



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

**POLİMER ARAYÜZEY KULLANILARAK HAZIRLANAN
AU/P3HT:F4-TCNQ/N-Sİ SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN
FREKANS BAĞLI ELEKTRİK VE DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

AYNUR ÖZTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ÖZGE TÜZÜN ÖZMEN**

DÜZCE, 2018

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER ARAYÜZEY KULLANILARAK HAZIRLANAN
AU/P3HT:F4-TCNQ/N-Sİ SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN
FREKANS BAĞLI ELEKTRİK VE DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aynur ÖZTÜRK tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü FİZİK Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

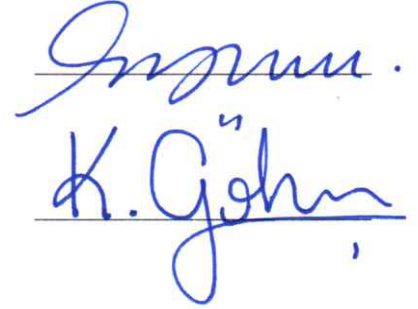
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Nuray ER

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN

Düzce Üniversitesi




Tez Savunma Tarihi: 02/07/2018

BEYAN

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

2 Temmuz 2018



Aynur ÖZTÜRK

TEŞEKKÜR

Hem lisans hem de yüksek lisans öğrenim sürecinde ve tez çalışmamın hazırlanması esnasında gösterdiği destek, sabır ve yardımlarından ötürü çok değerli hocam Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN'e en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında beni destekleyen anabilim dalı başkanımız Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL'a teşekkürler ederim.

Tez çalışmamda her türlü desteğini benden esirgemeyen, tezimin yazımında ve bu aşamaya gelmesinde her zaman bana yardımcı olan Fizik anabilim dalı doktora öğrencisi Hüseyin Muzaffer ŞAĞBAN'a çok teşekkür ederim.

Tezimin yazım kılavuzuna uygun yazılması esnasında verdiği desteklerden dolayı Fizik anabilim dalı doktora öğrencisi Tuğba ÖZDEMİR'e çok teşekkürler ederim.

Eğitim hayatım süresince bana her türlü desteği gösteren aileme, öğretmenlerime ve arkadaşlarıma en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2016.05.02.403 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir

2 Temmuz 2018

Aynur ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	V
ÇİZELGE LİSTESİ	VII
KISALTMALAR.....	VIII
SİMGELER	IX
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İLETKEN, YARIİLETKEN VE YALITKAN.....	1
1.2. KATILARDA İLETKENLİK VE BANT TEORİSİ	2
2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR.....	4
2.1. İDEAL MY KONTAKLARDA ENGEL OLUŞUMU (SCHOTTKY-MOTT TEORİSİ)	5
2.2. METAL-YALITKAN/POLİMER-YARIİLETKEN SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI	9
2.3. İDEAL MPY TİPİ SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI.....	9
2.3.1. Yığılma Bölgesi.....	12
2.3.2. Tüketim Bölgesi.....	12
2.3.3. Terslenim Bölgesi	13
2.4. MYY YAPILARDA İDEAL DURUMDAN SAPMALAR.....	13
2.4.1. Arayüzey Durumları.....	14
2.4.2. Arayüzey Yükleri.....	16
2.4.3. Hareketli İyonlar.....	16
2.4.4. İyonlaşmış Tuzaklar	16
2.5. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER.....	17
2.5.1. Dielektriksiz ve Dielektrikli Paralel Plakalı Kondansatörler	17
2.5.2. Dielektrik Kutuplanma	18
2.5.2.1. Kutuplanma Yükleri	19

2.5.2.2. Kutuplanma Yüklerinin Alanı	20
2.5.3. Kutuplanma Mekanizmaları	22
2.5.3.1. Elektronik Kutuplanma	22
2.5.3.2. İyonik Kutuplanma	22
2.5.3.3. Yönelim Kutuplanması	23
2.5.3.4. Arayüzey Kutuplanması	23
2.5.4. Dielektrik Sabitinin Hesaplanması	23
2.5.5. Dielektrik Kayıplar	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. GİRİŞ	27
3.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	29
3.2.1. Si Alttaşın Hazırlanması	29
3.2.2. Omik Kontağın Oluşturulması	29
3.2.3. P3HT:F4-TCNQ Polimer Karışımın Hazırlanması ve Kaplanması	30
3.2.4. Doğrultucu Kontağın Oluşturulması	31
3.2.5. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLER	33
4.2. FREKANS BAĞLI DIELEKTRİK ÖZELLİKLER	40
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
6. KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için enerji bantlarının şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için doğrultucu ve omik kontak durumundaki enerji bant diyagramı a) $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak), b) $\Phi_m < \Phi_s$ (omik kontak), c) $\Phi_m > \Phi_s$ (omik kontak), d) $\Phi_m < \Phi_s$ (doğrultucu kontak).....	5
Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_m > \Phi_s$) elektron enerji bant diyagramı: (a) kontak yapılmadan önceki durum, (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.....	6
Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji bant diyagramı: (a) ısıl denge, (b) doğru beslem, (c) ters beslem durumu.....	8
Şekil 2.4. Bir MYY/MPY yapının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.5. İdeal MYY Schottky diyot yapısının $V=0$ durumunda (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken için enerji bant diyagramı.....	10
Şekil 2.6. MPY/MYY yapının kapasitans eşdeğer devresi.....	11
Şekil 2.7. İdeal MYY yapının $V \neq 0$ durumunda enerji bant şeması (a) yığılım, (b) tüketim ve (c) terslenim.....	12
Şekil 2.8. İdeal MYY yapının (a) yığılım, (b) tüketim ve (c) terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri.....	13
Şekil 2.9. İdeal bir MYY yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	14
Şekil 2.10. MYY yapısının (a) bir enerji seviyesi ve (b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için eşdeğer devresi.....	16
Şekil 2.11. (a) Plakalar arası boş (b) plakalar arası dielektrik malzeme ile doldurulan paralel plakalı kondansatör.....	17
Şekil 2.12. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri.....	19
Şekil 2.13. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu.....	20
Şekil 2.14. Dielektrikli bir kondansatörde yük akımı (I_C) ile kayıp akımı (I_I) arasındaki ilişki.....	25
Şekil 3.1. MPY SBD'un şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.2. (a) P3HT ve (b) F4-TCNQ organik polimerlerin kimyasal yapıları.....	28
Şekil 3.3. Termal buharlaştırma kaplama sistemi.....	30
Şekil 3.4. Spin kaplama sistemi.....	31
Şekil 3.5. SEM kesit alanı ölçümü.....	31
Şekil 3.6. Üretilen MPY SBD'lerin görünümü.....	32
Şekil 3.7. Düşük ve orta frekans empedans analizmetresi.....	32
Şekil 4.1. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı $C - V$ karakteristikleri.....	34
Şekil 4.2. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı $G/w - V$ karakteristikleri.....	34
Şekil 4.3. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı $R_i - V$ karakteristikleri.....	36
Şekil 4.4. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin 1 MHz frekans değerindeki $R_i - V$	

karakteristiği.....	37
Şekil 4.5. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı arayüzey yoğunluğu (N_{ss}) değişim grafiği.	38
Şekil 4.6. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı seri direncin (R_s) değişim grafiği.....	39
Şekil 4.7. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı dielektrik sabiti (ϵ') değişim grafiği.....	41
Şekil 4.8. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı dielektrik kayıp (ϵ'') değişim grafiği.....	42
Şekil 4.9. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı kayıp açısı ($\tan\delta$) değişim grafiği.....	43
Şekil 4.10. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin 2 V - 10 V aralığında frekansa bağlı ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) grafiği.....	44
Şekil 4.11. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı elektrik modülünün gerçel kısmının (M') grafiği.....	45
Şekil 4.12. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı elektrik modülünün sanal kısmının (M'') grafiği.....	45

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre kontak yapısı.....4



KISALTMALAR

MPY	Metal-Polimer-Yarıiletken
MY	Metal-Yarıiletken
MYY	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
OFET	Organik Alan Etkili Transistör
OLED	Organik Işık Yayan Diyot
OTFT	Organik İnce Film Transistörler
SBD	Schottky Bariyer Diyot
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

SİMGELER

A	Doğrultucu kontak alanı
C	Kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın oluşturduğu kapasitans
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
Cu	Bakır
$C-V$	Kapasitans-voltaj
D	Arayüzey tabakasının kalınlığı
Dc	Doğru akım
E_C	İletkenlik bant kıyısı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_m	Maksimum elektrik alan
F	Frekans
Fe	Demir
G	İletkenlik
$G/w-V$	İletkenlik-voltaj
I	Akım
I_C	Yük akım
I_t	Kayıp akım
M'	Elektrik modülünün gerçel kısmı
M''	Elektrik modülünün sanal kısmı
M^*	Kompleks elektrik modülü

N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
Q	Elektron yükü
Q_{sc}	Uzay yükü
qV_i	Yarıiletkenden metale geçen elektronların aşması gereken potansiyel engeli Seri direnç
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Şant direnç
Si	Silisyum
T	Mutlak sıcaklık
$\tan\delta$	Kayıp açısı
V	Voltaj
V_i	Kontakt potansiyel farkı
V_F	Doğru beslem voltajı
V_R	Ters beslem voltajı
W	Açısal frekans
W_D	Tüketim bölgesinin genişliği
Y	Admittans
Z^*	Kompleks empedans
Å	Angstrom
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Dielektrik kayıp
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu

λ

Elektron yakınlığı

σ_{ac}

Ac elektriksel iletkenlik



ÖZET

POLİMER ARAYÜZEY KULLANILARAK HAZIRLANAN AU/P3HT:F4-TCNQ/N-Sİ SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN FREKANS BAĞLI ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Aynur ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

Temmuz 2018, 52 sayfa

Son yıllarda organik polimer malzemeler araştırmaların odağı haline gelmiştir. Organik malzemelerin yarıiletken teknolojisinde bu kadar öne çıkmasının sebepleri; düşük sıcaklıklarda çalışma imkanı sunması, düşük maliyetle kolay üretilebilir olmaları, geniş yüzeylere büyütülebilir olmaları ve üretilen cihazların yüksek verimliliğe sahip olmalarıdır. Bu özelliklerinden dolayı organik malzeme ile yapılan bir çok çalışmanın sonucu olarak, organik alan etkili transistör (OFET), organik ince film transistör (OTFT), Schottky bariyer diyot (SBD) ve organik ışık yayan diyot (OLED) gibi bir çok elektronik cihazın üretimi yapılmaktadır. Günümüzde kullanılan elektronik cihazların çoğunda bulunan diyot teknolojisinde ise SBD oldukça büyük yer kaplamaktadır. SBD'leri diğer diyotlardan daha çok tercih edilmesinin nedeni ise; tepki sürelerinin çok daha hızlı olması, yüksek frekans değerlerinde anahtarlama özelliğini kaybetmemesi ve daha düşük voltaj ile ilettime geçebilmeleridir. Bu tez çalışmasında, altın/poly (3-hexylthiophene):2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (P3HT:F4:TCNQ)/n-tipi silisyum (Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si) metal-polimer-yarıiletken (MPY) SBD yapının dielektrik özellikleri incelenmiştir. Kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) ölçümleri, $-10\text{ V} - +10\text{ V}$ voltaj aralığında, $10\text{ kHz} - 2\text{ MHz}$ frekans aralığında, oda sıcaklığında ve karanlıkta gerçekleştirilmiştir. Kapasitans ve iletkenlik değerlerinden yararlanılarak direnç (R_i) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) parametreleri elde edilmiştir. Frekans arttıkça direnç eğrilerindeki piklerin şiddetinin ve N_{ss} değerlerinin azaldığı görülmektedir. Frekans ve voltaja bağlı dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), ac iletkenlik (σ_{ac}), kayıp tanjantı ($\tan\delta$), gerçel ve sanal elektrik modülleri (M' ve M'') $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar doğrultusunda Au/P3HT: F4-TCNQ/n-Si MPY SBD için ϵ' , ϵ'' , σ_{ac} , M' ve M'' parametrelerinin frekansa bağlı olduğu görülmüştür. Frekans değerlerinin artmasıyla birlikte Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si SBD'nin ϵ' ve ϵ'' parametreleri azalırken, σ_{ac} , M' ve M'' parametreleri artış göstermektedir. Öte yandan, frekans arttığında $\tan\delta$ neredeyse sabit kalmıştır. Sonuç olarak, Au/P3HT: F4-TCNQ/n-Si MPY SBD için σ_{ac} , ϵ' , ϵ'' , M' ve M'' parametrelerinin frekansa güçlü bir şekilde bağlı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel ve dielektrik özellikler, Frekans ve voltaj bağılılığı, Metal-polimer-yarıiletken (MPY) yapısı, Polimer arayüzey, Schottky bariyer diyot.



ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF FREQUENCY DEPENDENT ELECTRIC AND DIELECTRIC PROPERTIES OF AU/P3HT:F4-TCNQ/N-SI SCHOTTKY BARRIER DIODE PREPARED BY USING POLYMER INTERFACE LAYER

Aynur ÖZTÜRK

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

July 2018, 52 pages

In the last few decades, the polymeric organic materials have been a subject of intensive research. The main reasons of being the center of attention of organic polymers in semiconductor technology are including low-temperature processing, low cost, easy fabrication techniques and large area processing, allow the variety of large application fields and opportunity to produce of high performance devices. Through these properties, many devices can be manufactured with organics such as organic field effect transistors (OFETs), organic thin film transistors (OTFTs), Schottky diodes and organic light emitting diodes (OLEDs). Schottky barrier diodes (SBDs) are the most widely used diodes in electronic devices, because of their faster response time, switching ability under the high frequency signals and low forward voltage drop compared to other diodes. In this thesis, the dielectric properties of the gold/poly (3-hexylthiophene):2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane/n-type silicon (Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si) metal-polymer-semiconductor (MPS) Schottky barrier diode (SBD) structure were investigated. Capacitance-voltage ($C-V$) and conductance-voltage ($G/w-V$) measurements were performed on $-10\text{ V} - +10\text{ V}$ voltage range, in $10\text{ kHz} - 2\text{ MHz}$ frequency range, , at room temperature and in the dark. Resistance (R_i) and interface state density (N_{ss}) parameters were obtained using the values of capacitance and conductivity. The intensity of the peaks in the resistance curves and the N_{ss} values decrease by increasing the frequency. The frequency and voltage dependent dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), ac conductivity (σ_{ac}), loss tangent ($\tan\delta$) and the real and imaginary parts of electric modulus (M' and M'') were calculated by using $C-V$ and $G/w-V$ measurements. The experimental results show that ϵ' , ϵ'' , σ_{ac} , M' and M'' parameters are robust functions of the frequency for the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si SBDs. If ϵ' and ϵ'' parameters of the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si SBDs decrease, σ_{ac} , M' and M'' parameters increase with increasing the frequency for each voltage values. On the other hand, $\tan\delta$ remain almost constant even though the frequency increases. Finally, it can be concluded that σ_{ac} , ϵ' , ϵ'' , M' and M'' parameters are strongly dependent on the frequency for the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si SBDs.

Keywords: Electrical and dielectric properties, Frequency and voltage dependence, metal-polymer-semiconductor (MPS) structure, Polymer interface, Schottky Barrier diode.



1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MY) kontaklar arasındaki elde edilen ilk veriler 19. yüzyılın sonlarına doğru Braun'un bazı metal kontakların (Cu, Fe, ...), yarıiletken kristal üzerine doğrultucu olarak kullanılabileceğini keşfi ile başlamıştır [1]. Modern teknolojiye çok önemli bir yeri olan metal-yarıiletken kontaklar mikrodalga karıştırıcı dedektörler, fotodiyotlar, güneş pilleri, radyo-frekans devreleri, hızlı anahtar uygulamaları gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle bu tip kontakların kullanıldığı diyotların özelliklerini belirlemek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalarda Schottky diyotların üretimi ile metal-yarıiletken yapıların akım iletim mekanizmaları tespit edilmiştir [2].

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen umut vaadedici sonuçlar doğrultusunda MY kontakların yanı sıra metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) ve metal-polimer-yarıiletken (MPY) tipi Scottky bariyer diyotları (SBD) elektronik endüstrisinde oldukça fazla şekilde kullanılmaktadır [3]. Özellikle MPY tipi SBD'ler ile ilgili yapılan deneysel ve teorik çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. MPY çalışmalarındaki artışın başlıca nedenleri; düşük maliyet, kolay üretilebilme ve geniş kullanım alanlarına sahip olmaları gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Bu gelişmeler sonucunda MPY yapıların kullanılması daha çekici bir hale gelmiştir [4].

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde tez konusu hakkında genel bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümünde MY yapılar ile ilgili genel teorik bilgiler verilirken, üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan MPY yapıların hazırlanması gösterilmiş ve ölçümler için kullanılan deneysel sistemlerden bahsedilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde deneysel sonuçlar verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde elde edilen sonuçların genel değerlendirilmesi ve literatürle karşılaştırılması yapılmıştır. Tezin son kısmında kullanılan kaynakların bir listesi verilmiştir.

1.1. İLETKEN, YARIİLETKEN VE YALITKAN

En az iki atomun birleşmesi ile oluşan yapılar molekül olarak adlandırılır. Aynı türdeki atomlar veya farklı atomların birleşmesi ile meydana gelen moleküller kullanılarak katı madde elde edilebilir.

Katı maddeleri elektriği iletip iletmemelerine bağı olarak iletken, yalıtkan ve yarıiletken olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür. Maddenin elektriği iletmesi veya iletmemesi katı içinde dolaşabilecek durumda bulunan serbest elektronların varlığı ile ilgilidir. Serbest elektronlarının fazla miktarda olması sebebiyle metallerin elektrik iletkenliği iyidir. Yarıiletken maddelere dışarıdan etki bulunmadığı durumda elektriği iletmezler. Fakat dışarıdan ısı, ışık ya da voltaj etkileri olduğunda elektrik iletimine geçebilirler. Yalıtkan maddeler serbest elektron bulundurmaması sebebiyle elektriği iletmezler. Çok yüksek bir voltaj uygulanırsa elektronlar serbest duruma geçebilirler.

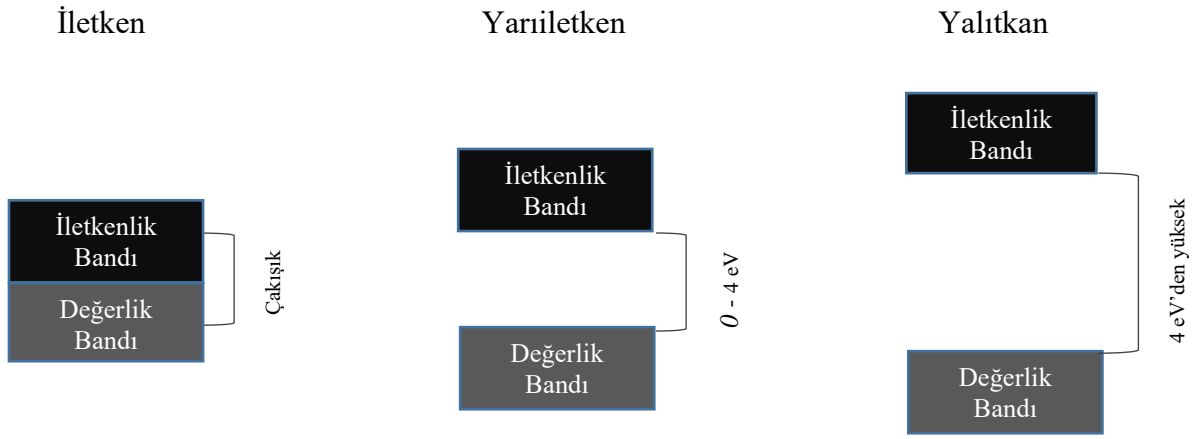
Maddenin iletkenliğini son yörüngesinde bulunan değerlik elektronları belirler. Bu elektronların bulunduğu yörünge valans yörüngesi olarak isimlendirilir. Son yörüngede bulunan değerlik elektronlarının atomun çekirdeğine zayıf şekilde bağı olması metalin özelliğini ifade eden bir durumdur. Son yöründesinde 1-3 elektron bulunduran maddeler iletken, 4-5 olanlar yarıiletken, valans yörüngesi tamamen dolu veya değerlik elektron sayısı 5'ten fazla olanlar ise yalıtandır [5].

1.2. KATILARDA İLETKENLİK VE BANT TEORİSİ

Bir katıda bulunan elektronların davranışını tanımlayan enerji bant ilişkisi, katıların bant teorisi ile açıklanır. Bu teoriye göre katıdaki enerji seviyelerine, katıyı meydana getiren atomların tamamının katkısı olduğu düşünülür. Enerji seviyeleri tek atom için sadece bir çizgi iken atom etkileşimlerinin olduğu durumda ise çizgilerin yarılması nedeniyle aralıkların geniş olduğu bant meydana getirirler.

İletken malzemede valans ve iletim bandı çakışıktır. Yani bantların arasında yasak enerji aralığı bulunmaz. Bantlar arasında elektron veya deşikler rahatça hareket edebilir ve elektrik akımı oluşturabilirler. Bir malzemenin valans bandı elektronlar ile tamamen dolu ise bu malzeme yalıtandır. Yalıtkanın iletkenliği ve özdirenci çok küçüktür. Yalıtkanlar için valans ve iletim bandının arasında geniş bir enerji aralığı (E_g) vardır ve bu aralık 4 eV ve üzeri bir değerdedir. Yarıiletkenler ise iletken ve yalıtkan arasında yer alırlar. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki enerji aralığı ($0 < E_g < 4$ eV) şeklindedir.

Malzemeye dışarıdan bir elektrik alan etkisi olduğunda valans bandında bulunan elektronların kazandığı enerji ile daha üstteki enerji seviyesine geçmeleri ve kristalin tamamında hareket etmeleri sağlanmış olur. Bu şekilde yükler ile net bir elektrik akımı oluşturulur. Benzer durumda deşiklerin de hareket ettiği ve elektrik akımının oluşmasını sağladığı söylenebilir.



Şekil 1.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için enerji bantlarının şematik gösterimi.

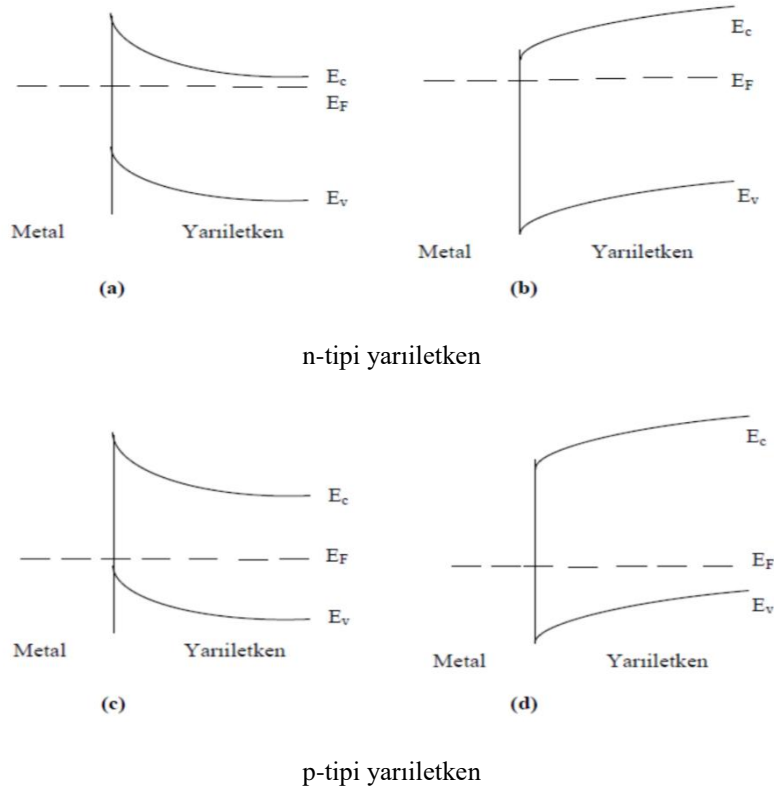
2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

Yalıtkan ve yarıiletken kristallerinin iletkenlik özellikleri detaylı şekilde incelenerek metal-yarıiletken (MY) türdeki diyotların karakteristik parametreleri anlaşılabilir. Bu tür bir inceleme yapabilmek için kristale uygun kontaklar alınarak Schottky diyot yapısının elde edilmesi gerekir. Yarıiletken ve onunla kontak ettirilecek metal veya alaşımın mümkün olduğunca düşük direnç ile atomik denecek kadar küçük boyutta birbirlerine temas etmesi istenir. İdeal bir kantağın olabilmesi için kontak oluşturma amacıyla kullanılacak malzeme yüzeylerinin mümkün olduğunca pürüzsüz ve temiz olması gerekir [6]. MY diyotların iyi bir doğrultma özelliği göstermesi için yarıiletken ve ona uygun saf metallerin seçimi iyi yapılmalıdır. Yarıiletken ve metalin kontak edilmesi esnasında, iki malzeme arasında ısıl denge sağlanıncaya kadar yüklerin malzemeler arası geçişi olur. Yarıiletken ve metalin E_F olarak ifade edilen Fermi enerji seviyelerinin eşitleneceği ana kadar iki malzemedenden de birbirine yük geçişi vardır.

MY kontaklar, doğrultucu kontak ve omik kontak olarak iki çeşittir. MY kontaklarda iletkenliği meydana getiren elektronlar ile deşikler iki yön arasında kolayca iletilebiliyorsa bu kontak türü doğrultucu kontak türüdür. Doğrultucu kontakta akım, doğru beslem durumunda çok iyi iletilyorken, ters beslemde bu durum tam tersidir. Yani akım kötü şekilde iletir ya da hiç iletilemez. Elektron ve deşiklerin her yönde iletildiği kontak türü, omik kontak türüdür. Yarıiletken ve metalin iş fonksiyonları ile kantağın türü (doğrultucu ya da omik) belirlenir. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ile ifade edilir. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak ve $\Phi_m < \Phi_s$ olması durumunda ise omik kontak meydana gelir. Metal/p-tipi yarıiletkenlerde ise tam tersi bir durum söz konusudur. Bahsedilen durumlar Çizelge 2.1’de verilmiştir.

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

Çizelge 2.1. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre kontak yapısı.



Şekil 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için doğrultucu ve omik kontak durumundaki enerji bant diyagramı a) $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak), b) $\Phi_m < \Phi_s$ (omik kontak), c) $\Phi_m > \Phi_s$ (omik kontak), d) $\Phi_m < \Phi_s$ (doğrultucu kontak).

2.1. İDEAL MY KONTAKLARDA ENGEL OLUŞUMU (SCHOTTKY-MOTT TEORİSİ)

MY kontaktarın karakteristikleri belirlenirken önemli olan çeşitli faktörler bulunmasına rağmen, bunlar içerisindeki en önemli faktör olarak MY arayüzeyinde meydana gelen potansiyel engelin yapısı gösterilir.

Schottky ve Mott'un ortaya attıkları modellerde elektronların doğrultma yönünde hareket ettikleri, difüzyon ve sürüklenme yaparak da potansiyel engelini aştıkları ifade edilir. Mott tarafından önerilen modele göre potansiyel engelinin Φ_m ile Φ_s arasındaki fark nedeniyle oluştuğu belirtilir. Mott, arayüzeyde kirlilik atomları bulunmaması nedeniyle elektrik alanın değişmediğini, metale kadar olan kısım için elektrostatik potansiyelinin de uzaklık ile doğrusal olarak değişim gösterdiğini ifade etmiştir. Schottky, engel bölgesinde yoğunluğu değişmeyen safsızlık atomlarının bulunması nedeniyle elektrik alanda doğrusal olarak bir artış olduğunu ve metale kadar olan kısımda elektrostatik potansiyelin kuadratik şekilde değişim gösterdiğini belirtmiştir [1].

bulunan fark, elektron konsantrasyonunun azalması sebebiyle artış gösterir. Isısal dengeye ulaşıldığında E_F 'nin tamamen sabit kalması sebebiyle valans ve iletim bandının kenarları Şekil 2.2(b)'de gösterildiği gibi yukarı doğru bükülürler. Yarıiletken için χ ifadesi kontakla değişim göstermediğinden vakum seviyesi de yukarı yönde bükülür. Yarıiletken malzemenin metal tarafında olan yüzeyinde hareketli yük sayısı bakımından azalma meydana gelir. Bunun nedeni pozitif yüke sahip verici iyonların, iletim bandında bulunan elektronların yarıiletkenden metale geçişi esnasında arkalarında kalmalarıdır.

Bunun bir sonucu olarak ara yüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yük tabakası oluşur. Negatif yüklerden oluşan ince tabaka ise, metalin bulunduğu tarafta ve yarıiletkenden metale elektronların geçmesi ile meydana gelir. Bahsedilen tabaka ara yüzeyden $\sim 0,5\text{Å}$ kadar uzakta yer alır. Sonuç olarak yarıiletken-metal doğrultusunda elektrik alan meydana gelir. Yarıiletkenin bant aralığı metal ile kontak halinde değişmediğinden valans bant kenarı E_V , iletkenlik bant kenarı E_C 'ye benzer değişiklikler oluşur. Bu şekilde ısısal dengeye ulaşmış MY sistemde, engelin yüksekliği belirlenirken geçişin olduğu bölgede vakum seviyesinin sürekliliği sağlanmıştır. Φ_m ve Φ_s arasındaki fark, bantlarda meydana gelen bükülmenin miktarına eşittir.

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

Burada V ekleme oluşan potansiyel olarak ifade edilirken birimi voltur. qV_i ifadesi ise engel yüksekliğidir. Engelin yüksekliği metal tarafından ve yarıiletken tarafından bakıldığında farklıdır ve

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

ile verilir.

$$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n \text{ ve } \Phi_m = qV_i + \Phi_s \text{ olduğundan,}$$

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

elde edilir.

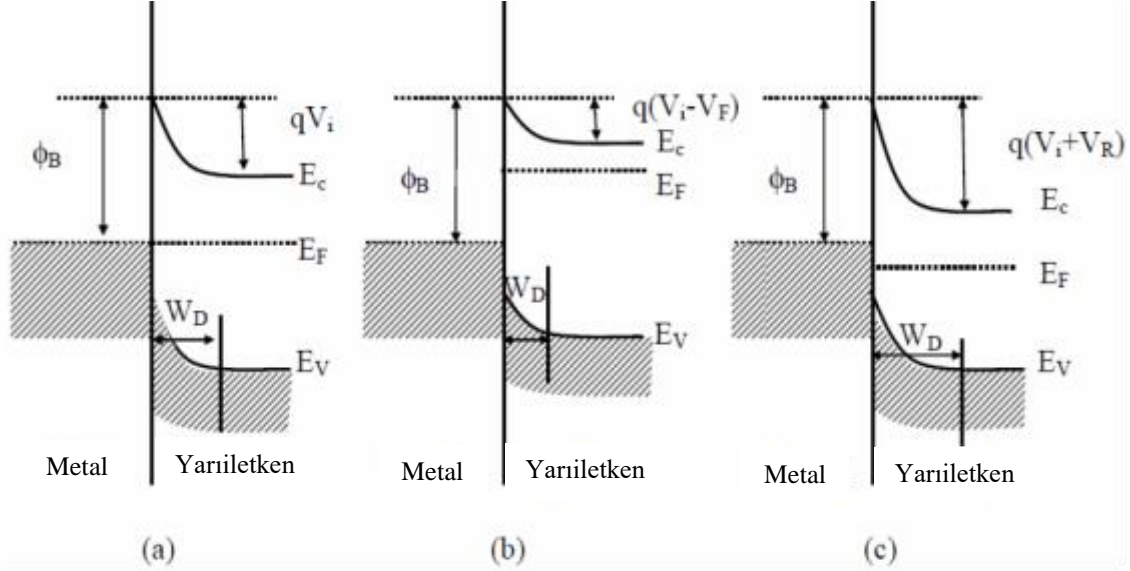
Burada $\Phi_n = (E_C - E_F)$ 'dir.

Denklem 2.2 Schottky ile Mott'un birbirinden bağımsız şekilde elde ettikleri bir ifadedir.

kT/q termal enerjisinin değeri Şekil 2.2(b)'de verilen Φ_B potansiyelinden küçüktür ve yarıiletkende hareketli yüklerin bulunmadığı bölge yüksek dirençli bir uzay yükü bölgesi halini alır. Bu bahsedilen durumlar sonucunda Şekil 2.2(b)'nin doğrultucu bir kontağı

gösterdiği anlaşılmaktadır.

Şekil 2.3'te oluşturulan metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için termal denge, doğru ve ters beslem durumlarındaki enerji bant diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji bant diyagramı: (a) ısısal denge, (b) doğru beslem, (c) ters beslem durumu.

MY kontak meydana geldikten sonra termal dengeye ulaşıldığında yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene geçen elektronlar birbirini dengeler. Bunun sonucu olarak da net bir akım oluşmaz.

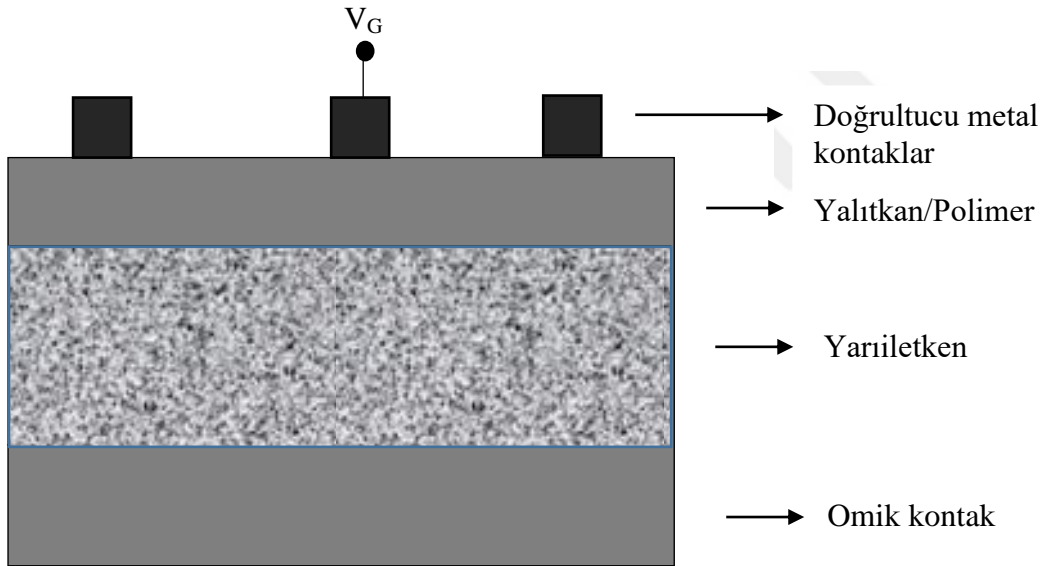
Yarıya dışarıdan uygulanacak voltaj, termal denge durumunda bulunan enerji bant diyagramının değişmesine neden olacaktır. Şekil 2.2(a)'da gösterildiği üzere diyota herhangi bir voltaj uygulandığında engel yüksekliği qV_i 'dir. Ancak metal-yarıiletken kontaklarda, uygulanacak bir $V = V_F$ voltajı ile tüketim bölgesinin genişliğinde azalma meydana gelir. Şekil 2.3(b)'de verildiği gibi bölgenin engel yüksekliği qV_i 'den $q(V_i - V_F)$ 'ye düşer. Bu duruma bağlı olarak yarıiletkenden metale geçecek elektronlar daha küçük bir engelle karşılaşacak ve yarıiletkenden metale yük akımı termal denge değerine göre artmış olacaktır. Şekil 2.3(c)'de görüldüğü gibi metal yarıiletken kontakta ters beslem uygulanması durumunda qV_i artarak $q(V_i + V_R)$ durumunu alacaktır. Bahsedilen durumda, yarıiletkenden metale doğru geçişin olduğu esnada engelin daha büyük olmasından dolayı ısı dengesinin sağlandığı duruma oranla yüklerin sayıca daha az bir kısmı metale geçer.

Doğru ve ters beslem durumunda da Φ_B ile ifade edilen engel yüksekliğinde bir değişimin olmaması nedeniyle metalden yarıiletkene doğru geçen yüklerin miktarında bir değişim

olmayacaktır. Sonuç olarak akımın yarıiletkenenden metale doğru (tek yönde) geçmesi nedeniyle kontağın doğru beslemde olduğu ifade edilir [7].

2.2. METAL-YALITKAN/POLİMER-YARIİLETKEN SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI

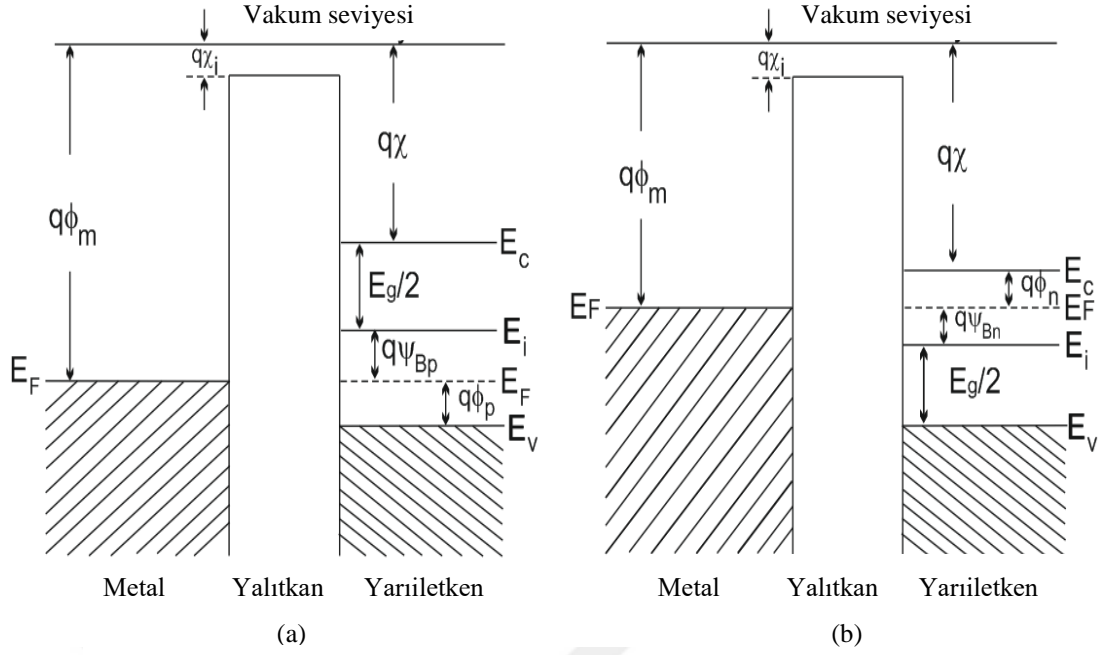
Yalıtkan veya polimer bir malzeme tabaka olarak yarıiletken ve metalin arasına kaplandığında MY yapısı, arayüzey tabakasına göre isimlendirilerek metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) veya metal-polimer-yarıiletken (MPY) yapılarına dönüşür. Metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen arayüzey tabakası ile MY yapının birbirinden izolesini sağlar. Arayüzey tabakasının seri direnci mevcut ise diyot üzerine etkiyen voltaj ($V_G = V_D + V_{RS} + V_I$) bölüşülür. Bundan dolayı arayüzey tabakası olarak yalıtkan veya polimer kullanılan yapılarda akımın iletilmesi MY yapılarıdakinden farklı şekildedir. Şekil 2.4'te metal-yarıiletken arasına yalıtkan veya polimer arayüzey tabakası yerleştirildiğinde oluşan yapıların şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Bir MYY/MPY yapının şematik gösterimi.

2.3. İDEAL MYY TİPİ SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI

İdeal yapıda metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotlardan (SBD) bahsedilebilmesi için R_{sh} şant direncinin $M\Omega$ gibi yüksek, arayüzey durumları ve seri direncin ise diyota etkisinden bahsedilemeyecek kadar küçük değerlerde olması gerekir [8]-[10]. Bu tür diyotlar için idealite faktörü 1 olarak alınır. Bahsedilen bu ideal yapının $V=0$ durumundaki enerji bant diyagramı Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. İdeal MYY Schottky diyot yapısının $V=0$ durumunda (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken için enerji bant diyagramı.

İdeal MYY olarak tanımlanan yapı aşağıdaki özelliklere sahiptir [9].

- Herhangi bir voltajın olmadığı durumda Φ_m ile gösterilen metalin iş fonksiyonu ve Φ_s ile gösterilen yarıiletkenin iş fonksiyonu arasında fark yoktur. Yani Φ_{ms} sıfırdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.4)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.5)$$

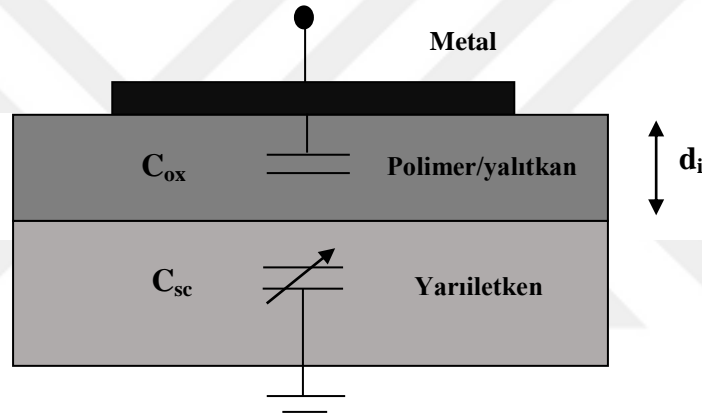
Verilen denklemlerde yarıiletkenin elektron yakınlığı χ , yasak enerji aralığı E_g ile ifade edilirken ψ_B terimi, Fermi enerji seviyesi (E_F) ile saf enerji seviyesi (E_i) arasındaki enerji farkını temsil eder.

- Bir beslem altında MYY yapıda bulunan yükler yalıtkan ile bitişik durumda bulunurken, metal yüzeyindeki yükler ile yarıiletkendeki yükler sayıca eşit fakat zıt yönlüdür.

Serbest yük yoğunluğu, yarıiletkenlerde metallerdeki göre daha az ve dışarıdan uygulanacak voltaj ile bağlantılıdır. İdeal durumdaki MYY yapıda, metal elektroda uygulanacak voltaj neticesinde yarıiletken malzemede bulunan yüklerde kaymalar oluşur. Yarıiletken arayüzeyinde yer alan bantlardaki bükülmelerin sebebi olarak gösterilen ve Q_{sc} ile

ifade edilen uzay yükü meydana gelir. Termal denge durumundaki yarıiletken malzemenin arayüzeydeki uzay yükü olan Q_{sc} 'yi potansiyelin büyüklüğü belirler. Yarıiletkenlerde katkı atomlarının türü ile çoğunluk ve azınlık yük taşıyıcıları belirlenir. Yarıiletken diyotlarda iletimi elektron veya holler sağlar. Azınlıkta olan yüklerin meydana getirdiği akım için azınlık akımı ifadesi kullanılırken, çoğunlukta olan yüklerden kaynaklı olan akım için ise çoğunluk yük akımı ifadesi kullanılır.

Yalıtkan veya polimer tabakanın metal ile yarıiletken malzeme arasına yerleştirilmesi sonucunda yarıiletken ve metal arasında MYY kapasitansı olarak adlandırılan C kapasitansı oluşur. MYY yapının kapasitansını elde ederken, uzay yükü kapasitansı C_{sc} ve yalıtkan tabakanın oluşturduğu kapasitans C_{ox} (veya C_i) kullanılır. Şekil 2.6'da MYY yapının kapasitans eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. MYY yapının kapasitans eşdeğer devresi.

Şekil 2.6'da gösterilen MYY yapının kapasitans eşdeğer devresinin çözümüyle elde edilen MYY yapının kapasitansının değeri şu şekilde tanımlanır [10]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6.'ya göre metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken yapıda eşdeğer kapasitans elde edilirken, seri bağlama ile C_{ox} ve C_{sc} kapasitanslarını bağlanması gerekir. Denklem 2.7'de yalıtkan veya polimer arayüzey tabakasının kapasitansının (C_{ox}) ifadesi verilmiştir [8], [9], [11].

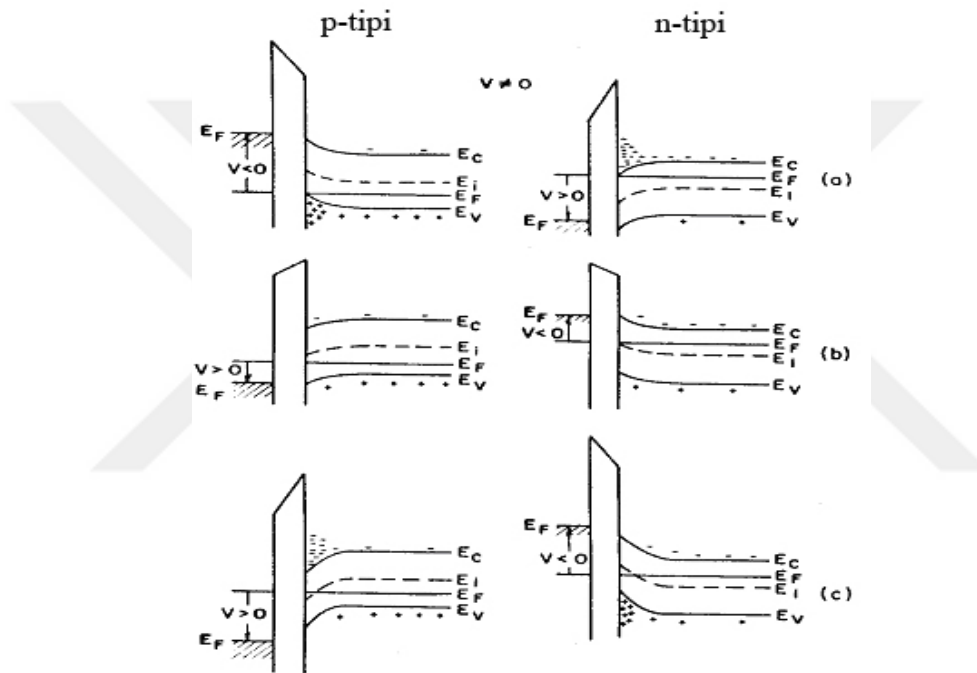
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_i} A \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti ϵ_{ox} , doğrultucu kontak alanı A ve arayüzey tabakanın kalınlık ifadesi d_i ile verilmiştir. ϵ_{ox} ve d_i voltajdan bağımsız olduğundan C_{ox} değeri uygulanan voltajla değişmez. Q_{sc} ile ifade edilen uzay yükü kapasitansı, MYY yapının

sırasında değişiklik meydana getirebilecek tek niceliktir. Bu tür yapıların $C-V$ eğrisinin incelenmesi yığılma, tüketim ve terslenim bölgesi olmak üzere üç şekilde yapılabilir.

2.3.1. Yığılma Bölgesi

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapı için metale voltaj uygulandığı durumda ($V_G > 0$) oluşan elektrik alanın etkisiyle malzemede yük taşımada sayıca çoğunlukta olan elektronlar yarıiletkenin arayüzeyinde birikmeye başlar. Bu birikmenin sonucunda bahsedilen n-tipi yapıda bantların yüzeye yakın yerlerinde yukarı yönde bükülme meydana gelir (Şekil 2.7(a)). Arayüzeydeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronların birikmesine “yığılma” adı verilir.



Şekil 2.7. İdeal MYY yapının $V \neq 0$ durumunda enerji bant şeması (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) terslenim [12].

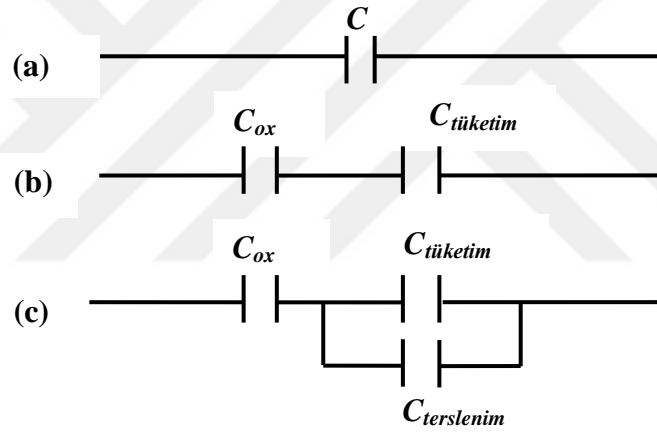
2.3.2. Tüketim Bölgesi

Metale sıfırın altında voltaj uygulandığında ($V_G < 0$) elektronların yarıiletkenin yüzeyinden uzaklaşması bu durumda meydana gelen elektrik alandan dolayıdır. Arayüzey bölgesinde pozitif yük oluşumu gerçekleşir. Elektronların yüzeyden uzaklaşması sonucunda yarıiletkenin iç bölgelerdeki elektron yoğunluğu, yüzeyindeki yoğunluktan daha fazla olur. Bunun sonucunda n-tipi MYY yapısında enerji bantları aşağı doğru bükülür (Şekil 2.7(b)). Tüketim bölgesinin oluşumu, uygulanan voltaj ile tüketim tabakası (W_D) genişliğinde bir bölgede elektronların azalması sonucunda gerçekleşir. ϵ_s dielektrik sabitine sahip yarıiletkenin tüketim bölgesinin genişliği Denklem 2.8 ile verilmiştir:

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

2.3.3. Terslenim Bölgesi

Metale $V_G \ll 0$ gibi bir voltaj değerinin uygulanması sonucunda MYY yapısındaki enerji bantlarında gerçekleşen bükülme daha fazla olur. N-tipi MYY yarıiletkenin arayüzeyinde azınlık taşıyıcılarının (hollerin) yoğunluğunda artış meydana gelir. Bu durumda E_F seviyesinin, E_i (saf durumdaki enerji) seviyesinin altına düştüğü Şekil 2.7(c)'de gösterilmiştir. N-tipi yarıiletkenin yüzeyi artık p-tipindeki gibi davranması olayı yarıiletken yüzeyinin terslenimi olarak adlandırılır. İdeal durumdaki metal-yalıtkan-yarıiletken yapısındaki yükler, metalin yalıtkan bölgeye yakın kısmında ve yarıiletken içinde bulunurlar. Bu durumda MYY yapısına uygulanan doğru akım (dc) neticesinde yalıtkan bölgeden yük geçişi meydana gelmez.



Şekil 2.8. İdeal MYY yapının (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri.

İdeal yapıdaki bir metal-yalıtkan-yarıiletken malzemenin yığılma, tüketim ve terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir [1],[8],[9].

2.4. MYY YAPILARDA İDEAL DURUMDAN SAPMALAR

İdeal bir MYY yapı için Şekil 2.9'da gösterildiği üzere diyotun yapısında bulunan sabit oksit yükleri, arayüzey durumları, hareketli iyonlar ve iyonize tuzaklar gibi nedenlerle ideal yapıdan sapmalar gözlenir [9].



Şekil 2.9. İdeal bir MYY yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.

2.4.1. Arayüzey Durumları

Arayüzey durumları, yük değişimi olabilen yalıtkan/yarıiletken malzemenin arayüzeyinde bulunan girilebilir enerji seviyesi olarak tanımlanır. Bu durumlar verici ya da alıcı türde olabilirler. Dışarıdan uygulanan bir voltaj söz konusu olduğunda E_F seviyesinin geride sabit kalmasına karşın, iletim ve valans bantı ile birlikte arayüzey tuzak seviyelerinin yukarı ve aşağı yönde hareketi gerçekleşir. Valans ve iletim bantı ile arayüzey tuzakları arasında gerçekleşen yük alışverişi nedeniyle bu tuzaklarda yük değişimi meydana gelir. Yük yoğunluğu (Q_{ss}), yalıtkan malzemenin kalınlığı ve yarıiletken malzemenin içerisindeki katkı yoğunluğu, arayüzey durumlarını etkilenemez. İdeal MYY yapıda oluşan arayüzey durumları, malzemenin kapasitansında bir değişim ve buna bağlı olarak da ideal yapıda sapmalar meydana getirir.

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şunlardır:

Kapasite: Malzeme içinde bulunan farklı arayüzey durumlarının birbirine eklenmesiyle birlikte yük başına kapasite eklenir. Uygulanan voltaj ile bu kapasite değeri keskin bir pik şeklinde oluşur. Bu pikler voltaj için görülür. Bunun nedeni, arayüzey durumunun daha düşük olması nedeniyle Fermi seviyesinin bu seviyeyi aşmasıdır.

İletim: Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanmasının yeterince hızlı olmaması nedeniyle zaman gecikmesi olur. Eşdeğer RC devresiyle arayüzey durumlarında oluşan zaman gecikmesi ifade edilebilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolmuş boşalım zamanı olarak da isimlendirilir. Ortaya çıkan bu zaman gecikmesi $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$

denklemleri ile verilir. Denklemlerde yer alan R_{ss} ifadesi arayüzey direnci olarak ifade edilir [10]. C_{ss} ifadesi arayüzey kapasitansdır ve Denklem 2.9'da verilmiştir:

$$C_{ss} = \frac{\partial C_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.9)$$

Arayüzey potansiyeli: Arayüzeyin elektrik alanı, orada bulunan yükler sebebiyle değişim göstermektedir. Arayüzey durumlarının bulunduğu zamanlarda kapasitans-voltajın mecburi genişlemesi nedeniyle, arayüzey potansiyelini değiştirmek için gerekli olan potansiyelin ideal durumdaki potansiyel değerinden daha yüksek bir değerde olması gerekmektedir.

İdeal durumda bulunan MYY için elde edilen $C-V$ eğrilerindeki kaymanın sebebi olarak arayüzey durumları gösterilir ve bu durumlar için durum yoğunluğu Denklem 2.10'daki ifade ile verilir.

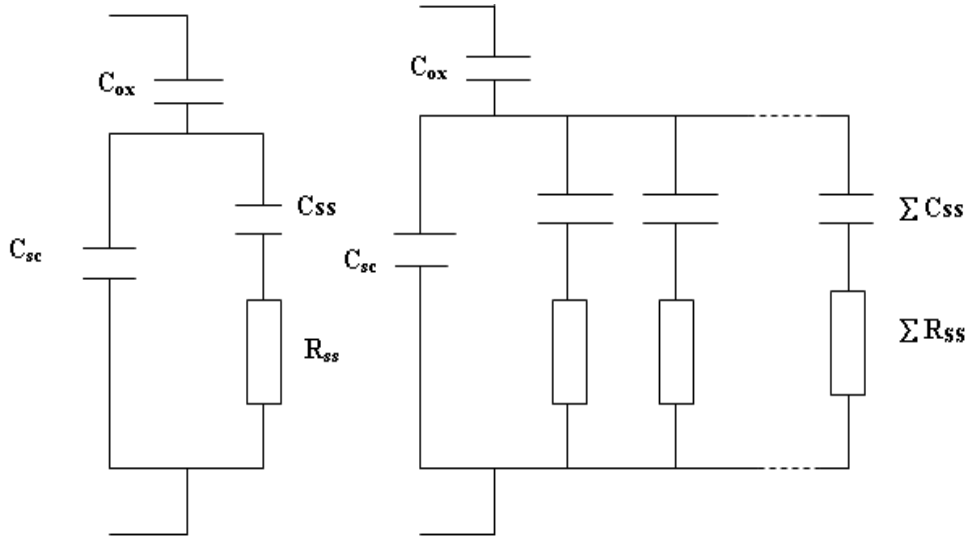
$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.10)$$

Bu denklemde durum yoğunluğu ifadesi (N_{ss}), birim enerji başına düşen birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanmaktadır. Denklemde verilen enerji ifadesi $E=q\psi_s$ şeklindedir. E enerjisinin diferansiyeli alınıp denklem 2.10'da yerine yazıldığında elde edilen durum yoğunluğu ifadesi aşağıdaki şekilde olacaktır:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (2.11)$$

Kullanılacak malzemenin yüzeyindeki potansiyel değişimi, arayüzey enerji seviyesinde bir değişime neden olur. Yük taşıyıcısının arayüzey durumunu işgal etme olasılığı Fermi seviyesine bağlı olduğu için, Fermi seviyesinde meydana gelen değişim ile bu olasılık da değişim gösterecektir.

Şekil 2.10'da arayüzey durumlarının, Q_{ss} 'ye paralel bir kapasitans ve bir seri direnç etkisi yaptığında oluşan durumun eşdeğer devresi verilmiştir [6].



Şekil 2.10. MYY yapısının (a) bir enerji seviyesi ve (b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için eşdeğer devresi.

2.4.2. Arayüzey Yükleri

MYY tipi yapı için yalıtkan içinde ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde yükler (arayüzey yükleri) bulunur. Bu yükler negatif olabilmekle birlikte genel olarak pozitif yüklerdir. MYY türündeki malzemenin elektriksel ölçümlerinde yarıiletken-yalıtkan arayüzeyine tabaka şeklinde yerleşmiş olarak gözlemlenen pozitif ve negatif yükler, yüksek frekans değerlerinde yapılan ölçümlerde $C-V$ eğrilerinde değişimlere neden olur. Malzemenin $C-V$ eğrilerinin uygulanan voltajın negatif değerlerine doğru kaymasına pozitif yükler, uygulanan voltajın pozitif değerlerine doğru kaymasına da negatif yükler neden olur [6], [10], [13]-[18].

2.4.3. Hareketli İyonlar

Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ gibi iyonlar $100\text{ }^\circ C$ üzerindeki sıcaklıklarda hareketlidirler ve bu tür iyonlar metal-yalıtkan veya yarıiletken-yalıtkan yapıların arayüzeylerinde yer alırlar [19]. Hareketli olan bu iyonlardan dolayı MYY yapının ideal durumundan sapmalar meydana gelir. Kusur olarak da adlandırılabilen iyonlar genellikle malzemelerin üretim aşamasında kullanılan kimyasalların içinde var olmaları, tutucuların kirli olması gibi durumlarda yüzeye yapışır ve malzemeye uygulanan elektrik alan etkisi ile hareket ederek bu sapmalara neden olurlar [20].

2.4.4. İyonlaşmış Tuzaklar

Kimyasal yapı bozukluklarından kaynaklı olarak yalıtkan malzeme içerisinde tuzaklar yer alır. İyonlaşmış tuzaklar olarak da isimlendirilen bu tuzaklar alıcı ve verici olmak üzere iki

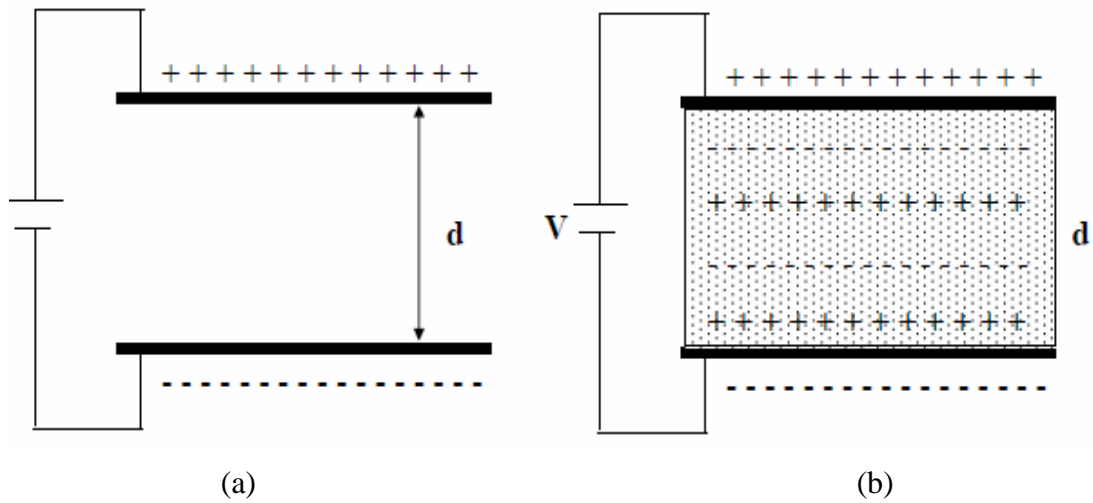
türdedir. Malzeme içerisindeki bu tuzaklar yüksüz duruma, elektron yakalayarak veya bırakarak geçerler. Bu durumda MYY yapının kapasitans-voltaj eğrilerine etki etmiş olurlar. Malzemenin $C-V$ karakteristiğinde pozitif voltajdan negatif voltaja doğru ve negatif voltajdan pozitif voltaja doğru gidilirken farklılıklar meydana gelir [21]. Bahsedilen yönlerde yapılan ölçüm sonuçları, kapasitans değerinde meydana gelen kayma miktarının, MYY yapının yalıtkan içerisindeki tuzaklarının miktarını ifade ettiğini göstermektedir.

2.5. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

Günümüzde geniş kullanım alanı olan polimerlerin dielektrik özelliklerinin nasıl bir değişim gösterdiğinin bilinmesi optimum performansa sahip malzeme ve cihazların üretimi için gerekli ve önemlidir. Bu sebeple farklı alanlarda kullanılan polimer malzemelerin farklı koşullar altındaki dielektrik özelliklerinin de ölçülmesi gerekmektedir. Dielektrik, dışarıdan uygulanan bir elektrik alan altında enerji depolayabilen malzemelere verilen isimdir. Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü dielektrik özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan başlıca parametrelerdendir. Birçok madde için bu değerler, elektrik alan şiddetinden bağımsız olup frekansa bağlı olunan durumlarda elektrik alan etkisindedir [22].

2.5.1. Dielektriksiz ve Dielektrikli Paralel Plakalı Kondansatörler

Şekil 2.11'de A yüzey alanı ve plakalar arası d uzaklığına sahip iki paralel plakalı kondansatörün plakaları arası boşken ve dielektrik bir malzeme yerleştirilmişken görülen durumlar verilmiştir.



Şekil 2.11. (a) Plakalar arası boş (b) plakalar arası dielektrik malzeme ile doldurulan paralel plakalı kondansatör.

Kondansatörün paralel plakaları arasına boşluk ya da geçişi engelleyecek yalıtkan (dielektrik) tabaka yerleştirilirse, levhalar arasında yük geçişinden söz edilemez. Paralel plakaların uçlarına üreteç bağlanırsa kondansatör yüklenir ve plakaların yükleri birbirinden farklı olarak pozitif (+ Q) ve negatif (- Q) olur. Plakalar arasında malzeme yokken, bu bölgede oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E_0 = \sigma / \varepsilon_0 \quad (2.12)$$

ile verilir. Denklem 2.12'de ε_0 ; serbest alan yükünün geçirgenliği ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm), σ ise; kondansatörün bir plakası üzerindeki birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğudur. Plakalar arasında d uzaklığı varken meydana gelen potansiyel fark,

$$V_0 = E_0 d \quad (2.13)$$

olur. σA bir plakada bulunan toplam yük miktarı olarak ifade edilirse paralel plakaları bulunan kondansatörün kapasitesi,

$$C_0 = Q_0 / V_0 = \varepsilon_0 A / d \quad (2.14)$$

şeklinde verilir. Plaka yüzeyindeki birim alan başına düşen yük yoğunluğu olarak ifade edilen σ ifadesi, kondansatörün plakaları arasında kalan bölge için elektrik yerdeğiştirme kaynağı şeklinde de düşünülebilir. Elektrik yerdeğiştirme ifadesi,

$$D = \sigma = \varepsilon_0 E_0 \quad (2.15)$$

şeklinde verilir.

Kondansatörün plakaları arasına dielektrik madde yerleştirildiğinde kapasitansında dielektrik sabiti olan ε' kadar artış meydana gelir. ε' 1'den büyüktür ve ε_0 cinsinden ifade edilir. Paralel konumda bulunan plakalar arası dielektrik malzeme ile dolu kondansatörün kapasitansı (sığası),

$$C = \varepsilon' \varepsilon_0 A / d \quad (2.16)$$

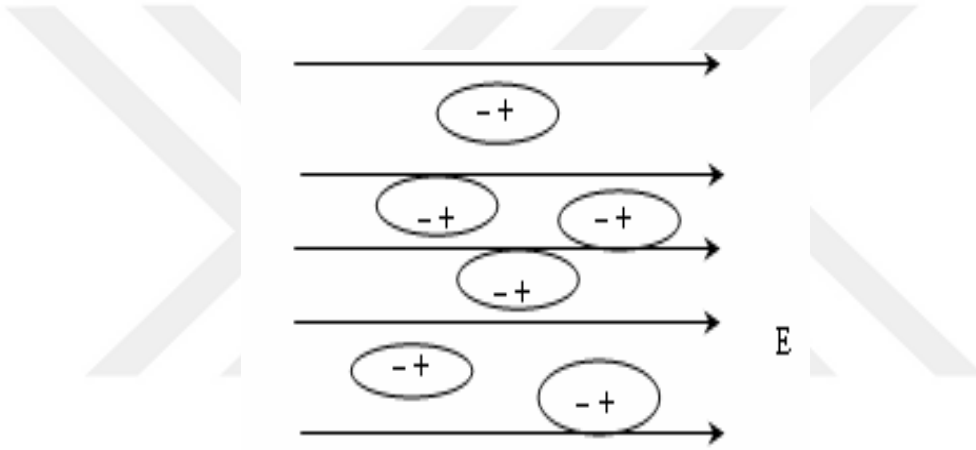
olarak ifade edilir.

2.5.2. Dielektrik Kutuplanma

Dielektrik bir malzeme kondansatörün levhalarının arasına yerleştirilerek voltajın azalacağı ve buna bağlı olarak da elektrik alan şiddetinin azalacağı $E = V/d$ ifadesinden anlaşılır. $E = \sigma / \varepsilon_0$ ifadesinden yararlanılarak E 'nin azalmasıyla birim yüzeyde bulunan net yükün azalacağı görülür. İletkenin elektrik alan içine yerleştirilmesiyle, alanın etkisi altında bulunan

serbest yüklerde yer değişimi meydana gelir. Elektrostatik dengenin kurulduğu durumda etki nedeniyle oluşan yüklerin elektrik alanı, tüm noktalarda dış alanı nötrleştirerek iletken içindeki elektrik alanın sıfır olmasına sebep olur [23].

Dielektriklerin daimi dipol içeren molekülleri polar madde olarak ifade edilirken, bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmamaktadır. Yani yükler birbirinden çok küçük miktarda ayrılırlar. Polar moleküllere örnek olarak H_2O ile N_2O verilebilirken, polar olmayan moleküllere H_2 , N_2 , O_2 örnek olarak gösterilebilir. Elektrik alan içerisine dielektrik madde yerleştirildiğinde, maddede kutuplanmanın meydana gelmesi nedeniyle dipolar olan molekülün dipol momentlerinin yönleri Şekil 2.12’de gösterilen elektrik alanın yönüne paralel olur [24]. Elektrik alan ortadan kaldırıldığında atomlar alanın olmadığı durumdaki hallerine döner ve dipoller ortadan kalkar.



Şekil 2.12. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri.

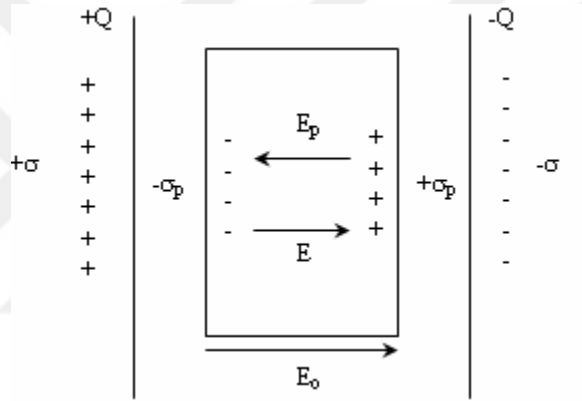
2.5.2.1. Kutuplanma Yükleri

Kondansatörün paralel plakaları arasına dielektrik bir madde yerleştirildiğinde, dielektrikte bulunan pozitif yüklerin merkezini, negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak şekilde yönelmeden kaynaklı bir kutuplanma meydana gelir. Dielektrik maddenin tamamına bakılırsa madde, hem polarize olmuş hem de yük bakımından nötr bir hal almıştır. Dielektrik maddenin paralel plakalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yükler oluşturacak biçimde bir net etki vardır. Dielektriğin içerisinde yer alan hacim elemanlarında yük fazlalığı bulunmamaktadır. Bütün olarak bakıldığında dielektriğin yük bakımından nötr olması nedeniyle yüzeyde oluşan pozitif ve negatif kutuplanma yüklerinin sayısı eşit olmalıdır. Bu durumda dielektrik maddenin kondansatörün paralel plakalarını gören yüzlerinde oluşan yükler çok ince bir tabaka içerisinde yer almaktadır. Tabaka içindeki yükler, çevrelerinde yer alan atomların etkisinde olmaları sebebiyle bağlı yükler olarak isimlendirilir. İletken bir levhanın dielektrik maddenin yüzeyine

dokundurulması durumunda iletkenin temas ettiği yüzeyden yük kalkmaz. Bu durum da yüklerin bağlı olduğunu ifade eder [23].

2.5.2.2. Kutuplanma Yüklerinin Alanı

Dielektriğin levhalara yakın olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yüklerinin oluşturduğu elektrik alan dış elektrik alana ters yönde olup, levhalar arasındaki toplam elektrik alanı azaltmaktadır. Şekil 2.13'te E_0 alanı içerisinde yer alan dielektrik madde içerisindeki moleküllerin pozitif tarafı elektrik alan ile aynı yönde, negatif tarafının ise elektrik alana ters olacak şekilde yöneldiği görülmektedir. Uygulanan alan ile nötr olan dielektrik madde polarize edilmiş olur. Elektrik alan etkisinden dolayı, yüzeyin solunda negatif, sağında da pozitif yükler birikime uğramıştır. Dielektriğin tamamen nötr kalması nedeniyle, karşılıklı yüzeylerde meydana gelen yük miktarları birbirine eşittir.



Şekil 2.13. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu.

Bileşke alan, kondansatörün plakaları arası boş olduğu durumdaki E_0 alan şiddeti ile polarize yüklerden ileri gelen E_p alan şiddetinin vektörel olarak toplanması ile elde edilir.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (2.17)$$

Plakalar arasında herhangi bir malzemenin olmadığı durumdaki E_0 alanı ile polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği E_p alanı birbirine ters yöndedir. Kutuplanmanın oluşmasını engellemeye çalışan alan E_p alanıdır. Bileşke alan, plakalar arasının boş olduğu durumdaki alan yönündedir. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ , dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu σ_p ile gösterilirse, etkili yük yoğunluğu ifadesi $(\sigma - \sigma_p)$ olur. Bu durumda σ ve E_0 ifadeleri arasındaki ilişki,

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.18)$$

şeklindedir. σ_P kutuplanma yük yoğunluğu ise E_P elektrik alanına,

$$E_P = \frac{\sigma_P}{\epsilon_0} \quad (2.19)$$

bağıntısı ile bağlı olur. Bu nedenle dielektrik içindeki alan yani bileşke alan şu şekilde olur:

$$E = E_0 - E_P = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_P}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

Paralel levhalar arasında dielektrik madde varken, levhalar arasındaki potansiyel farkı, elektrik alan ve sistemin kapasitansı aşağıdaki ifadelerle verilir:

$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (2.21)$$

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0} \quad (2.22)$$

$$C = \epsilon' C_0 \quad (2.23)$$

Burada C_0 dielektrik yokken kondansatörün kapasitesi, E_0 elektrik alanı ve V_0 potansiyel farkıdır. $C_0 = \epsilon_0 A/d$ eşitliği Denklem (2.23)'de yerine konularak dielektrikli paralel plakaların kapasitansı,

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (2.24)$$

olarak elde edilir. Denklem (2.22), Denklem (2.20)'de yerine konursa,

$$\frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_P}{\epsilon_0} \quad (2.25)$$

$$\sigma_P = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (2.26)$$

elde edilir. Dielektrik bulunmadığı zamanda var olan alanın, polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanından büyük olması nedeniyle, paralel plakalarda bulunan serbest yük yoğunluğu (σ), dielektrik madde üzerindeki σ_P ile ifade edilen kutuplanma yük yoğunluğundan büyüktür ($\sigma > \sigma_P$).

Kondansatörün plakaları arasında dielektrik olmaması durumunda dielektrik sabiti 1, kutuplanma yük yoğunluğu olur. Plakalar arasına iletken yerleştirildiği durumda ise elektrik alan şiddeti 0 olur ve $E_0 = E_P$ eşitliği meydana gelir. Bu ifade $\sigma_P = \sigma$ eşitliğine karşılık gelir. İletken üzerinde kutuplanan yükün, paralel plakalar üzerindeki yüke eşit ve zıt işaretli olması nedeniyle iletkendeki net alan sıfır değerini alacaktır [9].

Dielektriğin her yerinde bulunan P kutuplanması, bileşke elektrik alan (E) ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. Lineer ve homojen izotropik dielektrikler için P kutuplanması Denklem 2.27'de verilmiştir.

$$P = \varepsilon_0 \chi E \quad (2.27)$$

Burada χ , dielektriğin elektrik alınganlığı olarak adlandırılan bir niceliktir. Boşlukta polarize olacak madde olmadığından $\chi = 0$ olur ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\chi = (\varepsilon' - 1) \quad (2.28)$$

Kutuplanma etkisinin anlaşılabilmesi için dielektrik yüzeyindeki yüklerin yerdeğiştirmesi gerekir. Polarize olarak ifade edilen dielektrikler için, D elektrik yerdeğiştirmesi, dielektrik içerisindeki E alanı ile doğru orantılı olup,

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.29)$$

ifadesi ile verilir. Denklem (2.27), Denklem (2.29)'da yerine konulursa,

$$D = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (2.30)$$

olarak elde edilir [23], [25], [26].

2.5.3. Kutuplanma Mekanizmaları

Elektronik, iyonik, yönelim ve arayüzey kutuplanması olmak üzere dielektriklerdeki başlıca kutuplanma çeşitlerinden aşağıda bahsedilmiştir [26], [27].

2.5.3.1. Elektronik Kutuplanma

Elektronik kutuplanma elektrik alan etkisiyle bütün atom ve iyonlarda oluşan ve hemen hemen bütün dielektriklerde diğer kutuplanma çeşitleri olmasa dahi gözlenebilen bir kutuplanma türüdür. Diğer kutuplanmalar olmasa bile meydana gelmesinin nedeni olarak, atomda bulunan elektronların meydana getirdiği negatif yük dağılımının çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kayması gösterilebilir. Elektronun kütlelerinin çok küçük olması nedeniyle elektronik kutuplanma, dışarıdan uygulanan elektrik alanla 10^{-15} s gibi kısa bir zamanda meydana gelir.

2.5.3.2. İyonik Kutuplanma

Bu kutuplanma türünde moleküllerin farklı tipte atomlardan meydana gelmesi sebebiyle, atomların elektronları paylaşımı simetrik olmayacaktır. Yani, elektron yoğunluğunun yük

merkezi kayarak daha kuvvetli bağlayıcı atomlara doğru yönelecek ve dolayısıyla atomlar zıt kutuplu yükler kazanacaklardır. Net yüklere etkileyen dış elektrik alan ile atomların kendi aralarında denge konumlarını değiştirecektir. Meydana gelen yerdeğiştirmeyle oluşan etkileşimli ikinci bir dipol moment, dielektriğin iyonik kutuplanmasıdır. Bu kutuplanma yaklaşık $10^{-12} - 10^{-13}$ s gibi kısa bir zaman aralığında gerçekleşmesine rağmen bu süre elektronik kutuplanmaya göre uzundur.

2.5.3.3. Yönelim Kutuplanması

Kendiliğinden kutuplu (polar) dielektrik maddelerde yönelim kutuplanması baskındır. Mekanizma, sabit bir dipol momente sahip moleküllerin elektrik alan doğrultusunda yönelimleri ile gerçekleşir. Yönelim kutuplanmasında sıcaklığın neden olduğu etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kutuplanma türünde dipol momente sahip moleküllerin elektrik alanın olmadığı duruma tekrar geçebilmesi için ortamın viskozları ve moleküllerin büyüklükleri ile doğru orantılı olan zaman gerekir. Bu kutuplanma $10^{-3} - 10^{-9}$ s zaman aralığında gözlenir.

2.5.3.4. Arayüzey Kutuplanması

Diğer üç kutuplanma, malzemenin sınırında bulunan yüklerin yer değiştirmesi ve yönelim etkilerinin oluşması ile meydana gelirken, arayüzey kutuplanması ise hareketli yüklerin varlığında oluşur. Bahsedilen üç kutuplanmada çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde ise uygulanan dış alanı da içeren yerel alan etkisi altında bulunan atom ve moleküller vardır. Arayüzey kutuplanması elektrik alanda meydana gelen değişimlerin, malzemenin hacminde bulunan uzay yüklerini ya da dielektriğin arayüzeylerinde yer alan yüzey yüklerini biriktirmesiyle oluşmaktadır.

2.5.4. Dielektrik Sabitinin Hesaplanması

Dielektrik maddenin elektriksel özellikleri araştırılırken, dışarıdan uygulanan elektrik alana karşı duyarlı olması nedeniyle elektriksel devreyle eşleştirilmesi sağlanır. Admittans spektroskopisi kullanılarak, plakaları arasına dielektrik yerleştirilmiş olan kondansatörün yapısının karakterizasyonu sağlanır. Admittans ifadesi Y ile gösterilir ve

$$Y = G + j\omega C \quad (2.31)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikte iletkenlik G , uyarıcı voltajın açısız frekans ifadesi ω ile ifade edilirken toplam sığa C ile gösterilir. Admittans,

$$Y = G + j\omega(C_0 \epsilon^*) \quad (2.32)$$

olarak da ifade edilebilir. C_0 kondansatörün dielektrik madde yok iken sahip olduğu kapasitans, ε^* ise dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik sabitidir. Bağıl dielektrik sabiti,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.33)$$

ile verilir. Burada ε' depolanan enerjiyi, ε'' ise kaybedilen enerjiyi ifade etmektedir.

Denklem 2.33, Denklem 2.32'de yerine yazıldığında admittans ifadesi,

$$Y = G + j\omega C_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \quad (2.34)$$

$$Y = (G + \omega\varepsilon''C_0) + j\omega C_0\varepsilon' \quad (2.35)$$

olur [26], [28], [29].

Denklem 2.35 ile admittans ifadesinin sanal ve gerçel bileşenleri verilmiştir. Admittans ifadesinin tersi alınarak empedans elde edilir. Yani empedans ifadesi $Z = 1/Y$ 'dir. Burada Y ifadesi yerine Denklem 2.31 yazılırsa empedans,

$$Z = \frac{1}{j\omega C + G} = \frac{1}{j\omega C_0\varepsilon^*} \quad (2.36)$$

olarak elde edilir. Denklem 2.33'deki ifade, Denklem 2.36'da yerine yazılarak elde edilen gerçel ile sanal kısmın ifadeleri;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (2.37)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega RC_0} \quad (2.38)$$

olur [30].

Dielektrik maddeye $V = V_0 \cos(\omega t)$ şeklinde bir ac voltajı etki ettiğinde, numune üzerinden geçen akım ifadesi,

$$I = (\varepsilon^* C) \frac{dV}{dt} \quad (2.39)$$

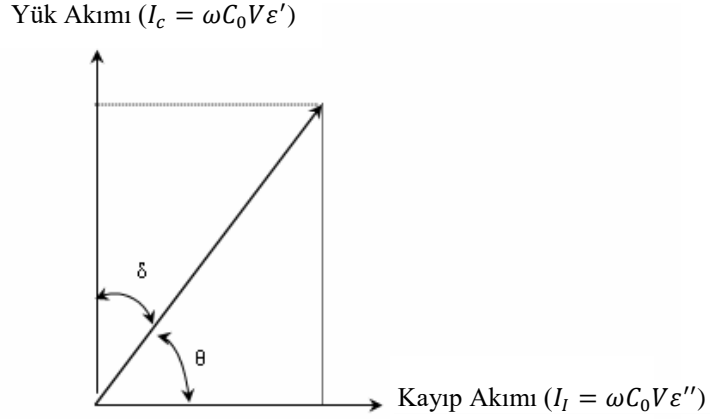
şeklindedir.

Numune ve RC devresi eşleştirildiğinde numune üzerinden geçen akım ifadesi,

$$I = I_R + jI_C \quad (2.40)$$

şeklindedir. Verilen denklemde voltaj ile aynı fazda olan I_R ifadesi gerçel ya da dirençsel bileşen iken farklı fazda olan I_C ifadesi sanal ya da sığasal bileşendir.

I_C ise voltaj ile farklı fazda olan sanal ya da sığasal bileşen olarak adlandırılır.



Şekil 2.14. Dielektrikli bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki.

Şekilde yer alan δ ifadesi dielektrik maddenin farklı fazlarda olan elektrik yerdeğiştirmesi ve belli aralıklar ile tekrarlanan elektrik alanı arasındaki faz kayması şeklinde ifade edilir. Bu kayma malzemeye etkiyen uyarıcı voltajın etkisiyle gerçekleşir. $\tan\delta$ ifadesi ise kayıp açısı şeklinde isimlendirilir ve aşağıda verildiği gibidir [29], [31]:

$$\tan\delta = \left| \frac{I_R}{I_C} \right| = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.41)$$

Dielektrik bir malzemenin ac elektriksel iletkenliği σ_{ac} aşağıdaki denklem ile verilebilir [32], [33].

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan\delta (d/A) \quad (2.42)$$

Burada d , polimer arayüzey tabaka kalınlığı A ise MPY (metal/polimer/yarıiletken) yapının doğrultucu kontak alanıdır. $\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ eşitliği Denklem 2.42'de yerine yazılırsa,

$$\sigma_{ac} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (2.43)$$

olur. Ayrıca $\varepsilon'' = G/\omega C_0$ ve $C_0 = \varepsilon_0 A/d$ eşitliklerini de Denklem 2.43'te yerine yazacak olursak σ_{ac} değeri,

$$\sigma_{ac} = \frac{Gd}{A} \quad (2.44)$$

olarak yazılabilir.

Araştırmacılar kompleks empedans (Z^*) ve kompleks elektrik modülü (M^*), dielektrik malzemelerin dielektrik özelliklerini; elektrik modüllerinin formüle edilmesini kullanarak tanımlamayı tercih etti [20], [33]-[35].

Kompleks dielektrik geçirgenlik verilerinin Z^* formalizasyonu ile incelenmesi ($Z^* = 1/Y^* = 1/j\omega C_0 \epsilon^*$) genellikle yüzey ve bulk (hacim, tüm numune) olgularını ayırt etmek ve yapının bulk dc iletkenliğini elde etmek için kullanılır [36], [37]. Elektrik modül formalizasyonu kullanılarak dielektrik gevşeme spektroskopisi ile ilgili ayrıntılı bilgi elde edilebilir. Voltaj ile değişim gösteren elektrik modülü ifadesinin değişik frekanslarda olması, malzemenin dielektrik gevşeme ve kutuplanma yapısı ile ilgili bilgileri elde etmede önemlidir [37].

Kompleks empedans (Z^*) ve kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti ($\epsilon^* = 1/M^*$) aşağıdaki denklem kullanılarak, M^* formuna dönüştürülebilir [36]-[38].

$$M^* = j\omega C_0 Z^* \quad (2.45)$$

veya

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (2.46)$$

olarak ifade edilir. (2.46) denkleminde M' ve M'' elektrik modülleri; kompleks elektrik modülünün (M^*) sırasıyla gerçel ve sanal bileşenleridir.

2.5.5. Dielektrik Kayıplar

Kondansatörün paralel plakalarının arası dielektrik madde ile dolu olup, kondansatör uçlarına yalıtkanlığını bozmayacak yüksek bir seviyede voltaj uygulanırsa dielektrik maddede ısınma meydana gelir. Isınma durumunda açığa çıkan ısı, frekans ile artış gösterir. Bu artış, dış alanda meydana gelen yön değişimlerine göre hareket eden moleküllerin birbirine sürtünmelerinden kaynaklıdır. Moleküllerin sürtünmeye karşı yapmış oldukları iş, ısıya dönüşür. Yakınlarındaki moleküllerle yaptıkları sürtünmelerden kaynaklı olarak dipollerin elektrik alanında oluşan değişimi takip etmeleri gecikir. Bahsedilen durumlar esnasında dielektrik maddede enerjinin ısıya dönüşmesi dielektrik kayıp olarak isimlendirirken, sıcaklığın artması ile bu kayıplarda da artış meydana gelir [23].

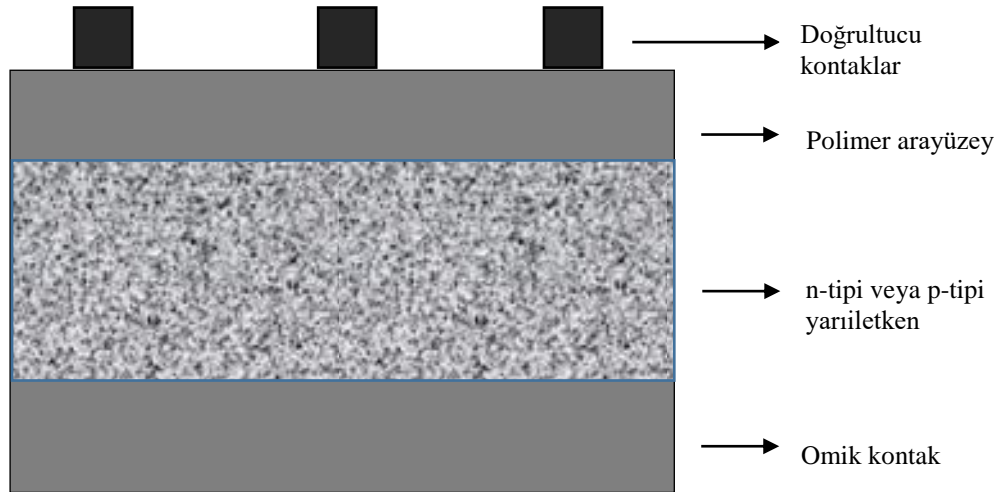
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. GİRİŞ

Günümüzde çeşitli avantajlarından dolayı optoelektronik ve elektronik alanlarında SBD'ler oldukça tercih edilen devre elemanlarıdır. SBD'ler doğru beslemde düşük voltaj değerlerinde kolaylıkla ilettime geçebilmeleri, gürültü seviyelerinin düşük ve verimlerinin yüksek olması, yüksek frekanslar altında hızlı anahtarlama yapabilme gibi avantajlarından dolayı diğer diyotlara göre daha yaygın kullanım alanına sahiptirler [39].

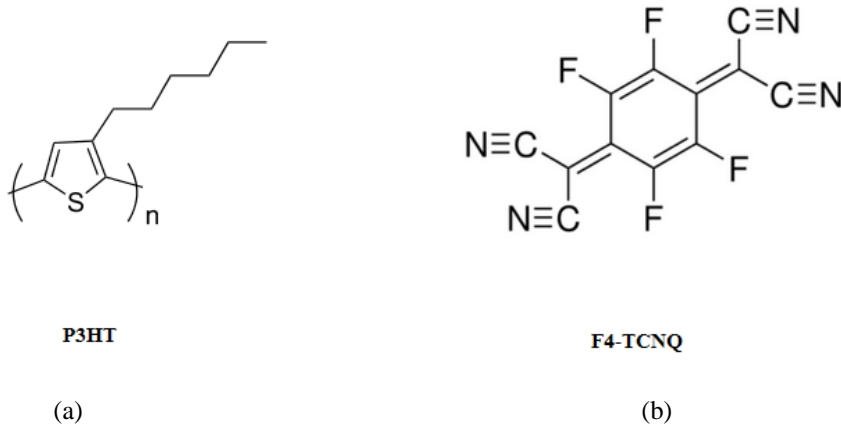
SBD yapıların elde edilebilmesi için MY kontak oluşturulması gerekir. Oluşturulan MY kantağa arayüzey tabakası olarak polimer yerleştirildiğinde ise MPY yapı elde edilen yapı elde edilir. Bu yapıların üretiminde kullanılan organik polimer malzemeler elektronik cihazın elektriksel özelliklerini etkilemektedir [40]. Kullanılan polimer malzemeler, inorganik malzemeler ile karşılaştırıldığında farklı yapılardaki SBD'lere göre daha iyi elektriksel sonuçlar elde edilir. Bunun nedenleri; üretim yöntemlerinin kolaylığı, istenilen yüzeye kolayca kaplanabilmeleri, yarıiletken arayüzey durumlarını efektif bir şekilde pasivize etmesidir.

MPY yapısındaki yarıiletkenler, seçilen yarıiletken alttaş üzerine polimer yarıiletken malzemenin spin kaplama, spreycaplama gibi yöntemler kullanılarak organik polimerin kaplanması ile oluşan polimer-yarıiletken yapının altına ve üstüne metal kontaktların büyütülerek Schottky bariyer diyot haline getirilmesi ile elde edilir (Şekil 3.1). MPY yapıdaki SBD'ler üretilirken metal ile yarıiletken arasına yük geçişini düzenleyecek ve üretilecek olan cihazın performansını arttıracak dielektrik sabiti yüksek olan polimer malzeme kaplanır. Bu polimer arayüzey tabakasının yüzeyi pasivize edeceği için diyotun sızıntı akımlarını engelleyerek akım iletim mekanizmasını iyileştirilir. Son olarak MPY tipi SBD'lerin doğrultucu ve omik kontaktları oluşturulurken uygun iş fonksiyonlarında metaller seçilir.



Şekil 3.1. MPY SBD'un şematik gösterimi.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen avantajları dolayısıyla MPY SBD yapısı ile çalışılmıştır. Yarıiletken ile metal yüzeylerin arasına poly(3-hexylthiophene):2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (P3HT:F4-TCNQ) organik karışımı kaplanarak elde edilen arayüzey tabakası kullanılmıştır. Bu tabakayı oluşturmak için kullanılan polimer malzemelerden P3HT'nin tercih edilmesi yüksek kristallenebilirlik oranına sahip olması ve iletkenlik değerlerinden kaynaklıdır Şekil 3.2(a) [41]. Güçlü elektron eğilimi nedeniyle F4-TCNQ malzemesi polimer-katkı sistemleri için etkili bir katkılama reaktifidir Şekil 3.2(b) [42].



Şekil 3.2. (a) P3HT ve (b) F4-TCNQ organik polimerlerin kimyasal yapıları.

Bu tez çalışmasında, %2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin elektriksel özelliklerinin analizleri, kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) ölçümleri ile yapılmıştır. $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri $-10\text{ V} - +10\text{ V}$ voltaj ve $10\text{ kHz} - 2\text{ MHz}$ frekans aralığında, oda sıcaklığında ve karanlıkta gerçekleştirilmiştir. Ölçümleri

yapılan diyot için elde edilen C ve G/w değerlerinden yararlanılarak dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$), gerçel ve sanal elektrik modülü (M' ve M'') ve ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) değerlerinin frekansa bağıllığı incelenmiştir.

3.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Bu tez çalışmasında kullanılan P3HT ve F4-TCNQ organik polimerleri Sigma Aldrich Ltd.'den alınmıştır. Organik arayüzey tabakası olarak %2 F4-TCNQ konsantrasyonuna sahip karışım hazırlanarak Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında aşağıdaki deneysel aşamalar izlenmiştir :

3.2.1. Si Alttaşın Hazırlanması

Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'lerin üretim aşamasında $\langle 100 \rangle$ yöneliminde tek kristal n-tipi silisyum (n-Si) pullar alttaş malzemesi olarak kullanılmıştır. Tek kristal Si pullar 350 ± 25 μm kalınlığında ve birer yüzleri fabrikasyon olarak parlatılmıştır. Ultrasonik banyo ile Si pullar için daha hızlı ve etkili bir temizlik yapılması sağlanmıştır. Temizlik işlemi RCA adı verilen kimyasal temizlik prosedürü takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Temizlik sonrası Argon (Ar) inört gazı ile Si pulların yüzeyini kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Omik Kontakın Oluşturulması

Üretimi gerçekleştirilen Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin omik kontakları için uygun iş fonksiyonuna (omik kontak için gümüş) sahip metaller seçilip büyütme işlemi uygulanmıştır. Temizlik işlemi önceki aşamada belirtildiği gibi gerçekleştirilen Si pulların mat yüzeylerine omik kontak oluşması için herhangi bir maskeleyme işlemi yapılmaksızın ~ 250 nm kalınlığında gümüş (Ag) kaplanmıştır. Kontakların kaplama işleminde Şekil 3.3'te görseli verilen ve Düzce Üniversitesi Fizik Bölümü Numune Hazırlama Laboratuvarına ait NANOVAK NVBJ-300TH marka termal buharlaştırma kaplama sistemi kullanılmıştır. Kontakın büyütülme işlemi gerçekleştirilirken istenilen kalınlığı elde edebilmek için termal buharlaştırma kaplama sisteminde yer alan dijital kalınlık ölçüm monitörü kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Termal buharlaştırma kaplama sistemi.

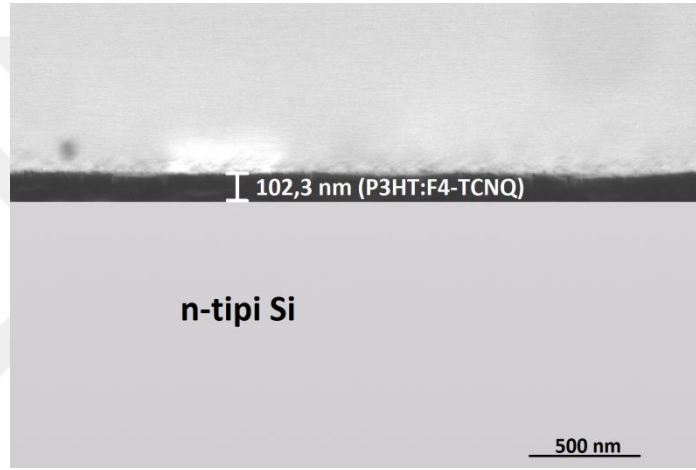
3.2.3. P3HT:F4-TCNQ Polimer Karışımın Hazırlanması ve Kaplanması

Bu tez çalışmasında üretilen MPY SBD'lerin aktif katmanını %2 F4-TCNQ konsantrasyonuna sahip P3HT:F4-TCNQ organik polimerleri oluşturmaktadır. Satın alınan toz haldeki polimerler organik karışımları hazırlamak için solüsyon haline getirilmiştir. Kullanılacak olan P3HT ve F4-TCNQ organik polimerlerin ortak çözücüsü olan klorobenzen kullanılmış, her bir polimer ayrı şişelerde 25mg/ml'lik çözeltiler oluşturacak şekilde 60 °C sıcaklıkta yaklaşık 3 saat süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Tez çalışmasında kullanılacak olan %2'lik F4-TCNQ konsantrasyonuna sahip karışım hazırlanıp tekrar manyetik karıştırıcıya 60 °C'de bir gece boyunca karışması için bırakılmıştır.

Temizlenen Si pulların parlatılmış yüzeyi üzerine Düzce Üniversitesi Fizik Bölümü Numune Hazırlama Laboratuvarı'nda bulunan spin kaplama cihazı (Şekil 3.4) kullanılarak P3HT:F4-TCNQ organik polimer karışımları kaplanmıştır. Kaplama işlemi 1500 devir/dakika sabit dönme hızıyla 30 saniyede tamamlanarak yaklaşık 100 nm kalınlık elde edilmiştir. Kesit alanı görüntü alma yönteminin kullanıldığı Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT)'nde bulunan SEM (taramalı elektron mikroskobu) kullanılarak kaplanan organik polimerin kalınlığı ölçülmüştür. Elde edilen SEM görüntüsünde kalınlığın yaklaşık 100 nm olduğu Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından numuneler için 80 °C'de 15 dakika ısı işlem gerçekleştirilerek organik yüzeyde bulunan çözücünün buharlaşması sağlanmıştır.



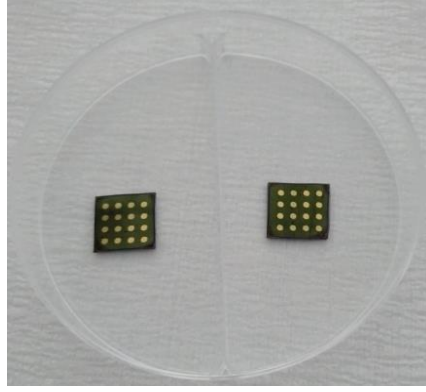
Şekil 3.4. Spin kaplama sistemi.



Şekil 3.5. SEM kesit alanı ölçümü.

3.2.4. Doğrultucu Kontakın Oluşturulması

Doğrultucu kontak olarak iş fonksiyonu nedeniyle altın (Au) kullanılmıştır. Kontakların kaplanması için paslanmaz çelikten üretilmiş ve üzerinde 1mm çapa sahip delikler olan maske kullanılmıştır. Numunelerin üzerine bu maske yardımıyla dairesel kontaklar yaklaşık olarak 250 nm kalınlığında büyütülmüşlerdir (Şekil 3.6). Termal buharlaştırma kaplama cihazı doğrultucu kontakların büyütülmesinde de kullanılmıştır. Termal kaplama sisteminde bulunan dijital ekran ile kontakların kaplama kalınlıkları takip edilmiştir.



Şekil 3.6. Üretilen MPY SBD'lerin görünümü.

3.2.5. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Hazırlanan MPY SBD yapının C , G/w elektriksel parametreleri voltaja bağlı olarak 10 kHz – 2 MHz frekans aralığında elde edilmiştir.

Frekansa bağlı $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri -10,0 V – +10,0 V voltaj aralığı ve 10 kHz – 2 MHz frekans aralığında Şekil 3.7'de görülen ve Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) laboratuvarlarında bulunan Novocontrol Technologies Alpha-AN marka düşük ve orta frekans empedans analizmetre (impedance analyzer) yardımıyla bilgisayara takılan bir ac/dc çevirici kart kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Düşük ve orta frekans empedans analizmetresi.

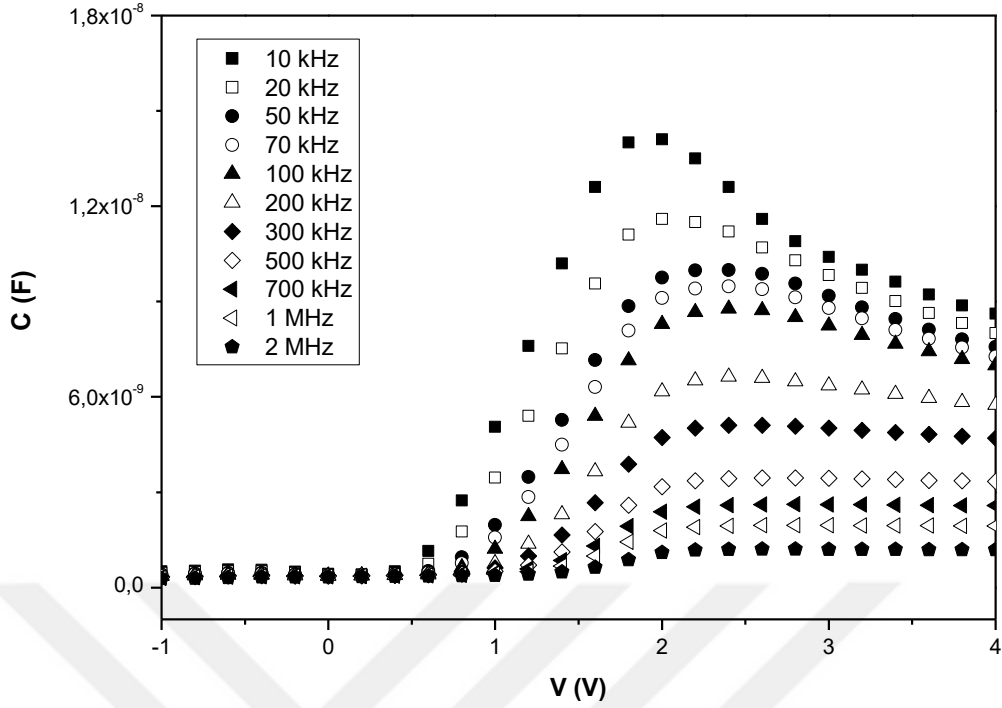
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, %2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan P3HT:F4-TCNQ arayüzey tabakasına sahip Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyot üretilmiştir. Üretim aşamaları Bölüm 3'te detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere spin kaplama yöntemi kullanılarak üretilen MPY SBD'nin kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri, -10,0 V – +10,0 V voltaj aralığı ve 10 kHz – 2 MHz gibi geniş bir frekans aralığı kullanılarak karanlıkta ve oda sıcaklığında empedans analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümlerinden yararlanılarak Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun R_i , R_s , N_{ss} , σ_{ac} , ϵ' , ϵ'' , M' ve M'' gibi bazı temel elektriksel ve dielektrik parametrelerinin hesaplamaları yapılmıştır.

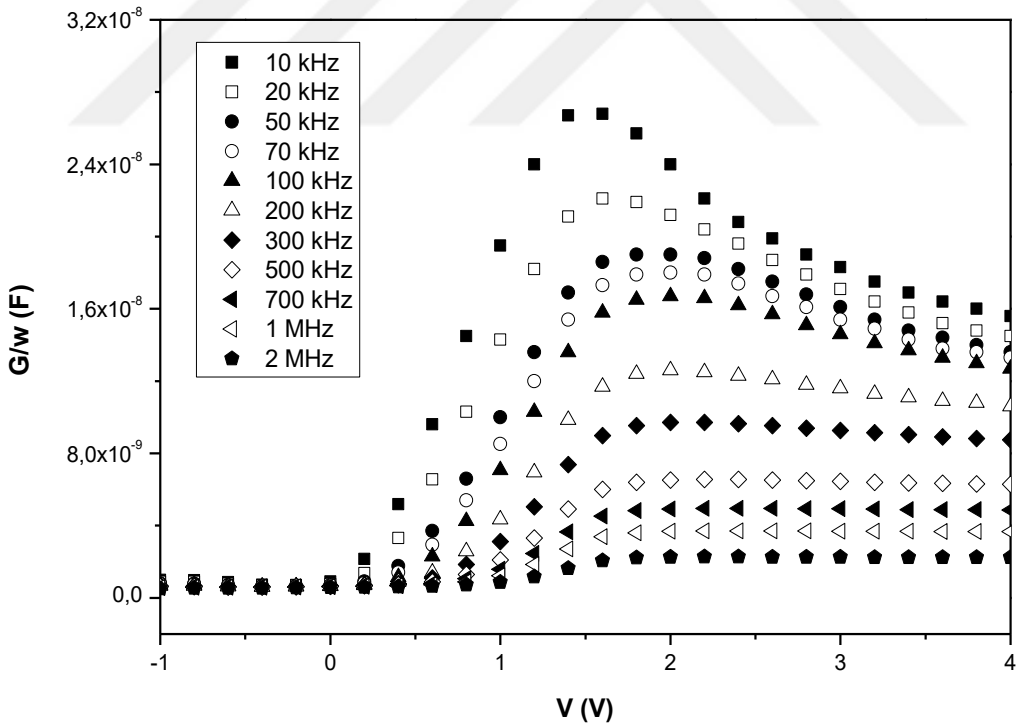
4.1. ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLER

%2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan P3HT:F4-TCNQ polimer arayüzey tabakasına sahip olan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj grafikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

C-V ölçümleri gerçekleştirilen MPY SBD'nin kapasitans karakteristiğinin, şekillerde açıkça görüldüğü üzere frekansa ve gerilme bağlı olduğu, frekans değerinin artmasıyla kapasitans değerinde azalmanın olduğu gözlemlenmiştir. Frekansa bağlı olarak gözlemlenen bu durumun başlıca sebepleri metal kontaklar ile yarıiletken malzeme arasındaki seri direncin kapasitansı etkilemesi, yasak enerji aralığı ve arayüzeylerde bulunan yüklerin frekans değerlerinin düşük olduğu durumlarda uygulanan ac sinyali takip ederek kapasitansa katkı sağlamalarıdır. Uygulanan frekans değerinin artmasıyla birlikte (≥ 500 kHz) arayüzey ve yasak enerji aralığında bulunan ve malzeme kapasitansına etki eden yükler ac sinyali takip edebilme yeteneklerini kaybederler. Bu sebeple bu yüklerin C'ye olan katkıları azalır. Bahsedilen etkenler dolayısıyla numune ideal kapasitans-voltaj karakterinden uzaklaşmış olur [10], [11].



Şekil 4.1. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı $C - V$ karakteristikleri.



Şekil 4.2. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı $G/w - V$ karakteristikleri.

Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun ters beslem bölgesinde kapasitans ve iletkenlik değerlerinde hemen hemen hiç değişim olmadığı yani uygulanan voltajın bu bölgede C ve G/w değerlerine etki etmediği görülmektedir. Diğer

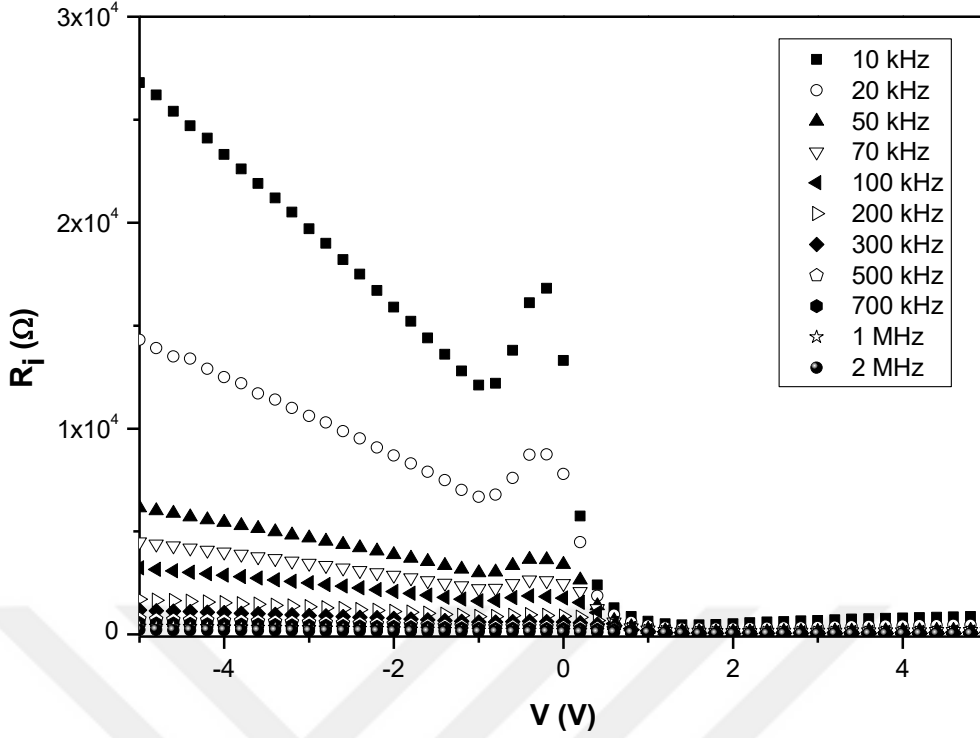
yandan tüketim ve yığılma bölgesinde kapasitans ve iletkenlik değerlerinin frekansa bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Yüksek frekanslarda kapasitans ve iletkenlik değerlerinin voltaja bağlı eğrileri $T = 1/w$ periyoduna sahip olacaktır. Bu süre artan frekansla daha da azalacağından arayüzey durumundaki taşıyıcılar a.c. sinyali takip edemeyecekler, bu nedenle C ve G/w değerlerinin incelemesi yapılırken frekansa bağlı ölçümlerin yapılması önemlidir.

%2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj eğrilerinden frekansa bağlı yarımalar olduğu görülmektedir. Frekansa bağlı olarak ortaya çıkan bu yarımaların sebebi arayüzey durumlarından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada arayüzey olarak kullanılan polimer yüzey yaklaşık olarak 100 nm kalınlığındadır. Bu nedenle arayüzey durumları metale geçemezler ve yarıiletken ile arayüzey durumları dengede olurlar. Ancak arayüzey durumları, kaplanan arayüzey tabaka kalınlığının 30 Å'dan büyük olmaması durumunda metale geçebilmektedirler [10].

%2 F4-TCNQ konsantrasyonu kullanılarak üretilen metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun direnç değerleri, kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümlerinden yararlanılarak şu ifade ile hesaplanmıştır:

$$R_i = \frac{G_m}{G_m^2 + (wC_m)^2} \quad (4.1)$$

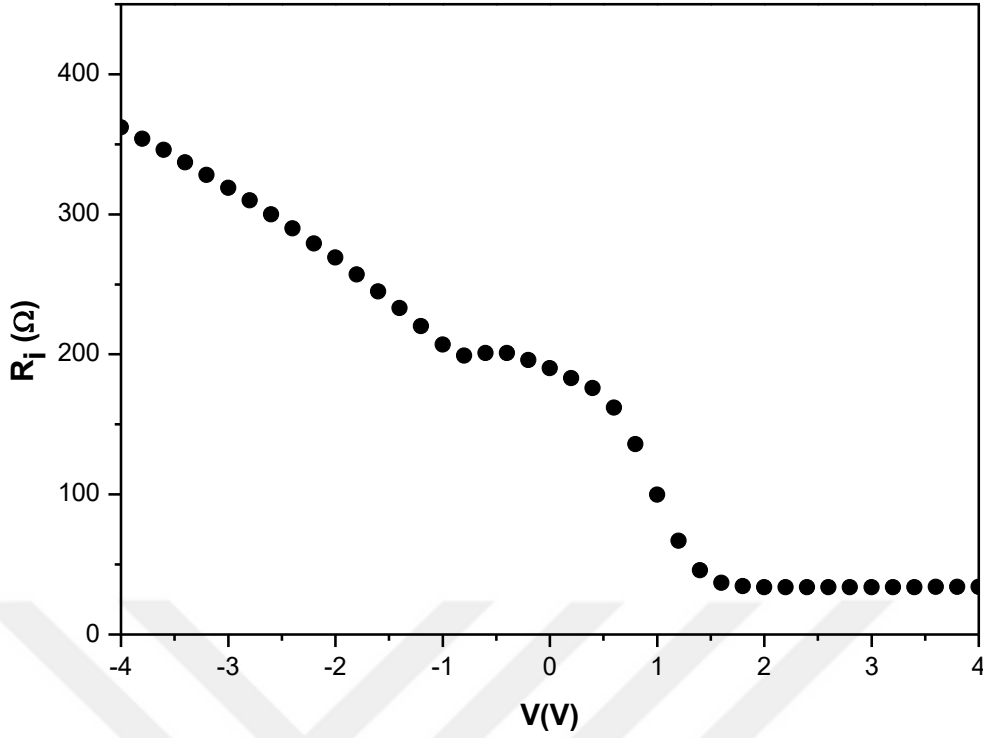
Yukarıdaki denklemde verilen C_m ifadesi, ölçümler sonucunda ortaya çıkan güçlü yığılma bölgesindeki kapasitansın değerini, G_m güçlü yığılma bölgesindeki iletkenlik değerini, w değeri ise açısal frekansı vermektedir. İdeal olarak üretilen bir diyot göz önüne alındığında bu diyotun seri direncinin sıfır olması ve şant direncinin ise sonsuza gitmesi beklenmektedir. Ancak, üretim aşamasının ideal koşullar altında yapılamamasından kaynaklı olarak üretilen diyotlar ideal durumdan sapmalara neden olabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında %2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun frekansa bağlı $R_i - V$ grafiği Şekil 4.3' te verilmiştir.



Şekil 4.3. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı $R_i - V$ karakteristikleri.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere üretilen diyotun direnç eğrilerinde arayüzey durumlarından kaynaklı pikler görülmektedir ve görülen bu piklerin şiddetinde frekans değerinin azalmasıyla bir artış görülmektedir [10], [32]. Frekans değerinin artmasıyla birlikte bu piklerin şiddetinde bir azalma olduğu gözlemlenmekte ve hatta yüksek frekans değerlerinde (>500 kHz) doğru gidildikçe bu piklerin ortadan kaybolmaya başladığı görülmektedir. Bu durumun sebebi ise daha önce açıklandığı üzere düşük frekans değerlerinde arayüzey de bulunan yüklerin ac sinyali takip edip kapasitans ve iletkenlik değerlerine bir etkide bulunmasıdır. Bu taşıyıcılar frekans değerlerinin artmasıyla ac sinyali takip yeteneklerini kaybedeceklerinden kapasitans ve iletkenlik değerlerine etki edemeyeceklerdir. Bu sebeple üretilen diyotların direnç değerlerinin daha güvenilir bir şekilde elde edilebilmesi için yüksek frekans değerlerinden elde edilen $C - V$ ve $G/w - V$ değerleri kullanılarak hesaplamalar yapılması gerekmektedir.

Yüksek frekans değerlerinde (>500 kHz) kapasitans ve iletkenliğin, dirence katkısının bulunmaması nedeniyle %2 F4-TCNQ konsantrasyonu kullanılarak üretilen Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin voltaja bağlı direnç değerlerindeki değişimin incelenebilmesi için 1 MHz frekans değeri seçilmiştir ve diyotun bu frekans değerindeki direnç-voltaj grafiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin 1 MHz frekans değerindeki $R_i - V$ karakteristiği.

Şekil 4.4'te görülen pozitif voltaj bölgesi yani ileri beslem olarak isimlendirilen bölgedeki direnç değerleri diyotun seri direncini (R_s) vermektedir. Ters beslem olarak adlandırılan yani negatif voltaj bölgesindeki direnç değerleri ise diyotun şant direncini (R_{sh}) vermektedir. Yapılan ölçümler sonucunda %2 F4-TCNQ konsantrasyonu kullanılarak üretilen MPY SBD'nin +4 V voltaj değerindeki seri direnci 33 Ω bulunmuştur. Bununla birlikte -4 V değerindeki şant direnci ise 362 Ω olarak elde edilmiştir. Direncin +4 V'tan itibaren voltajdan bağımsız hale gelerek sabit değere ulaşması nedeniyle, seri direnç için bu voltaj değeri kullanılmıştır. Kıyaslama yapılırken, diyotun seri direnci için +4 V'daki değerin alınması nedeniyle şant direnç için bunun tam tersi olan -4 V'daki direnç değeri kullanılmıştır.

Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun, Hill-Coleman metodu kullanılarak aşağıdaki denklem yardımıyla arayüzey durum yoğunlukları hesaplanmıştır [43]:

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{\left(\left((G_m / \omega)_{\max} / C_{ox} \right)^2 + (1 - C_{\max} / C_{ox})^2 \right)} \quad (4.2)$$

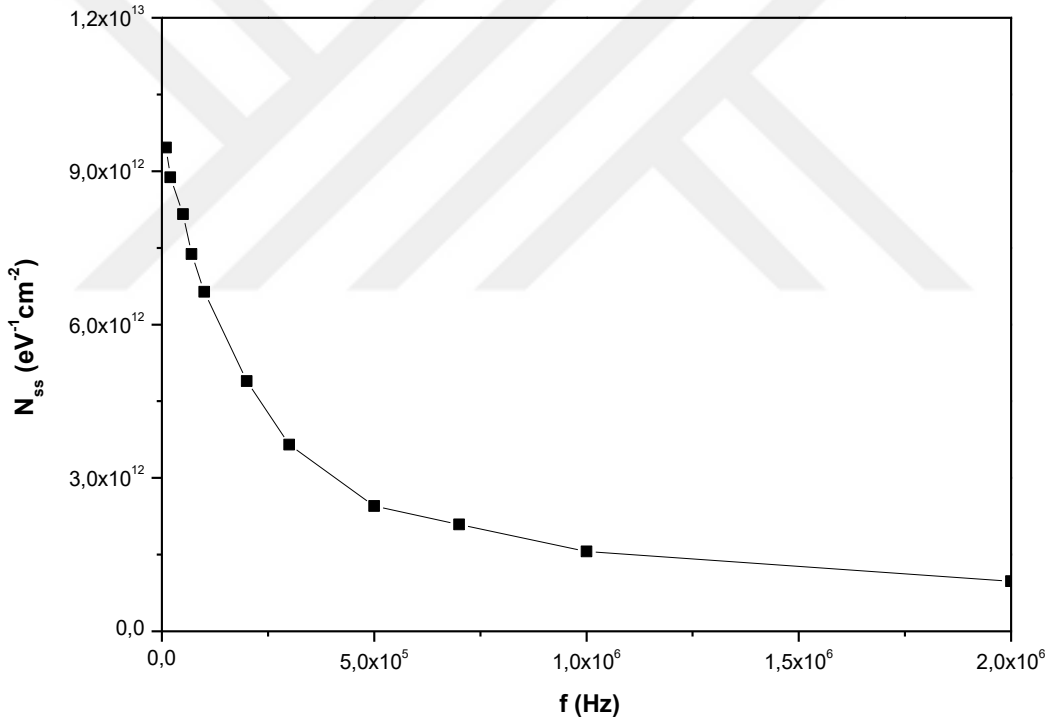
Denklem 4.2'deki C_{\max} ve $(G_m/w)_{\max}$ değerleri üretilen malzemenin kapasitans ve iletkenlik ölçümlerindeki pik yaptıkları noktalardır. Arayüzey olarak kullanılan polimer malzemenin kaplama kalınlığı 30 Å'den oldukça büyük olduğu için bu malzemeye yalıtkan malzeme

yaklaşımı yapılarak $C_{ox} (= C_i)$ değerinin yalıtkan tabaka kapasitansı olduğu kabul edilebilir. Bu durumda C_{ox} aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilebilir:

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'teki C_{ma} değeri malzemenin kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülmüş olan kapasitans değerini vermektedir. G_{ma} ise yine kuvvetli yığılım bölgesinden elde edilmiş olan iletkenlik değeridir.

Denklem 4.2 ile Denklem 4.3 kullanılarak %2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan arayüze sahip Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun N_{ss} değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan arayüzey durum yoğunluğu değerlerinin frekansa göre değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

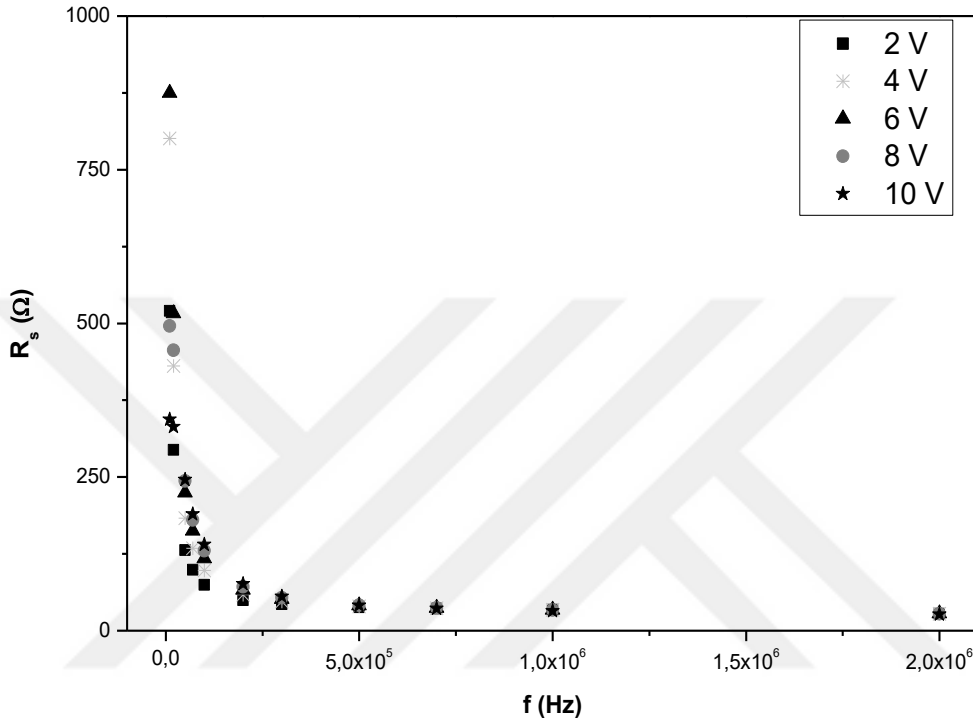


Şekil 4.5. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı arayüzey yoğunluğu (N_{ss}) değişim grafiği.

Şekil 4.5'te %2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun 10 kHz – 2 MHz frekans aralığındaki arayüzey durum yoğunluğunun artan frekans ile $9,46 \times 10^{12} \text{ cm}^2/eV$ değerinden $9,77 \times 10^{11} \text{ cm}^2/eV$ değerine azaldığı görülmektedir. Arayüzey durum yoğunluğunun frekansa kuvvetli bir şekilde bağlı olmasının nedeni daha önce de açıklandığı üzere düşük frekans değerlerinde arayüzey

durumlarında bulunan taşıyıcıların ac sinyali takip edebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Frekans değerinin artmasıyla birlikte arayüzey durumlarında bulunan taşıyıcılar uygulanan ac sinyalini takip edemeyecekleri için arayüzey durum yoğunluğu da azalmaktadır.

Şekil 4.6’da diyotun 2 V – 10 V aralığındaki voltaj değerleri için frekansa bağlı seri direnç değerleri verilmiştir.



Şekil 4.6. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı seri direncin (R_s) değişim grafiği.

Şekil 4.6’da görüldüğü üzere tüm voltaj değerlerinde (2 V – 10 V) frekans değerinin artmasıyla birlikte N_{ss} değerlerinde olduğu gibi R_s değerlerinde de bir azalma görülmektedir. Bununla birlikte artan frekans değerleri ile birlikte arayüzey durum yoğunluğunun da azaldığı görülmektedir. Yukarıda ifade edildiği üzere düşük frekans değerlerinde arayüzey durumlarında bulunan taşıyıcılar ac sinyali takip edebildikleri için malzemenin direncine de bir etkisi olmaktadır. Yani düşük frekans değerlerinde N_{ss} değerinin yüksek olmasından dolayı seri direnç değerlerinde de bir artış görülmektedir ve seri direnç değeri 10 kHz frekansta 520 Ω değerlerine kadar ulaşmaktadır. Frekans değerinin artmasıyla birlikte arayüzey durumlarındaki yükler ac sinyali takip edememeye başlayacaklardır. Böylece arayüzey durum yoğunluğundaki azalmanın seri direnç değerine de etki etmesi beklenmektedir. Frekansın 1 MHz ve üstü değerlerinde ölçülen seri direncin değeri ise 30 Ω mertebelerine kadar inmektedir. Daha önce ifade edildiği üzere malzemenin gerçek direnç değerlerinin elde

edilebilmesi için yüksek frekanslarda (≥ 500 kHz) yapılan ölçümlerden direnç hesaplarının yapılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, %2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan arayüze sahip Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametrelerin frekansa kuvvetli bir şekilde bağılılığı görülmektedir. Frekansa bağlı olarak ortaya çıkan bu değişimler polimer arayüzeydeki N_{ss} 'in varlığına atfedilebilir.

4.2. FREKANS BAĞLI DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

%2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan arayüze sahip Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kaybı (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}), elektrik modülünün gerçel kısmı (M') ve elektrik modülünün sanal kısmı (M'') karanlıkta ve oda sıcaklığında elde edilen iletkenlik (G/w) ve kapasitans (C) ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir. Ölçümlerin incelenmesi -10 V – +10 V voltaj ve 10 kHz – 2 MHz gibi geniş bir frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerin elektriksel ve dielektrik özellikleri hakkında fiziksel ve kimyasal bilgiler sunmasından dolayı ϵ^* ile ifade edilen dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik sabitinin (kompleks geçirgenliğin) incelenmesi büyük önem taşımaktadır ve aşağıdaki şekilde gösterilir [29], [44], [45]:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (4.4)$$

Burada kompleks geçirgenliğin gerçel ve sanal kısımları olan ϵ' ve ϵ'' sırasıyla depolanan enerji ve harcanan enerjiyi gösterir. Pozitif bir gelirim altında yani kuvvetli yığılım bölgesinde dielektrik sabit frekansa bağlı olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir [46]:

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (4.5)$$

Bu denklemde C değeri malzemenin kapasitansını verirken C_0 değeri ise boşluğun kapasitans değerini göstermektedir. C_0 değeri aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$C_0 = \epsilon_0 \left(\frac{A}{d} \right) \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'daki ϵ_0 boşluğun dielektrik geçirgenliğini ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} F/cm$), A doğrultucu kontak alanı (cm^2 cinsinden) ve d ise arayüzey tabakası olarak kullanılan polimer malzemenin kalınlığını vermektedir.

Kompleks geçirgenliğin sanal kısmı olan ϵ'' ifadesinin değeri Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanabilir [30]:

$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} \quad (4.7)$$

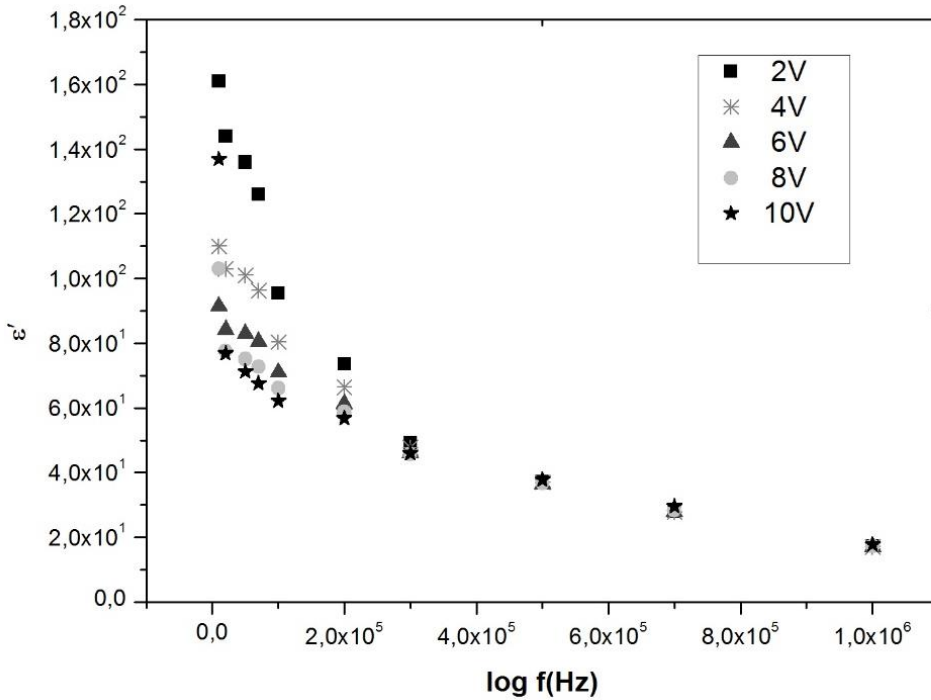
Bu denklemde yer alan G değeri üretilen yapının iletkenliğini, ω ise açısai frekansı ifade etmektedir.

Kayıp tanjantı ($\tan\delta$) ϵ' ve ϵ'' değerleri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [62]:

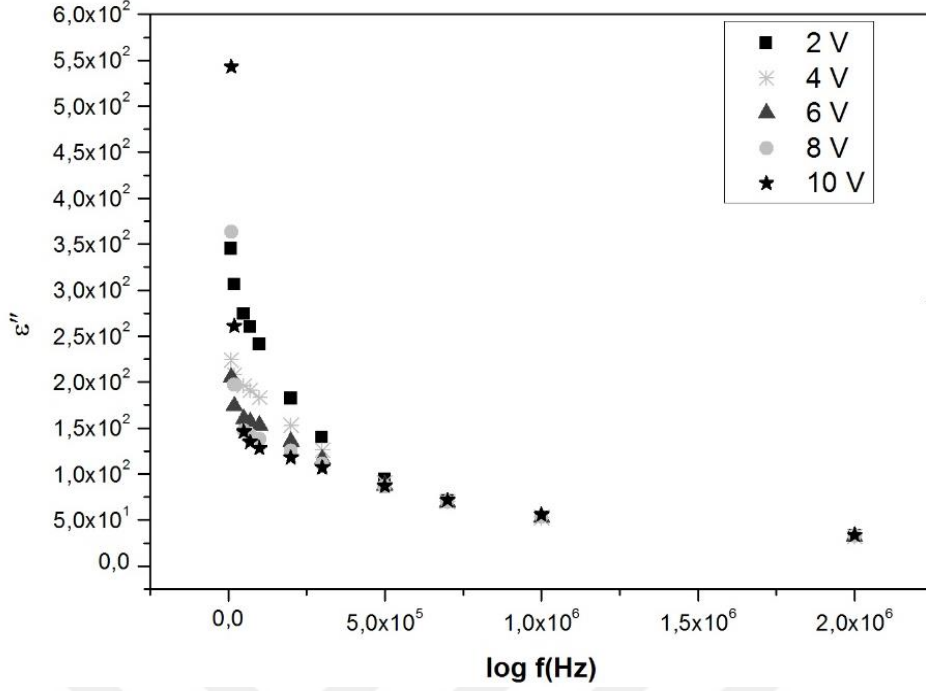
$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8'de ifade edildiği üzere kayıp açi değerı ϵ'' 'nün ϵ' değerine bölünmesiyle elde edilen bir parametredir. Bu nedenle, kayıp açidaki değişiklikleri etkileyen tek faktör, ϵ' ve ϵ'' parametrelerindeki değişikliktir.

%2 F4-TCNQ konsantrasyonu ile hazırlanan arayüzeye sahip Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyotun frekans ve voltaja bağlı ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değişimleri sırasıyla şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir.

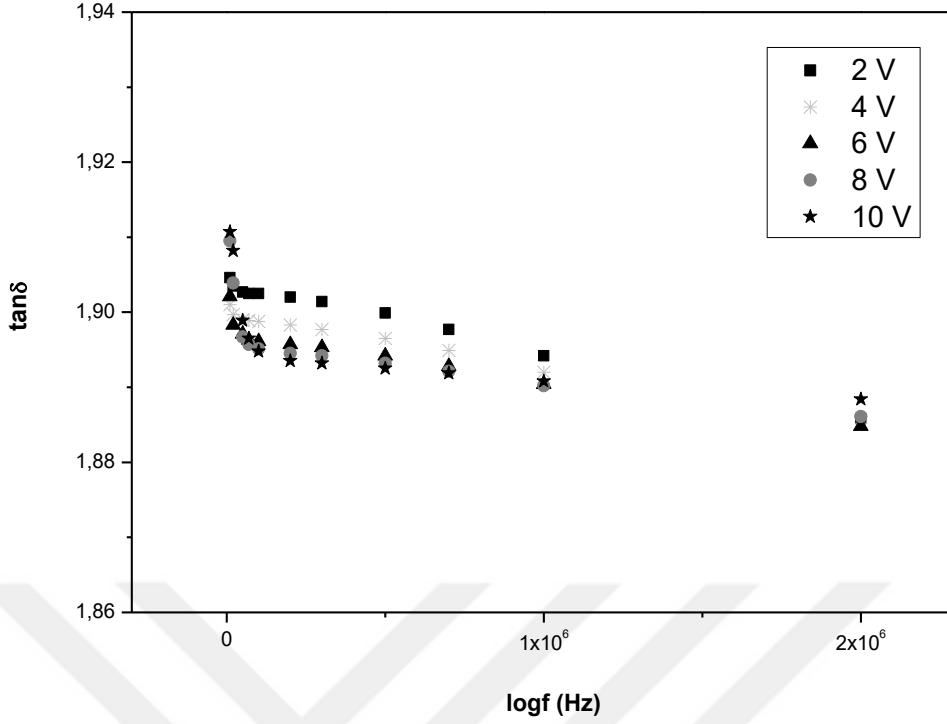


şekil 4.7. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı dielektrik sabiti (ϵ') değişim grafiği.



Şekil 4.8. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPS SBD'nin frekansa bağlı dielektrik kayıp (ϵ'') değişim grafiği.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, frekansın artmasıyla birlikte ϵ' ve ϵ'' değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. 500 kHz'den daha düşük frekans değerlerinde ϵ' ve ϵ'' voltaja bağlı bir değişim göstermektedir. Buna karşın frekans değerinin 500 kHz ve daha yüksek olduğu noktalarda ϵ' ve ϵ'' voltajdan bağımsız bir davranış göstermeye başlamaktadır. Bu durumun sebebi ise düşük frekans aralığında arayüzey tuzaklarında mevcut olan elektrik dipolleri polarizasyona katkıda bulunabilirler. Frekans değerinin artmasıyla birlikte arayüzey tuzakarında bulunan bu dipoller yeniden düzenlenebilmek için yeterli zamana sahip olmadıkları için polarizasyona olan etkileri azalmaktadır. Bunun sonucunda da ϵ' ve ϵ'' değerleri yüksek frekanslarda (>500 kHz) voltaj değerlerinden bağımsız hale gelerek yaklaşık olarak aynı değerde olurlar [23], [48], [49].



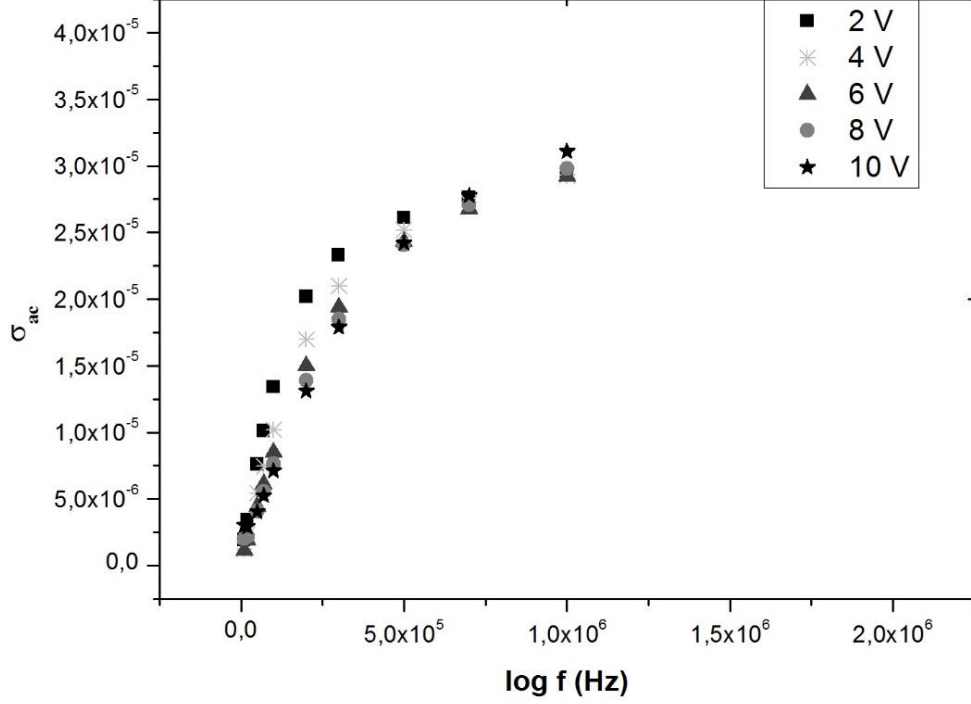
Şekil 4.9. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı kayıp açısı ($\tan\delta$) değişim grafiği.

Şekil 4.9'da, ϵ' ve ϵ'' parametrelerinden hesaplanan $\tan\delta$ grafiği gösterilmektedir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere $\tan\delta$ parametresinde voltaj ve frekansa bağlı olarak çok küçük değişimlerin olduğu görülmektedir.

Malzemenin ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) o malzemenin karakteri hakkında önemli bilgiler veren bir parametre olup aşağıdaki denklem ile elde edilebilir [50]:

$$\sigma_{ac} = \omega \epsilon_0 \epsilon'' \quad (4.9)$$

Farklı voltaj değerleri için Au/P3HT:F4TCNQ/n-Si yapısının ac elektriksel iletkenliğinin (σ_{ac}) davranışı, frekansın (10 kHz – 2 MHz) bir fonksiyonu olarak çizilmiş ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Frekansın artması ile elektriksel iletkenliğin de arttığı açıkça görülmektedir. Elektriksel iletkenliğin artış nedeni olarak, frekansın artması ile birlikte kutuplanmanın azalması gösterilebilir. Kutuplanmanın azalmasıyla ilettime katkı sağlayan taşıyıcı sayısının artması sağlanır ve böylece ac iletkenlik değerlerinde artış gösterir.

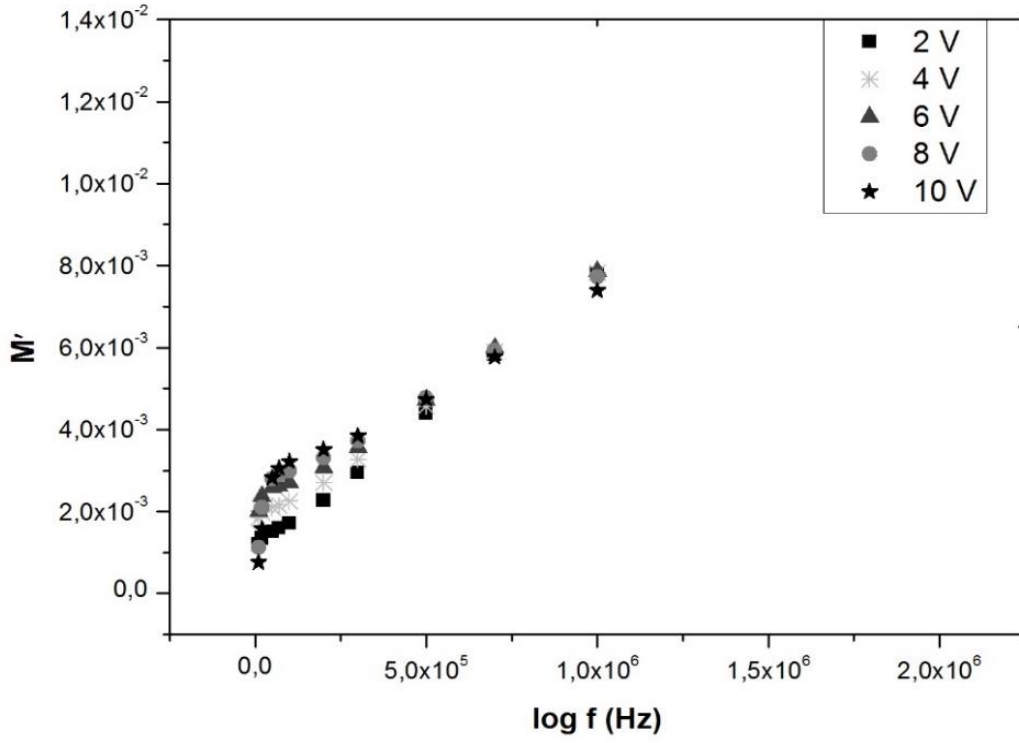


Şekil 4.10. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin 2 V – 10 V aralığında frekansa bağlı ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) grafiği.

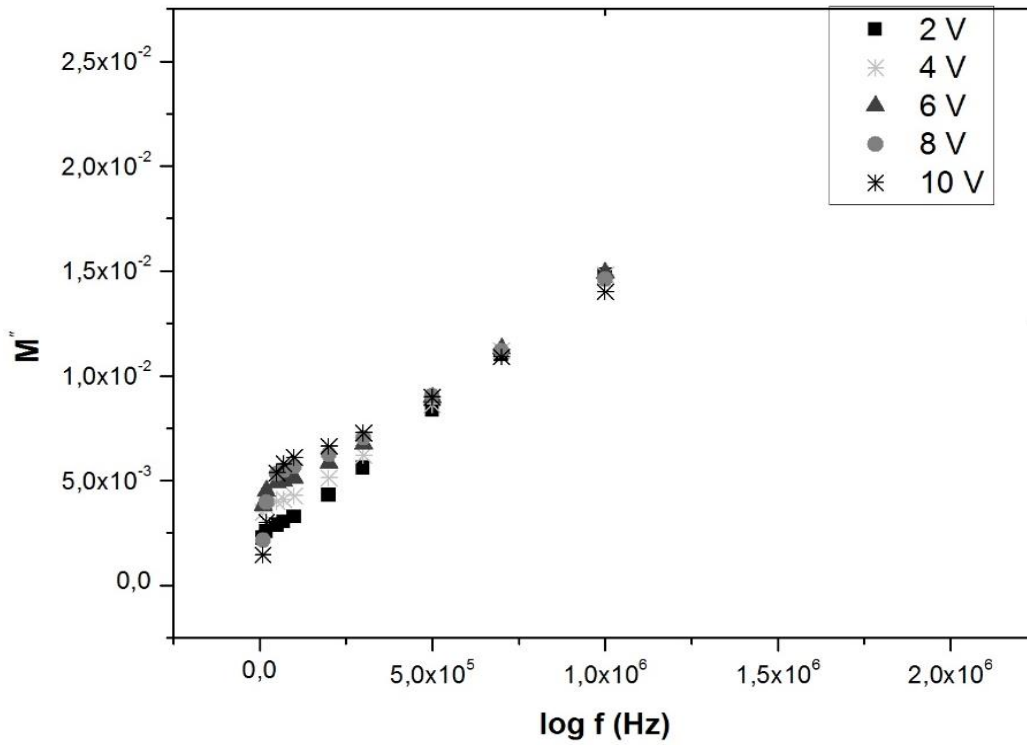
Elektrik modülü formalizmi ilk kez McCrum ve arkadaşları tarafından 1967 yılında, kompleks geçirgenliğin tersi alınarak ortaya atılmıştır [51]. Ancak deneysel verilere uygulanmamıştır. Modül deneysel olarak ilk defa, 1972 yılında Macedo ve arkadaşları ile 1973 yılında Moynihan ve arkadaşları tarafından camsı iyonik iletkenlerin araştırılmasında kullanılmıştır [52], [53]. Kompleks elektriksel modül formalizmi, dielektrik materyallere uygulanabilecek bir analiz yöntemidir. Bu nedenle, elektrik modülleri formalizmi, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından MPY SBD'lerin dielektrik özellik analizini tanımlamak için kullanılmıştır [36]. M^* ile ifade edilen kompleks elektrik modülü şu denklem kullanılarak hesaplanabilir [54]:

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (4.10)$$

M^* , gerçel M' ve sanal M'' bileşenleri ile birlikte ε' ve ε'' değerleri kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 4.11 ile Şekil 4.12'de frekans ve voltajın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı elektrik modülünün gerçel kısmının (M') grafiği.



Şekil 4.12. Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı elektrik modülünün sanal kısmının (M'') grafiği.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görüldüğü üzere M' ve M'' değerleri ε' ve ε'' değerlerinde meydana gelen frekans artışının bir sonucu olarak artan frekansla artar. Dielektrik modülü

M^* 'ın gerçek kısmı M' ve sanal kısmı M'' , voltaj değerleri için frekansa bağlıdır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de, her bir voltaj değeri için M'' 'nın yüksek frekansta sabit bir değere ulaştığı gösterilmiştir. Ayrıca M' , gevşeme sürecine bağlı olarak $M_{\infty} = 1/\epsilon_{\infty}$ 'ye karşılık gelen bir maksimum sabit değere ulaşır. Düşük frekanslarda M' sıfır yaklaşımı değeri, elektrot polarizasyonunun kaldırılmasını doğrular.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, %2 F4-TCNQ ile hazırlanan P3HT:F4-TCNQ polimer arayüze sahip SBD yapısının elektriksel ve dielektrik özelliklerinin frekansa bağlılığı, oda sıcaklığında ve 10 kHz – 2 MHz gibi geniş bir frekans aralığında incelenmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si metal-polimer-yarıiletken Schottky bariyer diyot için kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj değerlerinin frekansa kuvvetli olarak bağlı olduğu görülmüş ve frekansın artmasıyla birlikte kapasitans ve iletkenlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Frekansa bağlı olarak kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj değerlerinde meydana gelen değişimin nedeni olarak arayüzeyde bulunan yüklerin düşük frekans değerlerinde (< 500 kHz) ac sinyali takip ederek kapasitansa katkı sağlarken, yüksek frekans değerlerinde (\geq 500 kHz) ise ac sinyalini takip edemeyerek kapasitansa etki edememeleri gösterilir.

Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri kullanılarak hesaplanan direnç değerleri ile çizilen direnç eğrilerinde arayüzey durumlarından kaynaklı pikler olduğu ve bu piklerin şiddetinde frekansın artması ile birlikte azalma olduğu hatta yüksek frekans değerlerinde (\geq 500 kHz) bu piklerin ortadan kaybolmaya başladığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda arayüzey durum yoğunluğunun frekansa kuvvetli şekilde bağlı olduğu, frekansın artmasıyla birlikte arayüzey durum yoğunluğunun azaldığı da gözlemlenmiştir. Bu iki durumun nedeni de arayüzeyde bulunan yüklerin düşük frekanslarda ac sinyalini takip ederken, frekans değerinin artmasıyla arayüzey durumlarındaki taşıyıcıların ac sinyalini takip edememelerinden kaynaklıdır.

C-V ölçümleri kullanılarak malzemenin dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülünün gerçel ve sanal kısmı (M' ve M''), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) değerleri frekansa bağlı olarak hesaplanmıştır.

ϵ' ve ϵ'' değerlerinin artan frekansla azaldığı, yüksek frekans değerlerinde voltaja bağımlılığını yitirdikleri ve birbirleriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir. ϵ' ve ϵ'' değerlerindeki bu değişim, arayüzeydeki tuzak seviyelerinin yük ve yüzey polarizasyonu nedeniyle düşük frekans bölgesinde meydana gelebilir. Frekansın yüksek olduğu bölgelerde, dipollerin elektrik

alanı takip edememeleri nedeniyle ε' ve ε'' değerleri voltajdan bağımsız olurlar. Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp kullanılarak hesaplanan $\tan\delta$ 'nın, frekansın artmasıyla belirgin şekilde değişmediği ve sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlı olduğu bulunmuştur. Elektriksel iletkenlik artan frekansla artar. Bu artışın nedeni, artan frekansla kutuplaşmanın azalmasıdır. Daha fazla taşıyıcı eklenebildiği için polarite azaldıkça, ac iletkenliği artar. Düşük frekans değerlerinde σ_{ac} , voltajdan bağımsızdır. Fakat frekans yükseldikçe, ac iletkenliğinin voltaja bağlı olarak değiştiği görülmektedir. ε' , ε'' değerlerinde meydana gelen frekans artışının sonucu olarak, M' ve M'' değerleri, artan frekansla artar.



6. KAYNAKLAR

- [1] B.L. Sharma, *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, New York and London, Plenum Press, 1984.
- [2] A. Wilson, *The Theory of Electronic Semiconductors*, Proceeding of the Royal Society A, 1931.
- [3] D.A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices 2nd Edition*, Mc Graw-Hill, 1997.
- [4] O. Güllü, T. Kılıçoğlu, A. Türüt, “Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71:351-356, 2010.
- [5] G. Ersöz, “Organik arayüzeyli schottky diyotların hazırlanması, elektriksel ve dielektrik özelliklerinin geniş bir frekans aralığında incelenmesi”, Yüksek lisans tezi , Elektrik Eğitimi Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2005.
- [6] U. Aydemir, “Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin I-V, C-V ve DLTS metodu ile incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [7] E. Yağlıoğlu, “Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si Schottky bariyer diyotların oda sıcaklığında elektriksel karakterizasyonu”,Yüksek lisans tezi , Fizik Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2014.
- [8] E.H. Rhoderick, R.H. Williams, *Surfaces, Interfaces and Schottky Barriers, Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd Ed., Oxford, England, Clarendon Press, 1988.
- [9] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York,USA, 1981.
- [10] E.H. Nicollian, J.R. Brews, *MOS Physics and Technology*, New York, USA, John Wiley & Sons, 1982.
- [11] G. Lu, *Organic Semiconductor*, University of Rochester, 2006.
- [12] S. Karasu, “Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky bariyer diyotların elektrik ve dielektrik özelliklerinin analizi”, Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.
- [13] A.A.M. Farag, I.S. Yahia, M. Fadel, “Electrical and photovoltaic characteristics of Au/n-CdS Schottky diode”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 4906-4913, 2009.
- [14] A.A.M. Farag, A. Ashery, E.M.A. Ahmed, M.A. Salem, “Effect of temperature, illumination and frequency on the electrical characteristics of Cu/p-Si Schottky diode prepared by liquid phase epitaxy”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 495, no. 1, pp. 116-120 , 2010.
- [15] F. Yakuphanoglu, “The current-voltage characteristics of FSS/n-Si heterojunction diode under dark and illumination”, *Physica B.*, vol. 388, no. 1-2, pp. 226-229, 2007.
- [16] B. Akkal, Z. Benamara, N.B. Bouiadjra, S. Tizi, B. Gruzza, “Illumination dependence

- of I-V and C-V characterization of Au/InSb/InP (100) Schottky structure”, *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 3, pp. 1065-1070, 2006.
- [17] Ö. Tüzün Özmen, “Effects of PCBM concentration on the electrical properties of the Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes”, *Microelectronics Reliability*, vol. 54, no. 12, pp. 2766–2774, 2014.
- [18] A. Goetzberger, E. Klausmann, M.J. Schulz, “Interface states on semiconductor/insulator surfaces”, *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 226-233, 1976.
- [19] D.K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 337-379, 1998.
- [20] S.K. Ghandi, *VLSI Fabrication Principles*, John Wiley & Sons, New York, pp. 401-405, 1983.
- [21] S.R. Hofstein, G. Warfield, “Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer”, *Solid-State Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 321-341, 1965.
- [22] B. Tareev, *Physics of Dielectric Materials*, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- [23] İ. Yücedağ, “Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi”, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye 2007.
- [24] B. Tareev, *Physics of Dielectric Materials*, Mir Publishers, Moscow, 1979.
- [25] H. Fröhlich, *Theory of Dielectrics*, Clarendon Press, Oxford, 1958.
- [26] A.R. Von Hippel, *Dielectrics and Waves*, John Wiley & Sons, New York, 1954.
- [27] M. Popescu, I. Bunget, *Physics of Solid Dielectrics (Materials Science Monographs, 19)*, Elsevier Science Ltd., New York, 1984.
- [28] A. Tataroğlu, “MOS yapılarında temel fiziksel parametrelerin frekans ve radyasyon miktarına bağlı incelenmesi”, Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.
- [29] V.V Daniel, *Dielectric Relaxation*, Academic Press, London, 1967.
- [30] C.P. Smyth, *Dielectric Behavior and Structure: Dielectric Constant and Loss, Dipole Moment and Molecular Structure*, McGraw-Hill, New York, 1955.
- [31] L.I. Berger, *Semiconductor Materials*, CRC Press, 1997.
- [32] A. Tataroğlu, Ş. Altındal, M.M. Bülbül, “Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure”, *Microelectronic Engineering*, 81 (1): 140-149, 2005.
- [33] Z. Sönmez, “Metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) yapıların elektrik ve dielektrik özelliklerinin frekans ve potansiyele bağlı incelenmesi”, Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [34] S. Kar, R.L. Narasimhan, “Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-320 Å) oxide structures”, *Journal of Applied Physics*, 61 (12): 5353-5359, 1987.
- [35] A.S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons., New York, 1967.
- [36] P. Pissis, A. Kiritsis, *Solid-State Ionics*, vol 97, pp 105-113, 1997

- [37] M.Gökçen, “Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi”, Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008
- [38] K. Prabakar, S.K. Narayandass, D. Mangalaraj, “Dielectric studies on Cd_{0.4}Zn_{0.6}Te thin films”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 78, no. 3, pp. 809-815, 2003.
- [39] R. Hackam, P. Harrop, “Electrical properties of nickel-low-doped n-type gallium arsenide Schottky-barrier diodes”, *IEEE Transactions On Electron Devices*, vol. 19, no. 12, pp. 1231-1238, 1972.
- [40] F. Yakuphanoglu, “Determination of electronic properties of Al/p-Si/composite organic semiconductor (MIOS) junction barrier by current–voltage and capacitance–voltage methods”, *Synthetic Metals*, vol. 158, no. 3-4, pp. 108-112, 2008.
- [41] T.J. Prosa, M.J. Winokur, R.D. McCullough, “Evidence of a novel side chain structure in regioregular poly (3-alkylthiophenes)”, *Macromolecules*, vol. 29, pp. 3654-3656, 1996.
- [42] X. Han, Z. Wu, B. Sun, “Enhanced performance of inverted organic solar cell by a solution-based fluorinated acceptor doped P3HT:PCBM layer”, *Organic Electronics*, vol. 14, no. 4, pp. 1116-1121, 2013.
- [43] W.A. Hill, C.C. Coleman, “A single-frequency approximation for interface-state density determination”, *Solid-State Electronics*, vol. 23, no. 9, pp. 987-993, 1980.
- [44] A. Zaafouri, M. Megdiche, M. Gargouri, “AC conductivity and dielectric behavior in lithium and sodium diphosphate LiNa₃P₂O₇”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 584, no. 25, pp. 152-158, 2014.
- [45] H.M. Zaki, “AC conductivity and frequency dependence of the dielectric properties for copper doped magnetite”, *Physica B*, vol. 363, no. 1-4, pp. 232-244, 2005.
- [46] A. Kaya, Ö. Vural, H. Tecimer, S. Demirezen, Ş. Altındal, “Frequency and voltage dependence of dielectric properties and electric modulus in Au/PVC + TCNQ/p-Si structure at room temperature”, *Current Applied Physics*, vol. 14, no. 3, pp. 322-330, 2014.
- [47] C.P. Smyth, “Dielectric behavior and structure”, *McGraw-Hill*, New York, 1995.
- [48] K. Rajasekar, A. Subbarayan, R. Sathyamoorthy, “AC and dielectric properties of thermally evaporated p-type (Sb₂Te₃)₇₀ (Bi₂Te₃)₃₀ thin films”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 15, pp. 2515-2522, 2006.
- [49] A. Kaya, Ş. Altındal, Y. Şafak Asar, Z. Sönmez, “On the voltage and frequency distribution of dielectric properties and ac electrical conductivity in Al/SiO₂/p-Si (MOS) capacitors”, *Chinese Physics Letters*, vol. 30, no. 1, pp. 017301/1-4, 2013.
- [50] İ. Dökme, Ş. Altındal, M. Gökçen, “Frequency and gate voltage effects on the dielectric properties of Au/SiO₂/n-Si structures”, *Microelectronic Engineering*, vol. 85, no. 9, pp. 1910-1914, 2008.
- [51] N. G. McCrum, B. E. Read, G. Williams, *Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Solids*, John Wiley, London, 1967
- [52] P. B. Macedo, C. T. Moynihan, R. Bose, “The Role of Ionic Diffusion in Polarisation in Vitreous Ionic Conductors”, *Physics and Chemistry of Glasses*, vol. 13, pp. 171-179, 1972.

- [53] C. T. Moynihan, L. P. Boesch, N. L. Laberge, “Decay function for. the electric field relaxation in vitreous ionic conductors”, *Physics and Chemistry of Glasses*, Vol. 14, pp. 122–125, 1973.
- [54] S. Demirezen, “Frequency- and voltage-dependent dielectric properties and electrical conductivity of Au/PVA (bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature” , *Apply Physics A*, vol 112, pp. 827–833, 2013.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Aynur ÖZTÜRK
Doğum Tarihi ve Yeri : 24.03.1990 / KARABÜK
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : aynurozturk1903@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2018
Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2014
Lise		Fevzi Çakmak Lisesi (Y.D.A)	2008

YAYINLAR:

A) SCI, SCI-Expanded dışındaki indeksler tarafından taranan dergilerde yayımlanan makaleler :

A.1. H. M. Şağban, S. Karasu, **A. Öztürk**, Ö. Tüzün Özmen, “Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky bariyer diyotlarda PCBM konsantrasyonunun kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) karakteristiklerine etkisi ve dielektrik özelliklerin incelemesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 4, s. 1, ss. 55-66, 2016.

A.2. **A. Öztürk**, T. Özdemir, H. M. Şağban, Ö. Tüzün Özmen, “Study on the frequency and voltage dependent dielectric characteristics of the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si Schottky barrier diodes”, *International Journal of Engineering Science Invention*, yayımlanmak üzere gönderildi.

B) Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (*Proceedings*)

basılan bildiriler :

B.1. Ö. Tüzün Özmen, **A. Öztürk**, H. M. Şağban, T. Özdemir, “Study on the Frequency and Voltage Dependent Capacitance and Conductance Characteristics of the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes”, *Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress (TPS-33)*, 06-10 September, Bodrum, Turkey, p. 521 (2017).

B.2. T. Özdemir, H. M. Şağban, **A. Öztürk**, Ö. Tüzün Özmen, “Study on the Frequency and Voltage Dependent Dielectric Characteristics of the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si Schottky Barrier Diode”, *3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2016)*, 19-24 October, Antalya, Turkey, p. 591 (2016).

B.3. **A. Öztürk**, H. M. Şağban, Ö. Tüzün Özmen, “The Analysis of Frequency Dependent Capacitance and Conductance Characteristics of the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes”, *2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2015)*, 14-19 October, Antalya, Turkey, p. 138 (2015).

B.4. **A. Öztürk**, H. M. Şağban, Ö. Tüzün Özmen, O. Köysal, A. Demir, A. Kösemen, Z. Alpaslan Kösemen, “The Frequency Dependent Dielectric Properties of the Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes”, *2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2015)*, 14-19 October, Antalya, Turkey, p. 139 (2015).

B.5. S. Karasu, H. M. Şağban, **A. Öztürk**, Ö. Tüzün Özmen, “Frequency Effects on the Electric and Dielectric Properties of the Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes”, *2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2015)*, 14-19 October, Antalya, Turkey, p. 140 (2015).

C) Projeler :

C.1. *Polimer Arayüzey Kullanılarak Hazırlanan Au/P3HT:F4-TCNQ/n-Si Schottky Bariyer Diyotun Frekansa Bağlı Elektrik Ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi, Proje No: BAP 2016.05.02.403, Araştırmacı, 2016–2018.