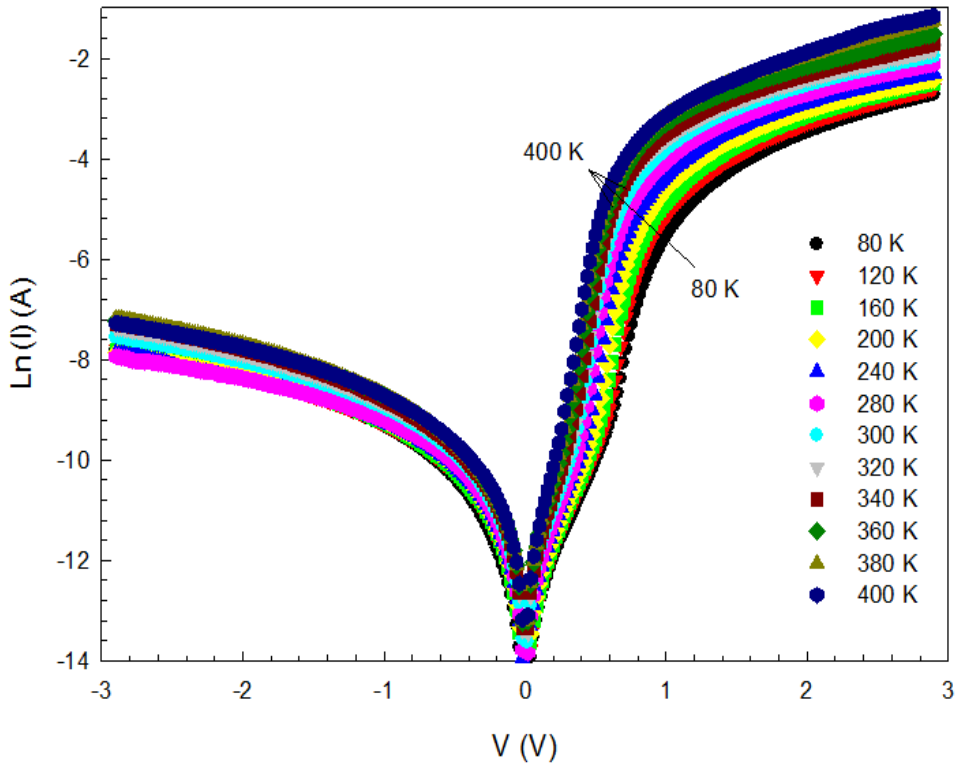
Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyotun doğru ve ters ön-gerilimdeki yarı logaritmik (I-V) eğrileri 80-400 K sıcaklık için elde edilmiştir. Şekil 6.1'de, bu Schottky engel diyotun farklı sıcaklıklardaki I-V eğrileri çizilmiştir. Grafiğin doğru beslem kısmından, akımın artan voltajla üstel olarak arttığı görülmektedir. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi düşük

voltajlarda ve orta voltajlarda iki farklı eğimli lineer bölgeye sahiptir. Bu davranış literatürde iki paralel diyot modeli ile açıklanabilir. Başka bir ifadeyle küçük voltajlarda ve büyük voltajlarda iki farklı akım iletim mekanizmasının mevcut olduğunu göstermektedir. Ancak bu çalışmada orta gerilim bölgesindeki I-V doğru beslem eğrileri kullanılmıştır. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky diyotunun her sıcaklık için Ln(I)-V eğrisinden elde edilen doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n) ve potansiyel engel yüksekliği Φ_B(I-V) değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Her bir sıcaklık için lineer bölgenin eğiminin farklı olduğunu Şekil 6.1'e bakılacak olursa görülmektedir. Bu durumda hesaplanan idealite faktörleri de her bir sıcaklık için hesaplandığında, sabit kalmayıp değişen sıcaklıkla beraber değişmekte olduğu gözlenmiştir. İdealite faktörünün değerinin ideal durumda (n=1) olması beklenir. Ancak bu duruma hemen hemen hiç rastlanmaz. Çünkü engel yüksekliği uygulanan gerilime bağlıdır. Bu bağımlılık, yalıtkan tabaka üzerinde potansiyel düşmesine, dolayısıyla I-V karakteristiğin değişimine ve idealite faktörün 1'den büyük çıkmasına neden olur. İdealite faktörünün 1'den büyük değerler çıkması, pratikte ideal diyot elde edilmesinin zor olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum ara yüzey durum yoğunluğuna, tünelleme akımının varlığına ve ara yüzey tabakasına atfedilmektedir [52]. Ayrıca görüntü yük engel yüksekliği alçalması ve üretim-yeniden birleşme süreçleri de idealite faktörünün büyük çıkmasını açıklayan sebepler arasında yer almaktadır [19, 21, 32]. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyodunun yapılan ölçümlerin sonuçlarındaki hesaplamalarda idealite faktörünün daha yüksek değere sahip olması özellikle arayüzey polimer tabakanın homojensizliği, polimer tabakayla yarıiletken tabaka arasındaki oksit tabakanın varlığı ve arayüzey durumlarının yüksek değerlere sahip olmasından kaynaklanabilir [41, 47].

Schottky diyotlarda ln(I)-V grafiğinin lineer bir doğru olması beklenir [26]. Ancak deneysel sonuçlar göstermiştir ki yüksek voltajlarda ($V \geq 1$ V), Şekil 6.1'de görüldüğü gibi doğru öngerilim lnI-V eğrileri geniş bir bölgede lineer olmasına rağmen yeterince ileri voltajlarda özellikle seri direnç ve arayüzey tabakasından dolayı lineerlikten sapmaktadır. Aynı zamanda, eğriler azalan sıcaklıkla gitgide daha ileri voltajlara kaymaktadır ki bu davranış da Schottky diyottan geçen akım iletiminin Eş. 6.1 ile uyumlu olarak Termiyonik Emisyon Difüzyonu (TED) teorisi tarafından desteklendiğini gösterir. Yüksek gerilim bölgesinde grafiğin doğrusallıktan sapması veya çok dar bir bölgede lineerlik göstermesi elde edilen elektriksel parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliğine gölge düşürür. Ancak bilindiği gibi yarıiletken aygıtların gerçek direnci mümkün olduğu kadar ileri pozitif

voltajlar için elde edilen değerdir. Bu yüzden diyotun seri direncinin bu bölgede hesaplanmasında fayda vardır.

I–V karakteristikleri, seri direnç ve arayüzey durumları gibi parametrelerden etkilenir. Bu parametrelerin SBD'ların elektriksel karakteristiklerine etkisi hala birçok araştırmacının ilgi alanıdır [47, 159-164]. Araştırmalarda görüldüğü gibi yapının seri direncinin düz beslem *I–V* karakteristiklerinde yüksek voltajlarda lineerlikten sapmasına yol açar.



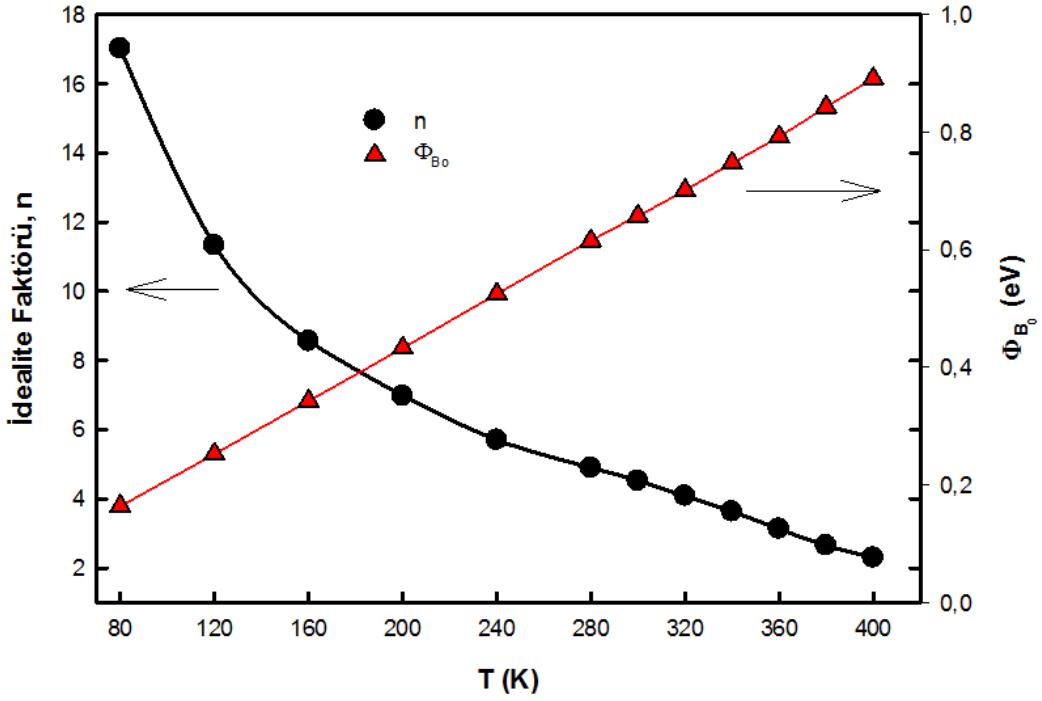
Şekil 6.1. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyot (SBD) için farklı sıcaklıklarda doğru ve ters ön gerilim ln(I)-V eğrileri

Çizelge 6.1. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için farklı sıcaklıklarda elde edilen I_o, n ve Φ_{Bo} değerleri

T (K)	$I_o x10^{-6}$ (A)	n	Φ_{Bo}(I-V) (eV)
80	1,07	17,03	0,16
120	1,26	11,33	0,25
160	1,46	8,56	0,34
200	1,77	6,98	0,43
240	1,97	5,70	0,52
280	2,36	4,90	0,61
300	2,89	4,52	0,65
320	3,34	4,08	0,70
340	3,47	3,63	0,74
360	3,75	3,12	0,79
380	3,40	2,65	0,84
400	3,39	2,30	0,89

Çizelge 6.1'den de görüldüğü gibi yarı-logaritmik doğru beslem lnI-V eğrilerinden elde edilen Φ_{Bo} ve n değerleri, sıcaklığa bağlıdır. Sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{Bo}) ve diyot idealite faktörünün (n) sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 6.2'de verilmektedir. Artan sıcaklıkla Φ_{Bo} değeri artarken, n değeri azalmaktadır. İdealite faktörü ile engel yüksekliği için, en düşük (80 K) ile en yüksek (400 K) sıcaklıkları için bu değerler, sırasıyla n=17,02-2,30 ve Φ_{Bo}=0,16-0,89 eV arasında elde edilmiştir. Hem idealite faktöründeki hem de engel yüksekliğindeki bu değişim sadece termiyonik emisyon modeli ile açıklanamaz. Bu durumda ara yüzeyde ikincil bir mekanizmanın varlığından söz edilebilir. Organik-inorganik ara yüzeyin keskin aktif olmayan yapıda oluşmasına rağmen, metal ile yarıiletken arasındaki organik tabakanın ara yüzey durumlarında önemli bir modifikasyona sebep olduğu görülmektedir. Bu yüzden engel yüksekliğindeki artış, P3HT organik tabaka pasivasyonu yoluyla ara yüzey dipolü ile açıklanabilir. Si ve organik yarıiletken etkileştiğinde, organik yarıiletken ve metalin iş fonksiyonunun en düşük boş molekül orbitali (LUMO) ve en yüksek dolu molekül orbitali (HOMO) seviyeleri yeniden düzenlenir ve sırayla organik/inorganik yarıiletken ara yüzeyinde yarıiletkenin elektron ilgisi değişir ve bu da bariyer yüksekliğinde artışa sebep olur.

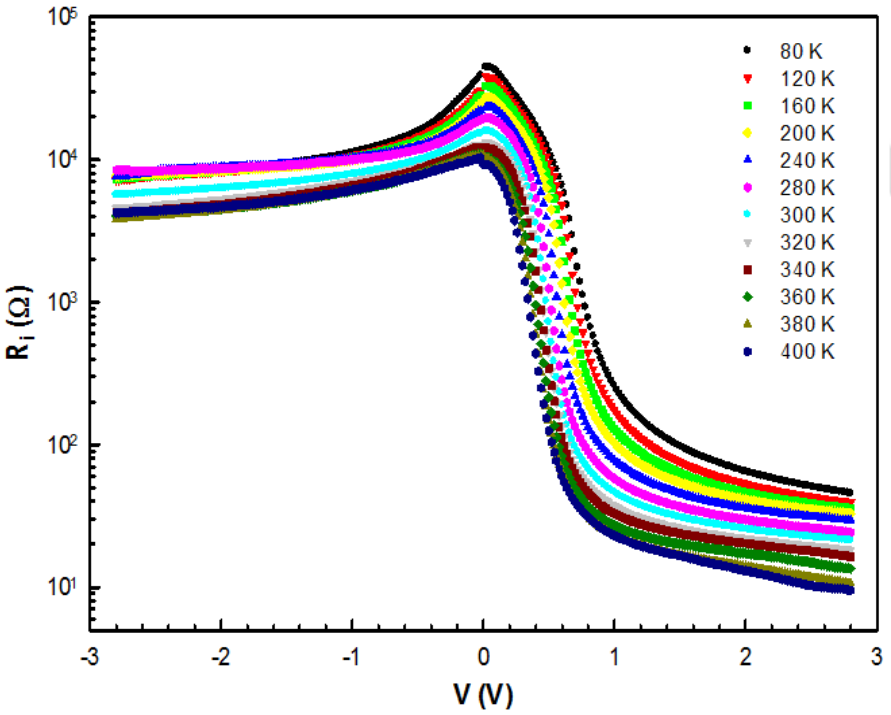
Au/P3HT/n-Si diyotunun oda sıcaklığında idealite faktörü 2,96 ve engel yüksekliği 0,70 eV olarak hesaplanmıştır. Daha önce yapılan ve rapor edilen çalışmalarda da, benzer değerlere ulaşılmıştır. Yakuphanoğlu [47]; Al/p-Si/P3HT/Ag Schottky kontağın oda sıcaklığında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 2,32 ve 0,70 eV olarak bulunmuştu ve Tüzün [165]; P3HT'ye farklı oranlarda PCBM katkısı ile yaptığı çalışmalarında idealite faktörünü ve engel yüksekliğinde sırasıyla 3,09 ve 0,73 eV gibi değerlere ulaşmıştır. Literatürde birçok araştırmacı, Au/P3HT/n-Si üzerine çalışmalar yapmış ve çalışmamızda ulaştığımız değerlerle uyum içerisindedir [41, 47, 93, 147, 166-168].



Şekil 6.2. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun idealite faktörü ve engelyüksekliğinin sıcaklıkla değişim grafiği

Schottky engel diyotların elektriksel karakteristiklerini ve idealitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri de diyotun seri direnci ve kısa devre (şönt) direncidir. İdeal bir SBD için seri direncin değeri sıfıra giderken ($R_s \rightarrow 0$) şönt direnç sonsuza doğru gitmelidir ($R_{sh} \rightarrow \infty$). Seri direnç doğru beslemde akımı sınırlayıcı bir etki yapar ve düz bezlem I–V karakteristiklerinde görülen lineerlikten sapma durumunu gösterir [20]. Seri direnç değeri birçok metotla hesaplanabilir. Au/P3HT/n-Si MPS diyot yapısının farklı sıcaklıklarda seri direnci (R_s) ve şönt direnci doğru ve ters beslem I-V karakteristiklerinden Ohm yasası ($R_i = dV_i/dI_i$) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.3'de diyot yapısı için Ohm yasasıyla elde

edilen R_i-V grafiği gösterilmiştir. Yüksek pozitif beslem için elde edilen R_i değerleri diyodun seri direncine (R_s) karşılık gelirken, yüksek negatif beslem için elde edilen R_i değerleri ise diyodun şönt direncine (R_{sh}) karşılık gelmektedir. R_s, doğru beslem bölgesindeki direncin minimum değerine yaklaştığı eğrinin eğiminin sabitlendiği gerilim değerindeki R_i değeriyken, R_{sh} ters beslem bölgesindeki direncin maksimum değerine yaklaştığı eğrinin eğiminin sabitlendiği gerilim değerindeki R_i değerine karşılık gelmektedir. Bu şekilde grafiğe bakılarak R_s ve R_{sh} değerleri oda sıcaklığında sırasıyla MPS tipi SBD için 12,18 Ω ve $1{,}59 \times 10^4$ Ω olarak elde edilmiştir. Aygıt performansının yüksek olması için seri direnç değeri mümkün olduğunca düşük değerde olması gerekirken, eklemdeki akım kayıplarından kaçınmak için şönt direnç değerinin oldukça yüksek olması gereklidir [41, 47, 165, 167, 169].



Şekil 6.3. Au/P3HT/n-Si MPS SBD'nun 80 K-400 K sıcaklık aralığında Ohm yasasıyla elde edilen R_i -V eğrileri

Arayüzey durumlarının metal ya da yarıiletken ile dengede olup olmadığını arayüzey tabaka kalınlığı belirler. Eğer arayüzey tabakanın kalınlığı 30 Å'dan küçük ise arayüzey durumları metal ile dengede ve büyük ise yarıiletkenle dengede olurlar. Çalışmamızda hazırlanan Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotlarda arayüzey tabakasının (P3HT) kalınlığı 59,3 Å olduğu için arayüzey durumları yarıiletkenle dengede olduğunu

söyleyebiliriz. Bu arayüzey durumları ile yarıiletken arasında yük geçişlerinin olduğunu gösterir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği voltaj ile değiştiği için etkin engel yüksekliği Φ_e aşağıdaki gibi ifade edilebilir [32, 170, 171].

$$\Phi_e = \Phi_{Bo} + \beta(V - IR_s) = \Phi_{Bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)(V - IR_s) \tag{6.7}$$

β, engel yüksekliğinin voltaj ile değişim katsayısıdır. Arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) dağılım profili, doğru ön-gerilim *I-V* ölçümlerinden enerjinin (E_c-E_{ss}) bir fonksiyonu olarak hem idealite faktörü n(V) hem Φ_e' nin gerilime bağlı değeri dikkate alınarak elde edilebilir.

Arayüzey durumları yarıiletken ile dengede iken MIS tipi Schottky engel diyotlar için, idealite faktörü *n* değeri 1'den büyüktür ve *n*'in voltaja bağımlı ifadesi [32, 172];

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i}\left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V)\right] \tag{6.8}$$

şeklinde verilir. Nss'lerin yoğunluğu ifadesi Card ve Rhoderick [32] tarafından elde edilen Eş. 6.9 ile verilir:

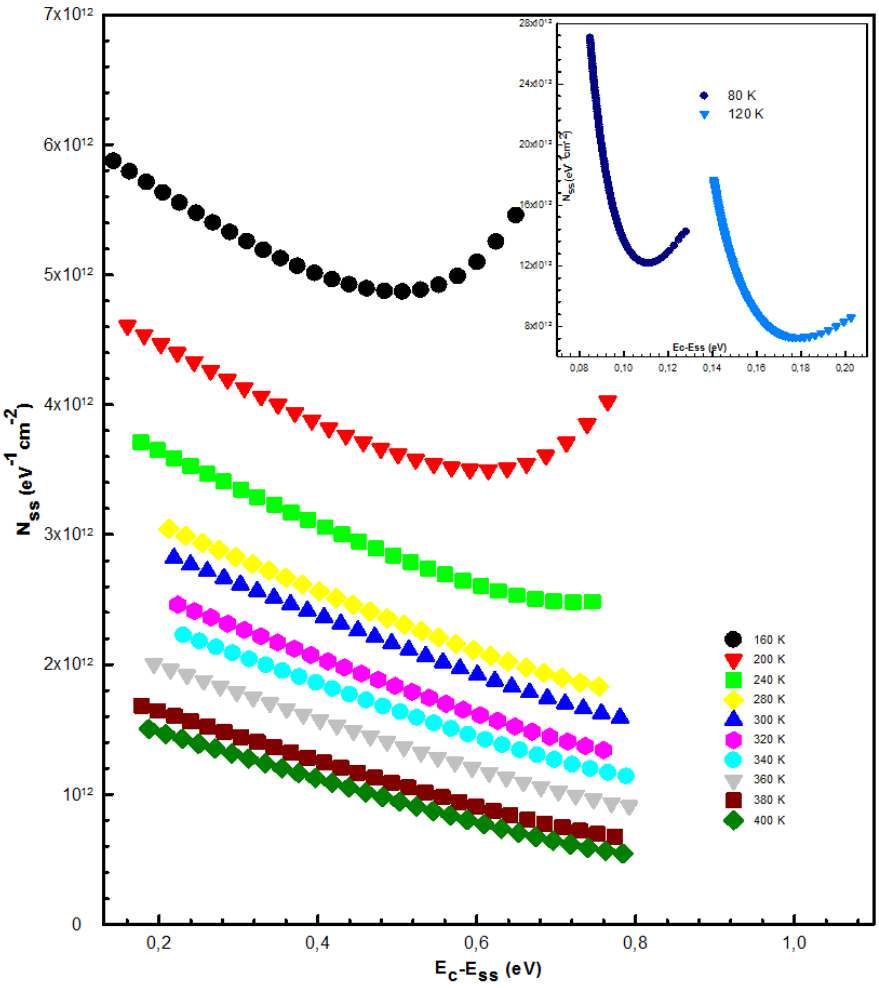
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q}\left[\frac{\varepsilon_i}{d_i}(n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D}\right] \tag{6.9}$$

verilmiştir. Burada ε_s (=11,8ε_o) yarıiletkenin ve ε_i (=4ε_o) arayüzey tabakanın dielektrik sabitleri ve ε_o boşluğun geçirgenliğidir. W_D tükenim bölgesinin genişliği ve d_i ise arayüzey yalıtkan tabakanın kalınlığıdır. Arayüzey durumlarının enerjisi E_{ss} n-tipi yarıiletkenler için, yarıiletkenin yüzeyinde iletim bandının alt kenarı ile yasak enerji bandının ortası arasındadır. E_{ss} (N_{ss}'lerin enerji seviyesi) ve E_c'deki seviyeler arasındaki ilişki [165, 173];

$$E_c - E_{ss} = q\left[\Phi_e - (V - IR_s)\right] \tag{6.10}$$

şeklinde verilir.

MPS tipi Schottky engel diyotları için N_{ss}'lerin enerji yoğunluk dağılımı Eş 6.9 ve 6.10 kullanılarak elde edildi. Şekil 6.4'de, N_{ss} değerlerinin iletim bandının alt sınırından yarıiletkenin yasak enerji aralığının ortasına doğru azalmakta olduğu ve sıcaklık arttıkça azaldığı açıkça görülmektedir. 80 ve 120 K sıcaklıklarında N_{ss} değerleri 160-400 K sıcaklık aralığındaki değerlerden daha yüksek olduğu için Şekil 6.3'de ayrıca gösterilmiştir. Şekil 6.4'de görüldüğü gibi azalan N_{ss} değerleri bir minumumdan geçerek yaklaşık olarak U şeklinde davranış göstermektedir. Bu davranış arayüzey durumlarını genelde verici (donor) tipi olduğunu göstermekte ve yasak enerji aralığının ortasından sonra ise alıcı (acceptor) tipi arayüzey durumlarının katkısı etkin olmaktadır. P3HT organik polimer arayüzeyin verici (donor) olduğunu gösteren bir çok çalışma literatürde mevcuttur [41, 93, 174].



Şekil 6.4. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için farklı sıcaklıklarda N_{ss}-$(E_c$-$E_{ss})$ eğrileri

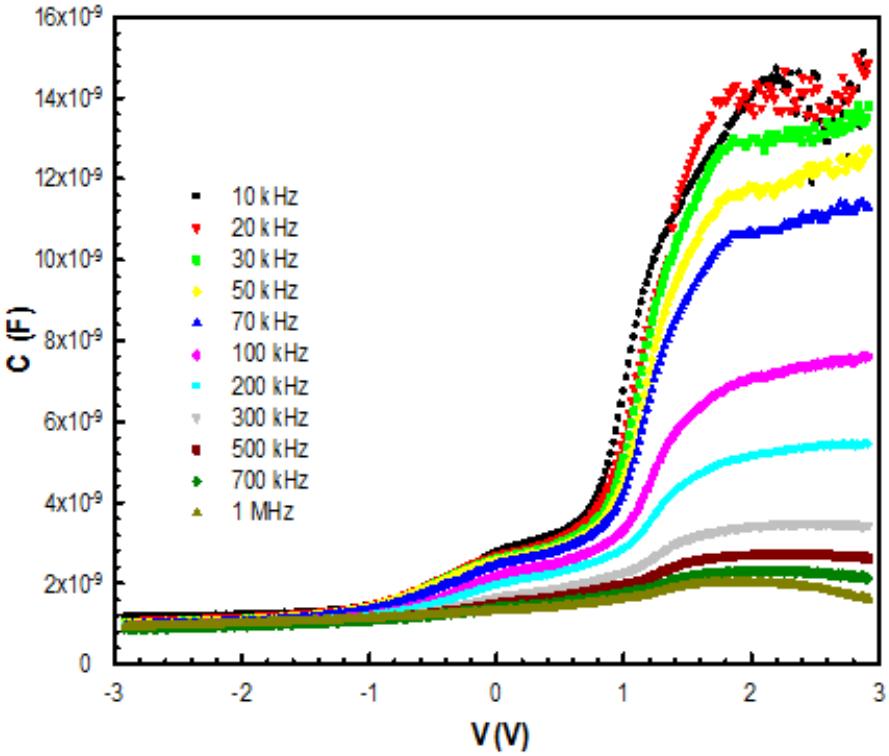
Arayüzey durum yoğunluğu grafiğinde N_{ss} değerlerindeki bu azalma, P3HT arayüzeyindeki durumların sıcaklık etkisiyle moleküler yeniden yapılanma ve düzenlenmesine ya da sıcaklık arttıkça yeteri kadar enerji kazanan yük taşıyıcılarının tuzaklardan kurtulmasına atfedilebilir. Arayüzey durumları nümunenin elektriksel parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Değerlerin mertebe olarak 10^{12} ($eV^{-1}cm^{-2}$) civarında çıkması literatürle uyum içinde olduğunu gösterir.

7. KAPASİTANS-VOLTAJ (C-V) VE İLETKENLİK-VOLTAJ (G/ω-V) KARAKTERİSTİKLERİ

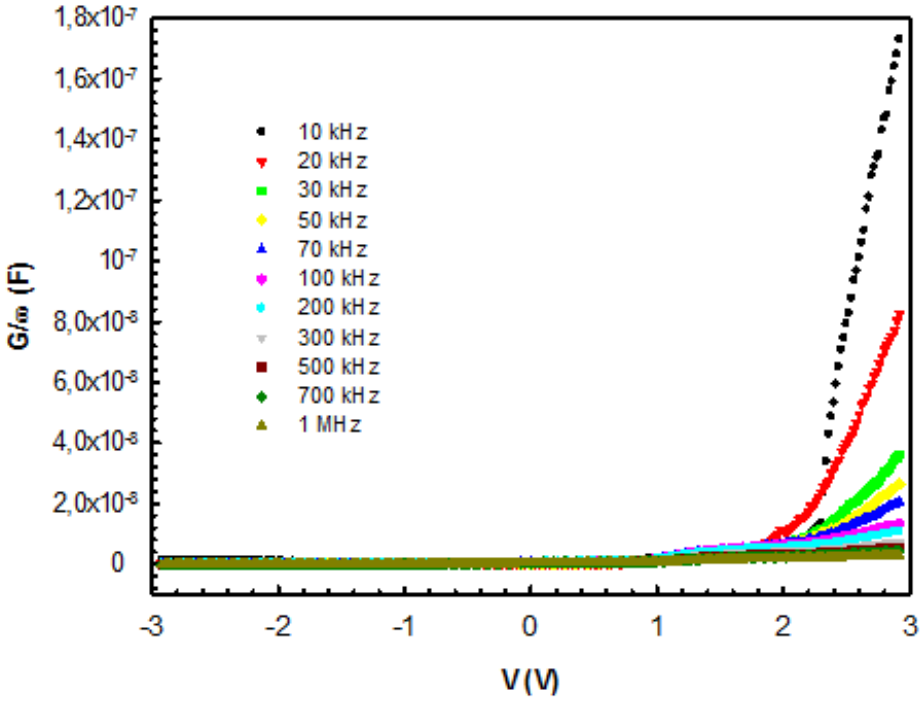
7.1 Frekansa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristikleri

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotlarının oda sıcaklığında, -3 V ve +3 V aralığında ve geniş frekans aralığında (10 kHz-1 MHz) elde edilen deneysel C-V ve G/ω-V ölçümleri HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile yapılmıştır. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında sırasıyla deneysel C-V ve G/ω-V karakteristikleri Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de gösterilmektedir. MIS/MOS diyotlarda olduğu gibi C-V eğrileri terslenim-tüketim-yığılma bölgelerine sahiptir. Şekil 7.1 ve 7.2'den görüldüğü gibi diyotun C ve G/ω değerleri frekansa oldukça bağlı olduğundan özellikle tüketim ve yığılma bölgesinde frekansın etkisi daha belirgindir. C ve G/ω değerleri yeterince küçük negatif voltajlarda yani terslenim bölgesinde (-3 V ile 0 V arasında) hemen hemen sabit kalırken tüketim ve yığılma bölgelerinde frekansın ve gerilimin artmasıyla artmaktadır. Düşük frekanslardaki kapasitans büyük iken, yüksek frekanslara doğru gidildikçe doğru beslem durumundaki kapasite azalmaktadır. Kuvvetli yığılma bölgesinde gördüğümüz bükülme ise seri direncin varlığına ve büyüklüğüne atfedilebilir. Yüksek frekanslara doğru gidildikçe daha düşük C ve G/ω değerleri gözlenmesi arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilebilir.

MPS doğrultucu kontağın kapasitansı, Eş. 2.46 ile verilmektedir. Schottky diyotların C-V verilerini incelemek ve diyodun bazı elektriksel parametrelerini hesaplamak için ters beslem C^{-2}-V eğrilerinden yararlanılabilir. Au/P3HT/n-Si diyotun farklı frekanslardaki C-V ölçümlerinden yararlanılarak elde edilen C^{-2}-V eğrisi Şekil 7.3'de verildi. C^{-2}-V eğrilerinden difüzyon potansiyeli (V_D), verici konsantrasyonu (N_D), fermi enerji seviyesi (E_F), engel yüksekliği (Φ_B) gibi parametreler elde edilmiştir. C^{-2}-V grafiğinin ters beslemde lineer kısmın eğiminden diyodun verici konsantrasyonu ve yatayda kestiği noktadan da difüzyon potansiyel değeri elde edilmiştir.



Şekil 7.1. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ölçülen C-V karakteristikleri



Şekil 7.2. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ölçülen G/ω-V karakteristikleri

Verici konsantrasyonuna bağlı olarak fermi enerji seviyesi elde edilmiştir. C-V ölçümlerinde C^{-2}-V ilişkisi şu şekilde verilir [175, 176]:

$$C^{-2} = \frac{2}{q\varepsilon_s A^2 N_D}(V_o + V) \tag{7.1}$$

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

$$V_D = V_0 + \frac{kT}{q} \tag{7.2}$$

Hesaplanan difüzyon potansiyelleri her bir frekans değeri için Çizelge 7.1'de verilmiştir. Ölçüm yapılan her sıcaklık için tüketim tabakasının genişliği (W_D),

$$W \quad \sqrt{} \tag{7.3}$$

Burada V_D difüzyon potansiyeli, N_D verici yoğunluğudur. Çeşitli frekanslar için tüketim takasının değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Engel yüksekliği değerleri Şekil 7.3'den yararlanılarak elde edilebilir.

$$\Phi_B(C-V) = V_D + E_F - \Delta\Phi_B \tag{7.4}$$

Burada E_F, bulk Fermi seviyesi ile iletkenlik band kenarı arasındaki enerji farkıdır. $\Delta\Phi_B$ imaj kuvveti engel düşmesidir [16, 20, 26, 31, 34-36, 177] ve Eş 7.5'deki gibi verilir,

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\varepsilon_s\varepsilon_o}\right]^{1/2} \tag{7.5}$$

E_m ise elektrik alandır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_o}{\varepsilon_s \varepsilon_o} \right]^{1/2} \tag{7.6}$$

E_F enerjisi ise aşağıdaki eşitlikten hesaplandı.

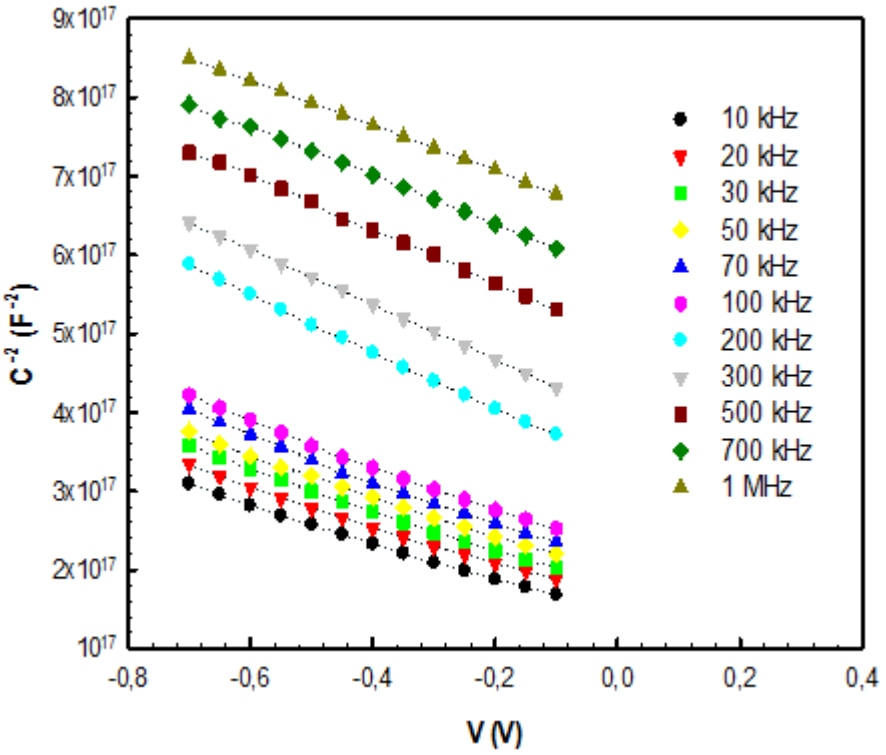
$$E_F = \frac{kT}{q} Ln(N_C / N_D) \tag{7.7}$$

Burada N_C, n-Si için iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve

$$N_C = 4{,}82x10^{15} T^{3/2} (m_e^* / m_o)^{3/2} \quad \text{ve} \quad (m_e^* / m_o) = 0{,}98 \tag{7.8}$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte m_e* elektronların etkin kütlesi ve m_o elektronun durgun kütlesidir. V_D, N_D, W_D, Φ_B(C-V) ve E_F değerleri C^{-2}-V eğrilerinden belirlendi ve Çizelge 7.1'de sırasıyla verildi. C^{-2}-V eğrilerinden elde edilen bariyer yüksekliği değerleri Au/P3HT/n-Si için I-V sonuçlarından elde edilenler ile son derece uyumludur. Polimer yüzeyli Schottky diyotlarda polimer ve ara yüzeyde yasak enerji aralığına karşılık gelen durumlar oluşmaktadır. Bu da kapasitansın değerini yükseltmektedir.

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotu için oda sıcaklığındaki I-V ve C-V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği (Φ_B) değerlerinin birbirinden farklı olması önemli bir durumdur. I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri Çizelge 6.1'de ve C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri de Çizelge 7.1'de verildi. C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri I-V ölçümlerinden elde edilenlerden daha büyüktür. I-V ve C-V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerindeki farklılıklar bir yalıtkan tabakanın varlığına veya metal ile yarıiletken arayüzeyindeki yüklerin oluşumuna, derin kirlilik seviyelerine, imaj kuvvet engel düşmesine ve kenar sızıntı akımlarının varlığına atfedilebilir [178]. Aynı zamanda bunlara ek olarak I-V ve C-V karakteristiklerinden elde edilen Schottky engel yüksekliği değerlerinin farklı olması Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotunun arayüzeylerindeki homojensizliklerden (arayüzey tabakasının oluşumu, arayüzey tabaka kalınlığının çeşitliliği ve arayüzey yüklerinin dağılımı) kaynaklanan Schottky engel yüksekliği dağılımı ile açıklanabilir [67].



Şekil 7.3. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ölçülen C^{-2}-V eğrileri

Au/P3HT/n-Si diyotta düşük frekanslarda kapasitans değerinin frekans artarken azaldığı görülmüştür. Bu durum düşük frekanslarda a.c. sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini göstermektedir. Ayrıca yeterince yüksek frekansta alınan C-V ölçümleri ara yüzeydeki yüklerin a.c. sinyallerini takip edemediğini göstermektedir. Diyotun engel yüksekliği ayrıca ters besleme C^{-2}-V eğrisinden de hesaplanmıştır. Bu yöntemle hesaplanan değerler Çizelge 7.1'de verilmiştir Yapılan hesaplamalar sonunda C^{-2}-V eğrisinden hesaplanan değerlerin ln(I)-V eğrisinden hesaplanan değerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durum tükenim bölgesinin genişliği uzay yük bölgesinin derinlerine yerleşen arayüzey kusurları ile değişse bile kapasitansın tükenim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas olmamasına, ölçülen engel yüksekliği değerinin engel yüksekliği dağılımının ortalama değeri olmasına ancak buna karşın ara yüzeyden geçen akımın engel yüksekliğine üstel olarak bağlı olmasına ve ara yüzey dağılımına karşı hassas olmasına dayandırılabilir.

Çizelge 7.1. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun C^{-2}-V eğrilerinden hesaplanmış bazı temel diyot parametreleri

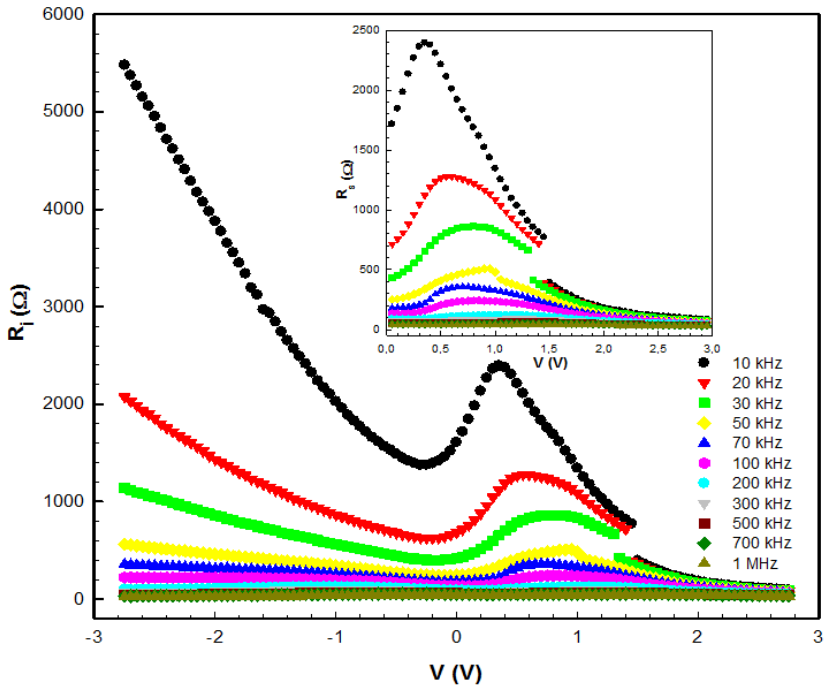
f (kHz)	V_D (V)	N_D x10^{16} (cm^{-3})	W_D x10^{-5} (cm)	E_F (eV)	Φ_B (eV)
10	0,0	6,01	0,38	0,155	0,20
20	0,12	5,78	0,52	0,156	0,25
30	0,13	5,44	0,56	0,157	0,26
50	0,17	5,30	0,65	0,158	0,30
70	0,29	5,08	0,86	0,159	0,42
100	0,31	4,86	0,91	0,160	0,44
200	0,34	3,63	1,11	0,168	0,48
300	0,47	3,60	1,30	0,168	0,60
500	0,51	3,65	1,35	0,168	0,65
700	0,58	3,89	1,39	0,166	0,71
1000	0,60	4,14	1,37	0,164	0,73

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotunun frekansa bağlı Rs değerleri, C-V ve G/ω-V eğrilerinden yararlanılarak admittans tekniği kulanılarak hesaplandı [35]:

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \tag{7.9}$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılım (strong accumulation) bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. MIS ve MPS tipi Schottky engel diyotlarında seri direnç ve arayüzey durumları voltaja bağlı kapasitans ve iletkenlik değişimlerinden gözlenir. Gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken diyotun direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve yeterince ters gerilimlerde (terslenim bölgesinde) sonsuza gider. Eş. 7.9 kullanılarak frekansa bağlı seri direnç değerleri hesaplandı ve Şekil 7.4'de gösterilmiştir. Şekil 7.4'de Rs değerleri düşük frekanslarda pikler vermekte frekans arttıkça bu pikler kaybolmaktadır. Bu durum piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının etkisine atfedilebilir. Çünkü yarıiletken ile dengede olan Nss'ler düşük frekanslarda a.c. sinyalini kolaylıkla takip edebilir ve mevcut kapasitansa ilave bir katkı getirirler. Bu nedenle Rs

değerinin yeterince yüksek frekanslarda (f≥500 kHz) elde edilen C-V ve G/ω-V eğrilerinden hesaplanması, değerin güvenilirliği ve doğruluğu açısından gereklidir. Arayüzey durumlarının C_{ma} değerlerine düşük frekanslardaki katkısından dolayı seri direnç normal değerinden büyük çıkmaktadır. P3HT arayüzey tabakasının homojensizliği ve kalınlığı R_s'nin değerinin yüksek olmasının diğer nedenleridir.



Şekil 7.4. Au/P3HT/n-Si yapının 10 kHz-1 MHz aralığında frekans değerleri için direnç-voltaj (R_i -V) eğrileri

Arayüzey durumlarının hesaplanmasında Hill-Coleman metodu kullanışlı bir metottur [179]. Bu sebeple çalışmamızda Au/P3HT/n-Si yapının arayüzey durumları (Nss), Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de verilen farklı frekanslar için ölçülen C-V ve G/ω-V değerlerini dikkate alarak Hill-Coleman metodu yardımıyla elde edilerek Şekil 7.5 ve Çizelge 7.2'de verildi. Bu metoda göre, arayüzey durum yoğunluğunu veren bağıntı;

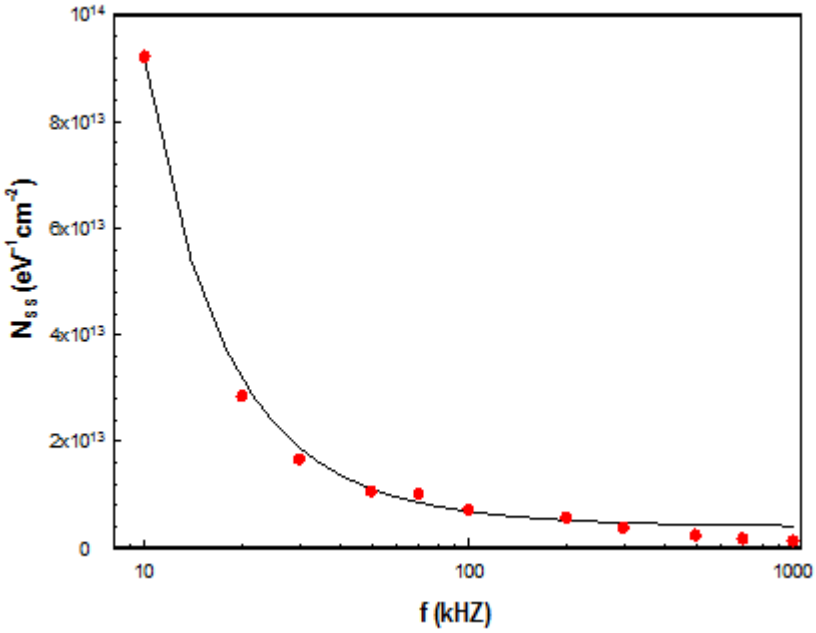
$$N_{ss} = \frac{2}{qA}\frac{(G/\omega)_{\max}}{\left[\left((G/\omega)_{\max}/C_{ox}\right)^2 + \left(1 - C_m/C_{ox}\right)^2\right]} \tag{7.10}$$

Burada A, diyotun doğrultucu kontak alanı (=0,0314 cm^2), ω açısal frekans ($=2\pi f$), C_{ox} arayüzey tabakanın kapasitansı, C_m ve $(G/\omega)_m$ ise C-V eğrilerindeki maksimum pik değerlerinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Çizelge 7.2'de görüldüğü gibi,

frekansın arttırılmasıyla, kapasitansın (C_m) pik değeri ve buna karşılık gelen $(G/\omega)_{max}$ değeri azalmaktadır. Bu deneysel sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile iyi bir uyum içindedir [175, 180, 181].

Çizelge 7.2. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun ~0 V'da frekansa bağlı arayüzey durumları ve elde edilen C_m ve G_m/ω değerleri

f (kHz)	C_m x 10^{-9} (F)	G_m/ω x 10^{-9} (F)	N_{SS} ($eV^{-1}.cm^{-2}$)
10	3,34	7,11	$9{,}21x10^{13}$
20	3,14	3,62	$2{,}84\ x10^{13}$
30	3,05	2,52	$1{,}66\ x10^{13}$
50	2,99	1,80	$1{,}06\ x10^{13}$
70	3,10	2,42	$1{,}75\ x10^{13}$
100	3,01	1,88	$1{,}14\ x10^{13}$
200	2,77	1,40	$5{,}60\ x10^{12}$
300	2,56	1,26	$3{,}74\ x10^{12}$
500	2,21	1,17	$2{,}27\ x10^{12}$
700	1,96	1,10	$1{,}65\ x10^{12}$
1000	1,75	1,00	$1{,}24\ x10^{12}$



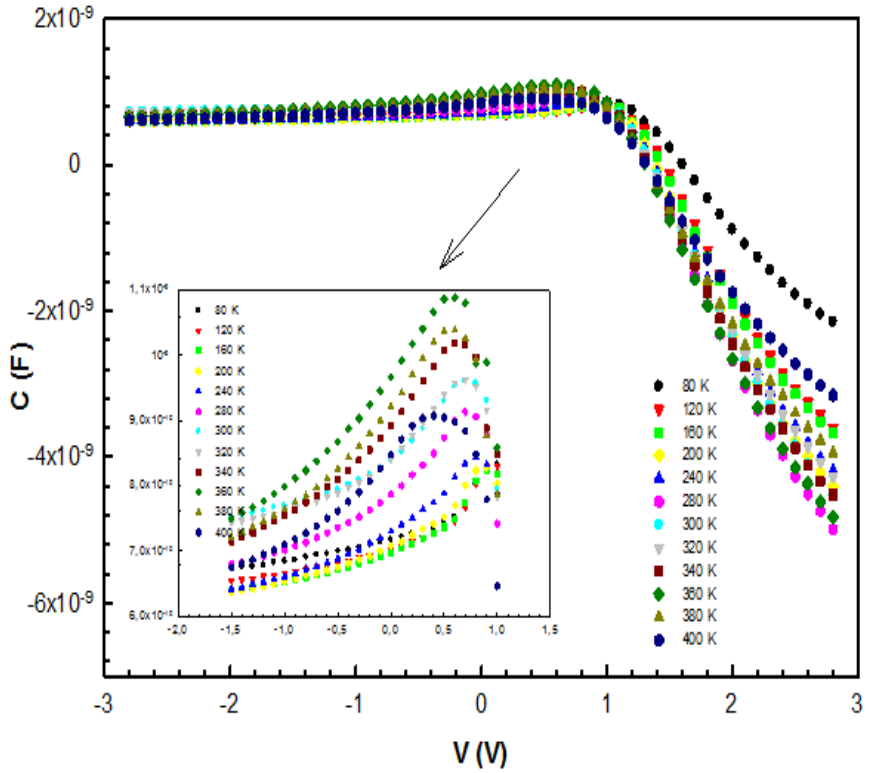
Şekil 7.5. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için arayüzey durumlarının frekansa bağımlılığı

7.2. Sıcaklığa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) Karakteristikleri

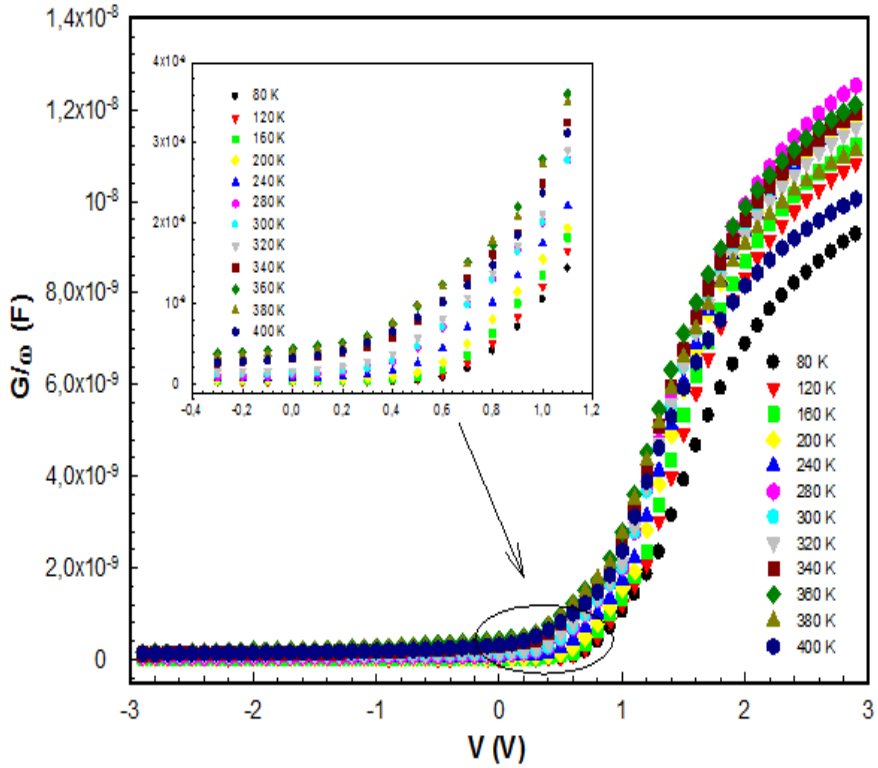
Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotunun sıcaklığa bağlı *C–V* ölçümleri 80–400K sıcaklık aralığında, 1 MHz frekansta, ±3 V aralığında, Hewlet Packart 4192 A empedans analizörü cihazı ile alınmıştır. Ölçümler, arayüzey durumlarının C-V ve G/ω-V karakteristiklerine etkisini minimuma çekmek için f=1MHz gibi yüksek frekansta gerçekleştirilmiştir. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotu için sıcaklığa bağlı *C–V* eğrisi ve *G/ω-V* eğrisi sırasıyla Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de verilmiştir.

Şekil 7.6 ve 7.7'den görüldüğü üzere C-V ve G/ω-V eğrileri yığılma, tüketim ve tersinim bölgelerine sahiptir. Şekil 7.6'da görüldüğü gibi C'nin değeri uygulanan voltaj ile artmakta ve pozitif voltaj bölgesinde yani doğru ön-gerilim bölgesinde bir pik vermektedir. Tersinim bölgesindeki (-1,5V<V<1V) C-V değerleri Şekil 7.6'nın içinde ayrıca verilmiştir. Bu pik davranışı literatürdeki araştırmalar baz alınarak sıcaklık etkisiyle arayüzey durumlarının yeniden yapılanması ve düzenlenmesine ve ayrıca seri direnç etkisine atfedilebilir [182-185]. Yapılan birçok çalışmada bu pik davranışının sadece ara yüzeye atfedilemeyeceğini ve omik kontakta oluşan kontak direncine, azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna da bağlı olduğunu göstermiştir [186-189].

Şekil 7.6 incelendiğinde artan voltaj değerlerine karşılık kapasitansın hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir hatta yaklaşık 1 V değerinden itibaren kapasitans değeri negatif değerler almaktadır. Bu durum artan ters beslem gerilimiyle deplasyon tabakasının artmasına ve Eş. 2.46'ya göre deplasyon kapasitesinin azalmasına atfedilebilir.
Yarıiletkendeki termal olarak oluşturulabilen taşıyıcılar yani elektronlar ya da holler uygulanan doğru ve ters ön gerilim altında artan sıcaklık ile artar. Artan sıcaklıkla birlikte tüketim ve yığılım bölgesinde yük depolanması C'nin değerlerindeki değişimi açıklar (C=Q/V). C'nin aldığı negatif değerler literatüre "Negatif Kapasitans (NC)" tanımlaması ile girmiştir. Kapasitansın yığılma bölgesinde negatife yönelimi sadece direnç ve ara-yüzey durumlarının varlığı ile tam olarak açıklanamaz. Ancak tüketim bölgesinde C'nin bir minimumdan geçmesi negatif diferansiyel kapasitans olarak isimlendirilir.



Şekil 7.6. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky diyotunun 1 MHz frekansta 80-400 K sıcaklık aralığındaki C-V karakteristikleri.



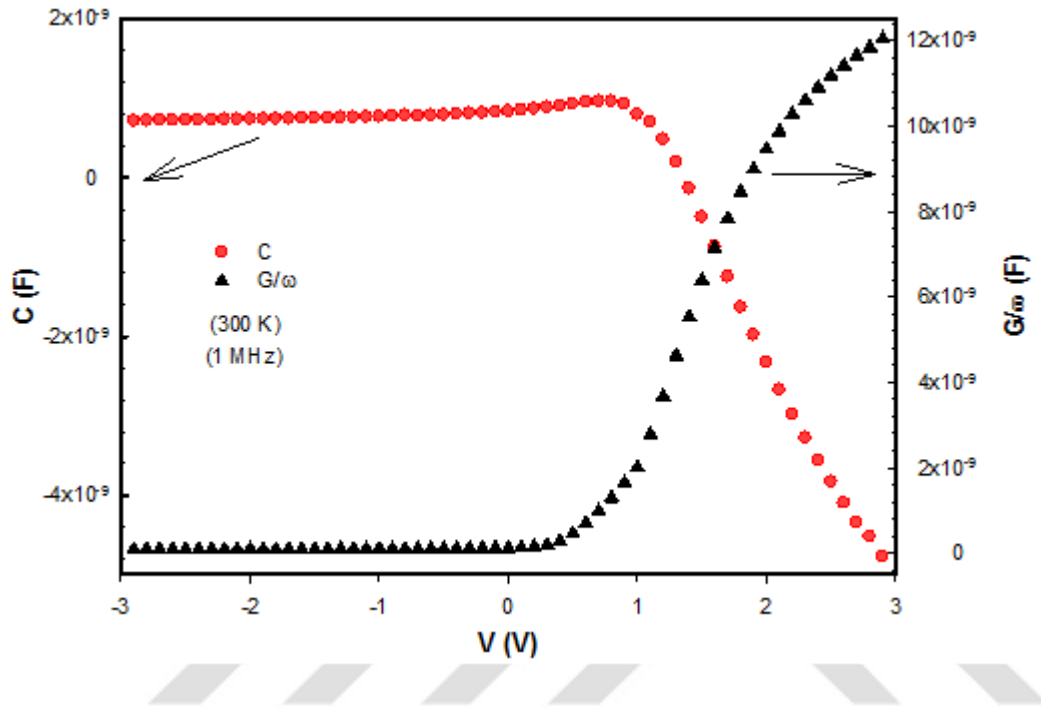
Şekil 7.7. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky diyotunun 1 MHz frekansta 80-400 K sıcaklık aralığındaki G/ω-V karakteristikleri.

Negatif kapasitans metal/yarıiletken, metal/yalıtkan/yarıiletken yapılar [182-184, 188-191], p-n eklemler [187], fotodedektörler [192-194], ışık yayan diyotlar [195, 196], fotovoltaikler ve organik polimer içeren yapılar [185, 186, 197-200] ve bazı dielektrik ve ferroelektrik malzemeler [201, 202] gibi birçok yapıyı içeren çalışmalara konu olmuştur. Uzun süre literatürde negatif kapasitans ifadesi yer almamıştır, bunun yerine "olağandışı", "anormal" davranış olarak adlandırılmıştır [182-184]. Şekil 7.6'da 80-400 K sıcaklık aralığındaki sıcaklık değerleri için negatif kapasitans (NC) değerleri görülmektedir. Diğer yandan Şekil 7.7'de görüldüğü gibi G/ω değerleri, C değerlerinin aksine terslenim ve tükenim bölgelerinde artan voltajla artmaktadır. Kapasitansın negatife gitme voltajından sonra diyot indüktif davranış gösterir. Zaten negatif kapasitans teriminin anlamı malzemenin indüktif davranış sergiliyor olmasıdır. Kapasitans ve iletkenlik değerlerinin uygulanan voltaja ve sıcaklığa bağlı olan bu davranışları materyalin indüktif özelliği olduğunu gösterir. Arayüzey tuzak durumlarından salınan yükün yeniden yakalanması indüktif davranış olarak tanımlanır. NC'nin gözlenmesi besleme voltajında meydana gelen bir artmanın elektrotlardaki yüklerde bir azalma oluşturduğunu doğrulaması açısından da önemlidir [183, 184, 189].

Negatif kapasitans sadece azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna bağlı olarak doğru ön gerilim voltajı uygulanan bölgede görüldüğü ileri sürülür [182, 184]. İleri voltaj bölgesindeki C'nin negatif kapasitans davranışını Wu ve arkadaşları [182] iyonizasyon etkisi sebebiyle metal/yarıiletken arayüzeyinde yük kayıpları ile açıklamıştır. Jones ve arkadaşları [189] negatif kapasitansın metal/yarıiletken arayüzeyinde oluşan dipolün serbest elektron yüküyle birleşen hollerin enjeksiyonundan kaynaklandığını söylemiştir. Böylece oluşan dipol, arayüzeyin her iki tarafındaki iyonizasyon enerjisinin çok farklı olmasını sağlar [194]. Negatif kapasitansın diğer nedenleri ise yüksek dirençli malzemelerden kaynaklanması [189], iyonizasyon etkisi ile arayüzeydeki yük kayıpları [182], seri direnç etkisi [185], metal/yarıiletken arasındaki arayüzeylerin varlığı [194], veya hem seri direnç etkisi hem de arayüzey durumlarının [182, 203] etkili olduğunu ileri süren çalışmalar olmuştur.

C ve G/ω değişimini karşılaştırabilmek için oda sıcaklığında Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotu için C ve G/ω grafikleri birlikte çizildi ve Şekil 7.8'de gösterildi. Şekil 7.8'de C değerlerinin azalmasına karşılık G/ω değerlerinin artan voltajla arttığı ve yığılma

bölgesinde G/ω'nın maksimum değerine C'nin minumum değeri karşılık geldiği görülmektedir. C ve G/ω'nın kesişmesi bize aygıtın indüktif davranışı göstermesinin belirtisidir.



Şekil 7.8. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD için sırasıyla C-V ve G/ω-V karakteristiklerinin bir arada çizimi

Kapasitanstaki bu azalma metal-yarıiletken ara-yüzeyinde yüklerin sıcaklıkla birlikte polarize olduğunu ve arayüzeydeki lokalize tuzaklarda bulunan yüklerin tuzaklardan kurtulacak kadar enerji kazanmasına atfedilebilir. Arayüzeyde bir dipol etkisine sebep olan metal ve yarıiletken arasındaki lokalize ara-yüzey durumlarının varlığı bilinmektedir. İleri ön-gerilim altında, uygulanan voltajın büyük bir kısmı yarıiletken, malzemenin seri direnci ve dipol ara-yüzey tarafından paylaşılmaktadır [182, 184]. Şekil 7.8'de görüldüğü gibi C-G/ω arasıdaki bu ilişki, yüklerin çoğalması ve polarizasyonun artmasına atfedilebilir.

Seri direnç değerini belirlemek için literatürde çeşitli metotlar kulanılmıştır. MPS tipi Schottky diyotlarda gerçek seri direnci elde etmek için en çok tercih edilen metot Nicollian ve Brews [35] tarafından geliştirilen admitans metodudur. Yüksek frekanslarda, paralel RC devresini kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli yığılım altındaki eşdeğer devrenin toplam admitansı ve empedansı ($Y_{ma}=1/Z_{ma}$),

$$Y_{ma} = 1/Z_{ma} = G_{ma} + j\omega C_{ma} \tag{7.11}$$

eşitliğiyle verilir. Gerçek seri direnç (R_s) değerleri, Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyot için verilen *C-V* ve *G/ω-V* eğrilerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki değerlerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir [35]:

$$R_S = \frac{G_{ma}}{(G_{ma}{}^2 + C_{ma}^2 w^2)} \tag{7.12}$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Kuvvetli yığılım bölgesindeki kapasitans (C_{ma}) ile R_s ve yalıtkan tabakanın kapasitans (C_{ox}) arasındaki ilişki,

$$C_{ma} = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{ox}^2)} \tag{7.13}$$

eşitliği ile verilir. Eş. 7.12 ve Eş. 7.13 kullanılarak C_{ox} değeri,

$$C_{ox} = C_{ma}\left[1 + (\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}})^2\right] = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 A}{d_{ox}} \tag{7.14}$$

şekline dönüştürülebilir. Burada ε_i=4ε_o [41, 149] ve ε_o (=8,85x10^{-14} F/cm) sırasıyla arayüzey tabaka ve boşluğun geçirgenlik sabitleridir.

Son olarak, düzeltilmiş admitansın imajiner ve gerçel kısmını (Y_c=G_c+$j\omega C_c$) karşılaştırarak düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve kondüktans (G_c) değerleri ise,

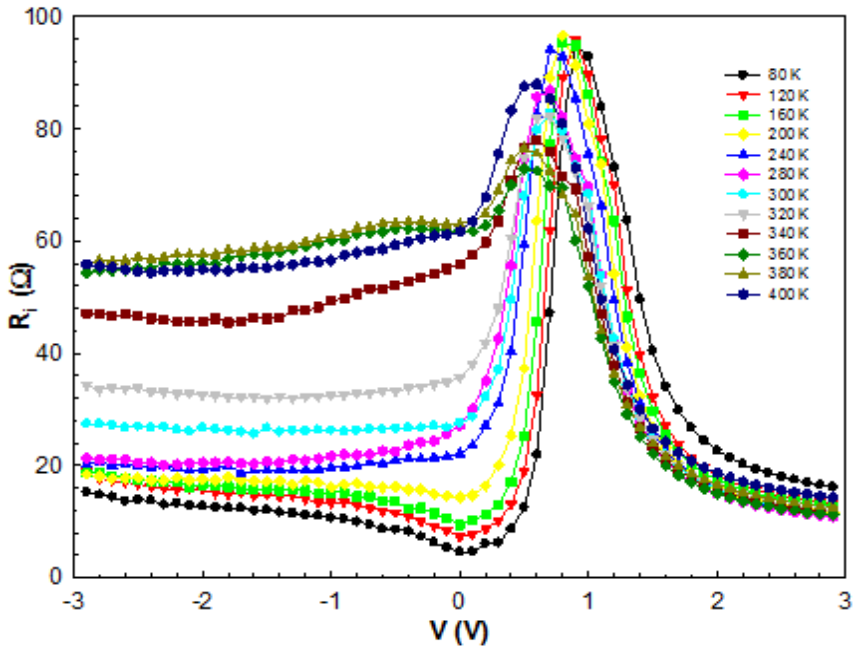
$$C_c = \frac{\left[G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2\right] C_{ma}}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \tag{7.15}$$

$$G_c = \frac{\left[G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2\right] a}{a^2 + (\omega C_{ma})^2} \tag{7.16}$$

eşitliklerinden elde edilebilir. Burada "α" parametresi aşağıdaki şekilde verilir:

$$a = G_{ma} - \left[G_{ma}^2 + \left(\omega C_{ma}\right)^2\right] R_s \qquad (7.17)$$

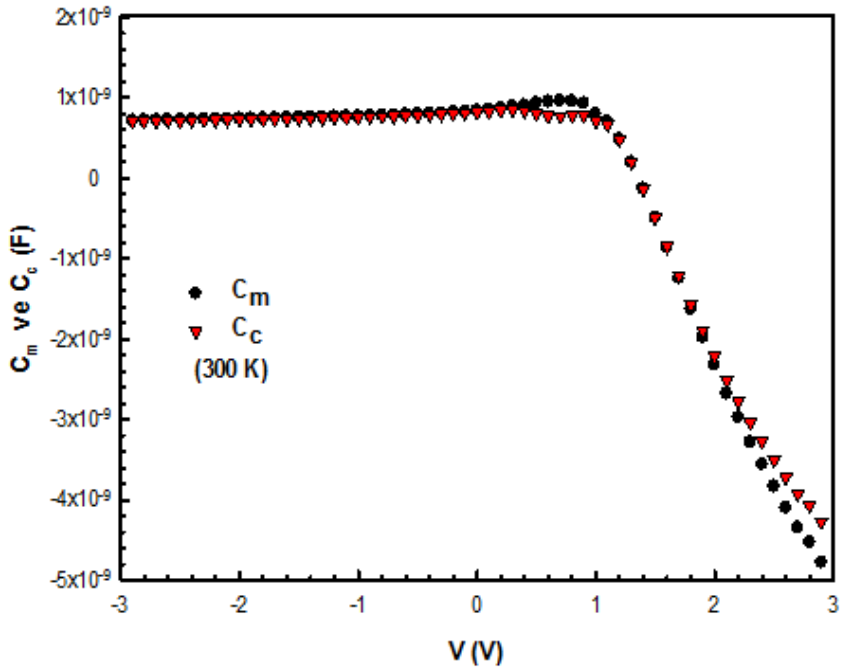
Yarıiletken diyotlarda gerçek seri direnç dediğimiz R_S değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve ters gerilimlerde ise sonsuza doğru gider. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD için sıcaklığa bağlı seri direnç grafiği Şekil 7.9'da verildi. Şekil 7.9'dan görüldüğü gibi R_s değerleri her sıcaklık için pik (yaklaşık 1 V civarında) vermekte ve sıcaklık arttıkça bu pikin büyüklüğü değişmektedir. Ayrıca R_S pikleri sıcaklık arttıkça pozitif ön-gerilimden negatif ön-gerilime (tersinim bölgesine) doğru kaymaktadır. Bu kayma arayüzeydeki tuzak yüklerinin tuzaklardan kaçmak için gerekli enerjiye sahip olabildiklerini gösterir. İdeal olmayan Schottky engel diyotları elektriksel karakteristikleri sebebiyle R_S önemli bir parametredir.



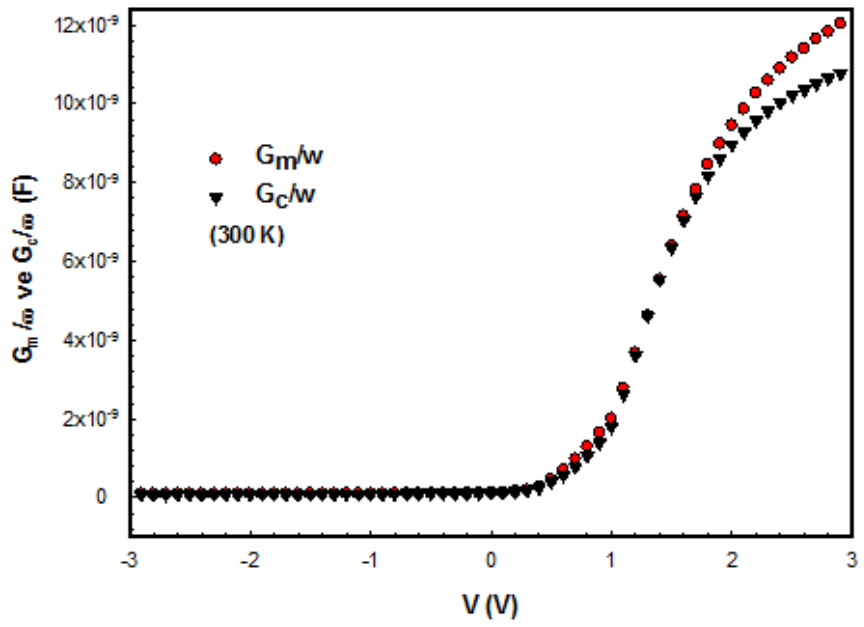
Şekil 7.9. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyot için farklı sıcaklıklarda ve 1 MHz'de direncin (R_i) değişimi

Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotu için 300 K'de gerçek C_c-V ve G_c/ω-V değerleri Eş. 7.16 ve Eş. 7.17 kulanılarak elde edildi ve düzeltilen kapasitans ve iletkenlik değerleri ile ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Düzeltme yapıldıktan sonra C_c'nin değeri her ne kadar aynı gibi görünse de fark yaratacak kadar dahi olsa artan voltajla artmıştır. Ölçülen

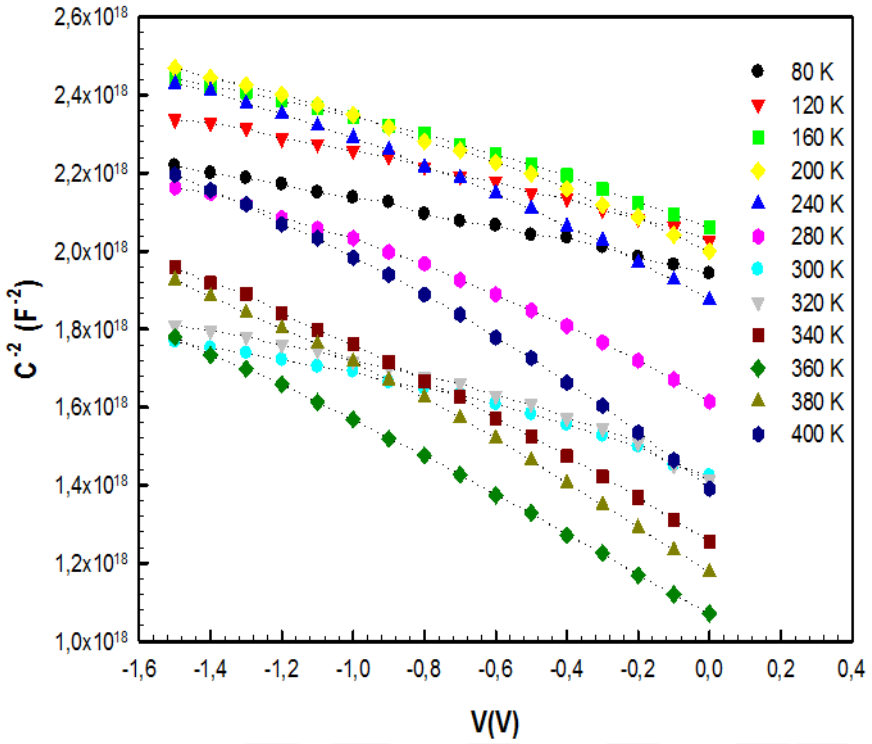
kapasitans (C_m) değerlerindeki negatiflik kısmen ortadan kalkmıştır. Rs'nin kapasitansın negatif davranması üzerine bir etkisi olduğunu göstermektedir. Diğer yandan yığılım bölgesinde G_c/ω-V nin düzeltilmiş değerleri tüm bölgelerde azalmaktadır.



Şekil.7.10. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların 1MHz'de T=300 K'de voltaja bağlı olarak ölçülen C_m-V ve düzeltilmiş Cc -V karakteristikleri



Şekil.7.11. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotların 1MHz'de T=300 K'de voltaja bağlı olarak ölçülen G_m/ω-V ve düzeltilmiş G_c/ω -V karakteristikleri



Şekil 7.12. Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD için 80-400 K aralığında ölçülen C^{-2}-V eğrileri

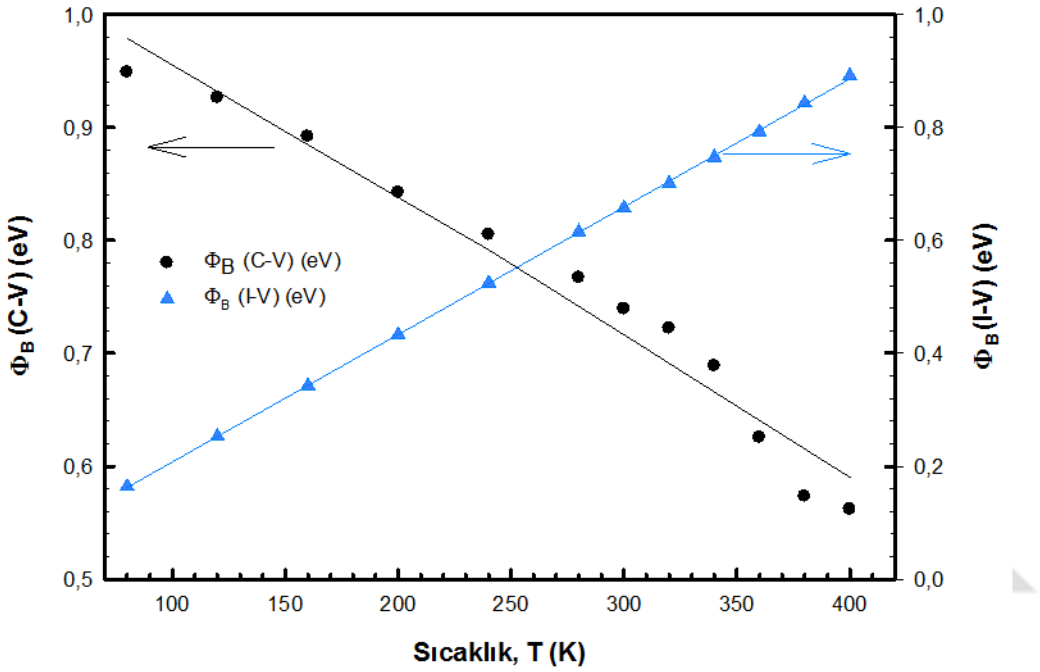
Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi SBD'un ters ön gerilim (negatif voltaj) bölgesindeki C^{-2}-V eğrilerinden yararlanarak engel yüksekliğinin homojen olmadığı durumlarda ortalama engel yüksekliği bulunabilir. Bu yüzden MPS tipi SBD'ların oda sıcaklığında negatif voltaj bölgesinde 1 MHz için C^{-2}-V eğrileri elde edildi ve Şekil 7.12'de verildi. Şekil 7.12'den görüldüğü gibi, bu eğriler geniş bir voltaj aralığında Schottky tipi diyotun oluşumunu gösteren bir lineer bölgeye sahiptir. MPS tipi SBD'lar için V_D, E_F, N_D ve Φ_B(C-V) gibi bazı elektriksel parametreleri negatif voltaj bölgesinde C^{-2}-V eğrilerindeki lineer bölgelerin eğiminden Eş 7.1'den Eş 7.7'e kadar olan eşitlikler kullanılarak elde edildi ve Çizelge 7.3'de verildi. Hesaplamalara bakıldığında artan sıcaklıkla V_D, N_D, W_D ve Φ_B (C-V) değerleri azalırken E_F artmaktadır. Aynı zamanda eğimdeki bu değişikliğin, arayüzeyde tuzaklanmış ve tuzaktan kurtulma süreleri oldukça uzun olan yüklerden kaynaklanması mümkündür. Elde edilen verilere bakıldığında metal-yarıiletken arayüzeyinde P3HT tabakasının kullanılması organik polimerlerin birçok malzemeye karşı alternatif olabileceğini ve Si tabanlı elektronik yapıların geliştirilmesi için organik arayüzey tabaka kullanımlarının değişik polimer katkılandırılmaları ile çeşitlendirilip önemini arttıracağını göstermektedir.

Çizelge 7.3. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun sıcaklığa bağlı C^{-2}-V eğrilerinden hesaplanmış bazı temel diyot parametreleri

T (K)	V_D (V)	N_D x10^{16} (cm^{-3})	W_D x10^{-5} (cm)	E_F (eV)	Φ_B (C-V) (eV)
80	0,94	7,10	1,32	0,04	0,94
120	0,89	6,26	1,37	0,06	0,92
160	0,84	5,52	1,41	0,08	0,89
200	0,77	5,49	1,35	0,10	0,84
240	0,73	5,02	1,37	0,14	0,80
280	0,63	4,92	1,30	0,15	0,74
300	0,63	4,26	1,03	0,16	0,74
320	0,60	3,91	1,03	0,18	0,72
340	0,37	3,56	1,39	0,19	0,68
360	0,27	2,82	1,43	0,21	0,62
380	0,25	2,99	1,28	0,22	0,57
400	0,15	2,88	1,24	0,23	0,56

Çizelge 7.3'de verilen değerlerden dikkat çekeceğimiz önemli bir parametre Φ_B, engel yüksekliğidir. Φ_B değerleri sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlıdır. Çizelge 7.3'de de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin azaldığı görülmektedir. I-V ölçümleri sonrasında hesaplanan Φ_B değerleri ile C-V ölçümlerinden hesaplanan Φ_B değerlerinin birbirinden farklı olduğunu gördük. Çizelge 6.1'de verilen I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri ile Çizelge 7.3'de verilen C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri birbirinden farklıdır. Bu durum Şekil 7.13'de net bir şekilde gösterilmektedir. I-V ve C-V metodlarından elde edilen engel yüksekliği değerlerindeki farklılıklar bir yalıtkan tabakanın varlığından veya M/S arayüzeyindeki yüklerin oluşumundan, derin kirlilik seviyelerinden, imaj kuvvet engel düşmesinden ve kenar sızıntı akımlarının varlığından dolayı olabilir [178]. Ara yüzey kompozisyonunun homojensizlikleri, arayüzey tabaka kalınlıkları ve arayüzey yüklerinin dağılımı da I-V ve C-V ölçümleri arasında farklılığa neden olabilir [204]. Tung'a göre ise bunlara ek olarak bu iki teknikten elde edilen Schottky engel yüksekliği değerlerinin farklı olması, Au/P3HT/n-Si diyotunun arayüzeyindeki homojensizliklerden (arayüzey tabakasının oluşumu, arayüzey tabaka kalınlığının çeşitliliği ve arayüzey yüklerinin dağılımı)

kaynaklanan Schottky engel yüksekliği dağılımı ile açıklanabilir [205]. Tüketim bölgesinin genişliği uzay yük bölgesinin derinlerine yerleşen arayüzey kusurları ile değişir ve C-V ölçümleri P3HT:Si arayüzeyindeki potansiyel dalgalanmalar, kusurlar ve deliklerden daha az etkilenir. Bu nedenle C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri daha güvenilir olacaktır.

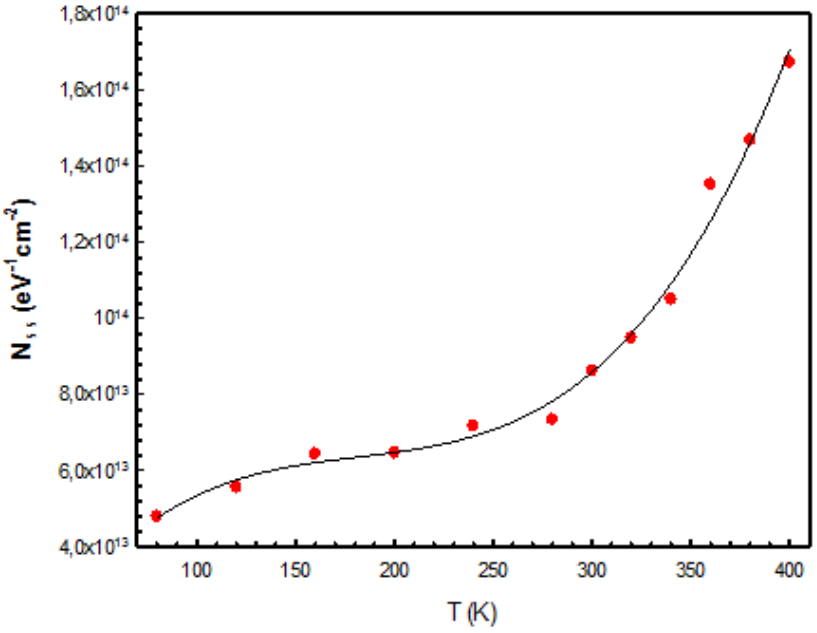


Şekil 7.13. Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyot için I-V ve C-V metotlarından elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi

Silisyumun yasak enerji aralığındaki arayüzey durumlarının hesaplanmasında Hill-Coleman metodu [179] kullanılabilir ve Eş. 7.18 ile ifade edilebilir:

$$N_{ss} = \frac{2}{qA}\left[\frac{(G/\omega)_{\max}}{\left((G/\omega)_{\max}/C_{ox}\right)^2 + \left(1 - C_m/C_{ox}\right)^2}\right] \tag{7.18}$$

Burada A, diyotun doğrultucu kontak alanı (=0,0314 cm^2), ω açısal frekans ($=2\pi f$), C_{ox} arayüzey tabakanın kapasitansı, C_m ve $(G/\omega)_m$ ise C-V eğrilerindeki maksimum değerlerinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir.



Şekil 7.14. Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyot için Hill Coleman metodu kullanılarak elde edilen sıcaklığa bağlı Nss profili

Çizelge 7.4. Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky diyotunun sıcaklığa bağlı C_m ve G_m/ω ölçümleri ve Hill-Coleman metodu kullanılarak elde edilen arayüzey durumları

T (K)	C_m x 10^{-10} (F)	G_m/ω x 10^{-10} (F)	N_{ss} ($eV^{-1}.cm^{-2}$)
80	8,33	10,6	4,79 x10^{13}
120	8,30	12,1	5,56 x10^{13}
160	8,23	10,0	6,44 x10^{13}
200	8,27	11,4	6,47 x10^{13}
240	8,43	10,1	7,17 x10^{13}
280	9,13	9,92	7,33 x10^{13}
300	9,61	9,82	8,62 x10^{13}
320	9,63	10,8	9,44 x10^{13}
340	10,2	10,3	1,05 x10^{14}
360	10,9	9,74	1,35 x10^{14}
380	10,4	9,74	1,26 x10^{14}
400	9,07	6,55	1,27 x10^{14}

Şekil 7.14 ve Çizelge 7.4'den Nss değerlerinin sıcaklık arttıkça arttığı gözlenebiliyor. Daha önce I-V ölçümlerinden elde edilen N_{ss}-(E_C-E_{ss}) eğrilerinde, sıcaklık arttıkça Nss değerlerindeki azalmayı Şekil 6.4'de göstermiştik. Bu durum idealite faktörünün de sıcaklık azaldıkça artmasından sorumlu bir faktör olarak görülür. İdealite faktörünün arayüzey tabakadan geçen voltaj düşmesi veya engel yüksekliğin voltaja bağımlılığı sonucu yükselmesi beklendiği için bu faktörlerden herhangi biri sıcaklığa bağımlı olunca idealite faktörü de sıcaklığa bağımlılık gösterir. Dolayısıyla Eş. 6.9'dan görülebildiği gibi idealite faktörü n, N_{ss}, d_i ve ε_i değerlerine bağımlı olarak artar ve sıcaklıkla değişim gösterdiği için N_{ss}'de sıcaklığa güçlü bir şekilde bağımlı olacaktır. Sıcaklık azalırken nispeten daha yüksek değerlerde N_{ss}'in değişimini, metal/yarıiletken arayüzeyinde engel yüksekliğinin lateral (enine) homojensizlikleri sonucunda n'nin sıcaklığın fonksiyonu olarak değişimine atfedilmiştir [164, 206]. Buna göre sistemin arayüzey durumlarının sıcaklığa karşı kararlı olduğu söylenebilir. Şekil 7.14'den artan sıcaklık ile giderek daha derindeki veya yüksek enerjili tuzakların uyarıldığını ve dolayısıyla arayüzey durum yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Bu durumun literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [21, 35, 164, 171, 172, 182].

8. Au/P3HT/n-Sİ (MPS) SCHOTTKY ENGEL DİYOTUNUN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun metal ile yarıiletken arasındaki polimer tabaka için kompleks geçirgenliğin gerçel kısmı ε′ (dielektrik sabiti), imajiner kısmı ε″ (dielektrik kayıp) ve tanδ (dielektrik kayıp açı) frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak incelenmiştir. C-V-f ve G/ω-V-f ölçümleri -3V ile 3V voltaj aralığında, oda sıcaklığında geniş frekans (10kHz-1MHz) ve 80-400 K sıcaklık aralığında incelendi. Bu ölçümlerin amacı Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun a.c. iletkenlik özellikleri, frekans ve gerilime bağlı dielektrik profili ve elektrik modülüne dair daha iyi bir bakış açısı sağlamaktır. Elektriksel özelliklerden a.c. elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) gibi temel parametreler frekansa ve voltaja bağlı olarak hesaplandı. Dielektrik özelliklerden ise dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp tanjantı (tanδ) frekansa ve gerilime bağlı olarak hesaplandı. Deneysel sonuçlar, Schottky Barrier diyotun ε′, ε″, kayıp tanjantı (tanδ), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) ve σ_{ac} değerlerinin tersinim bölgesinden ziyade özellikle tükenim ve yığılım bölgelerinde frekansın ve uygulanan ön gerilimin güçlü fonksiyonları olduğunu göstermiştir.

8.1. Frekansa Bağlı Dielektrik Özellikleri ve Ac Elektriksel İletkenlik Ölçümleri

Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotunun oda sıcaklığında, geniş bir frekans ve voltaj aralığında (sırasıyla, 10 kHz ila 1 MHz ve -3 V ile 3 V) dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları (dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp ε'') ile a.c. elektriksel iletkenligi (σ_{ac}) ve dielektrik kayıp tanjantı (tanδ) karakteristiklerinin frekans bağımlılığı kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır [79, 82-84, 207-210]. Kuvvetli yığılım bölgesinde, MPS yapısının maksimum kapasitansı oksit kapasitansa ($C_m = C_{ox}$) karşılık gelmektedir.

$$\varepsilon' = \frac{C_m d_i}{\varepsilon_o A} = \frac{C_m}{C_0} \tag{8.1}$$

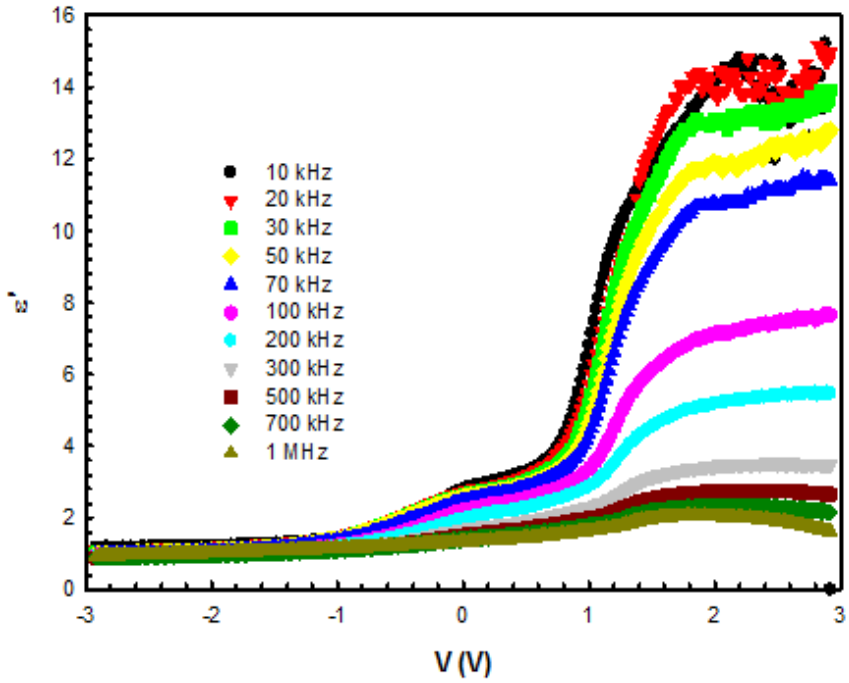
$$\varepsilon'' = \frac{G_m d_i}{\omega \varepsilon_o A} = \frac{G_m}{\omega C_0} \tag{8.2}$$

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{8.3}$$

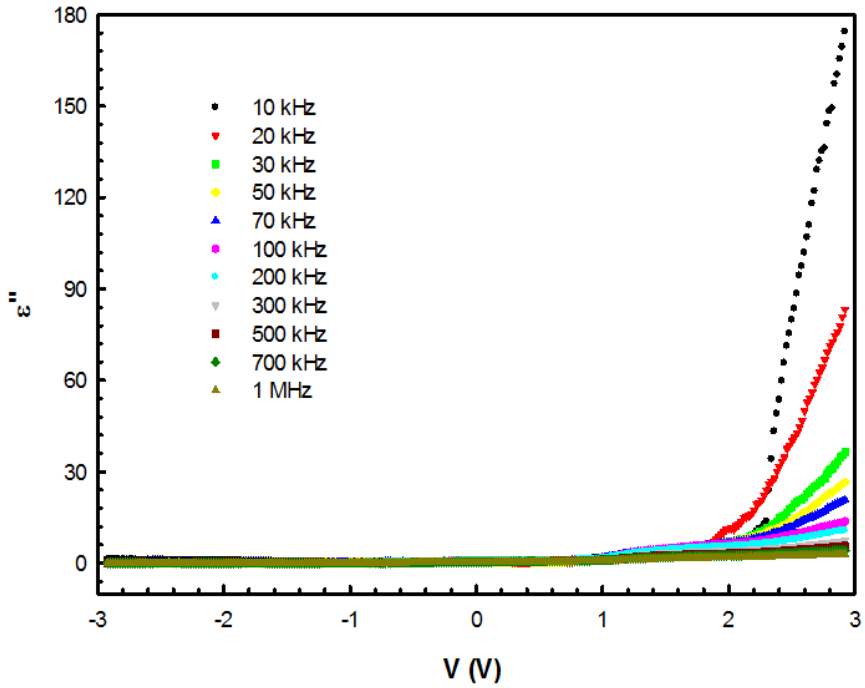
Burada $C_0(=\varepsilon_o(A/d))$, metal ile yarıiletken arasında boşluğun kapasitansı; $A(cm^2)$, MPS yapının doğrultucu kontak alanı; d_i, arayüzey P3HT tabaka kalınlığı; ε_o $(=8.85x10^{-14}$ F/cm), boşluğun dielektrik sabiti; ω ise uygulanan elektrik alanın açısal frekansıdır $(\omega=2\pi f)$.

Farklı frekanslarda Au/P3HT/n-Si MPS tipi SBD için ε', ε" ve tanδ değerlerinin gerilime bağlı grafiği Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'de gösterilmektedir. Deneysel sonuçlar, pozitif gerilim bölgesinde (tükenim ve yığılım bölgeleri) ε' değerlerinin gerilimin ve frekansın güçlü bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. ε' değerleri negatif bölgede artan gerilimle artarken, pozitif gerilime doğru gidildikçe C-V eğrilerine benzer şekilde bir pik vermektedir. Bu benzerlik beklenen bir durumdur. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de görüldüğü gibi ölçülen C ve G değerleri artan frekansla azalmaktadır ve dolayısıyla dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε") değerleri de artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslarda görülen bu artma eğilimi arayüzeyde oluşan kutuplaşmaya atfedilebilir [210, 211].

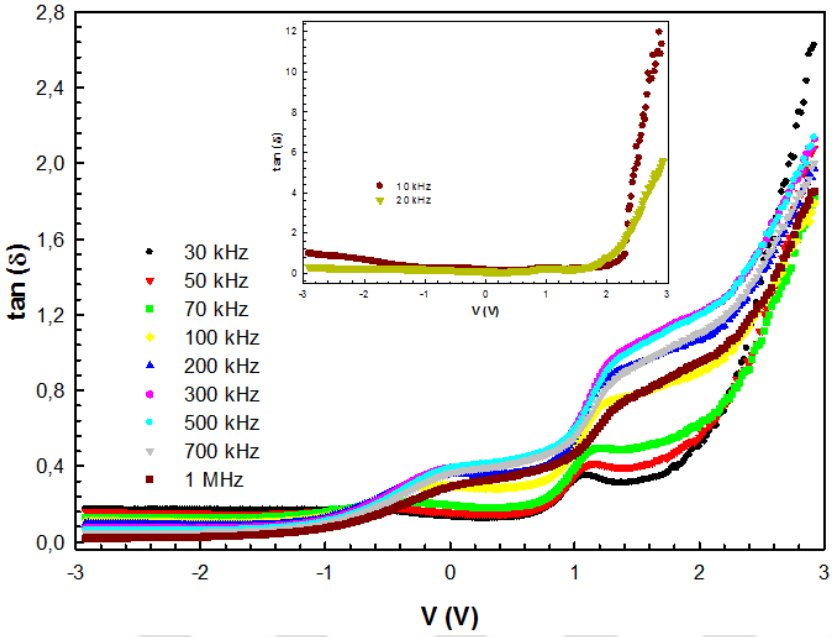
Artan frekansla ε' değerindeki azalma yüzey veya arayüzeysel polarizasyonundan kaynaklanır. Çünkü belirli frekanslarda dış alandan kaynaklanan elektron sıçramaları alanın değişimine izin vermez ve frekans artsa da dış alan sabit bir değere ulaşır [210-212]. Yüzey pürüzlülüğü sebebiyle yük taşıyıcıların daha az iletken bölgelerde birikmesi, iletkenliğin frekansa bağlı olmasına neden olur. Böylelikle, arayüzeysel polarizasyon meydana gelir [81, 207]. Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'de görüldüğü üzere ε" ve tanδ ileri negatif ve pozitif gerilim bölgelerinde hem uygulanan gerilime hem de frekansa oldukça duyarlıdır. ε"-V ve tanδ-V eğrilerinin hem yığılım hem de tersinim bölgesinde bir frekans dağılımı göstermesinin nedeni arayüzey durumlarının ve tersinim yüklerinin yüksek ve düşük frekansa tepki sürelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır [162, 210, 211]. Şekil 8.3'de görüldüğü gibi tanδ-V paremetrelerinin tersinim ve tükenim bölgesinde pik vermektedir. Deneysel ε'-V, ε"-V ve tanδ-V grafikleride gösterdi ki N_{ss} ve arayüzey polarizasyonu tersinim ve tükenm bölgesinde etkili iken, R_s ve P3HT arayüzey tabakasının yığılım bölgesinde etkilidir.



Şekil 8.1. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun ε'-V karakteristiklerinin oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi



Şekil 8.2. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun ε"-V karakteristiklerinin oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında voltaja bağlı değişimi

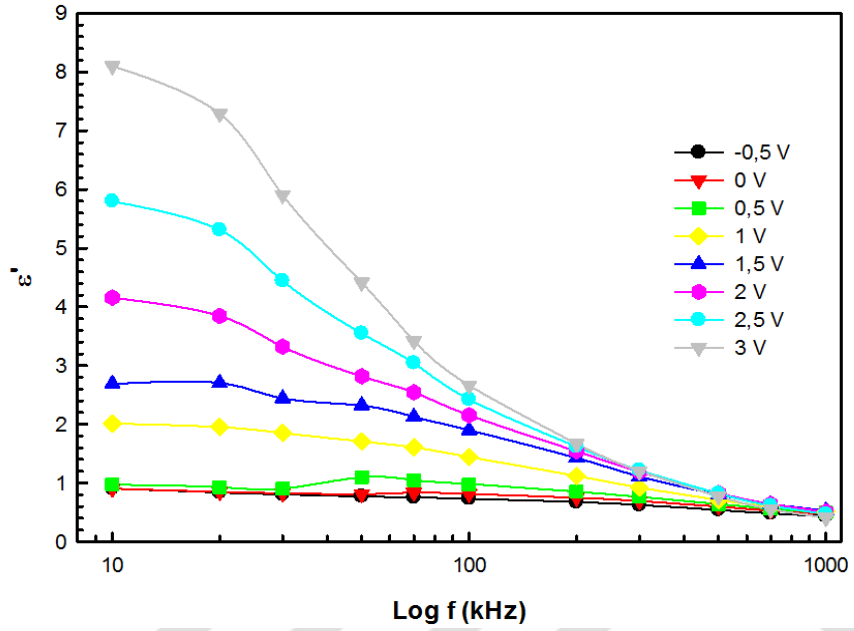


Şekil 8.3. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında kayıp açı tanδ'nın 10 kHz-1 MHz frekans aralığında voltaja bağlı değişimi

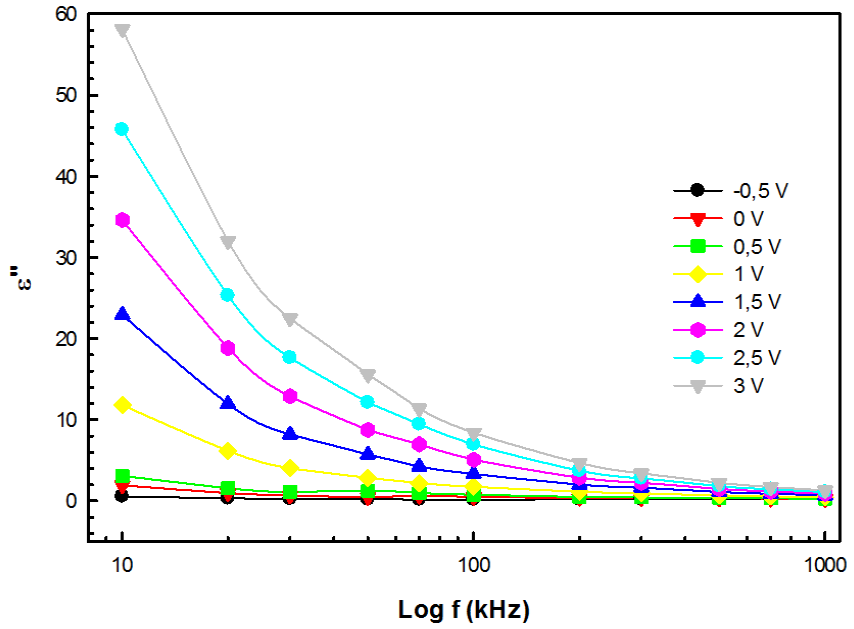
Hesaplanan ε', ε" ve tanδ değerlerinin oda sıcaklığındaki frekansa bağlı değişimi, farklı gerilim değerleri için sırasıyla Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da verilmiştir. Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da açıkça görülmektedir ki; dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε") yüksek frekanslarda (f≥200 kHz) voltajdan bağımsızdırlar. Yüksek frekanslarda ε′ ve ε′′ değerlerinin birbirine yakın olduğu açıktır. Yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumları N_{ss} a.c. sinyali izleyemez ve herhangi bir arayüzeysel kutuplaştırma mekanizmasının olmaması nedeniyle de; C, ε' ve ε" ye ilave bir katkıda bulunamaz. Bu yapıların düşük frekanstaki yalıtkan davranışına elektrotların arayüzeyi, dc iletkenlik, dipol yönelimi ve yük taşıyıcıları katkıda bulunabilir [210, 213, 214]. ε" karakteristiği, katkılama konsantrasyonu, arayüzey tabakası ve yarıiletken arasına yerleşmiş arayüzey durum yoğunluğu, diyotun seri direnci (R_s), arayüzey yalıtkan tabakanın kalınlığı, arayüzeyin pürüzlülüğü ve yarıiletkenin yasak enerji aralığı gibi bazı parametrelere bağlıdır [212].
Şekil 8.4'den görüldüğü gibi dielektrik sabitinin değeri, P3HT için dielektrik sabitinin beklenen teorik değeri (~4) ile uyumludur [55, 146, 147, 215]. Bu sonuç, elde edilen deneysel sonuçların doğruluğunu ve güvenirliliğini ortaya koymaktadır.

Şekil 8.4 ve 8.5'den görülebileceği gibi frekansın artmasıyla hem ε′ hem de ε′′ değerleri her bir gerilim değeri için azalmıştır. Bu durum dielektrik malzemeler için beklenen bir davranıştır. Esasında, özellikle düşük frekanslarda hem arayüzey/yüzey hem de

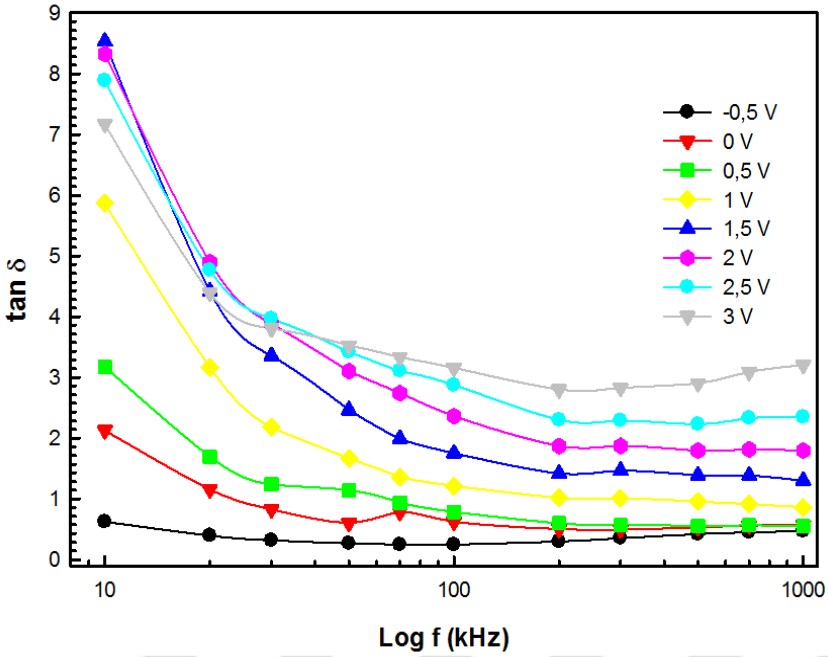
dipolar/yönelme polarizasyonları ε′ ve ε″ değerlerine katkıda bulunur. Frekansın artmasıyla bu polarizasyonların katkıları ortadan kalkar. Ayrıca, frekansın artmasıyla ε′ ve ε″ değerlerinde görülen azalma, frekans arttıkça arayüzey dipollerinin değişen alan yönüne daha kısa sürede yönlenmesi ile açıklanabilir[210, 212, 214, 216].



Şekil 8.4. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında ε' karakteristiklerinin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi



Şekil 8.5. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında ε" karakteristiklerinin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi



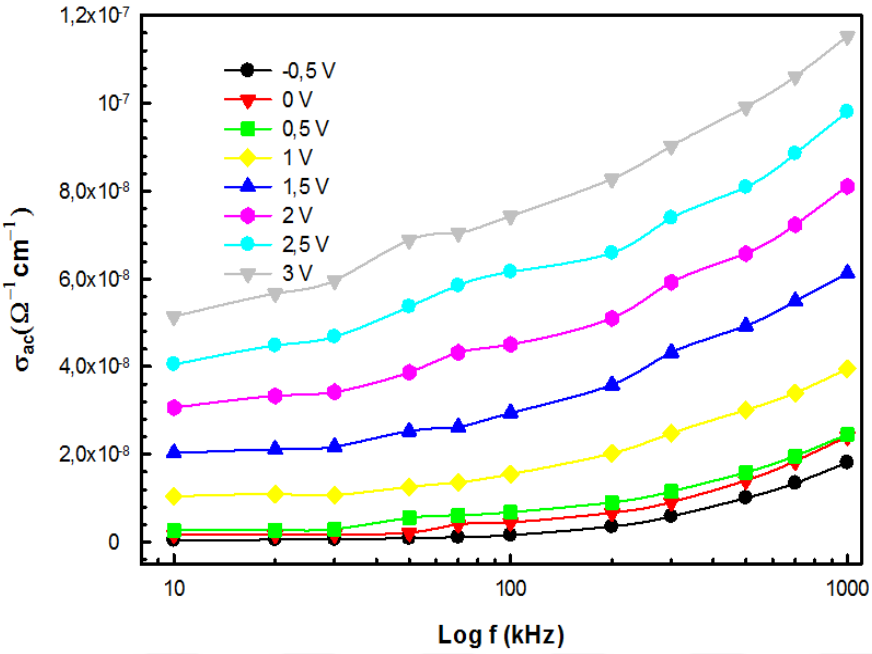
Şekil 8.6. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında kayıp açı tanδ'nın farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi

Şekil 8.6'da artan frekansla kapasitans ve iletkenlik değerlerinde meydana gelen azalmadan dolayı tanδ-logf değerleri uygulanan artan ön gerilimle ile azalır. Tanδ'nın frekansa bağlı böyle bir davranışı arayüzey durumlarının alternatif alan altında, yeniden yapılanması ve yeniden sıralanmasına bağlanabilir.

Bu çalışmada, ac elektriksel iletkenlik değerleri de frekansa bağlı olarak oda sıcaklığındaki beş gerilim değeri için, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplandı:

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan\delta (d/A) = \varepsilon'' \omega \varepsilon_o \tag{8.4}$$

Hesaplanan ac elektriksel iletkenlik değerleri Şekil 8.7'de verilmiştir. Artan frekans ile kapasitans ve iletkenlik değerleri azalmaktadır. Bu ise a.c. elektriksel iletkenliği frekansa bağımlı kılar. A.c. iletkenliğin artan frekans ile genellikle arttığı bilinmektedir. Bu a.c. iletkenlik yalnızca sıfır frekansta sonsuz ve yüksek frekanslarda önemli ölçüde dielektrik kayba katkıda bulunur [216-220]. AC elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) artışı kayıp akıma yol açacağından kayıp enerji tanδ arttırır. Bu durum, diyotun seri direncinin artan frekans ile kademeli olarak azalmasına atfedilebilir [211].



Şekil 8.7. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun oda sıcaklığında σ_{ac}'nin farklı voltajlardaki frekansa bağlı değişimi

8.1.1. Frekansa bağlı modülüs

Kompleks (imajiner) dielektrik geçirgenliği verilerinin Z* formalizasyonuyla incelenmesi ($Z^*=1/Y^*=1/i\omega C_o\varepsilon^*$) genellikle yüzey ve bulk (hacim, tüm numune) olgularını ayırt etmek ve yapının bulk dc iletkenliğini elde etmek için kullanılır [207, 208, 213, 215, 218, 221, 222].

Fiziksel açıdan bakıldığında elektrik modülü genellikle dielektrik durulma (relaxation) spektroskopisi hakkında daha detaylı bilgi elde etmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle gerçek dielektrik durulma sürecini temsil eder [217, 219, 222, 223], ve birçok avantaja sahiptir. Düşük frekanslarda dielektrik sabiti ve iletkenliğin değerlerindeki değişimi en aza indirmiştir. Elektrik modülünün gerilime bağlı değişik frekanslardaki profili bu yapının dielektrik durulma ve polarizasyon mekanizması hakkında önemli bilgiler vermektedir [219, 222].

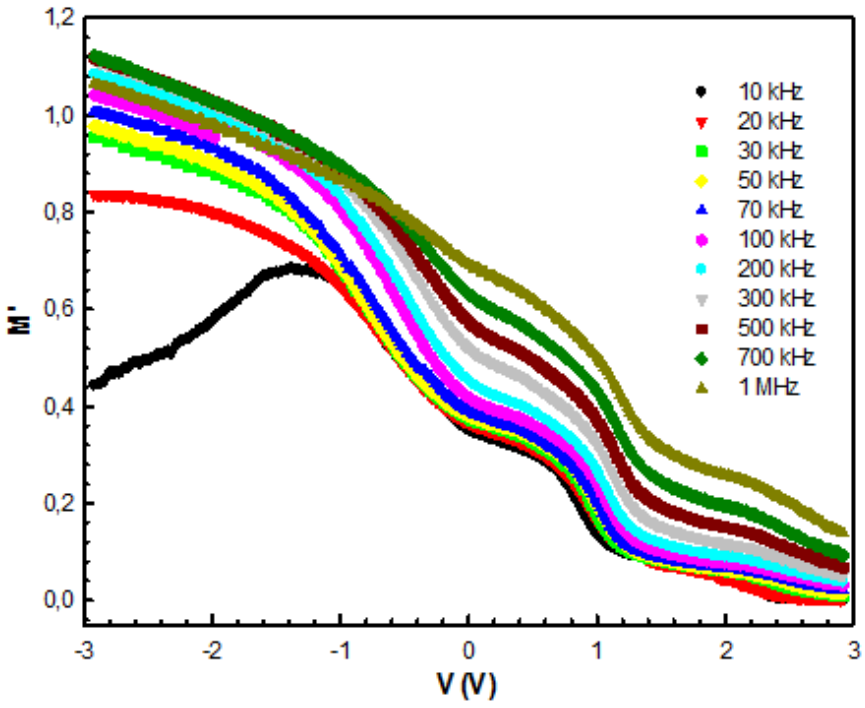
Kompleks empedans veya kompleks permitivity (dielektrik geçirgenlik) ($\varepsilon^*=1/M^*$) aşağıdaki denklem kullanılarak M* formuna dönüştürülebilir [218, 224, 225]:

$$M^* = i\omega C_0 Z^* \tag{8.5}$$

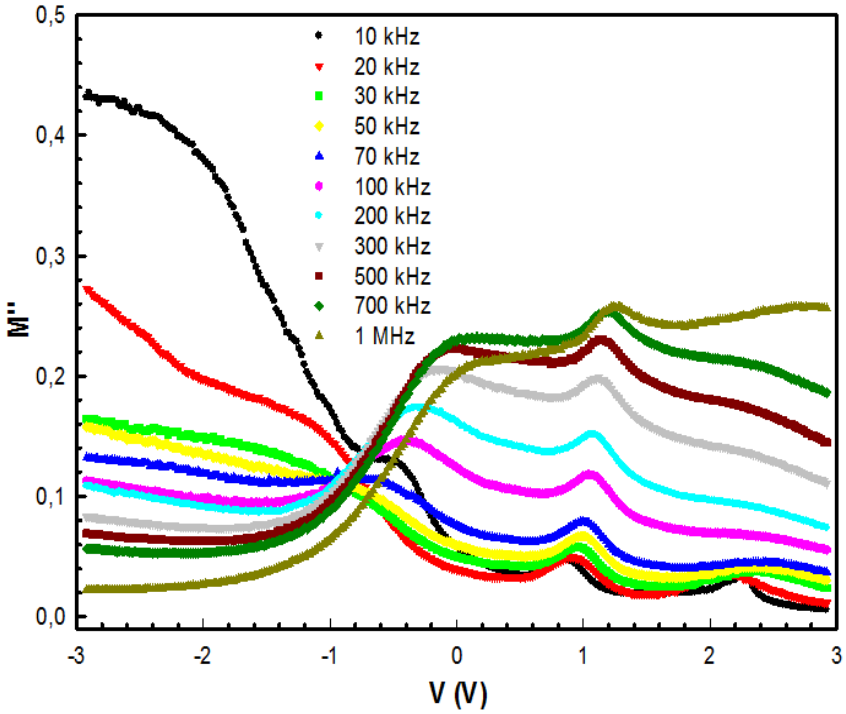
veya

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + iM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + i\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \tag{8.6}$$

Elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M") kısmı Eş 8.6 kullanılarak farklı frekansta her bir gerilim için ε′ ve ε″ değerlerinden hesaplanmıştır. Bu hesaplamaya göre M′ ve M″ değişimi sırasıyla Şekil 8.8 ve Şekil 8.9'da gösterilmiştir. Şekil 8.8 ve Şekil 8.9'da görüldüğü gibi, M′ ve M" gerilime oldukça bağlıdır. M' ve M" parametreleri özellikle tükenim bölgesinde uygulanan ön gerilimin güçlü bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Tükenim (negatif ön-gerilim) bölgesinde gerilimin artmasıyla M′ değerleri azalmış fakat bu değerler tüm frekanslarda yakın değerler almıştır. M′ karakteristiğinin böyle olması bu bölgede dielektrik durulma mekanizmasının frekansa bağlı olmasına atfedilir [208, 213, 221, 222, 226, 227].



Şekil 8.8. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün gerçel M' kısmının farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi

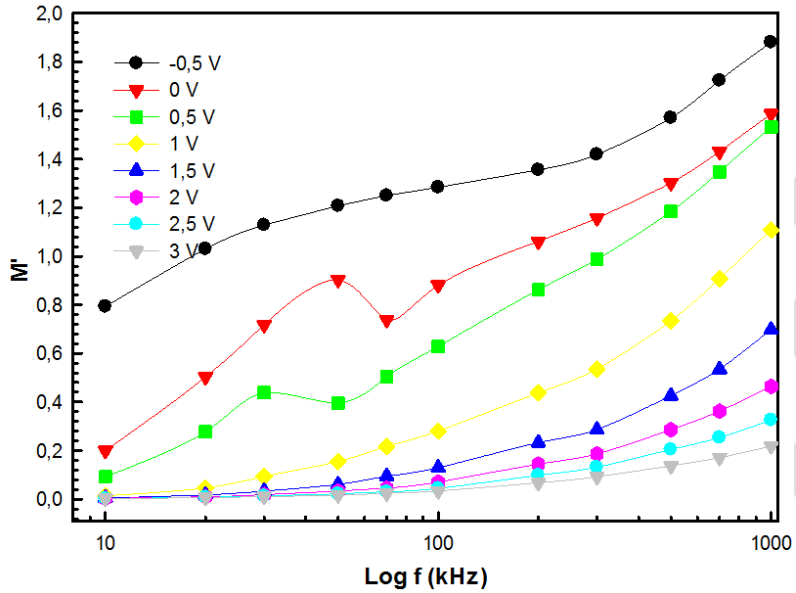


Şekil 8.9. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün imajiner M'' kısmının farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimi

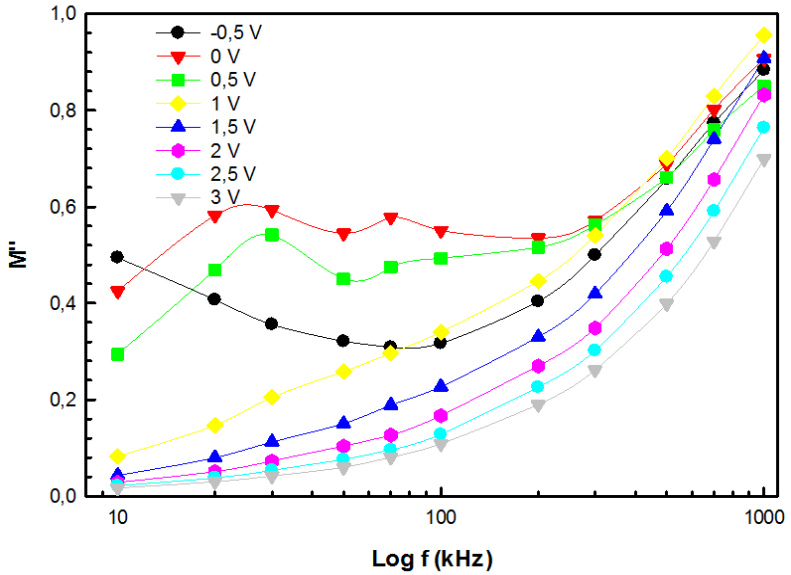
Şekil 8.9'da farklı frekanslarda Au/P3HT/n-Si yapının M″ değerlerinin gerilime bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 8.9'dan görüldüğü gibi, M″ değerleri, özellikle düşük frekanslarda uygulanan gerilimin güçlü bir fonksiyonudur. Frekans arttıkça M″ değerleri azalmaktadır ve M″ grafiği tersinim bölgesinde düşük frekanslarda pik vermektedir. Fakat M″ değerleri yüksek frekanslarda aynı bölgede neredeyse sabit kalmaktadır.

Elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M'') eğrileri hem ileri negatif gerilim hem de ileri pozitif gerilimde bir frekans dağılımı göstermektedirler. Orta gerilim bölgesinde ise her iki değerde yaklaşık sabit kalmakta olup gerilim ve frekans bağımlılığı ihmal edilecek kadar azalmaktadır. Reel elektrik modülünün frekans dağılımı negatif ve pozitif gerilim bölgeleri için aynı sırada iken, imajiner elektrik modülünün dağılımı pik değerinden sonra sıra değiştirmektedir. Reel elektrik modülü artan frekansla artan bir dağılım sergilemekte iken imajiner elektrik modülü negatif bölgede artan frekansla azalan, pozitif bölge de ise artan bir dağılım sergilemektedir. İmajiner elektrik modülü frekansa bağlı olarak yaklaşık 0-1 V aralığında her bir frekans eğrisi için bir pik vermektedir. Bu pikin maksimumu artan frekansla pozitif gerilim bölgesine doğru kaymaktadır. Farklı voltajlarda M′ değerlerinin frekansa bağlı değişimi Şekil 8.10'da gösterilmiştir. 10kHz-1 MHz frekans aralığında

gerilimin artmasıyla M′ değerlerinin azaldığı ve frekansın artmasıyla bu değerlerin de arttığı Şekil 8.10'dan görülebilir. Benzer şekilde farklı voltajlarda M″ değerlerinin frekansa bağlı değişim grafiği Şekil 8.11'de verilmiştir. Frekans ve gerilim arttıkça M″ değerlerinin de arttığı görülmektedir. Düşük frekanslarda M′ ve M″ değerleri elektriksel polarizasyonun olmamasından dolayı neredeyse sıfıra yakın bir değere sahip olurlar [210, 212, 213, 218, 219, 221, 222, 227].



Şekil 8.10. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün gerçel M' kısmının farklı voltajlarda frekansa bağlı değişimi



Şekil 8.11. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında elektrik modülünün imajiner M'' kısmının farklı voltajlarda frekansa bağlı değişimi

8.2. Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Özellikleri ve Ac Elektriksel İletkenlik Ölçümleri

Dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε''), kayıp açı (tanδ), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülün sıcaklığa bağımlılığı Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için 1 MHz frekansta 300-400 K sıcaklık aralığında incelendi. ε', ε'', tanδ ve σ_{ac} değerleri Eş.8.1, 8.2, 8.3 ve Eş.8.4 kulanılarak hesaplandı. Sırasıyla Şekil 8.12, 8.13, 8.14'de Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotunun 1 MHz'de ki ε'-V, ε''-V ve tanδ-V karakteristiklerini göstermektedir. Kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletim değerlerinden hesaplanan ε', ε'' ve tanδ parametreleri önemli ölçüde sıcaklığa bağlı davranış gösterdikleri gözlenmiştir.

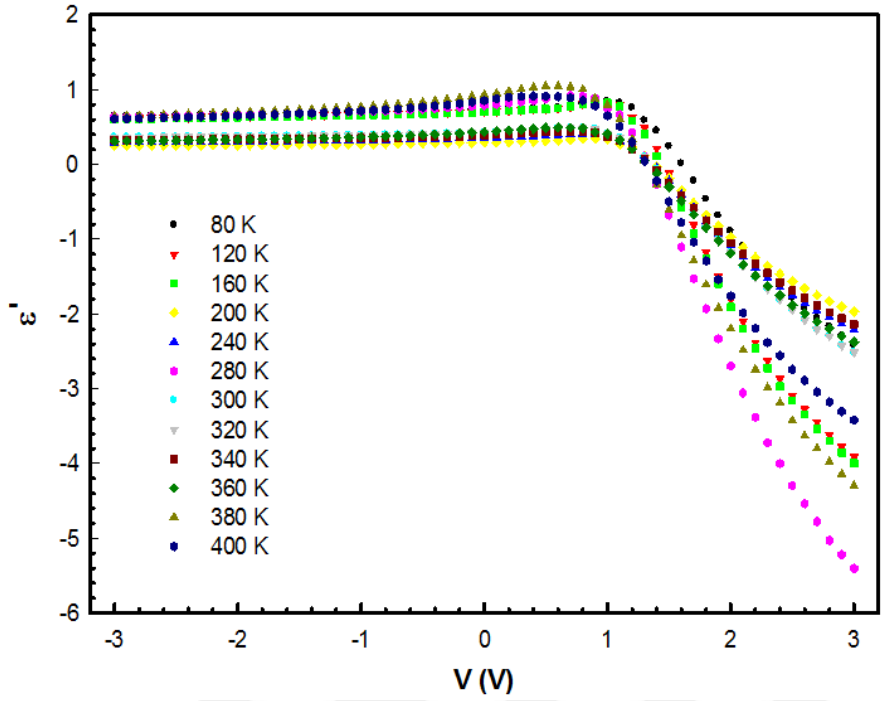
Şekil 8.12'den görüldüğü gibi, negatif bölgede ε' artan gerilimle zayıfça artarken, ε'' ise azalmaktadır. Pozitif bölgede ise genel olarak bunun tersi gerçekleşmekte ve artan gerilimle ε' azalırken ε'' artmaktadır (Şekil 8.13). Sıcaklık arttıkça, örgüde kusurlar/düzensizlikler oluşur ve çoğunluk yük taşıyıcılarının (iyonlar ve elektronlar) hareketliliği (mobilitesi) artar [201, 211, 215, 225]. Sıcaklık ile beraber ε', ε'' ve tanδ'nin değişimi iyonik katılarda genel bir eğilimdir. Sıcaklıktaki artış materyallerde iyon sıçraması, yönelim ve yük taşıyıcılarının konstrasyonlarının artması, safsızlık yada çatlaklara sebep olan uzay yükü polarizasyonu nedeniyle olabilir. Buna ilaveten, yasak enerji aralığı dar olan yarıiletkenlerde, yük taşıyıcıları hareketsiz ancak polarizasyon nedeniyle tuzaklanabilir. Sıcaklık artarsa, yük taşıyıcılarının sayısı üstel olarak artar ve bunun sonucunda daha fazla uzay yükü polarizasyonu meydana gelir ve bu da dielektrik sabitinde bir artışa sebep olur. Yani dielektrik malzemenin ε' ve ε'' değerlerinde bir artma, moleküllerin sıcaklıkla genişlemesinden kaynaklanır [16, 184, 219, 228].

ε'-V eğrilerinin, negatif gerilim bölgesinde gerilim voltajına bağımlılığı neredeyse yok gibidir. Yani bu durumda arayüzey tabakası neredeyse kararlı bir dielektrik malzemedir ve gerilimden çok fazla etkilenmez denilebilir. Ayrıca bir MPS diyotun kapasitansı, metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakanın kalınlığına bağlı olduğu kadar yarıiletken/polimer arasında lokalize olmuş arayüzey durumlarının büyüklüğüne ve dağılımına da bağlıdır. Yalıtkan arayüzey tabaka hem metal ile yarıiletken arasında bir izolasyon hem de pasivasyon görevi yapmaktadır. Öyleyse dielektrik sabiti kalınlıktan ziyade arayüzey durumlarının büyüklüğüne ve homojenliğine bağlıdır.

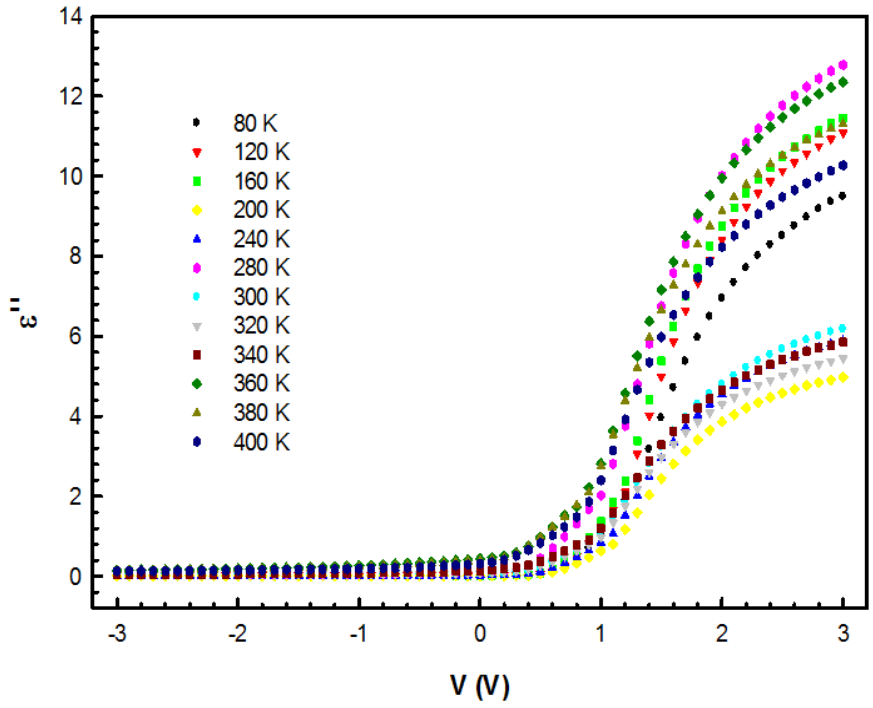
Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1'den büyük olduğu düşünülür fakat gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($\tau_d >> \tau_0$) birçok farklı mekanizma yardımıyla kapasitansın hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür [229, 230]. Arka yüzeyinde omik bir metal kontak ile ön yüzeyinde polimer (P3HT) büyütülmüş Si yarıiletkenli MPS yapıların, arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile kapasitans yaklaşık 1 volttan sonra negatif olarak artarken, kondüktans ise hızlıca artmaktadır (Şekil 7.5 ve Şekil 7.6).

ε', ε" ve tanδ değerlerinin her üçü de arayüzey tabaka kalınlığına karşı hassasken bu hassasiyet dielektrik sabiti ε' için daha da belirgindir. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için ε' değerleri ~1 volttan sonra hızlıca azalarak negatife gitmektedir. MPS yapıda kullanılan Si'da oluşan, gerek arayüzey durumları ve gerekse kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile bu MPS yapıların kapasitansı ve dielektrik sabitinde hızlı bir azalma ile negatif kapasite ve negatif dielektrik sabitine yol açmaktadır.

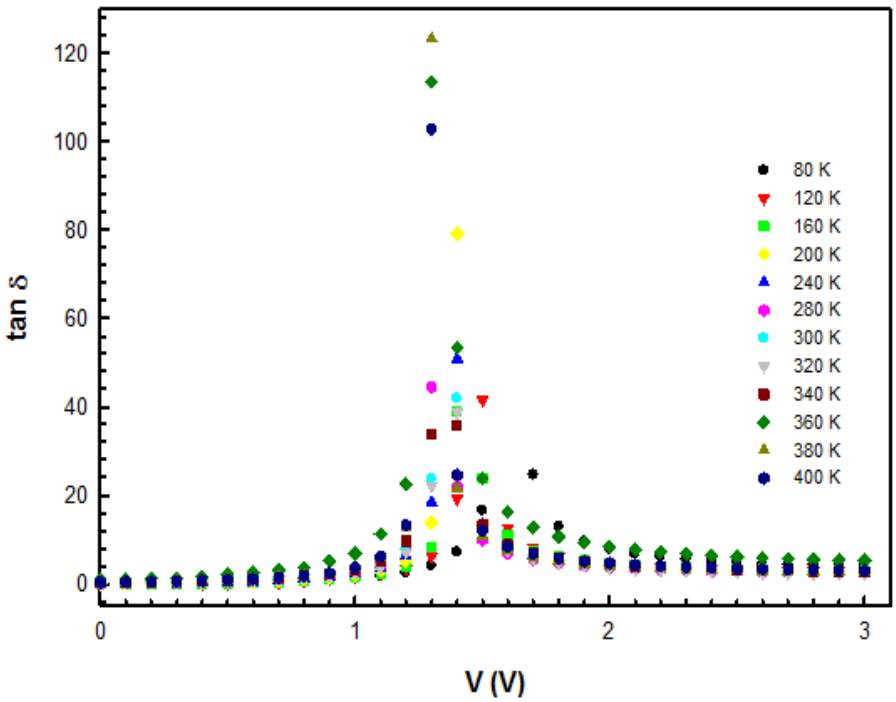
Dielektrik kayıp açı tanδ'nin sıcaklığa bağımlılığı bir dielektrik durulma sergilemektedir (Şekil 8.14). Şekil 8.14'de açıkça görüldüğü gibi dielektrik kayıp açı tanδ yaklaşık 1,5 volt civarında önce bir pik verip artma eğiliminden sonra ani bir şekilde düşmektedir. Bu gerilim değerinden sonra, artan pozitif gerilimle dielektrik sabiti negatif olarak artmaktadır. Bu duruma dielektrik kayıptaki hızlı artış eşlik etmektedir. Bu artış, elektriksel iletkenliğin artması ile uzay yük taşıyıcılarının artmasına atfedilebilir. Bu bölgede dielektrik durulma zamanı (τ_d), taşıyıcıların oluşma-yeniden birleşme zamanından (τ_0) daha büyüktür. Yani Si yarıiletkeni relaxation durumuna geçmiştir.



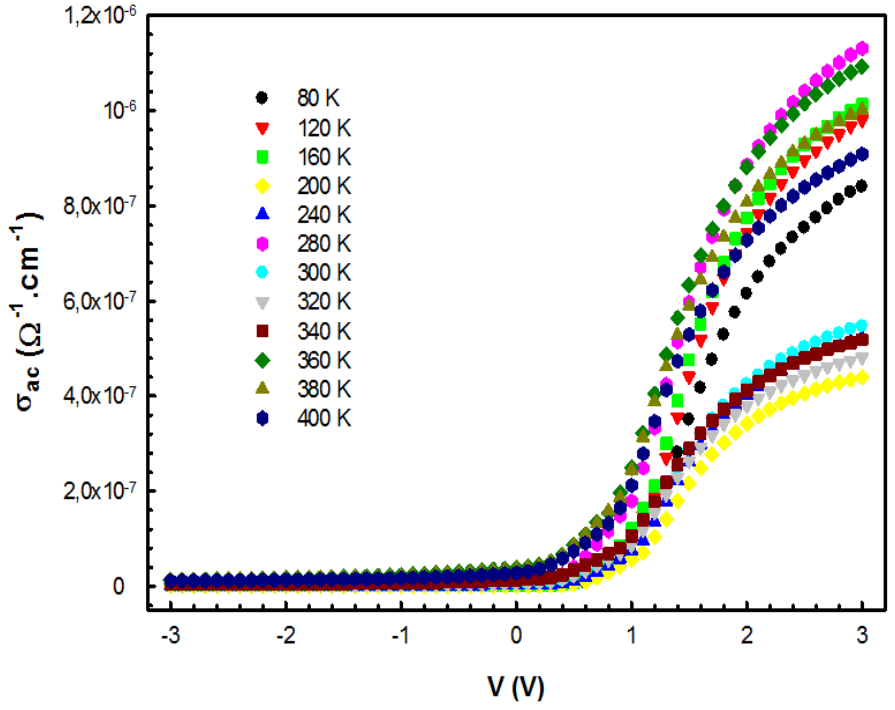
Şekil 8.12. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki ε'-V karakteristikleri



Şekil 8.13. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki ε''-V karakteristikleri



Şekil 8.14. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki tanδ-V karakteristikleri



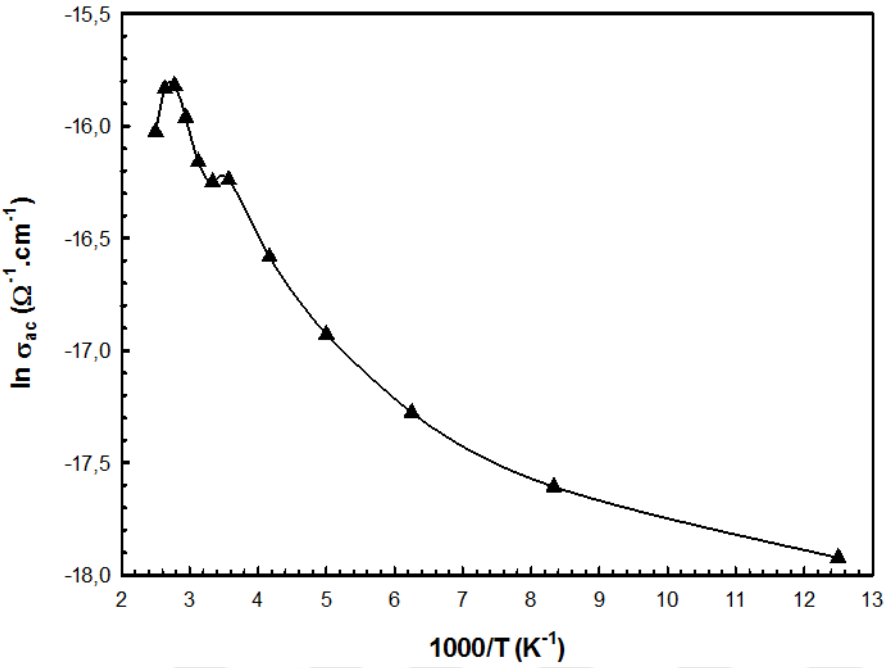
Şekil 8.15. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki σ_{ac}-V karakteristikleri

Şekil 8.15'de, MPS yapı için a.c. elektriksel iletkenliği (σ_{ac})'nin sıcaklığa bağımlılığını gösterilmektedir. Elektriksel iletkenlik Şekil 8.15'de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde de verilmiştir [214, 225, 231-237]. MPS yapıdaki dielektrik polarizasyon yöntemi iletim yönetimine benzer bir mekanizmanın içinden yer aldığı literatürde önerilmiştir. Artan sıcaklık ile yük taşıyıcılarının hareketliliğinin artması taşıyıcıların sayısının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu çalışmalarda bu artış metal/yarıiletken arayüzeyindeki kusurlar veya düzensizliklerden ve lokalize olmuş kusurlar içerisinde sıçrama ile yer değiştiren yük taşıyıcılarına atfedilmiştir.

Elektriksel iletim durumunda, a.c. iletkenliğin sıcaklık bağımlılığı Arrhenius denklemine göre açıklanabilir. Buna göre a.c. iletkenliğin sıcaklığa göre değişimi aşağıdaki bağıntıyla verilir [213, 218, 231]:

$$\sigma = \sigma \ \exp\left(--\right) \tag{8.7}$$

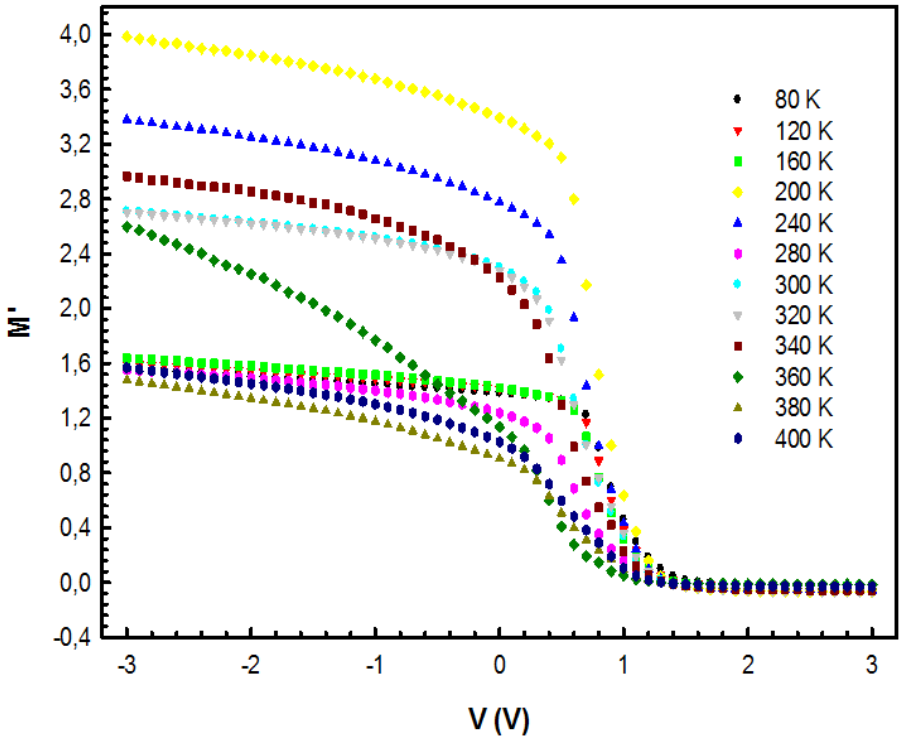
Burada σ_o ön eksponansiyel faktör, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve E_a aktivasyon enerjisini gösterir. 80-400 K aralığında elde edilen ac iletkenlik verilerin sıcaklıkla değişim grafiğinden yararlanılarak ve Eş. 8.7 kullanılarak elde edilen elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) 1000/T'ye bağlı değişim eğrileri Şekil 8.16'da verildi. Aktivasyon enerjisi Ea iletim için termal aktivasyon enerjisi olup potansiyel engel yüksekliğini geçmek için gerekli minimum enerjidir. Şekil 8.16'da gösterildiği gibi 1000/T'ye karşı lnσ_{ac}'nin bir çizimi yaklaşık lineer bir doğrudur ve elde edilen doğrunun eğimi $-E_a/kT$'ye eşittir. ln σ_{ac}'nin 1000/T'ye karşı grafiğin eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi (E_a) değeri 19,4 meV olarak bulundu. Düşük aktivasyon enerjisi yeniden birleşme ve uzay yüklerinin varlığına atfedilebilir [202, 210, 213, 223, 234, 235, 238].



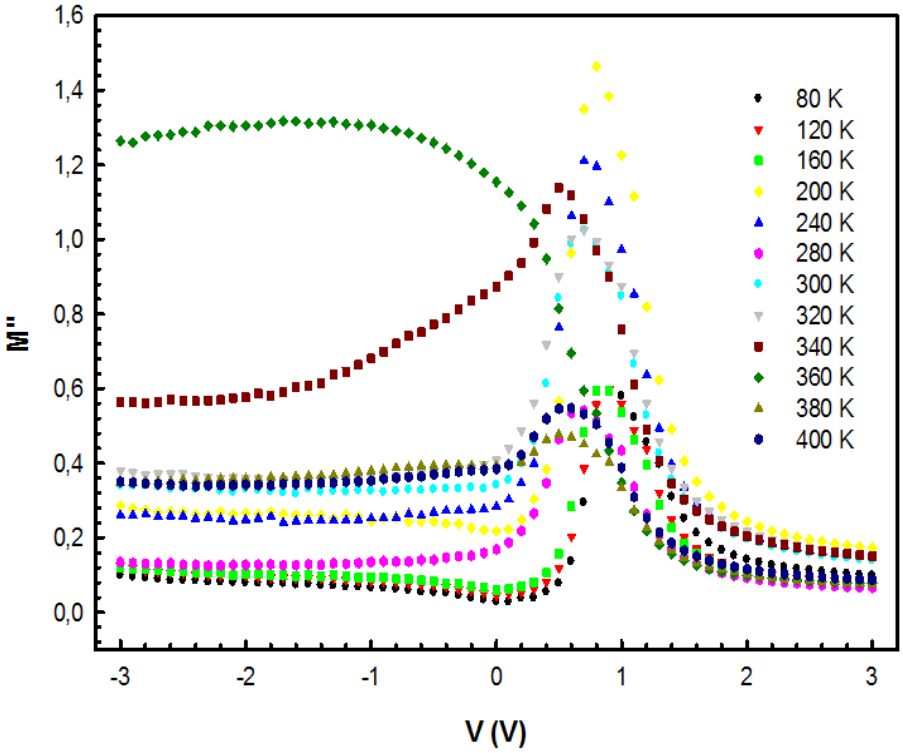
Şekil 8.16. 1 MHz'de Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için ln σ_{ac}-1000/T karakteristiği

8.2.1. Sıcaklığa bağlı modülüs

Şekil 8.17 ve Şekil 8.18'de Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de M'-V ve M''-V karakteristikleri gösterilmektedir. Au/P3HT/n-Si (MPS) yapılarına ait M' değerleri artan gerilim voltajıyla azalmakta olup bu azalış belli bir voltajdan sonra yerini ani bir düşüşe bırakmakta ve yaklaşık 1 volttan sonra da reel elektrik modülü sabit kalmaktadır. Her sıcaklık değerinde Au/P3HT/n-Si (MPS) diyotu için M''-V eğrileri pozitif bölgede yaklaşık 1 voltta birer pik vermekte ve bu pik maksimumları artan sıcaklıkla negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır.



Şekil 8.17. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki M'-V karakteristikleri



Şekil 8.18. Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için 1 MHz'de farklı sıcaklıklardaki M''-V karakteristikleri

9. AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI AKIM-VOLTAJ (I-V) KARAKTERİSTİKLERİ

Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotun doğru ve ters ön-gerilimlerdeki yarı-logaritmik akım-voltaj (I-V) ölçümleri karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri (50-250 W) için oda sıcaklığında elde edilerek Şekil 9.1'de verildi. Diyot üzerine uygulanan ışığın şiddeti arttıkça sızıntı akımı da artmaktadır. Bu durum artan aydınlatma şiddeti ile orantılı olarak metal-yarıiletken eklem bölgesinde daha çok sayıda elektron-hol çiftinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Buna ilave olarak uygulanan ışık şiddeti arttıkça tüketim bölgesinde uygulanan ışığın şiddetine bağlı olarak daha fazla tuzaklanmış yüklerin uyarılması ve bu yüklerin sızıntı akımına katkı sağlaması olarak açıklanmaktadır [93, 147, 239, 240]. Diğer taraftan diyotun ışığa duyarlılığını gözlemleyebilmek için (farklı aydınlatma şiddetleri altındaki açık devre voltajı V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} değerlerini belirlemek için) doğru ön-gerilim I-V eğrileri Şekil 9.2 ve Şekil 9.3'de verildi. Burada, I_M maksimum güç noktasındaki akımı, V_M maksimum güç noktasındaki gerilimi, I_{sc} kısa devre akımını, V_{oc} açık devre gerilimini göstermektedir.

Açık devre gerilimi (V_{oc}), güneş ışığı veya eşdeğer bir ışıkta aygıttan bir akım geçmiyorken olabilecek en yüksek gerilimdir. Açık devre gerilimi, güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde temel bir parametredir. Teorik olarak, V_{oc}'nin alabileceği maksimum voltaj değeri, donorun HOMO seviyesi ile akseptörün LUMO seviyesi arasındaki farka eşittir. Her farklı ışık siddeti için devrede farklı açık devre gerilimi vardır. Açık devre gerilimi ışık şiddetinin artmasıyla logaritmik olarak artar.

Kısa devre akımı (I_{sc}) fotovoltaik aygıt boyunca hiçbir gerilimin olmadığı zamanki akımdır. Kısa devre akımı da, güç dönüşüm veriminin belirlenmesinde temel bir parametredir. Kısa devre akımı absorbe edilen ışığın miktarı ve iç dönüşüm verimi tarafından belirlenmektedir. Her ışık şiddetine karşılık farklı kısa devre akımı oluşmaktadır. Kısa devre akımı cihazın yapısına, yük taşıyıcıların ömrüne ve mobilitelerine önemli ölçüde bağlıdır. Bant aralığının düşürülmesi foton emilimini artırdığından kısa devre akımı da artar.

Şekil 9.3'de görülen maksimum güç noktasının ($P_M = V_M \cdot I_M$), ($V_{OC} \cdot I_{SC}$)'ye oranı dolum faktörünü vermektedir. Dolum faktörü güneş pilinin diyot karakteristiğine ne kadar

yakın olduğuyla ilgili bilgi verir. Dolum faktörü her zaman 1'den küçüktür. Dolum faktörü 1'e yakınlaştıkça aygıtın kalitesi artar. Dolum faktörü seri ve paralel dirençlerden etkilenir. Dolum faktörü FF ile gösterilir [241]:

$$FF = \frac{\cdot I}{\cdot I} \tag{9.1}$$

Bir enerji dönüşüm terimi olarak verimlilik önemli bir parametredir. Maksimum çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Açık devre gerilimine (Voc), kısa devre akımına (Isc) ve dolum faktörüne (FF) bağlıdır. Güç dönüşüm verimi,τ aygıt tarafından maksimum güç noktasında üretilen elektrik gücünün, gelen ışığın oluşturduğu giriş gücüne oranı olarak şekilde tanımlanır [241] :

$$\underline{\quad} \quad \underline{\frac{OC \cdot I \quad \cdot FF}{}} \tag{9.2}$$

Verim, diyotun üzerine düşen ışığın ne kadarının elektrik enerjisine dönüştüğünü belirleyen parametredir. Optimum şartlarda, uygun parametreler göz önünde bulundurularak üretilen organik güneş hücrelerinden yüksek verim elde etmek mümkündür. Verimi yükseltmek için ilgili her bir parametrenin yani kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve dolum faktörü ayrı ayrı değerlendirilerek iyileştirilmesi gerekir.

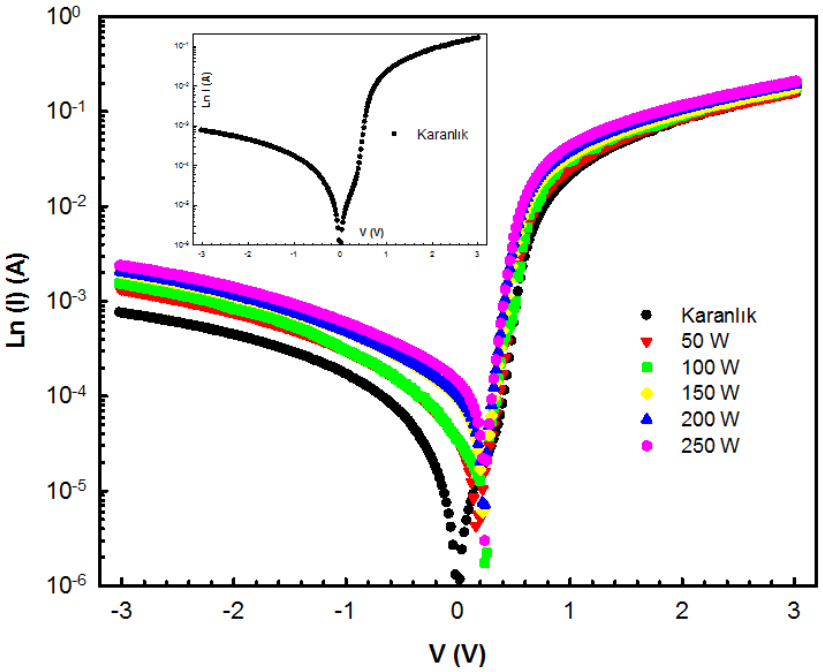
Verimi etkileyen faktörler arasında polimerlerin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri sayılabilir. HOMO, üçüncü bölümde ayrıntılı olarak bahsettiğimiz gibi polimer zincirinden bir elektron koparmak için gereken enerjiyi ifade eder. LUMO ise polimer zincirine bir elektron eklendiğinde kazanılan enerjiye eşittir. Düşük bant aralığına sahip polimerlerin verimleri daha yüksektir. Alam ve arkadaşları çalışmalarında enerji bant aralığını 1.2-1.5 eV aralığına çekmek hücrenin kısa devre akımını, dolayısıyla verimini yükselteceğini ileri sürmüştür [242]. Verimi etkileyen bir diğer faktör de polimer karışımın morfolojisidir. İyi bir karışım donor-akseptör arayüzünü azaltacak ve eksitonların ayrılma bölgesine difüzyonu sırasında kat edeceği mesafeyi azaltacaktır. Dolayısıyla yüklerin ayrışması ve elektrotlarda toplanması artacağından verim de artacaktır.

Şekil 9.2'de görüldüğü gibi foto-akım (I_p) değerleri artan aydınlatma şiddeti ile artmaktadır. Şekil 9.3'e baktığımızda ise 250 W aydınlatma şiddetinde V_{oc} ve I_{sc} değerleri sırasıyla 0,26 V ve 0,295 mA olarak ölçülmüştür. Maksimum güç eğrisinin akım ve voltaj değerleri yardımıyla fotodiyotun verimliliği bir başka deyişle dolum faktörü (FF) % 0,21 olarak hesaplanmıştır.

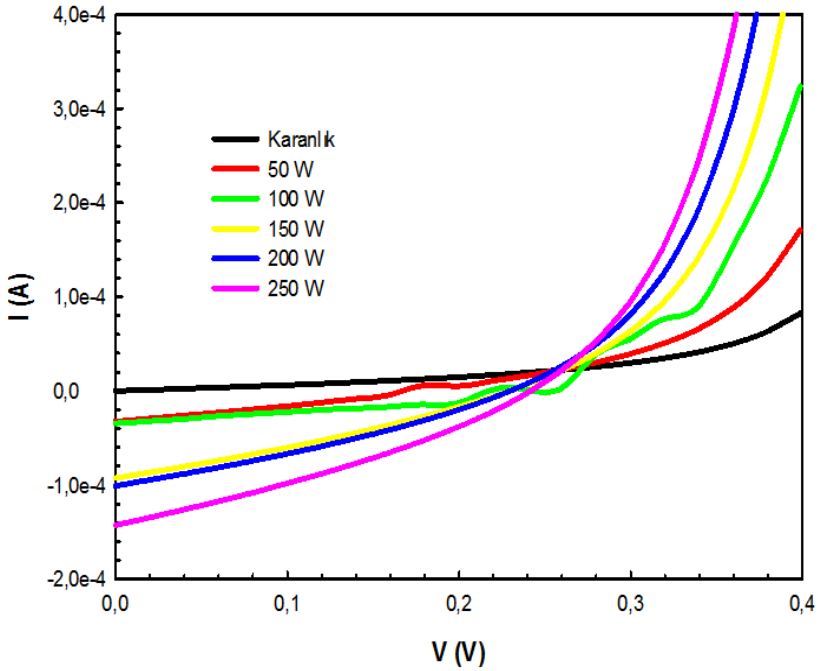
Literatüre baktığımızda MPS tipi güneş pili yapısındaki çalışmalarda yakın değerler görürüz. Yakuphanoğlu bir çalışmasında p-Si/C60:MEH-PPV/Au diyotu için açık devre voltajı (V_{oc}) değerini 130 mV, kısa devre akımını (I_{sc}) 24,5 nA ve fotoakımını 2,94 μA olarak bulmuştur [244]. Yılmaz Canlı ve arkadaşlarının [244] ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al güneş pili için yaptığı hesaplamalarda ise Voc=650 mV, Jsc=4,1 mA/cm^2 ve dolum faktörü değerini 0,42, verimi ise düşük kısa devre akımı ve düşük dolum faktörü değerleri nedeniyle %1 olarak hesaplanmıştır. Burada Yılmaz Canlı ve arkadaşları polimere farklı sıvı kristal bileşikler ile katkıladığında ise bu verim %1'den %2,9'a kadar çıkmıştır. Yakuphanoğlu ve Anand [245] ITO/PEDOT-PSS/P3HT-PCBM/LiF/Al organik güneş pili yapısının elektrik özeliklerinin araştırılmasında Akım-Voltaj ve Kapasitans-Voltaj tekniklerini kullanmıştır ve n=2,29, Φ_B= 0,89 eV , R_s=3,73x10^4 Ω hesaplanmıştır. Açık devre voltajı V_{oc} 0,58 V, kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} ise 5,84 mA/cm^2 ve dolum faktörü 0,31 olarak elde edilmiştir. Hayashi ve arkadaşları [246] P3HT polimerinin kulanıldığı güneş pilinde V_{oc}=0,38 V, J_{sc}=5,85 mA/cm^2, dolum faktörünü 0,38 ve verimi %0,85 olarak hesaplamıştır. Matthieu Manceau ve arkadaşları [247] ise farklı oranlarda P3HT katkılı güneş pili yapılarında verimin %2,4 ile %3,4 aralığında elde etmiştir ki bu literatürdeki, en iyi verim derecesidir. Bizim çalışmamızda elde edilen değerler (V_{oc}, 0,26 V; I_{sc},0,295 mA; FF, 0,27; τ ise ~%0,28), bir güneş pili için düşük olmakla birlikte Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyotlarının bir fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermektedir [41, 62, 91, 93].

Au/P3HT/n-Si (MPS) SBD için oda sıcaklığında ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki doğru ve ters ön-gerilim yarı-logaritmik *ln(I)-V* eğrileri Şekil 9.1'de görüldüğü gibi -3/+3 V aralığında yaklaşık lineer bir davranış gösterir. Sırasıyla I_0, n ve Φ_{Bo} değerleri , Şekil 9.1 ve Eş. 6.2, 6.4 ve Eş. 6.6 yardımıyla hesaplanmıştır. Şekil 9.1'de lineer bölgenin eğiminden ($\tan\theta=q/nkT$) diyotun her bir ışık şiddeti için idealite faktörleri elde edilerek Şekil 9.4'de verildi. I_o doyma akımı değerleri ise yine *lnI-V* grafiğinin lineer bölgesinin sıfır voltta

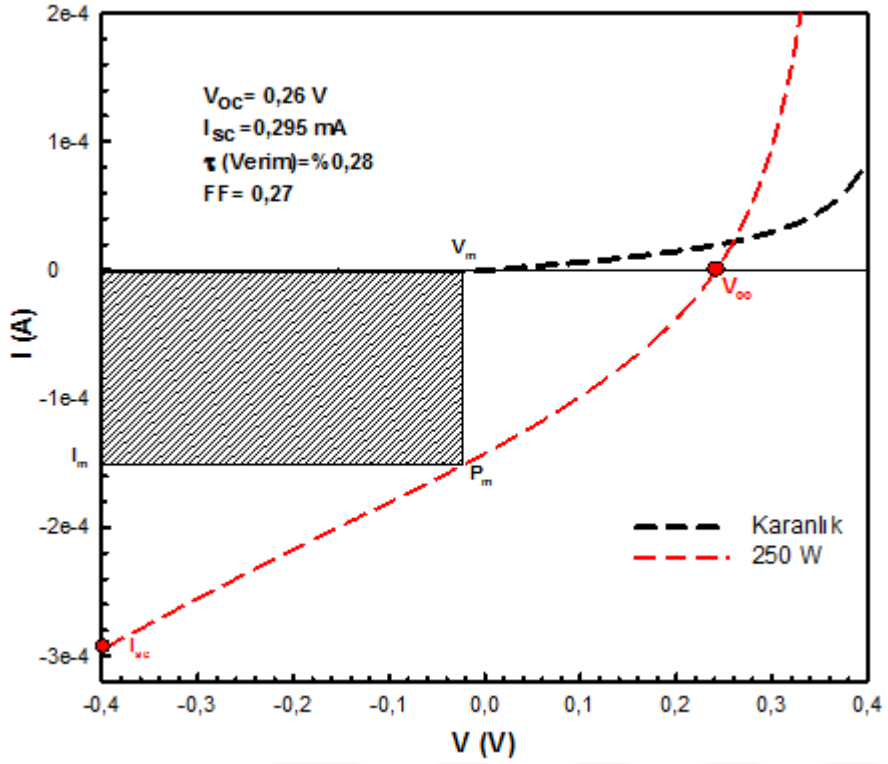
kestiği noktadan elde edildi. Elde edilen I_o değerleri ile diyotun doğrultucu kontak alanı (A) ve etkin Richardson sabiti (A^*) değerleri kullanılarak sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{Bo}) değerleri Eş. 6.6'dan elde edildi ve Çizelge 9.1'da verildi.



Şekil 9.1. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde ln(I) -V eğrileri



Şekil 9.2. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde I-V eğrileri

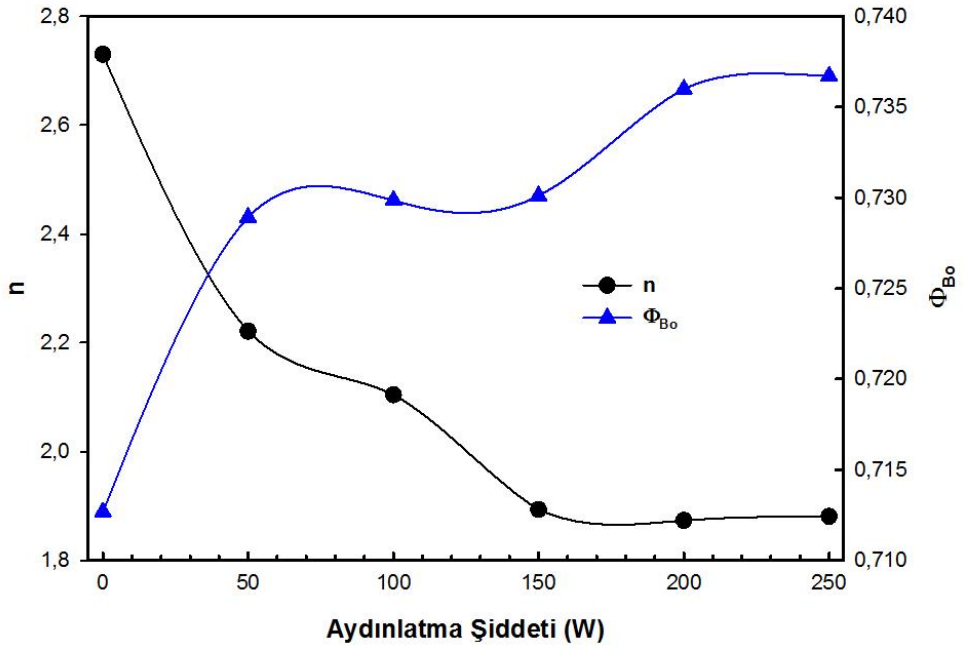


Şekil 9.3. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için maksimum güçte verim eğrisi

Farklı aydınlatma şiddetleri için elde edilen deneysel n ve Φ_{Bo} değerleri Şekil 9.4'de verildi. Çizelge 9.1'de görüldüğü gibi n değerleri artan aydınlatma şiddeti ile azalırken Φ_{Bo} değerleri artmaktadır [39, 41, 240]. İdealite faktörleri 1'den büyüktür. İdeal bir diyotun idealite faktörü 1'dir ve idealite faktörünün 1'den büyük olması, diyotların ideallikten saptığını gösterir. Bu ideallikten sapmalar genelde kullanılan aratabakanın varlığına, arayüzey durumlarına ve seri direncin etkisine bağlanır. Bazı araştırmacılar [169, 245] ideallikten sapmaya organik aratabaka ile ikinci bir mekanizmanın arayüzeyde oluşmasını neden olarak gösterirken, bazı araştırmacılarda [76, 147, 226, 248] tükenim bölgesinde elektron ve hollerin tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlamışlardır.

Çizelge 9.1. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde elde edilen I_o, n ve Φ_{Bo} değerleri

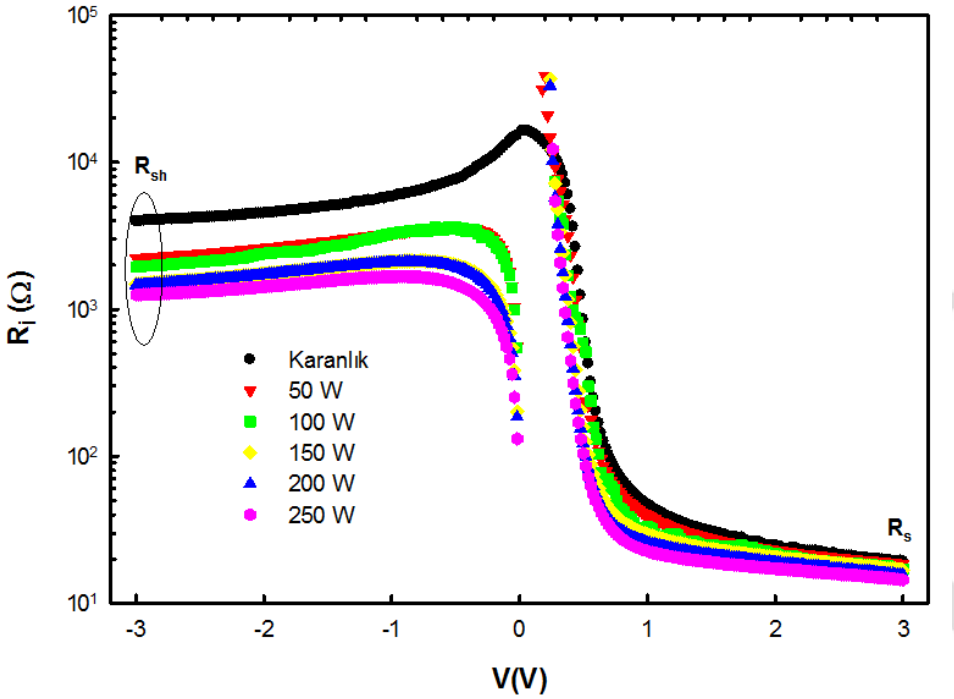
Aydınlatma Şiddeti (W)	$I_o x10^{-7}$ (A)	n	Φ_{Bo} (eV)
0	3,46	2,72	0,71
50	1,84	2,22	0,72
100	1,78	2,10	0,72
150	1,76	1,89	0,73
200	1,40	1,87	0,73
250	1,36	1,88	0.73



Şekil 9.4 Au/P3HT/n-Si (MPS) SB diyotunun aydınlatma şiddetine bağlı bariyer yüksekliği ve idealite faktörü eğrileri

Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotlarda hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri altında direncin (R_i) uygulanan voltaj ile nasıl değiştiğini göstermek amacıyla R_i değerleri ±3 V aralığında 20 mV' luk adımlarla Ohm yasası kullanılarak hesaplandı. Farklı aydınlatma şiddetleri için elde edilen R_i-V eğrileri Şekil 9.5'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi R_s *ve* R_{sh} değerleri hem voltaja hem de aydınlatma şiddetine bağlı olarak oldukça değişmektedir. Yüksek pozitif ön-gerilimler için elde edilen R_i değerleri diyotun

seri direncine (R_s) karşılık gelirken, yüksek negatif ön-gerilimler için elde edilen R_i değerleri ise diyotun kısa devre direncine (R_{sh}) karşılık gelmektedir. Artan ışık şiddeti ile R_s değerleri lineer azalırken R_{sh} değerleri artan aydınlatma şiddeti ile üstel olarak azalmaktadır.

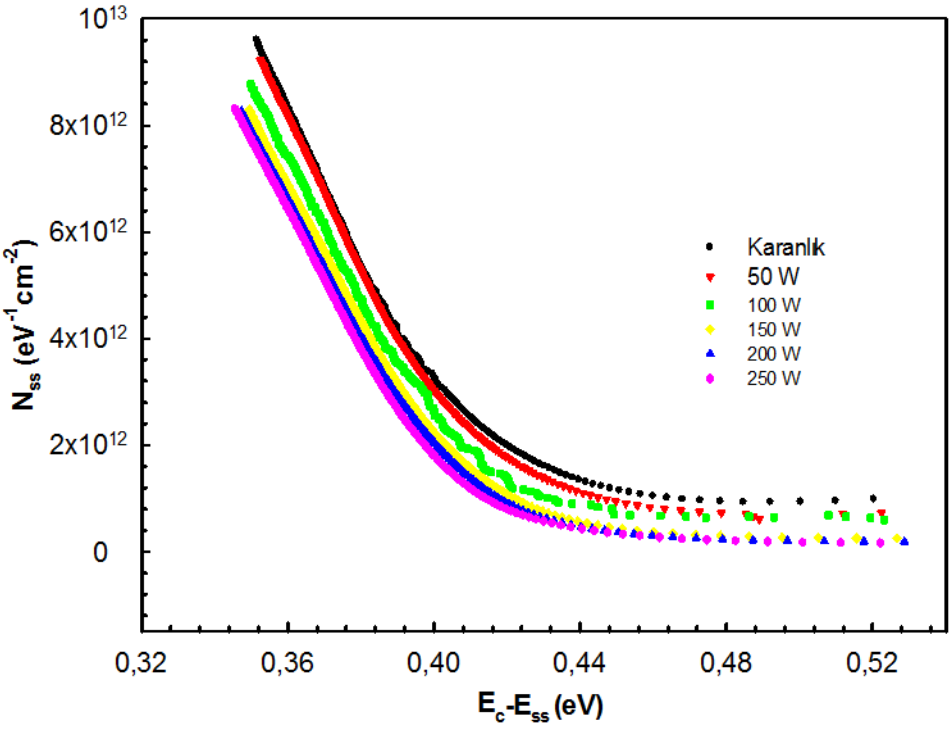


Şekil 9.5. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde R_i-V eğrileri

Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotun arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) yasak enerji bandındaki dağılım profili doğru ön-gerilim *I-V* ölçümlerinden enerjinin (E_c-E_{ss}) bir fonksiyonu olarak ve etkin engel yüksekliğinin (Φ_e) uygulanan gerilime bağlı olduğu göz önüne alınarak farklı aydınlatma şiddetleri için elde edildi ve Şekil 9.6'de verildi. Şekil 6.4 ve 9.6'da görüldüğü gibi karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri için N_{ss} değerleri iletim bandının alt kenarından yasak enerji aralığının ortasına doğru azalmakta ve bir minimumdan geçerek U şekline benzer bir davranış göstermektedir. Bu davranış arayüzey durumlarının genelde verici (donor) tipi olduğunu göstermekte ve yasak enerji aralığının ortasından sonra ise alıcı (acceptor) tipi arayüzey durumlarının da etkin olabileceğini göstermektedir.

Şekil 9.6'den açıkça görüldüğü gibi arayüzey durumlarının yoğunluğunun diyot üzerine uygulanan ışık şiddeti arttıkça artması, ışık şiddeti arttıkça tuzaklanmış yük seviyelerinden

salınan yük taşıyıcıların akıma daha fazla katkı sağladığı açıklamasını deneysel olarak doğrulamaktadır [105, 147, 240, 249].



Şekil 9.6. Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde N_{ss}- E_c-E_{ss} eğrileri

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

MS ve MIS/MPS yapılar üzerine yapılan araştırmalar artarak devam etmektedir. Araştırmaların bir bölümü yeni yarıiletken malzemelerin hazırlanması yönünde gelişirken bir bölümü de bu yarıiletkenlerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerden faydalanılarak yeni metal-yarıiletken devre elamanları geliştirmeyi amaçlar. Bu çalışmada, metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi Au/P3HT/n-Si (100) yönelimine sahip 0,01 Ω.cm özdirençli, 350 μm kalınlıklı, 2 inç çapında fosfor (P) katkılı (n-tipi) Si tek kristal üzerine Schottky diyotlar hazırlanmıştır. Bu diyotun elektriksel ve dielektriksel karakteristikleri, geniş bir frekans (10kHz-1MHz) ve sıcaklık (80-400 K) aralığında, ±3 V'da araştırılmıştır. Önce n-Si yarıiletkenine P3HT arayüzey tabakası spin kaplama metoduyla yüzey oksiti kaldırılmış n-Si üzerine kaplandı. Au/P3HT/n-Si (MPS) diyotların metalizasyon işlemleri de 10^{-6} mbar basınç altında hazırlandı. Hazırlanan diyotların arka yüzü bakır levhaya doğrultucu kontaklar ile gümüş pasta ve gümüş kaplı teller yardımıyla yapıştırıldı ve elektriksel ölçümler için hazır hale getirildi.

P3HT örneği GNR firmasının APD 2000 Pro X-ışınları kırınım cihazı ile tarama yapıldı. Kaynak olarak CuKα spektrası kullanıldı. Yapının kristaltesinin incelendiği Si üzerine P3HT büyütmenin kırınım analizinden (110), (022), (1101), (1300) düzlemlerinden yansıma elde edildiği ortaya çıkmıştır. Scherrer eşitliği ile kristalin yanal boyutu 93 nm olarak hesaplandı. Buradan da anlaşılacağı üzere geniş kristal boyutu ile kristalize olduğu aşikardır.

Schottky diyotlarda, doğru ön-gerilim *lnI-V* eğrileri üç farklı bölgeye ayrılır. Bunlar sırasıyla düşük gerilim (V≤0,1 V) bölgesi, orta gerilim (0,1 < V < 0,8 V) bölgesi ve yüksek gerilim (V>0,8 V) bölgesidir. Düşük gerilim bölgesinde kaçak akımlar etkin olup lineer bir davranış gözlenmez. Yüksek gerilim bölgesinde ise *ln(I)-V* eğrisinde R_s' den dolayı bir bükülme meydana gelir. Orta gerilim bölgesinde *ln(I)-V* eğrisi genelde lineer bir davranış gösterir. Bu lineer davranış bize geniş voltaj aralığında bazı parametrelerin belirlenmesine olanak sağladı. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky diyotunun her sıcaklık için LnI-V eğrisinden elde edilen doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n) ve potansiyel engel yüksekliği Φ_B(I-V) değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyodunun yapılan ölçümlerin sonuçlarındaki hesaplamalarda 80-400 K sıcaklık aralığında *n*, idealite faktörü değerleri 17.02'den 2.30 değerlerine doğrıu azalan bir değişim gösterir. Aynı şekilde

$\Phi_{Bo}(I\text{-}V)$, engel yüksekliği 0.16 eV-0.89 eV aralığında artış gösterir. İdealite faktörünün ideal değeri olan 1'den uzaklaşmasına imaj kuvveti etkisi, elektron ve hollerin yeniden oluşumu ve birleşme olayları ile tünelleme olayı da neden olarak gösterilebilir [52]. Sıcaklık arttıkça n idealite faktörü azalırken Φ_{Bo} artmaktadır. İdealite faktörünün daha yüksek değere sahip olması özellikle arayüzey polimer tabakanın homojensizliği, polimer tabakayla yarıiletken tabaka arasındaki oksit tabakanın varlığı ve arayüzey durumlarının yüksek değerlere sahip olmasından kaynaklanabilir [41, 47]. Engel yüksekliğindeki artış, P3HT organik tabaka pasivasyonu yoluyla ara yüzey dipolü ile açıklanabilir. Si ve organik yarıiletken etkileştiğinde, organik yarıiletken ve metalin iş fonksiyonunun en düşük boş molekül orbitali (LUMO) ve en yüksek dolu molekül orbitali (HOMO) seviyeleri yeniden düzenlenir ve sırayla organik/inorganik yarıiletken ara yüzeyinde yarıiletkenin elektron ilgisi değişir ve bu da bariyer yüksekliğinde artışa sebep olur. Literatürde birçok araştırmacı, Au/P3HT/n-Si üzerine çalışmalar yapmış ve çalışmamızda ulaştığımız değerlerde literatür ile uyum içerisindedir [41, 47, 93, 147, 166-168]. R_s ve R_{sh} değerleri oda sıcaklığında sırasıyla MPS tipi SBD için 12,18 Ω ve 1,59x10^4 Ω olarak elde edilmiştir. MPS tipi Schottky engel diyotları için N_{ss}'lerin enerji yoğunluk dağılımı Eşitlik 6.9 ve 6.10 kullanılarak elde edildi ve grafiği Şekil 6.4'de verildi. N_{ss} değerlerinin iletim bandının alt sınırından yarıiletkenin yasak enerji aralığının ortasına doğru azalmakta olduğu ve sıcaklık arttıkça azaldığı açıkça görülmektedir. N_{ss} değerlerindeki bu azalma, P3HT arayüzeyindeki durumların sıcaklık etkisiyle moleküler yeniden yapılanma ve düzenlenmesine ya da sıcaklık arttıkça yeteri kadar enerji kazanan yük taşıyıcılarının tuzaklardan kurtulmasına atfedilebilir. Arayüzey durumları nümunenin elektriksel parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Değerlerin 10^{12} civarında çıkması literatürle uyum içinde olduğunu gösterir.

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotlarının frekansa bağlılığı oda sıcaklığında, ±3 V ve geniş frekans aralığında (10 kHz-1 MHz) elde edilen deneysel C-V ve G/ω-V ölçümleri HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile yapılmıştır. Kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/ω-V) ölçümlerinden; V_D, E_F, W_D ve Φ_B (C-V) gibi temel diyot parametreleri elde edildi. V_D, 0,06-0,60 V, E_F, 0,155–0,164 eV, N_D, 6,01×10^{16}-4,14×10^{16} cm^{-3} ve Φ_B, 0,20-0,73 eV aralığında değişmektedir. Au/P3HT/n-Si yapının arayüzey durumları (N_{ss}), Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de farklı frekanslarda ölçülen C-V ve

G/ω-V değerlerini dikkate alarak Hill-Coleman metodu yardımıyla elde edilerek Şekil 7.5 ve Çizelge 7.2'de verildi. N_{ss}=9.21x10^{13}-1.24 x10^{12} $eV^{-1}.cm^{-2}$ aralığında değişmektedir.

Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotunun sıcaklığa bağlılığı *C–V* ve *G/ω-V* ölçümleri 80–400K sıcaklık aralığında, 1 MHz frekansta, ±3 V aralığında, Hewlet Packart 4192 A empedans analizörü cihazı ile alınmıştır. Sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümleri sonucu çizilen C^{-2}-V grafiği yardımıyla V_D, E_F, N_D ve Φ_B değerleri hesaplanmıştır. Au/P3HT/n-Si MPS Schottky engel diyotu için; V_D, 0,94-0,15 V, E_F, 0,04–0,23 eV, N_D, 7,10×10^{16}–2,88×10^{16} cm^{-3} ve Φ_B, 0,94-0,56 eV aralığında değişmektedir. C-V değerleri fiziksel mekanizması ve kaynağı henüz tam olarak belirlenmemiş ve çoğu zaman açıklanamadığı için yok kabul edilen negatif kapasitans (NC) davranışı göstermiştir. Negatif Kapasitansa sebep olan etkenler ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir. Sıcaklığa bağlı Nss değerlerinin sıcaklık arttıkça arttığı gözlemlendi. N_{ss}=4,79x10^{13}-1,27x10^{14} $eV^{-1}.cm^{-2}$ aralığında değişmektedir. Sıcaklık azalırken nispeten daha yüksek değerlerde Nss'in değişimini, metal/yarıiletken arayüzeyinde engel yüksekliğinin lateral (enine) homojensizlikleri sonucunda n'nin sıcaklığın fonksiyonu olarak değişimine atfedilmiştir [164, 206].

Au/P3HT/n-Si MPS tipi Schottky engel diyotunun oda sıcaklığında, geniş bir frekans ve voltaj aralığında (sırasıyla, 10 kHz-1 MHz ve ±3 V) dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları (dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp ε") ve kayıp tanjantı (tanδ) karakteristiklerinin frekans bağımlılığı kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden hesaplanmıştır. Elektriksel özelliklerden a.c. elektriksel iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) gibi temel parametreler frekansa ve voltaja bağlı olarak hesaplandı. Deneysel sonuçlar, Schottky engel diyotun ε′, ε″, kayıp tanjantı (tanδ), reel ve imajiner elektrik modülü (M′, M″) ve σ_{ac} değerlerinin tersinim bölgesinden ziyade özellikle tüketim ve yığılma bölgelerinde frekansın ve uygulanan ön gerilimin güçlü fonksiyonları olduğunu göstermiştir. Dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε") değerleri de artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslarda görülen bu artma eğilimi arayüzeyde oluşan kutuplaşmaya atfedilebilir [210, 211]. Dielektrik sabitinin değeri P3HT için dielektrik sabitinin beklenen teorik değeri (~4) ile uyumludur [55, 146, 147, 215]. Reel elektrik modülü artan frekansla artan bir dağılım sergilemekte iken imajiner elektrik modülü negatif bölgede artan frekansla azalan, pozitif bölge de ise artan bir dağılım sergilemektedir.

Dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε''), kayıp açı (tanδ), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülün sıcaklığa bağımlılığı Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için 1 MHz frekansta 300-400 K sıcaklık aralığında incelendi. Negatif bölgede ε' artan gerilimle zayıfça artarken, ε'' ise azalmaktadır. Pozitif bölgede ise genel olarak bunun tersi gerçekleşmekte ve artan gerilimle ε' azalırken ε'' artmaktadır (Şekil 8.13). Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky engel diyotu için ε' değerleri ~1 volttan sonra hızlıca azalarak negatife gitmektedir. MPS yapıda kullanılan Si'da oluşan, gerek arayüzey durumları ve gerekse kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile bu MPS yapıların kapasitansı ve dielektrik sabitinde hızlı bir azalma ile negatif kapasite ve negatif dielektrik sabitine yol açmaktadır. Dielektrik kayıp açı tanδ'nin sıcaklığa bağımlılığı bir dielektrik durulma sergilemektedir (Şekil 8.14). Şekil 8.14'de açıkça görüldüğü gibi dielektrik kayıp açı tanδ yaklaşık 1 volt civarında önce bir pik verip artma eğiliminden sonra ani olarak düşmektedir.

Elektriksel iletkenlik Şekil 8.15'de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Elektriksel iletim durumunda, a.c. iletkenliğin sıcaklık bağımlılığı Arrhenius denklemine göre açıklanabilir. ln σ_{ac}'nin 1000/T'ye karşı grafiğin eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi (E_a) değeri 19,4 meV olarak bulundu. Düşük aktivasyon enerjisi yeniden birleşme ve uzay yüklerinin varlığına atfedilebilir [202, 210, 213, 223, 234, 235, 238].

Au/P3HT/n-Si (MPS) yapılarına ait M' değerleri artan gerilim voltajıyla azalmakta olup bu azalış belli bir voltajdan sonra yerini ani bir düşüşe bırakmakta ve yaklaşık 1 volttan sonra da reel elektrik modülü negatife gitmektedir. Her sıcaklık değerinde Au/P3HT/n-Si (MPS) diyotu için M''-V eğrileri pozitif bölgede yaklaşık 1 voltta birer pik vermekte ve bu pik maksimumları artan oksit tabaka kalınlığıyla negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır.
Son olarak Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky diyotunun akım-voltaj (I-V) ölçümleri hem karanlıkta hem de farklı aydınlatma şiddetleri için ölçüldü ve ilgili grafikler ve çizelgeler elde edildi. *I-V* ölçümleri hem karanlık hem de 6 farklı aydınlatma şiddeti (0-250 W) için, ±3 V aralığında, 20 mV' luk adımlarla oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Aydınlatma şiddetine bağlı olarak deneysel *I-V* ölçümlerinden I_o, n, Φ_{Bo}, R_s , R_{sh} *ve* N_{ss} gibi temel diyot parametreleri elde edildi. Au/P3HT/n-Si MPS SBD için karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde elde edilen I_o, n ve Φ_{Bo} değerleri Çizelge 5.6'da verildi. I_o,=3.46x10^{-7}-1.84 x10^{-7}A, n = 2.72-1.88, Φ_{Bo}=0.71-0.73 değerleri elde edilmiştir. Artan ışık şiddeti ile R_s

değerleri lineer azalırken R_{sh} değerleri artan aydınlatma şiddeti ile üstel olarak azalmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar (V_{oc}, 0,26 V; I_{sc},0,295 mA; FF, 0,27; τ ise ~%0,28) bir güneş pili için düşük olmakla birlikte Au/P3HT/n-Si Schottky engel diyotlarının ışığa duyarlı olduğunu göstermektedir [41, 62, 91, 93]. Mevcut literatür kıyaslamalı olarak incelendi.

Hazırlanan bu tez sonucunda deneysel veriler bize metal ile yarıiletken arasında P3HT arayüzey tabakası ve buna benzer polimerlerin kullanımının birçok avantaj sağlayacağını göstermektedir. Bu tez çalışması sonucunda;

- ✓ Geleneksel metal yarıiletken kontaklardan Au/n-Si diyotun P3HT arayüzey tabakası kullanılarak modifiye edilebileceği,
- ✓ Yalıtkan polimerlerin katkılanarak (PCBM vb. organik katkılar ile arayüzeyinde oluşturulan organik/polimer materyalleri MPS tipi diyotlarda doğrultma oranı ve kısa devre direncini artırıp diğer taraftan R_s, N_{ss} ve kaçak akımı azaltılabilir) metal/yarıiletken kontaklarda arayüzey tabakası olarak kullanılabileceği
- ✓ Spin kaplama metoduyla kaplanan P3HT tabakaların yardımıyla n-Si yüzeyinin pasifize/nötralize edilebileceği,
- ✓ Uygun deney ortamında hazırlanacak Au/P3HT/n-Si diyotların geleneksel olanlara oranla daha yüksek performans gösterebileceği,
- ✓ Tüm elektriksel ölçümler zamana bağlı olarak da gerçekleştirilip hem ölçümlerin tekrarlanabilirliği hem de temel elektriksel parametrelerin zamana bağlı değişimi incelenebileceği,
- ✓ Au/P3HT/n-Si diyotların ışığa duyarlı olarak kullanılabileceği önerilmektedir.
- ✓ P3HT polimerinin çeşitli katkılamalarla çalışma alanı azalmanın aksine her gün biraz daha genişlediği göz önüne alınırsa P3HT:PCBM, P3HT: PF8BT, P3HT:PEDOT vb., katkılı organik polimer yapılar verimi arttırmada birer örnek teşkil ediyor. Sadece P3HT değil gelişen bir alan olan polimer dünyası katkılamadaki çeşitliklerle malzemelerin verimlerini arttrmak için farklı organik polimerleri keşfetmeye devam ediyor. Örneğin bilim dünyasında yeni yeni parlayan bir diğer yapı Kesterite'lerdir. Avrupa'da sadece bu malzeme için çalışan gruplar oluşmaya başlamış ve çalışılması gereken bir alan olma yolunda ilerlemektedir.

- ✓ P3HT gibi organik polimerli malzemelerin ışığa duyarlı yapıları nedeniyle sadece güneş pili ve benzeri ürünleri ortaya koymada kullanılacağı düşünülebilir ancak sahip oldukları üstün özellikleri nedeniyle polimerlerin akıllı malzeme olarak kullanılmaları üzerinde de çok yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Geleceğin malzemeleri dediğimiz akıllı malzeme olarak adlandırılan malzemelerde organik polimer yapılı yarıiletkenlerin kulanılması, bu çalışmalara artan ihtiyacı açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil hafızalı polimerler üzerinde durulması gereken ve hızla gelişen bir çalışma alanına sahiptir. Organik polimer yapıların esnek, ucuz ve her şartta kullanıma uygun olması bir çok alanda olduğu gibi şekil hafızalı akıllı malzemelerin yapılmasında da kullanılacaktır. Elektronik, inşaat, tekstil vb. alanlarda bu malzemeleri sık duyabiliriz. Savunma sanayi için ise bu alandaki her ilerleme kıymetli olacaktır. Örneğin üzerinde çalışılan şekil değiştiren uçak (morphing aircraft) olarak bildiğimiz uygulamalarda, uçak kanatları, uçuş sırasında verilen komutlar neticesinde istenilen şekli alabilmektedirler. Bu sayede bu tip uçaklar farklı uçuş koşulları altında en uygun uçuş performansı verebilmektedirler. Bu performans iyileşmesi de, yakıt ekonomisini, çok rollü görev kabiliyetini ve görev performansını iyileştirmektedir. Bu yüzden organik polimerlerden ilk akla gelen P3HT ve türevi bir çok polimer katkılı malzeme araştırmaya ve geliştirmeye müsait malzemeler arasında sayılabilir.
- ✓ Gelişen dünya koşularına ayak uydurabilmek adına ülkemizin her alanda teknolojinin yapı taşı olacak bu malzemeler hakkında araştırma yapmaya destek ve yön verici olması elzemdir. Savunma sanayisinden evlerde kulandığımız elektronik aletlere (örneğin ünlü firmalarımız tarafından şu anda üretimi yapılan OLED Tv'ler ar-ge'nin hayatımızın bir parçası olduğunu göstermektedir.) kadar bir çok alanda çalışan özel sektör, üniversite ar-ge işbirliği ile bu temeli daha da güçlendirecektir.

KAYNAKLAR

1. Braun, F. (1875). Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annalen der Physik und Chemie*, 229(12), 556-563.

2. Braun, E., Macdonald, S. (1982). *Revolution in Miniature*. (Second Edition). New York: Cambridge University Press.

3. Emerson, D. T. (1997). The work of Jagadis Chandra Bose: 100 years of mm-wave research. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2, 553-556.

4. Bose, J. C. (1899). On a Self-Recovering Coherer and the Study of the Cohering Action of Different Metals. *Proceedings of the Royal Society*, LXV(416), 166-172.

5. Bose, J. C. (1998). Detector For Electrical Disturbances Patent. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 229-234.

6. Indian National Science Academy. (2001). *Pursuit and Promotion of Science: The Indian Experience (Chapter 2)*. India: Indian National Science Academy, 22-25.

7. Douglas, A. (1981). Communications: The crystal detector: By 1920, G.W. Pickard had tested 31 250 possible combinations of materials in search of a practical detector. *IEEE Spectrum*, 18(4), 64-69.

8. Lee, T. H. (2007). The (Pre-) History of the Integrated Circuit: A Random Walk. *IEEE Solid-State Circuits Newsletter*, 12(2), 16-22.

9. Pierce, G. W. (1907). Crystal Rectifiers for Electric Currents and Electric Oscillations. Part I. Carborundum. *Physical Review (Series I)*, 25(1), 31-60.

10. Kleint, C. (1998). Julius Edgar Lilienfeld: Life and profession. *Progress in Surface Science*, 57(4), 253-327.

11. Sondheimer, E. H. (1999). Sir Alan Herries Wilson. 2 July 1906 - 30 September 1995: Elected F.R.S. 1942. *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 45, 547-562.

12. Lalena, J. N., Cleary, D. A. (2010). *Principles of Inorganic Materials Design.* (Second Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 175-183.

13. Schottky, W. (1939). Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht-und Spitzengleichrichter. *Zeitschrift für Physik*, 113(5-6), 367-414.

14. Mönch, W. (2013). *Semiconductor Surfaces and Interfaces.* (Third Edition). Berlin: Springer, 21-28.

15. Sattler, K. (2010). Metal Nanolayer-Base Transistor. *Handbook of Nanophysics: Nanoelectronics and Nanophotonics*. New York: CRC Press, 13.1-13.7.

16. Sharma, B. L. (1984). Physics of Schottky Barrier Junctions. *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. (First Edition). New York: Springer, 2-60.

17. Bhattacharya, H., Fornari, P., Kamimura, R. (2011). Atomic Structures and Electronic Properties of Semiconductor Interfaces. *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*. (First Edition). Amsterdam: Elsevier, 151.

18. Mott, N. F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semi-conductor. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568.

19. Crowell, C. R., Sze, S. M. (1965). Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures. *Solid-State Electronics*, 8(12), 979-990.

20. Rhoderic, E. H., Williams, R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. (Second Edition). USA:Oxford [England] : Clarendon Press ; New York : Oxford University Press, 20-48.

21. Tung, R. T. (1992). Electron-Transport At Metal-Semiconductor Interfaces: General Theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509–13523.

22. Henisch, H. K. (1984). *Semiconductor Contacts: An Approach to Ideas and Models.* New York: Clerondon Press.

23. Torrey, C.A., Whitmer, H.C. (1948). *Crystal Rectifiers*. New York: McGraw Hill, 1-11.

24. Rideout, V. L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48(3), 261-291.

25. Bethe, H. A. (1942). Theory of The Boundary Layer of Crystal Rectifiers. *MIT Radiation Laboratory*, 43, 12-17.

26. Sze, S. M. (2007). *Physics of Semiconductor Devices.* (Third Edition). New Jersey: John Wiley& Sons, 135-191, 197-240, 663-740.

27. Bardeen, J. (1947). Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact. *Physical Review*, 71(10), 717-727.

28. Shur, M. (1990). *Physics of semiconductor devices*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 194-225.

29. Heine, V. (1965). Theory of Surface States. *Physical Review*, 138(6A), 1689-1696.

30. Mönch, W. (1994). Metal-semiconductor contacts: electronic properties. *Surface Science*, 299–300(C), 928–944.

31. Cowley, A. M., Sze, S. M. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212–3220.

32. Card, H. C., Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 319.

33. Çetinkara, H. A., Sağlam, M., Türüt, A., Yalçın, N. (1994). The effects of the time-dependent and exposure time to air on Au/epilayer n-Si Schottky diodes. *The European Physical Journal Applied Physics*, 6(1), 89-94.

34. Werner, J. H., Güttler, H. H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522.

35. Nicollian, J. R., Brews, E. H. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New York: John Wiley& Sons.

36. Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. (Third Edition). Boston: McGraw-Hill.

37. Altındal, Ş. (1993). *Al-SiOx-pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

38. Saad, M., Kassis, A. (2008). Thermally and light-activated current in ZnO/CdS/$CuGaSe_2$ single crystal solar cells. *Renewable Energy*, 33(5), 974-978.

39. Yakuphanoğlu, F. (2007). The current-voltage characteristics of FSS/n-Si heterojunction diode under dark and illumination. *Physica B: Condensed Matter*, 388(1-2), 226-229.

40. Tozlu, C., Mutlu, A. (2016). Poly(melamine-co-formaldehyde) methylated effect on the interface states of metal/polymer/p-Si Schottky barrier diode. *Synthetic Metals*, 211, 99-106.

41. Gündüz, B., Yahia, I. S., Yakuphanoğlu, F. (2012). Electrical and photoconductivity properties of p-Si/P3HT/Al and p-Si/P3HT:MEH-PPV/Al organic devices: Comparison study. *Microelectronic Engineering*, 98, 41-57.

42. Yakuphanoğlu, F., Şenkal, B. F. (2008). Electrical conductivity, photoconductivity, and optical properties of poly(1,4-diaminoanthraquinone) organic semiconductor for optoelectronic applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 19(9), 1193-1198.

43. Singh, T. B., Meghdadi, F., Güneş, S., Marjanovic, N., Horowitz, G., Lang, P., Bauer,S. and Sariciftci, N. S. (2005). High-Performance Ambipolar Pentacene Organic Field-Effect Transistors on Poly(vinyl alcohol) Organic Gate Dielectric. *Advanced Materials*, 17(19), 2315-2320.

44. Ferrer, J., Alonso, J., de Ávila S. (2014). Electrical Characterization of Photodetectors Based on Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) Layers. *Sensors*, 14(3), 4484-4494.

45. Shirakawa, H., Louis, E. J., MacDiarmid, A. G., Chiang, C. K., and Heeger, A. J. (1977). Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)x. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 16, 578.

46. Heeger, A. J. (2001). Semiconducting and Metallic Polymers: The Fourth Generation of Polymeric Materials (Nobel Lecture). *Angewandte Chemie International Edition*, 40(14), 2591-2611.

47. Yakuphanoğlu, F., Shah, M., Farooq, W.A. (2011). Electrical and Interfacial Properties of p-Si/P3HT Organic-on-Inorganic Junction Barrier. *Acta Physica Polonica A*, 120(3), 558-562.

48. Esen, H., Inalli, M., Esen, M. (2006). Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47(9), 1281-1297.

49. Güneş, S., Neugebauer, H., Sarıçiftci, N.S. (2007). Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews*, 107(4), 1324-1338.

50. Tang, C. W. (1986). Two-layer organic photovoltaic cell. *Applied Physics Letters*, 48(2),183.

51. Altındal, Ş., Sari, B., Unal,H.I., Yavas, N. (2009). Electrical characteristics of Al/polyindole Schottky barrier diodes. I. Temperature dependence. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(5), 2955-2961.

52. Güllü, O., Türüt, A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structures. *Journal of Applied Physics*, 106(10), 103717.

53. Riede, M., Lüssem, B., Leo, K. (2011). Organic Semiconductors. *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, 448-507.

54. Wang, H., Yan, D. (2010). Organic heterostructures in organic field-effect transistors. *NPG Asia Materials*, 2(2), 69-78.

55. Dong, H., Fu, X., Liu, J., Wang, Z. and Hu, W. (2013). 25th Anniversary Article: Key Points for High-Mobility Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials*, 25(43), 6158-6183.

56. Zhao, Y., Guo, Y., Liu, Y. (2013). 25th Anniversary Article: Recent Advances in n-Type and Ambipolar Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials,*. 25(38), 5372-5391.

57. Braga, D., Horowitz, G. (2009). High-Performance Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials*, 21(14-15), 1473-1486.

58. Mas-Torrent, M., Rovira, C. (2011). Role of Molecular Order and Solid-State Structure in Organic Field-Effect Transistors. *Chemical Reviews*, 111(8), 483-4856.

59. Wang, G., Swensen, J., Moses, D., Heeger, A.J. (2003). Increased mobility from regioregular poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*, 93(10), 6137.

60. Sarıçiftci, N. S. (1997). *Primary Photoexcitations in Conjugated Polymers*. Singapore: World Scientific.

61. Ye, Q., Chi, C. (2011). Conjugated Polymers for Organic Solar Cells. *Solar Cells New Aspects and Solutions*, Crotia: InTech.

62. Yakuphanoğlu, F. (2010). Electrical and photovoltaic properties of cobalt doped zinc oxide nanofiber/n-silicon diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 494(1-2), 451-455.

63. Sirringhaus, H., Brown, P.J., Friend, R.H., Nielsen, M.M., Bechgaard, K., Langeveld-Voss, B.M.W., Spiering, A.J.H., Janssen, R.A.J., Meijer, E.W., Herwig, P. and de Leeuw, D.M. (1999). Two-dimensional charge transport in self-organized, high-mobility conjugated polymers. *Nature*, 401(6754), 685-688.

64. Meijer, E. J., Mangnus, A.V.G., Huisman, B. H., Hooft, G. W., de Leeuw, D. M. and Klapwijk, T. M. (2004). Photoimpedance spectroscopy of poly(3-hexyl thiophene) metal–insulator–semiconductor diodes. *Synthetic Metals*, 142(1-3), 53-56.

65. Okutan, M., Başaran, E., Yakuphanoğlu, F. (2005). Electronic and interface state density distribution properties of Ag/p-Si Schottky diode. *Applied Surface Science*, 252(5), 1966-1973.

66. Ziel, A. V. (1968). *Solid State Physical Electronics*. New Jersey: Prentice Hall Inc.

67. Tung, R. T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1-3) ,1-138.

68. Ghandhi, S. K. (1983). *VLSI Fabrication Principles*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983.

69. Gökçen, M. (2005). *MOS Yapılarda kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/w-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

70. Schroder, D. K. (1998). *Semiconductor Material and Device Characterization.* (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.

71. Grove, A. S. (1967). *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley and Sons.

72. Haddara, H. S., El-Sayed, M. (1988). Conductance technique in MOSFETs: Study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes. *Solid-State Electronics*, 31(8), 1289-1298.

73. Kutluca, H. (2007). *Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin sıcaklığa incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

74. Padovani, F. A., Stratton, R. (1966). Field and thermionic-field emission in Schottky barriers. *Solid-State Electronics*, 9(7), 695-707.

75. Yu, A. Y. C. (1968). Surface Effects on Metal-Silicon Contacts. *Journal of Applied Physics*, 39(7), 3008.

76. Sah, C. T., Shockley, W. (1958). Electron-Hole Recombination Statistics in Semiconductors through Flaws with Many Charge Conditions. *Physical Review*, 109(4), 1103-1115.

77. Ohdomari, I., Tu, K. N. (1980). Parallel silicide contacts. *Journal of Applied Physics*, 51(7), 3735.

78. Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers.

79. Von Hippel, A. R. (1954). *Dielectric Materials and Applications*. New York: John Wiley& Sons Inc..

80. Popescu, I., Bunget, M. (1984). *Physics of solid dielectrics*. Amsterdam: Elsevier Science Ltd..

81. Raju, G. G. (2003). *Dielectrics in Electric Fields.* (Power Engineering, 19*)*. New Jersey: CRC Press.

82. Daniel, V. V. (1967). *Dielectric Relaxation*. London: Academic Press.

83. Symth, C. P. (1955). *Dielectric Behaviour and Structure*. New York: McGraw-Hill.

84. Fröhlich, H. (1958). *Theory of Dielectrics*. Oxford: Clarendon Press.

85. Skotheim, T. A. (1986). *Handbook of Conducting Polymers*. New York: Marcel Dekker Inc..

86. Saçak, M. (2004). *Polimer Kimyası*. (3. Baskı). Ankara: Gazi Kitapevi.

87. Chiang, C.K., Fincher, C.R.,. Park, Y.W., Heeger, A.J., Shirakawa, H., Louis, E.J., Gau, S.C. and MacDiarmid, A.G. (1977). Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene. *Physical Review Letters*, 39(17), 1098-1101.

88. Şen, S. (2007). *Polivinilferrosen-Polipirol Kompozitlerinin Sentezi ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

89. Yang, X. (2012). *Semiconducting Polymer Composites: Principles, Morphologies, Properties and Applications*. New York: John Wiley& Sons.

90. Sirringhaus, H., Wilson, R. J., Friend, R. H., Inbasekaran, M., Wu, W., Woo, E. P., Grell, M. and. Bradley, D.D.C. (2000). Mobility enhancement in conjugated polymer field-effect transistors through chain alignment in a liquid-crystalline phase. *Applied Physics Letters*, 77(3), 406.

91. Moons, E. (2002). Conjugated polymer blends: linking film morphology to performance of light emitting diodes and photodiodes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14(47), 12235-12260.

92. Nunzi, J. M. (2002). Organic photovoltaic materials and devices. *Comptes Rendus Physique*, 3(4), 523-542.

93. Nolasco, J. C., Castro-Carranza, A., Iñıguez, B., Pallarès, J. and Estrada, M. (2011). Electrıcal propertıes of P3HT (Poly [3-hexylthıophene])/n-type crystallıne sılıcon (n-c-Si) solar cells. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 20(4), 749-773.

94. Fukui, K. (1975). *Theory of Orientation and Stereoselection*. New York: Springer.

95. Lewis, D. F. V., Ioannides, C., Parke, D. V. (1994). Interaction of a series of nitriles with the alcohol-inducible isoform of P450: Computer analysis of structure activity relationships. *Xenobiotica*, 24(5), 401-408.

96. Pearson, R. G.(1989). Absolute electronegativity and hardness: applications to organic chemistry. *The Journal of Organic Chemistry*, 54(6), 1423-1430.

97. Wallace, C. O., Dastoor, G.G., Officer, P.C. and Too, D.L. (2000). Conjugated Polymers: New materials for photovoltaics. *Chemical Innovation*, 30(1), 14-22.

98. Winder, C., Sarıçiftci, N. S. (2004). Low bandgap polymers for photon harvesting in bulk heterojunction solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 14(7), 1077.

99. Brütting, W. (2005). *Physics of organic semiconductors*. Weinheim: Wiley-Vch-Verlag.

100. Bundgaard, E., Krebs, F. C. (2007). Low band gap polymers for organic photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(11), 954-985.

101. Hoppe, H., Sarıçiftci, N. S. (2004). Organic solar cells: An overview. *Journal of Materials Research*, 19(7), 1924-1945.

102. Tarkuç, S., Şahmetlioğlu, E., Tanyeli, C., Akhmedov, I. and Toppare, L. (2007). Electrochromic properties of a soluble conducting polymer of 1-benzyl-2,5-di(thiophene-2-yl)-1H-pyrrole. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 121(2), 622-628.

103. Ak, M. S., Ak, M., Güllü, M. and Toppare, L. (2007). Synthesis and electropolymerization of 5,12-dihydrothienon [3′,4′:2,3] [1,4] dioxocino [6,7-b] quinoxaline and its electrochromic properties. *European Polymer Journal*, 43(8), 3452-3460.

104. Feng, L. F., Wang, C. D., Cong, H. X., Zhu, C. Y., Wang, J., Xie, X. S., Lu, C. Z. and Zhang, G. Y. (2007). Sudden Change of Electrical Characteristics at Lasing Threshold of a Semiconductor Laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 43(6), 458-461.

105. Zhang, C., Hua, C., Wang, G., Ouyang, M. and Ma, C. (2010). A novel multichromic copolymer via electrochemical copolymerization of (S)-1,1′-binaphthyl-2,2′-diyl bis (n-(6-hexanoic acid-1-yl) pyrrole) and 3,4-ethylenedioxythiophene. *Electrochimica Acta*, 55(13), 4103-4111.

106. Chen, H., Huang, H., Tian, Z., Shen, P., Zhao, B. and Tan, S. (2010). Synthesis and photovoltaic performances of 2,5-dioctyloxy-1,4-phenylenevinylene and terthiophene copolymers with di(p-tolyl)phenylamine and oxadiazole side groups. *European Polymer Journal*, 46(4). 673-680.

107. Lanzi, M., Paganin, L. (2010). New regioregular polythiophenes functionalized with sulfur-containing substituents for bulk heterojunction solar cells. *Reactive and Functional Polymers*, 70(6), 346-360.

108. Sarıçiftci, N. S. (2014). Organic Semiconductors. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.,1-7.

109. Lungenschmied, C., Dennler, G., Czeremuzskin, G., Latrèche, M., Neugebauer, H. and Sarıçiftci, N. S. (2006). Flexible encapsulation for organic solar cells. *Photonics for Solar Energy Systems*, 6197, 619712.

110. Xia, L., Wei, Z., Wan, M. (2010). Conducting polymer nanostructures and their application in biosensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 341(1),1-11.

111. Gerard, M., Chaubey, A., Malhotra, B. D. (2002). Application of conducting polymers to biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 17(5), 345-359.

112. Malhotra, B. D., Chaubey, A., Singh, S. P. (2006). Prospects of conducting polymers in biosensors. *Analytica Chimica Acta*, 578(1), 59-74.

113. Hoa, D. T., Kumar, T. N. S., Punekar, N. S., Srinivasa, R. S., Lal, R. and Contractor, A. Q. (1992). A biosensor based on conducting polymers. *Analytical Chemistry*, 64(21), 2645-2646.

114. Zhang, F., Johansson, M., Andersson, M. R., Hummelen, J. C. and Inganäs, O. (2002). Polymer Photovoltaic Cells with Conducting Polymer Anodes. *Advanced Materials*, 14(9), 662-665.

115. Yoshino, K., Tada, K., Fujii, A., Conwell, E. M. and Zakhidov, A. A. (1997). Novel photovoltaic devices based on donor-acceptor molecular and conducting polymer systems. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 44(8), 1315-1324.

116. Baibarac, M., Gómez-Romero, P. (2006). Nanocomposites Based on Conducting Polymers and Carbon Nanotubes: From Fancy Materials to Functional Applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(2), 289-302.

117. Wong, W. Y. (2008). Metallopolyyne Polymers as New Functional Materials for Photovoltaic and Solar Cell Applications. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 209(1), 14-24.

118. Vanlaeke, P., Swinnen, A., Haeldermans, I., Vanhoyland, G., Aernouts, T., Cheyns, D., Deibel, C., D'Haen, J., Heremans, P., Poortmans, J. and Manca, J. V. (2006). P3HT/PCBM bulk heterojunction solar cells: Relation between morphology and electro-optical characteristics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(14), 2150-2158.

119. Mihailetchi, V. D., Xie, H. X., de Boer, B., Koster, L. J. A. and. Blom, P. W. M. (2006). Charge Transport and Photocurrent Generation in Poly(3-hexylthiophene): Methanofullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 16(5), 699-708.

120. Ayachi, S., Mabrouk, A., Bouachrine, M., Alimi, K. (2012). Photophysical Properties of Two New Donor-Acceptor Conjugated Copolymers and Their Model Compounds: Applications in Polymer Light Emitting Diodes (PLEDs) and Polymer Photovoltaic Cells (PPCs), *Organic Light Emitting Devices*. Crotia: InTech, 105-142.

121. Khan, S., Lorenzelli, L., Dahiya, R. S. (2015). Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 15(6), 3164-3185.

122. Benor, A., Knipp, D. (2008). Contact effects in organic thin film transistors with printed electrodes. *Organic Electronics*, 9(2), 209-219.

123. Girotto, C., Cheyns, D., Aernouts, T., Banishoeib, F., Lutsen, L., Cleij, T. J., Vanderzande, D., Genoe, J., Poortmans, J. and Heremans, P. (2008). Bulk heterojunction organic solar cells based on soluble poly(thienylene vinylene) derivatives. *Organic Electronics*, 9(5), 740-746.

124. Liu, X., Wallmann, I., Boudinov, H., Kjelstrup-Hansen, J., Schiek, M., Lützen, A. and Rubahn, H.G. (2010). AC-biased organic light-emitting field-effect transistors from naphthyl end-capped oligothiophenes. *Organic Electronics*, 11(6), 1096-1102.

125. Weng, G., Su, Y., Liu, Z., Zhang, J., Dong, W. and Xu, C. (2009). Electrochemical properties of novel organodisulfide poly 1,2-bis(thiophen-3-ylmethyl)disulfane as cathode material for secondary lithium batteries. *Energy*, 34(9), 1351-1354.

126. Zhan, L., Song, Z., Zhang, J., Tang, J., Zhan, H., Zhou, Y. and Zhan, C. (2008). PEDOT: Cathode active material with high specific capacity in novel electrolyte system. *Electrochimica Acta*, 53(28), 8319-8323.

127. Chang, C. C., Her, L. J., Hong, J.-L. (2005). Copolymer from electropolymerization of thiophene and 3,4-ethylenedioxythiophene and its use as cathode for lithium ion battery. *Electrochimica Acta*, 50(22), 4461-4468.

128. Meyer, V. (1883). Ueber den Begleiter des Benzols im Steinkohlentheer, *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 16(1), 1465-1478.

129. Diaz, A. F., Kanazawa, K. K., Gardini, G. P. (1979). Electrochemical polymerization of pyrrole. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 14, 635.

130. Fichou, D. (1999). *Handbook of Oligo- and Polythiophenes.* Germany: Wiley-VCH.

131. Schopf, G., Koßmehl, G. (1997). *Polythiophenes-Electrically Conductive Polymers*, Berlin: Springer, 129.

132. Sato, M., Tanaka, S., Kaeriyama, K. (1986). Soluble conducting polythiophenes. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 11, 873.

133. Patil, A. O., Heeger, A. J., Wudl, F. (1988). Optical properties of conducting polymers. *Chemical Reviews*, 88(1), 183-200.

134. Baughman, R. H., Bredas, J. L., Chance, R. R., Elsenbaumer, R. L. and Shacklette, L. W. (1982). Structural basis for semiconducting and metallic polymer dopant systems. *Chemical Reviews*, 82(2), 209-222.

135. Bredas, J. L., Street, G. B. (1985). Polarons, bipolarons, and solitons in conducting polymers. *Accounts of Chemical Research*, 18 (10), 309-315.

136. Kovacic, P., Jones, M. B. (1987). Dehydro coupling of aromatic nuclei by catalyst-oxidant systems: poly(p-phenylene). *Chemical Reviews*, 87(2), 357-379.

137. Cheng, Y. J., Yang, S. H., Hsu, C. S. (2009). Synthesis of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Applications. *Chemical Reviews*, 109(11), 5868-5923.

138. Głowacki, E. D., Voss, G., Sarıçiftci, N. S. (2013). 25th anniversary article: progress in chemistry and applications of functional indigos for organic electronics. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 25(47), 6783-800.

139. Jeon, S. S., Yang, S. J., Lee, K. J. and Im, S. S. (2010). A facile and rapid synthesis of unsubstituted polythiophene with high electrical conductivity using binary organic solvents. *Polymer*, 51(18), 4069-4076.

140. Patil, A. O., Ikenoue, Y., Basescu, N., Colaneri, N., Chen, J., Wudl, F. and Heeger, A. J. (1987). Self-doped conducting polymers. *Synthetic Metals*, 20(2), 151-159.

141. Wallace, G. G., Spinks, G. M., Kane-Maguire, L. A., Teasdale, P. R. (2009). *Conductive electroactive polymers: Intelligent Polymer Systems* (Third Edition). United States: CRC Press.

142. Watts, B., Swaraj, S., Nordlund, D., Lüning, J. and Ade, H. (2011). Calibrated NEXAFS spectra of common conjugated polymers. *The Journal of Chemical Physics*, 134(2), 24702.

143. Matsumoto, F., Moriwaki, K., Takao, Y. and Ohno, T. (2008). Synthesis of thienyl analogues of PCBM and investigation of morphology of mixtures in P3HT. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, 4.

144. Goubard, F., Wantz, G. (2014). Ternary blends for polymer bulk heterojunction solar cells. *Polymer International*, 63(8), 1362-1367.

145. Barsch, U., Beck, F. (1993). Electrodeposition of polythiophene from bisthiophene onto iron. *Synthetic Metals*, 55(2-3), 1638-1643.

146. Kim, C. H., Kisiel, K., Jung, J., Ulanski, J., Tondelier, D., Geffroy, B., Bonnassieux, Y. and Horowitz, G. (2012). Persistent photoexcitation effect on the poly(3-hexylthiophene) film: Impedance measurement and modeling. *Synthetic Metals*, 162(5-6), 460-465.

147. Brus, V. V., Zellmeier, M., Zhang, X., Greil, S. M., Gluba, M., Töfflinger, A. J., Rappich, J. and Nickel, N. H. (2013). Electrical and photoelectrical properties of P3HT/n-Si hybrid organic–inorganic heterojunction solar cells. *Organic Electronics*, 14(11), 3109-3116.

148. Kuo, C.-C., Wang, C.-T., Chen, W.-C. (2009). Poly(3-hexylthiophene)/Poly(methyl methacrylate) Core-Shell Electrospun Fibers for Sensory Applications. *Macromolecular Symposia*, 279(1), 41-47.

149. Ludwigs, S. (2014). *P3HT Revisited-From Molecular Scale to Solar Cell Devices*. Berlin: Springer.

150. Güneş, S., Marjanovic, N., Nedeljkovic, J. M. and Sariciftci, N. S. (2008). Photovoltaic characterization of hybrid solar cells using surface modified TiO(2) nanoparticles and poly(3-hexyl)thiophene. *Nanotechnology*, 19(42), 424009.

151. Skotheim, T. A., Reynolds, J. R. (2007). *Handbook of Conducting Polymers: Conjugated Polymers*. (Third Edition). New York: CRC Press Taylor&Francis Group,9.1-10.1.

152. Camaioni, N., Ridolfi, G., Casalbore-Miceli, G., Possamai, G. and Maggini, M. (2002). The Effect of a Mild Thermal Treatment on the Performance of Poly(3-alkylthiophene)/Fullerene Solar Cells. *Advanced Materials*, 14(23), 1735-1738.

153. Padinger, F., Rittberger, R. S., Sarıçiftci, N. S. (2003). Effects of Postproduction Treatment on Plastic Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 13(1), 85-88.

154. Dietmüller, R. (2012). *Hybrid organic-inorganic heterojunctions for photovoltaic applications*, Doktora Tezi, Technische Universität München, München, 52-56.

155. Yang, X., Loos, J., Veenstra, S. C., Verhees, W. J. H., Wienk, M. M., Kroon, J. M., Michels, M.A.J. and Janssen, R. A. J. (2005). Nanoscale morphology of high-performance polymer solar cells. *Nano letters*, 5(4), 579-83.

156. Tremel, K., Ludwigs, S. (2014). Morphology of P3HT in Thin Films in Relation to Optical and Electrical Properties. *Advances in Polymer Science*, 265, 39–82.

157. Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-ray diffraction*, (Second Edition). California: Addison-Wesley, 389.

158. Suryanarayana, M. G., Norton, C. (1998). *X-Ray Diffraction: A Practical Approach*. New York and London: Plenum Press, 63-85.

159. Giulianini, M., Waclawik, E. R., Bell, J. M. and Motta, N. (2010). Temperature and electric field dependent mobility in poly(3-hexylthiophene) diodes. *Journal of Applied Physics*, 108(1), 14512.

160. Zhang, H., Du, X., Wang, Y., Guan, Q., Sun, Y., Cui, Y. and Zhang, J. (2013). Temperature-dependent photovoltaic behavior of CdSe quantum dots/P3HT hybrid thinfilm. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 49, 1-4.

161. Janardhanam, V., Kumar, A. A., Reddy, V.R. and Reddy, P.N. (2009). Study of current-voltage-temperature (I-V-T) and capacitance-voltage-temperature (C-V-T) characteristics of molybdenum Schottky contacts on n-InP (100), *Journal of Alloys and Compounds*, 485(1-2), 467-472.

162. Pakma, O., Serin, N., Serin, T. and Altındal, Ş. (2008). Influence of frequency and bias voltage on dielectric properties and electrical conductivity of Al/TiO_2/p-Si/p+ (MOS) structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(21), 215103.

163. Kuo, C. S., Wakim, F. G., Sengupta, S. K. and Tripathy, S. K. (1993). Schottky diodes using poly(3-hexylthiophene). *Journal of Applied Physics*, 74(4), 2957.

164. Bülbül, M. M., Zeyrek, S., Altındal, Ş. and Yüzer, H. (2006). On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si_3N_4/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 83(3), 577-581.

165. Özmen, Ö. T. (2014). Effects of PCBM concentration on the electrical properties of the Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes. *Microelectronics Reliability*, 54(12), 2766-2774.

166. Özmen, Ö. T., Yağlıoğlu, E. (2014). Electrical and interfacial properties of Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 448-454.

167. Aydın, M. E., Yakuphanoğlu, F., Eom, J.-H. and Hwang, D.-H. (2007). Electrical characterization of Al/MEH-PPV/p-Si Schottky diode by current–voltage and capacitance–voltage methods. *Physica B: Condensed Matter*, 387(1-2), 239-244.

168. Liu, J. T., Lee, N. H., Kim, Y., Oh, D. and Kim, T. W. (2015). Effect of the concentration of the poly(3-hexylthiophene) on the electrical characteristics of diode rectifiable devices. *Journal of the Korean Physical Society*, 66(12), 1868-1871.

169. Brus, V. V., Kyaw, A. K. K., Maryanchuk, P. D. and Zhang, J. (2015). Quantifying interface states and bulk defects in high-efficiency solution-processed small-molecule solar cells by impedance and capacitance characteristics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(11), 1526-1535.

170. Saxena, A. N. (1969). Forward current-voltage characteristics of Schottky barriers on n-type silicon. *Surface Science*, 13(1), 151-171.

171. Altındal, Ş., Dökme, İ., Bülbül, M. M., Yalçın, N. and Serin, T. (2006). The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range. *Microelectronic Engineering*, 83(3), 499-505.

172. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. (2009). The analysis of the series resistance and interface states of MIS Schottky diodes at high temperatures using I-V characteristics, *Journal of Alloys and Compounds*, 484(1), 405-409.

173. Singh, A. (1985). Characterization of interface states at Ni/nCdF2 Schottky barrier type diodes and the effect of CdF2 surface preparation. *Solid-State Electronics*, 28(3), 223-232.

174. Oklobia, O., Shafai, T. S. (2013). A study of donor/acceptor interfaces in a blend of P3HT/PCBM solar cell: Effects of annealing and PCBM loading on optical and electrical properties. *Solid-State Electronics*, 87, 64-68.

175. Chattopadhyay, P., RayChaudhuri, B. (1993). Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes. *Solid-State Electronics*, 36(4), 605-610.

176. Tataroğlu, B., Altındal, Ş., Tataroğlu, A. (2006). The C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Al/SiO_2/p-Si (MIS) structures. *Microelectronic Engineering*, 83(10), 2021-2026.

177. Henisch, H. K. (1986). Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications, *Proceedings of the IEEE*, 74(6),894.

178. Reddy, V. R., Janardhanam, V., Leem, C.-H. and Choi, C.-J. (2014). Electrical properties and the double Gaussian distribution of inhomogeneous barrier heights in Se/n-GaN Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*, 67, 242-255.

179. Hill, W. A., Coleman, C. C. (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid-State Electronics*, 23(9), 987-993.

180. Bülbül, M. M., Zeyrek, S. (2006). Frequency dependent capacitance and conductance–voltage characteristics of Al/Si_3N_4/p-Si(100) MIS diodes. *Microelectronic Engineering*, 83(11-12), 2522-2526.

181. Karataş, Ş., Türüt, A. (2010). The frequency-dependent electrical characteristics of interfaces in the Sn/p-Si metal semiconductor structures. *Microelectronics Reliability*, 50(3), 351-355.

182. Wu, X., Yang, E. S., Evans, H. L. (1990). Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces, *Journal of Applied Physics*, 68(6), 2845.

183. Ershov, M., Liu, H. C., Li, L., Buchanan, M., Wasilewski, Z. R. and Jonscher, A. K. (1998). Negative capacitance effect in semiconductor devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45(10), 2196-2206.

184. Werner, J. H. (1991). Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces. *Journal of Applied Physics*, 70(2), 1087.

185. Mallajosyula, A. T., Iyer, S.S.K., Mazhari, B. (2012). Capacitance-voltage characteristics of P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells with ohmic contacts and the impact of single walled carbon nanotubes on them. *Organic Electronics*, 13(7), 1158-1165.

186. Ehrenfreund, E., Lungenschmied, C., Dennler, G., Neugebauer, H. and Sariciftci, N. S. (2007). Negative capacitance in organic semiconductor devices: Bipolar injection and charge recombination mechanism. *Applied Physics Letters*, 91(1), 12112.

187. Noguchi, T., Kitagawa, M., Taniguchi, I. (1980). Negative Capacitance of Silicon Diode with Deep Level Traps. *Japanese Journal of Applied Physics*, 19(7), 1423-1424.

188. Mokeddem, K., Kechouane, M. (2015). Negative capacitance in Aluminum/hydrogenated amorphous silicon nitride/n type crystalline silicon structure. *Superlattices and Microstructures*, 86, 335-341.

189. Jones, B. K., Santana, J., McPherson, M. (1998). Negative capacitance effects in semiconductor diodes. *Solid State Communications*, 107(2). 47-50.

190. Butcher, K. S., Tansley, T., Alexiev, D. (1996). An instrumental solution to the phenomenon of negative capacitances in semiconductors. *Solid-State Electronics*, 39(3), 333-336.

191. Wang, C. C., Liu, G. Z., He, M. and Lu, H. B. (2008). Low-frequency negative capacitance in La[sub0.8] Sr[sub0.2] MnO[sub3]/Nb-doped SrTiO[sub3] heterojunction. *Applied Physics Letters*, 92(5), 52905.

192. Gharbi, R., Abdelkrim, M., Fathallah, M., Tresso, E., Ferrero, S., Pirri, C. F. and Brahim, T. M. (2006). Observation of negative capacitance in a-SiC:H/a-Si:H UV photodetectors. *Solid-State Electronics*, 50(3), 367-371.

193. Perera, A. G. U., Shen, W. Z., Ershov, M., Liu, H. C., Buchanan, M. and Schaff, W. J. (1999). Erratum:'Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors'. *Applied Physics Letters*, 75(2), 304.

194. Shen, W. Z., Perera, A. G. U. (2001). Effect of interface states on negative capacitance characteristics in GaAs homojunction far-infrared detectors. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 72(1), 107-111.

195. Zhu, C. Y., Feng, L. F., Wang, C. D. , Cong, H. X., Zhang, G. Y., Yang, Z. J. and Chen, Z. Z. (2009). Negative capacitance in light-emitting devices. *Solid-State Electronics*, 53(3), 324-328.

196. Pingree, L. S. C., Russell, M. T., Marks, T. J. and Hersam, M. C. (2006). Field dependent negative capacitance in small-molecule organic light-emitting diodes. *Journal of Applied Physics*, 100(4), 44502.

197. Yahia, I. S., Mansour, S. A., Hafez, H. S., Ocakoğlu, K. and Yakuphanoğlu, F. (2012). Photovoltaic Properties and Negative Capacitance Spectroscopy of PCBM:P3HT/FTO Nanostructured Counter Electrode for TiO_2-Based DSSC. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 22(6), 1240-1247.

198. Lungenschmıed, C., Ehrenfreund, E., Sarıçiftci, N. S. (2009). Negative capacitance and its photo-inhibition in organic bulk heterojunction devices. *Organic Electronics*, 10(1), 115-118.

199. Bisquert, J. (2011). A variable series resistance mechanism to explain the negative capacitance observed in impedance spectroscopy measurements of nanostructured solar cells. *Physical chemistry chemical physics : PCCP*, 13(10), 4679-85.

200. Kwok, H. L. (2003). Modeling negative capacitance effect in organic polymers. *Solid-State Electronics*, 47(6), 1089-1093.

201. Saghrouni, H., Jomni, S., Belgacem, W., Elghoul, N. and Beji, L. (2015). Temperature dependent electrical and dielectric properties of a metal/Dy_2O_3/n-GaAs (MOS) structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 307-314.

202. Saghrouni, H., Jomni, S., Cherif, A., Belgacem, W. and Beji, L. (2016). The temperature dependence on the electrical properties of dysprosium oxide deposited on n-porous GaAs. *Journal of Alloys and Compounds*, 676, 127-134.

203. Altındal, Ş., Uslu, H. (2011). The origin of anomalous peak and negative capacitance in the forward bias capacitance-voltage characteristics of Au/PVA/n-Si structures. *Journal of Applied Physics*, 109(7), 74503.

204. Song, Y. P., Meirhaeghe, R. L. V., Laflère, W. H. and Cardon, F. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid State Electronics*, 29(6), 633-638.

205. Tung, R. T. (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 11304.

206. Sellai, A., Ouennoughi, Z. (2008). Analysis of frequency- and temperature-dependent interface states in PtSi/p-Si Schottky diodes. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 154-155(1-3), 179-182.

207. Chelkowski, A. (1980). *Dielectric Physics*. Amsterdam: Elsevier.

208. Popescu, I., Bunget, M. (1984). *Physics of Solid Dielectrics*. New York: Elsevier.

209. Daniel, V. V. (1967). *Dielectric Relaxation*. New York: Academic Press, 162, 558.

210. Bülbül, M. M. (2007). Frequency and temperature dependent dielectric properties of Al/Si_3N_4/p-Si(100) MIS structure," *Microelectronic Engineering*, 84(1), 124-128.

211. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Bülbül, M. M. (2005). Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO_2/p-Si (MOS) structure. *Microelectronic Engineering*, 81(1), 140-149.

212. Afandiyeva, I. M., Bülbül, M. M., Altındal, Ş. and Bengi, S. (2012). Frequency dependent dielectric properties and electrical conductivity of platinum silicide/Si contact structures with diffusion barrier. *Microelectronic Engineering*, 93, 50-55.

213. Prabakar, K., Narayandass, S. K., Mangalaraj, D. (2003). Dielectric properties of $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ thin films. P*hysica Status Solidi (A)*, 199(3), 507-514.

214. Sattar, A. A., Rahman, S. A. (2003). Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu–Zn Ferrites. P*hysica Status Solidi (A)*, 200(2), 415-422.

215. Chen, S.-A., Liao, C.-S. (1993). Prediction of charge mobility and its temperature dependence in neutral poly(3-Hexylthiophene) from dielectric relaxation measurement. *Solid State Communications*, 87(11), 993-996.

216. Kyu, C. C., Young, K. C. L., Seuk, H., Jong-Kwan, W., Rangaswamy, N., Kwang-Man, L. and Myung, T. H. (2010). Frequency-dependent Capacitance-Voltage and Conductance-Voltage Characteristics of Low-dielectric-constant SiOC(-H) Thin Films Deposited by Using Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition. *Journal of the Korean Physical Society*, 57(61), 1976.

217. Fanggao, C., Saunders, G. A., Lambson, E. F., Hampton, R. N., Carini, G., Di Marco, G. and Lanza, M. (1996). Temperature and frequency dependencies of the complex dielectric constant of poly(ethylene oxide) under hydrostatic pressure. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 34(3), 425-433.

218. Migahed, M. D., Ishra, M., Fahmy, T. and Barakat, A. (2004). Electric modulus and AC conductivity studies in conducting PPy composite films at low temperature. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(6), 1121-1125.

219. Psarras, G., Manolakaki, E., Tsangaris, G. (2002). Electrical relaxations in polymeric particulate composites of epoxy resin and metal particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(3), 375-384.

220. Afandiyeva, I. M., Dökme, İ., Altındal, Ş., Bülbül, M. M. and Tataroğlu, A. (2008). Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al-TiW-Pd_2Si/n-Si structures. *Microelectronic Engineering*, 85(2), 247-252.

221. Kyritsis, A., Pissis, P., Grammatikakis, J. (1995). Dielectric relaxation spectroscopy in poly(hydroxyethyl acrylates)/water hydrogels. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 33(12), 1737-1750.

222. Tsangarıs, G. M., Psarras, G. C., Tsangarıs, G. M. (1998). Electric modulus and interfacial polarization in composite polymeric systems. *Journal of Materials Science*, 33(8), 2027-2037.

223. Osman, M., Hefni, M., Mahfouz, R. and Ahmad, M. (2001). γ-Irradiation effect on the electrical properties of $LiKSO_4$. *Physica B: Condensed Matter*, 301(3-4), 318-325.

224. Macedo, G. M., Moynihan, P. B., Tsangaris, C. T. (1972). The long time aspects of this correlation function, which are obtainable by bridge techniques at temperatures approaching the glass transition. *Physics and Chemistry of Glasses*, 13, 171-176.

225. Tataroğlu, A. (2006). Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures. *Microelectronic Engineering*, 83(11-12), 2551-2557.

226. Bidault, O., Goux, P., Kchikech, M., Belkaoumi, M. and Maglione, M. (1994). Space-charge relaxation in perovskites. *Physical Review B*, 49(12), 7868-7873.

227. Dökme, İ., Altındal, Ş., Gökçen, M. (2008). Frequency and gate voltage effects on the dielectric properties of $Au/SiO_2/n$-Si structures. *Microelectronic Engineering*, 85(9), 1910-1914.

228. Mönch, W. (1970). On metal-semiconductor surface barriers. *Surface Science*, 21(2), 443-446.

229. Champness, C. H., Clark, W. R. (1990). Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 56(12), 1104.

230. Mohammad, S. N., Fan, Z.-F., Botchkarev, A. E., Kim, W., Aktas, O., Morkoç, H., Shiwei, F., Jones, K. A. and Derengek, M. A. Physical mechanisms underlying anomalous capacitance characteristics of platinum-gallium nitride Schottky diodes *Philosophical Magazine Part B*, 81(5), 453-460.

231. Mansingh, A. (1980). AC conductivity of amorphous semiconductors. *Bulletin of Materials Science*, 2(5), 325-351.

232. Mahalakshmi, S., Manja, K. S. (2008). ac electrical conductivity and dielectric behavior of nanophase nickel ferrites. *Journal of Alloys and Compounds*, 457(1-2), 522-525.

233. Migahed, M. D., Ishra, M., Fahmy, T. and Barakat, A. (2004). Electric modulus and AC conductivity studies in conducting PPy composite films at low temperature *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(6), 1121-1125.

234. Al-Ramadin, Y., Zihlif, A. M., Elimat, Z. M. and Ragosta, G. (2009). Dielectric and AC electrical conductivity of polycarbonate kaolinite composites *Journal of Thermoplastıc Composıte Materıals*, 22(6), 617-632.

235. Obrzut, J., Page, K. A. (2009). Electrical conductivity and relaxation in poly(3-hexylthiophene) *Physical Review B-Condensed Matter and Materials Physics*, 80(19), 195211.

236. Okutan, M., Başaran, E., Bakan, H. I., Yakuphanoğlu, F. (2005). AC conductivity and dielectric properties of Co-doped TiO_2. *Physica B: Condensed Matter*, 364(1-4), 300-305.

237. El-Nahass, M. M. and Ali, H. A. M. (2012). AC conductivity and dielectric behavior of bulk Furfurylidenemalononitrile. *Solid State Communications*, 152(12),1084-1088.

238. Awan, S., Gould, R. (2003). Conductivity and dielectric properties of silicon nitride thin films prepared by RF magnetron sputtering using nitrogen gas. *Thin Solid Films*, 423(2), 267-272.

239. Yakuphanoğlu, F. (2010). Controlling of silicon–insulator–metal junction by organic semiconductor polymer thin film. *Synthetic Metals*, 160(13), 1551-1555.

240. Yükseltürk, E., Bülbül, M. M., Zeyrek, S. (2016). The effects of illumination on electrical parameters of Au/P3HT/n-Si Schottky barrier diode. *AIP Conferance Proceedings*, 1722, 220027.

241. Thompson, B. C., Fréchet, J. M. J. (2008). Polymer-fullerene composite solar cells. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47(1), 58-77.

242. Alam, M., Ray, B., Khan, M. and Dongaonkar, S. (2012). The Essence and Efficiency Limits of Bulk-Heterostructure Organic Solar Cells. *MRS Proceedings*, 1390.

243. Yakuphanoğlu, F. (2008). Photovoltaic properties of the organic–inorganic photodiode based on polymer and fullerene blend for optical sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 141(2), 383-389.

244. Canlı, N. Y., Güneş, S., Pivrikas, A., Fuchsbauer, A., Sinwel, D., Sarıçiftci, N. S., Yasa, Ö. and Bilgin-Eran, B. (2010). Chiral (S)-5-octyloxy-2-[{4-(2-methylbuthoxy)-phenylimino}-methyl]-phenol liquid crystalline compound as additive into polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(6), 1089-1099.

245. Yakuphanoğlu, F., Anand, R. S. (2010). Charge transport properties of an organic solar cell. *Synthetic Metals*, 160(21), 2250-2254.

246. Hayashi, Y., Sakuragi, H., Soga, T., Alexandrou, I. and Amaratunga, G. A. J. (2008). Bulk heterojunction solar cells based on two kinds of organic polymers and fullerene derivative. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 313, 422-425.

247. Manceau, M., Chambon, S., Rivaton, A., Gardette, J.-L., Guillerez, S. and Lemaître, N. (2010). Effects of long-term UV-visible light irradiation in the absence of oxygen on P3HT and P3HT:PCBM blend. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(10), 1572-1577.

248. Güllü, Ö., Türüt, A. (2010). Electrical analysis of organic dye-based MIS Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 87(12), 2482-2487.

249. Xin, H., Ren, G., Kim, F. S. and Jenekhe, S. A. (2008). Bulk Heterojunction Solar Cells from Poly(3-butylthiophene)/Fullerene Blends: In Situ Self-Assembly of Nanowires, Morphology, Charge Transport, and Photovoltaic Properties. *Chemistry of Materials*, 20(19), 6199-6207.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: YÜKSELTÜRK, Esra
Uyruğu	:
Doğum tarihi ve yeri	:
Medeni hali	:
Telefon	:
E-mail	:

Eğitim

Derece	Mezuniyet tarihi
Doktora	
Yüksek lisans	
Lisans	
Lise	

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yükseltürk, E., Bülbül, M. M., Zeyrek, S. (2016). The effects of illumination on electrical parameters of Au/P3HT/n-Si Schottky barrier diode. *AIP Conference Proceedings,* 1722, 220027.

Katıldığı Uluslararası Kongreler

1. 21. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı, "Au/P3HT/n-Si (MPS) Schottky Diyotların Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi", Gazi Üniversitesi, Ankara, 25 Aralık 2015 (Poster Bildiri).

2. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU-9); "The effects of illumination on electrical parameters of Au/P3HT/n-Si Schottky barrier diodes", İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 24-27 Ağustos 2015 (Poster Bildiri).

3. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU-9); "Temperature and frequency dependence of dielectric properties of Au/P3HT/n-Si Schottky diode", İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 24-27 Ağustos 2015 (Poster Bildiri).

4. International Semiconductor Science and Technology Conference (ISSTC- 2015); "Dielectric and modulus properties of Au/P3HT/n-Si Schottky barrier diode", Gediz Üniversitesi, Kuşadası/Aydın, 11-13 Mayıs 2015 (Poster Bildiri).

5. International Semiconductor Science and Technology Conference (ISSTC- 2015); "Frequency dependence electrical properties of Au/P3HT/n-Si Schottky Barrier Diodes (SBDs)", Gediz Üniversitesi, Kuşadası/Aydın, 11-13 Mayıs 2015 (Poster Bildiri).

6. 20. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı, Poster Presentation; "Au/P3HT/n-Si Schottky Diyotların Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Frekansa Bağlı İncelenmesi" Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 26 Aralık 2014 (Poster Bildiri).

7. International Nanoscience& Nanotechnology For Next Generation Conference (NanoNG'14); "Temperature and Rs effects on the C-V and G/w-V characteristics of Au/P3HT/n-Si diodes" , Fırat Üniversitesi, Elazığ, 20-22 Ağustos 2014 (Poster Bildiri).

8. IV.ADIM FİZİK GÜNLERİ; "Au/P3HT/n-Si Schottky Bariyer Diyotlarının Akım-Voltaj (I-V) karakteristikleri", , Dumlupınar Üniversitesi, 28-29 Mayıs 2014 (Poster Bildiri).

9. International Semiconductor Science and Technology Conference (ISSTC- 2014), Poster Presentation ; "The interface states and series resistance effects on Current-Voltage (I-V) Characteristics of Au/P3HT/n-Si Schottky Barrier Diodes (SBDs) at Room Temperature", İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, 13-15 Ocak 2014 (Poster Bildiri).

İlgi Alanları

Ebru Sanatı, Tarihi mekanlar, Doğa yürüyüşleri, Bilim Tarihi, Hint dili, Sansktritçe yazımı, Osmanlıca

GAZİ GELECEKTİR...