



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

**AU/P3HT:PCBM/N-Sİ SCHOTTKY BARIYER DİYOTLARIN
ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ**

SERPİL KARASU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

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

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AU/P3HT:PCBM/N-Sİ SCHOTTKY BARIYER DİYOTLARIN
ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

Serpil KARASU 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. Tamila ANUTGAN

Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 06/07/2017

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.

06 Temmuz 2017

Serpil KARASU



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında beni destekleyen anabilim dalı başkanımız Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

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.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve öğretmen arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2016.05.02.422 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

06 Temmuz 2017

Serpil KARASU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR.....	X
SİMGELER	XI
ÖZET	XIII
ABSTRACT	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL YARIİLETKEN (MY) KONTAKLAR.....	3
2.1. İDEAL MY KONTAKLARDA ENGEL OLUŞUMU (SCHOTTKY-MOTT TEORİSİ)	3
2.2. METAL-YALITKAN/POLİMER-YARIİLETKEN (MY/MPY) SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI	7
2.3. İDEAL MY TİPİ SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI.....	7
2.3.1. Yığılma Bölgesi.....	10
2.3.2. Tüketim Bölgesi.....	10
2.3.3. Terslenim Bölgesi.....	11
2.4. MY YAPILARDA İDEAL DURUMDAN SAPMALAR.....	12
2.4.1. Arayüzey Durumları.....	12
2.4.2. Arayüzey yükleri.....	14
2.4.3. Hareketli iyonlar	15
2.4.4. İyonlaşmış tuzaklar.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. GİRİŞ	16
3.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	18
3.2.1. Si Alttaşın Hazırlanması:	18
3.2.2. Omik Kontakın Oluşturulması:.....	18

3.2.3. P3HT:PCBM Polimer Karışımın Hazırlanması ve Kaplanması:	19
3.2.4. Doğrultucu Konağın Oluşturulması:.....	20
3.2.5. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri:.....	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
4.1. ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLER	22
4.2. FREKANS BAĞLI DİELEKTRİK ÖZELLİKLER.....	31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	38
6. KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ.....	43



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak) için elektron enerji band diyagramı: (a) kontak oluşmadan önce ve (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.	4
Şekil 2.2. MY doğrultucu kontak için enerji band diyagramı: (a) ısısal denge, (b) doğru beslem, (c) ters beslem durumu.	6
Şekil 2.3. MYY/MPY yapının şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.4. Voltaj uygulanmamış ($V=0$) durumdaki ideal bir MYY Schottky diyotun (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken için enerji-bant diyagramı.....	8
Şekil 2.5. MYY yapının kapasitans eşdeğer devresi.	9
Şekil 2.6. $V \neq 0$ durumunda ideal MYY yapının enerji-bant şeması (a) yığılım, (b) tüketim ve (c) terslenim.....	10
Şekil 2.7. İdeal MYY yapının (a) yığılım, (b) tüketim ve (c) terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri.	11
Şekil 2.8. Gerçek bir MYY yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.9. MYY yapısının (a) bir enerji seviyesi ve (b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için eşdeğer devresi.....	14
Şekil 3.1. MPY SBD'un şematik gösterimi.	17
Şekil 3.2. (a) P3HT ve (b) PCBM organiklerinin kimyasal yapıları.	17
Şekil 3.3. Termal buharlaştırma sistemi.	19
Şekil 3.4. Spin kaplama sistemi.	20
Şekil 3.5. SEM kesit alanı ölçümü.....	20
Şekil 3.6. Üretilen SBD'lerin doğrultucu kontak büyütülmesinden sonraki görünümü.	21
Şekil 3.7. Düşük ve orta frekans empedans analizmetresi.....	21
Şekil 4.1. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $C-V$ karakteristiği.	23
Şekil 4.2. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $G/w-V$ karakteristiği.	23
Şekil 4.3. 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $C-V$ karakteristiği.	24
Şekil 4.4. 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $G/w-V$ karakteristiği.	25
Şekil 4.5. 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranları kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin 1 MHz frekans değerindeki kapasitans-voltaj ($C-V$) karakteristikleri.	26
Şekil 4.6. 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranları kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin 1 MHz frekans değerindeki iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) karakteristikleri.	27
Şekil 4.7. Farklı P3HT:PCBM oranı kullanılarak hazırlanmış Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY Schottky bariyer diyotların 1 MHz frekans değerindeki R_f-V karakteristikleri.....	28
Şekil 4.8. Farklı P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin frekansa bağlı arayüzey yoğunluğu (N_{ss}) değişim grafiği.....	30
Şekil 4.9. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD 'nın frekansa bağlı dielektrik sabit (ϵ') değişim grafiği.....	33

Şekil 4.10. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı dielektrik kayıp (ϵ'') değişim grafiği.....	33
Şekil 4.11. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY Schottky bariyer diyotun frekansa bağlı kayıp açısı ($\tan\delta$) değişim grafiği.	34
Şekil 4.12. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY Schottky bariyer diyotun 2-10 V aralığında frekansa bağlı ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) grafiği.....	35
Şekil 4.13. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı elektrik modülünün gerçel kısmının (M') grafiği.....	36
Şekil 4.14. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD frekansa bağlı elektrik modülünün sanal kısmının (M'') grafiği.	36



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre kontak yapısı..... 3



KISALTMALAR

FET	Alan etkili transistörler
LED	Işık yayan diyotlar
MY	Metal-Yarıiletken
MPY	Metal-Polimer-Yarıiletken
MYY	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
OFET	Organik alan etkili transistörler
OLED	Organik ışık yayan diyotlar
OPD	Organik foto-diyot
OPV	Organik fotovoltaiçler
SBD	Schottky Bariyer Diyot
TFT	İnce film transistörler

SİMGELER

A	Doğrultucu kontak alanı
ac	Alternatif akım
Ag	Gümüş
Au	Altın
Å	Angstrom
C	Kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın oluşturduğu kapasitans
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
$C-V$	Kapasitans-voltaj
dc	Doğru akım
E_C	İletkenlik band kıyısı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak band aralığı
E_m	Maksimum elektrik alan
d	Arayüzey tabakanın kalınlığı
G	İletkenlik
$G/w-V$	İletkenlik-voltaj
I	Akım
I_0	Doyum akımı
$I-V$	Akım-voltaj
N_C	İletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğu
N_D	Donör atomların yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
q	Elektron yükü
qV_i	Yarıiletkenden metale geçen elektronların aşması gereken potansiyel engeli
R_i	Diyot direnci
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Şant direnç
Si	Silisyum

T	Mutlak sıcaklık
V	Voltaj
V_F	Doğru beslem voltaj
V_i	Kontak potansiyel farkı
V_R	Ters beslem voltaj
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
χ_s	Elektron yakınlığı
W_D	Tüketim tabakasının genişliği
Φ_{B0}	Bariyer yüksekliği



ÖZET

AU/P3HT:PCBM/N-Sİ SCHOTTKY BARIYER DİYOTLARIN ELEKTRİK VE DIELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

Serpil KARASU

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

Temmuz 2017, 42 sayfa

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ve temiz kaynaklar arayışının artması sebebiyle yarı iletken teknolojisi çok büyük bir önem kazanmıştır. Özellikle organik yarı iletken malzemeler ile yapılan çalışmaların umut vadecici olması sebebiyle bu malzemeler çok büyük bir öneme sahip olmaya başlamışlardır. Organik malzemelerin yarı iletken teknolojisinde bu kadar öne çıkmasının sebepleri; düşük sıcaklıklarda çalışma imkânı sunması, düşük maliyetle kolay üretilebilir olmaları, geniş yüzeylere büyütülebilir olmaları ve üretilen cihazların yüksek verimliliğe sahip olmalarıdır. Bu bağlamda yapılan çalışmalar sonucunda günümüzde organik alan etkili transistör (OFET), organik ince film transistör (OTFT), Schottky bariyer diyot (SBD) ve organik ışık yayan diyot (OLED) gibi birçok elektronik cihazın üretimi yapılmaktadır. Neredeyse tüm elektronik cihazlarda kullanılan diyotlar içinde ise SBD'ler büyük önem taşımaktadırlar. SBD'leri diğer diyotlardan daha üstün kılan özellikleri ise tepki sürelerinin çok daha hızlı olması, yüksek frekans değerlerinde anahtarlama özelliğini kaybetmemesi ve daha düşük voltaj ile iletme geçebilmeleridir. Bu tez çalışmasında, Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) SBD'ler farklı P3HT:PCBM oranlarında üretilerek aygıtların oda sıcaklığında ve karanlıkta, kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin sonucunda, $C-V$ ve $G/w-V$ karakteristiklerinden; diyot direnci (R_i) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) frekansa bağlı olarak elde edilmiştir. $C-V$ ve $G/w-V$ analizi verilerine göre en iyi sonucu veren diyot için 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 bağlılığı incelenmiştir. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin $C-V$ ve $G/w-V$ analizleri geniş frekans aralığında (10 kHz – 2 MHz) ve -10,0 V'dan +10,0 V'a voltaj aralığında yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Organik polimer, Schottky bariyer diyot, P3HT:PCBM katkı oranı, Elektriksel karakteristikler, Dielektrik özellikler, Frekans etkisi

ABSTRACT

ANALYSIS OF ELECTRIC AND DIELECTRIC PROPERTIES OF AU/P3HT:PCBM/N-SI SCHOTTKY BARRIER DIODES

Serpil KARASU

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özge TÜZÜN ÖZMEN

July 2017, 42 pages

In the last few decades, semiconductor technology has gained a significant importance with the improving technology and requesting for clean energy sources. Especially, the studies of organic semiconductor-based technologies have quite a large interest. The main reasons of being the center of attention of organic polymers in semiconductor technology are having the possibility of processing at low temperatures, being producible with a low cost, easy fabrication techniques and opportunity to produce the high performance devices. Through these features, many devices can be fabricated with organic polymers 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 and low forward voltage drop compared to other diodes. In this thesis, the gold/poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester/n-type silicon (Au/P3HT:PCBM/n-Si) metal-polymer-semiconductor (MPS) Schottky barrier diodes (SBDs) have been fabricated with different P3HT:PCBM mass ratios and electrical and dielectric characterization of Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBDs were investigated in the dark and at room temperature the frequency dependent capacitance-voltage ($C-V$) and conductance-voltage ($G/w-V$) measurements. As a result of $C-V$ and $G/w-V$ characterizations, the diode resistance (R_f) and interface states density (N_{ss}) have been obtained. Dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), loss tangent ($\tan\delta$), ac conductivity (σ_{ac}), and the real and imaginary parts of electric modulus (M' and M'') have been investigated for the diode which has the best results obtained from $C-V$ and $G/w-V$ measurements. The $C-V$ and $G/w-V$ measurements of Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBDs were taken in the large frequency range (10 kHz – 2 MHz) and in the voltage range from -10.0 V to +10.0 V.

Keywords: Organic polymers, Schottky barrier diodes, P3HT:PCBM mass ratio, Electrical characteristics, Dielectric properties, Frequency effect

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MY) malzemelerin kontak oluşturması sonucu ortaya çıkan iletim mekanizması Braun tarafından 1874 yılında keşfedilmiştir [1]. Bu keşfin ardından yapılan çalışmalar sonucunda MY kontakların katıların bant teorisine göre düzenlenip doğrultma mekanizması üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [2]. Bu gelişmeler sonrasında yapılan çalışmalar ile birlikte 1960'lı yıllarda Schottky Bariyer Diyot (SBD)'lerin üretimi gerçekleştirilmiş, MY ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY) kontakların iletim mekanizması gösterilmiştir [3],[4]. Son zamanlarda bu yapılarla ilgili çok sayıda hem deneysel hem de teorik çalışmalar mevcuttur [1]-[11].

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte yarıiletken teknolojilerini kullanımı ve bu teknolojilerin üretilmesi ile ilgili araştırmalar büyük önem kazanmıştır. Elektronik ve optoelektronik teknolojisinde inorganik malzemeler ışık yayan diyotlar (LED), Si tabanlı alan etkili transistörler (FET), ince film transistörler (TFT) gibi elektronik aygıtlarda aktif malzeme olarak geniş kullanım alanlarına sahiptirler [2]. Ancak gelişen teknolojiyle organik yarıiletkenler kullanılarak üretilen aygıtlar sahip oldukları avantajlarından dolayı inorganik aygıtların yerini almaya başlamıştır [5]. Kolay üretim süreçleri, düşük maliyetli oluşları ve geniş kullanım alanlarına sahip olmaları bu avantajlara birkaç örnek olarak verilebilir. Bu avantajlarından dolayı organik yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronik teknolojilerinde kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu bağlamda, son yıllarda yarıiletken teknolojilerinin araştırılması ve üretiminde inorganik malzeme bazlı malzemelerin yerini organik bazlı olarak üretilen malzemeler almaktadır. Günümüzde organik malzeme kullanılarak üretilen aygıtların başında organik ışık yayan diyotlar (OLEDs), organik alan etkili transistörler (OFETs), organik fotodiyotlar (OPDs), organik fotovoltajlar (OPVs) ve SBD'lerdir [12].

Diyotlar günümüz elektronik cihazlarında en çok kullanılan aygıtlardan biridir. SBD'ler ise gösterdikleri performans ve yüksek frekanslar altında da hızlı anahtarlama özelliğinden dolayı büyük önem taşımaktadırlar [5]. Organik teknolojinin gelişmesiyle birlikte diyotlarda organik tabanlı malzemelerle üretilmeye başlanmıştır. SBD'ler de organik bazlı malzemeler ile üretilip yüksek performans gösterebilmektedirler [12].

Diyotlar yüksek frekanslar altında üzerlerine uygulanan voltaj değişimlerine karşılık verememektedirler. Diğer bir ifadeyle, yüksek frekanslarda, iletim durumundan yalıtım durumuna veya yalıtım durumundan iletim durumuna geçiş yapamamaktadırlar. Ancak, SBD'ler düşük frekanslardan yüksek frekanslara kadar yani tüm frekans aralıklarında üzerlerine uygulanan voltaj değişimlerine çok hızlı karşılık verebilmektedirler. SBD'nin başka bir özelliği de diğer diyotlara kıyasla daha düşük ileri besleme voltajıyla çok hızlı bir şekilde ilettime geçebilmektedirler. Ayrıca, SBD'lerde azınlık taşıyıcıları daha az olduğu için ters yön sızıntı akımı da daha küçüktür. Bu sebeplerden dolayı SBD'lerin verimleri diğer diyotlara kıyasla daha fazladır [1].

MY kontak Schottky bariyer diyot yapısındadır ve metal ile yarıiletken arasında ince bir polimer tabakanın varlığında da metal-polimer-yarıiletken SBD oluşur. MPY SBD'nin üretiminde kullanılan farklı yarıiletkenler ve arayüzey tabakası olarak kullanılan organik malzemeler elde edilen elektronik cihazın elektriksel karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [1],[2]. Özellikle MPY tipi SBD'ler ile ilgili son zamanlarda teorik ve deneysel çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. SBD'lerin üretiminde organik arayüzey tabanın kullanımı inorganik arayüzey tabakanın kullanımı ile kıyaslandığında kolay üretim teknikleri, farklı özelliklerdeki malzemelerin kolaylıkla üretilip SBD'e kolayca kaplanabilmesi ve aynı zamanda polimer arayüzeyin yarıiletken malzemenin arayüzey durumlarını daha etkin pasive etmesi MPY yapıların MYY veya MY yapılara göre daha iyi SBD sonuçları vermesini ve daha çok tercih edilebilir olmasının en önemli sebepleridir.

Bu tez çalışması, toplamda altı ana bölümden oluşmaktadır. Tez çalışmasının ilk bölümünde tez konusuna kısa bir giriş yapılırken ikinci bölümünde ise MY kontaktarın tercih sebebi ve çalışma prensibi anlatılmıştır. Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan MPY malzemenin hazırlanması ve analizler için kullanılan deneysel çalışmalar gösterilmiştir. Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonular verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve literatürde gerçekleştirilmiş olan çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Son bölümde ise tez çalışmasında kullanılan kaynaklar verilmiştir.

2. METAL YARIİLETKEN (MY) KONTAKLAR

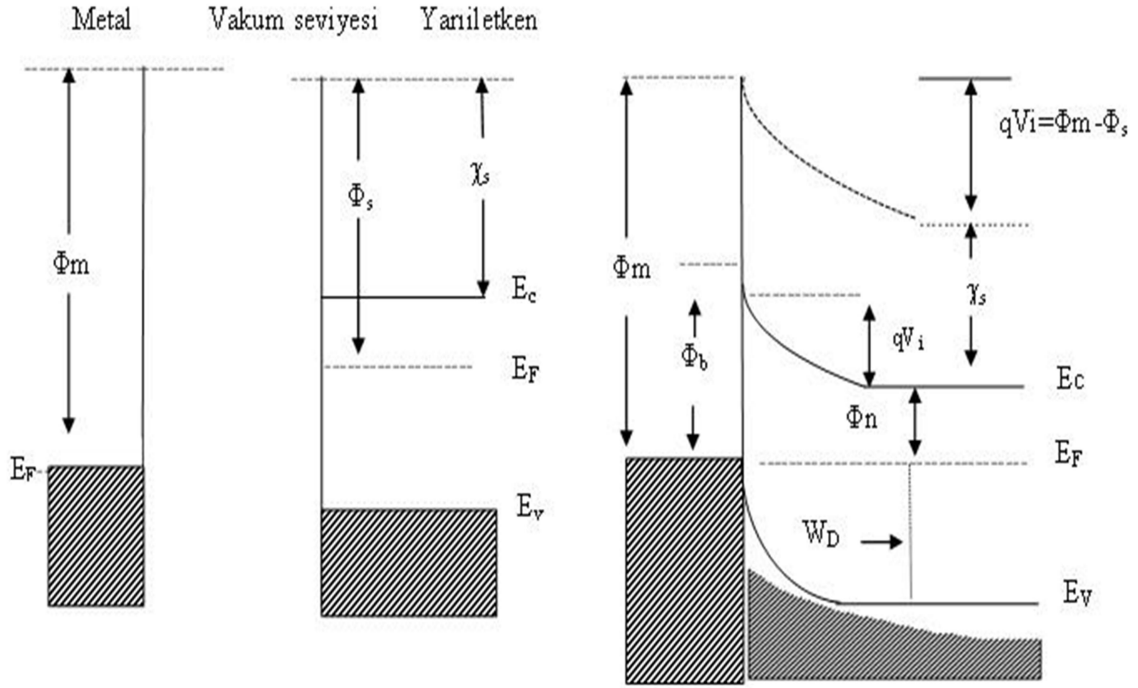
MY kontak SBD yapıdadır ve MY kontaklar ikiye ayrılırlar. Bunlar doğrultucu ve omik kontaklardır. Oluşturulan kontağın omik ya da doğrultucu olmasını belirleyen etmen, kontak oluşturulurken kullanılan metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarıdır. N-tipi yarıiletken üzerine doğrultucu kontak yapmak için kullanılacak metalin iş fonksiyonu (Φ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük, p-tipi yarıiletken üzerine doğrultucu kontak yapmak için ise kullanılacak metalin iş fonksiyonu (Φ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) küçük olmalıdır. Omik kontak ise metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engel oluşmadan taşıyıcıların metalden yarıiletkene kolayca geçmesini sağlar. Bu nedenle omik kontak hazırlamak için n-tipi yarıiletkende $\Phi_s > \Phi_m$, p-tipi yarıiletkende ise $\Phi_m > \Phi_s$ şartı dikkate alınmalıdır.

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

	n-tipi yarıiletken	p-tipi yarıiletken
Doğrultucu Kontak	$\Phi_m > \Phi_s$	$\Phi_s > \Phi_m$
Omik Kontak	$\Phi_s > \Phi_m$	$\Phi_m > \Phi_s$

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

Bu teoriye göre MY kontak oluşturulduğunda metal ile yarıiletken malzeme arasında yüklerin birbirinden ayrışması sonucu potansiyel bir bariyer oluşur. Schottky-Mott teorisine göre bu bariyer kullanılan malzemelerin iş fonksiyonlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır [4]. Φ_m iş fonksiyonuna sahip metal ile Φ_s iş fonksiyonuna sahip bir yarıiletkenin doğrultucu kontak durumundaki enerji band diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak) için elektron enerji band diyagramı: (a) kontak oluşmadan önce ve (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.

Φ_m metalin iş fonksiyonu, Fermi enerji seviyesinde bulunan bir elektronu koparıp vakum seviyesine çıkarmak için gereken enerji miktarıdır. Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu ise yine metalin iş fonksiyonuna benzer şekilde Fermi seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli enerjiyi gösterir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta yarıiletkenlerdeki Fermi seviyesi katkı atom yoğunluğuna bağlı olarak değişebilen bir parametre olmasıdır. Şekil 2.1’de gösterilen χ_s parametresi ise yarıiletkenlerde elektron yakınlığını ifade etmektedir. Elektron yakınlığı yarıiletken malzemelerde iletkenlik bandının en üst noktasında bulunan bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır.

Şekil 2.1(a)' da henüz kontak oluşumu gerçekleşmeden önceki band yapısı görülmekte olup enerji bantlarında herhangi bir bükülme görülmemektedir. Şekil 2.1(b)'de ise MY kontak oluştuğundan sonra denge durumunun enerji band diyagramı gösterilmiştir. Metal ile yarıiletken malzeme kontak haline getirildiğinde yarıiletken içinde bulunan ve metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjili olan elektronlar, metal ile yarıiletken malzemelerin Fermi seviyeleri eşit hale gelene kadar metale doğru akmaya başlarlar. Yarıiletken içindeki elektron yoğunluğu azaldığı için Fermi seviyesi iletkenlik bandından uzaklaşarak yasak enerji aralığının ortalarına doğru yaklaşmaya başlar. Bu durumun sonucu olarak iletkenlik bandı E_C ile Fermi seviyesi E_F arasındaki fark

artacaktır. Termal denge durumunda E_F sabit kalacağı için Şekil 2.1(b)'de açıkça görüldüğü üzere iletkenlik ve valans bantları bükülmeye başlar. Yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar arkalarında elektron yoksunu bir bölge ve pozitif yüklü iyonlar bırakırlar. Kontakın metal kısmında ise yarıiletkenden gelen elektronlardan kaynaklı negatif bir yük birikimi gerçekleşir. Ortaya çıkan bu durum sebebiyle yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan meydana gelir.

MY kontak oluşturulduğunda termal denge durumunda, yarıiletkendeki band bükülme miktarı (qV_i) metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarının farkına eşittir.

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

Denklem 2.1'deki qV_i , yarıiletkende bulunan elektronların metale geçebilmesi için aşılması gereken potansiyel engeldir. Metal tarafından gözükten engel ise aşağıdaki şekilde verilmektedir;

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

denklemleri ile verilir. Φ_s ise

$$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n \quad (2.3)$$

olduğundan,

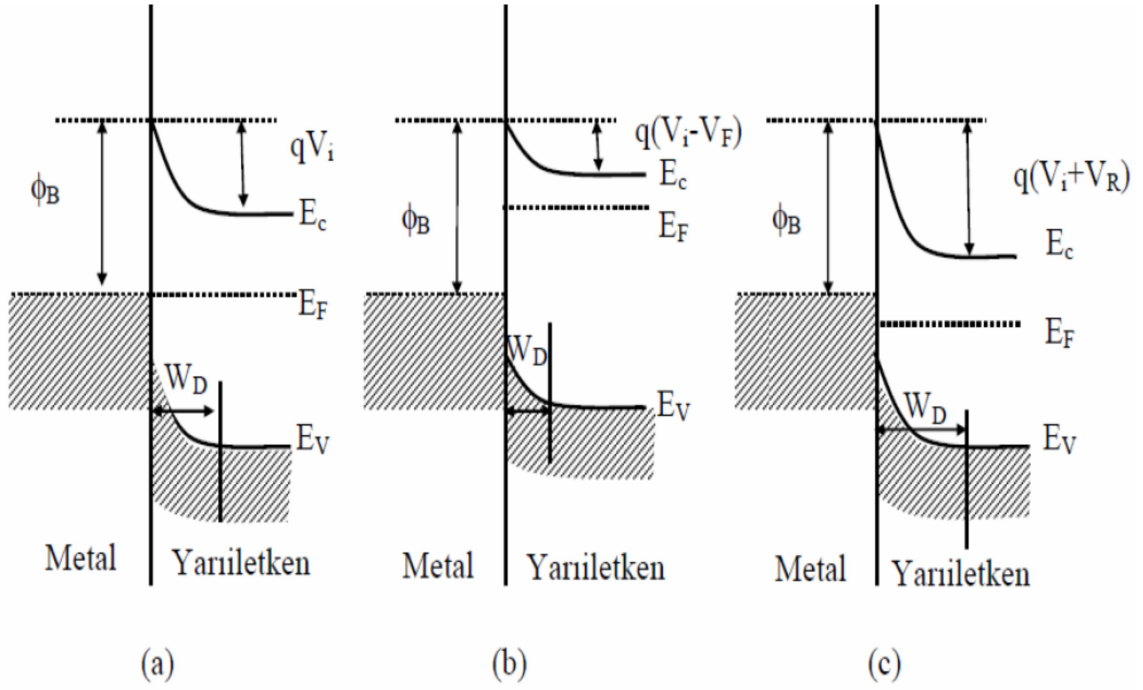
$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (2.4)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 2.4'te gösterilen $\Phi_n (= E_C - E_F)$ parametresi ise Fermi seviyesinin yasak band aralığındaki yerini göstermektedir.

Denklem 2.2'de elde edilen eşitlik 1938 yılında Schottky ve Mott tarafından birbirlerinden bağımsız bir şekilde bilim dünyasına sunulmuştur [1].

Şekil 2.1(b)'deki MY kontakta Φ_B potansiyeli, kT/q termal enerjisinden daha fazladır. Bunun yanı sıra yarıiletkendeki yüklerin olmadığı bölge dirençli bir bölge haline gelir. Bunların sonucunda da bu kontakın doğrultucu bir kontak olduğu gösterilmiş olur.

Oluşturulan MY kontağın doğru beslem ve ters beslem durumlarındaki enerji band diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



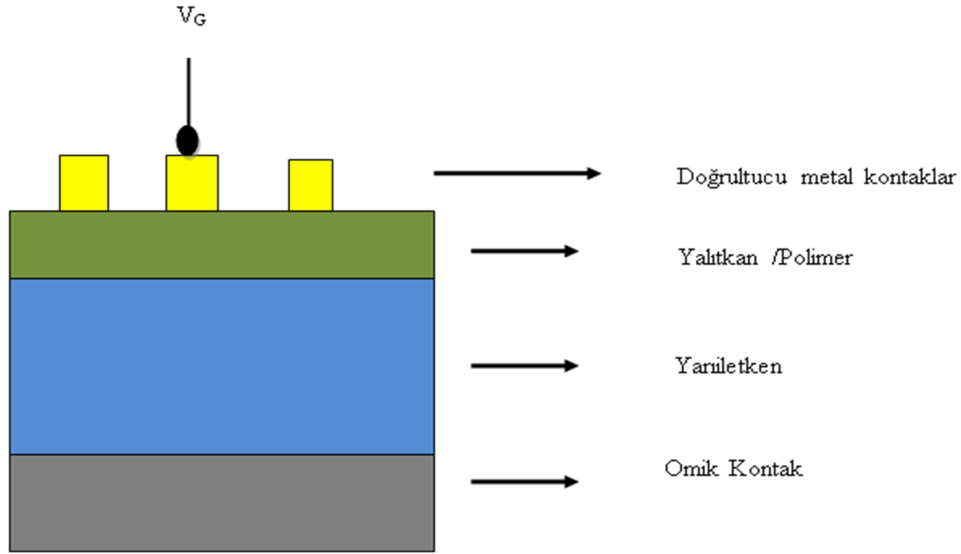
Şekil 2.2. MY doğrultucu kontak için enerji band diyagramı: (a) ısısal denge, (b) doğru beslem, (c) ters beslem durumu.

MY kontak oluştuktan sonra termal denge durumu sağlandığında metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale geçen yükler birbirini dengeleyeceği için net bir akım oluşmaz. Ancak kontağa dışarıdan uygulanacak bir potansiyel ile birlikte termal denge durumundaki band diyagramı değişecektir. MY kontağa uygulanacak olan doğru beslem sonucunda Şekil 2.2(b)'de görüldüğü üzere qV_i olan engel yüksekliği $q(V_i - V_F)$ 'ye düşecektir. Bu azalma sonucunda yarıiletkenden metale geçecek olan yükler daha düşük bir potansiyel engeli ile karşılaşacaktır. Buna karşın metal tarafındaki potansiyel engel Φ_B dışarıdan uygulanan voltajdan bağımsızdır. Bu nedenle, metalden yarıiletkene yük akışı termal denge durumundaki hali gibi kalacak ancak yarıiletkenden metale yük akışı artacaktır. MY kontağa uygulanacak olan ters beslem sonucunda ise Şekil 2.2(c)'de görüldüğü üzere qV_i olan engel yüksekliği $q(V_i + V_R)$ olacaktır. Bunun sonucunda, yarıiletkenden metale geçecek olan yükler daha büyük bir engelle karşılaşacaklar ve termal denge halindeki geçişe göre çok daha az yük geçişi gerçekleşir. Doğru beslemde olduğu gibi ters beslemde de Φ_B engel yüksekliğinde bir değişim olmayacak ve metalden yarıiletkene geçen yük miktarı aynı kalacaktır. Bu özellikleri dolayısıyla, yani akımı tek yönde geçirip diğer yönde geçirmeyen bir yapı olması sonucu doğrultucu kontak

oluşturulmuş olur.

2.2. METAL-YALITKAN/POLİMER-YARIİLETKEN (MYY/MPY) SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI

MY Schottky diyotların üretimi sırasında metal ile yarıiletken arasına yalıtkan ya da polimer bir arayüzey tabaka eklendiğinde, sırasıyla, MYY yapı veya MPY yapı haline dönüşür. Metal ile yarıiletkenin arasına kaplanan bu arayüzey tabaka sayesinde metal ile yarıiletken arasında hem yük akış dengesi sağlanmış olur hem de metal ile yarıiletken birbirinden ayrılmış olur. Bu şekilde arayüzey tabakası kaplanarak üretilen MYY ve MPY tipi Schottky diyotlara uygulanacak olan voltaj ise arayüzey tabakası, seri direnç ve diyot tarafından paylaşılır ($V_G = V_D + V_{RS} + V_I$). Bu özelliğinden dolayı MYY ve MPY yapıların akım iletim mekanizması MY yapılarına göre oldukça farklılık göstermektedir. Şekil 2.3'de MYY/MPY yapının şematik gösterimi verilmektedir.

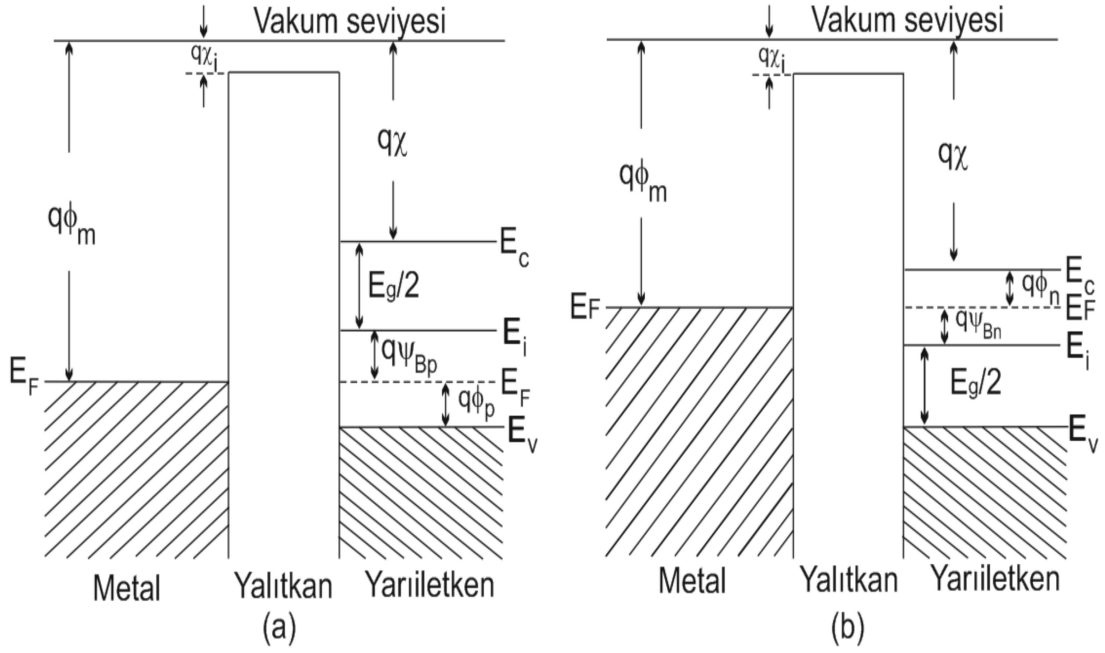


Şekil 2.3. MYY/MPY yapının şematik gösterimi.

2.3. İDEAL MYY TİPİ SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI

MYY tipi Schottky diyotların ideal olma şartı olarak seri direncin (R_s) ve arayüzey durumlarının diyota etki etmeyecek kadar küçük olması ile birlikte kısa devre direncinin (R_{sh}) ise çok yüksek ($\sim M\Omega$) olduğu durumlar gösterilir [1],[2],[7]. Bu tip ideal MYY Schottky diyotlarda idealite faktörü 1 olarak kabul edilir. Voltaj uygulanmamış ($V=0$) durumdaki ideal bir MYY Schottky diyotun hem n-tipi yarıiletken hem de p-tipi

yarıiletken için enerji bant diyagramları Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Voltaj uygulanmamış ($V=0$) durumdaki ideal bir MYY Schottky diyotun (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken için enerji-bant diyagramı.

MYY yapıya uygulanan bir ön voltaj olmadığı durumlarda Φ_m metalin iş fonksiyonu ile Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu yani ϕ_{ms} birbirine eşittir.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.5)$$

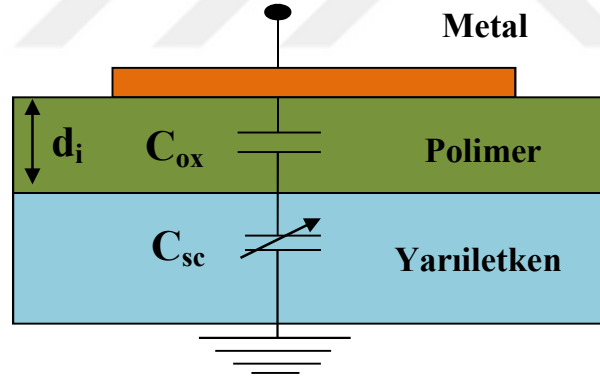
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.6)$$

Burada χ yarıiletkenin elektron afinitesini, E_g yarıiletken yasak enerji bant aralığını, ψ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.

Yarıiletken malzemelerde serbest yük yoğunluğu metallere göre daha azdır ve dışarıdan uygulanacak olan voltajla doğrudan ilişkilidir. İdeal bir MYY yapı için, metal elektroda uygulanacak ön voltaj sonucunda yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir. Yarıiletkenin arayüzeyindeki bantların bükülmesine neden olan Q_{sc} uzay yükü oluşur. Yarıiletken malzeme termal denge durumundayken, potansiyelin büyüklüğü arayüzeydeki uzay yükü olan Q_{sc} 'yi belirler. Yarıiletkenlerde çoğunluk ve azınlık yük

taşıyıcılarını katkı atomlarının türü belirler. Si kristalinin 3A elementlerinden biri ile (bor vb.) katkılanması sonucu p-tipi Si elde edilir ve bu malzemede çoğunluk yük taşıyıcıları holler, azınlık yük taşıyıcıları ise elektronlardır. Si kristaline n-tipi katkılama yapmak için ise periyodik cetvelin 5A elementlerinden biri ile (fosfor vb.) katkılama yapmak gerekmektedir. Bu şekilde elde edilen n-tipi Si'da çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar, holler ise azınlık yük taşıyıcılarıdır. Yarıiletken diyotlarda iletim sadece elektronlarla değil aynı zamanda holler ile de sağlanır. Yarı iletken malzemenin tipine göre azınlık ve çoğunluk yük taşıyıcıları belirlenir ve çoğunluk yüklerin oluşturduğu akıma çoğunluk yük akımı, azınlık yüklerin oluşturduğu akıma da azınlık yük akımı denir.

MYY yapılar paralel plakalı bir kondansatöre benzetilebilir. Metal ile yarıiletken malzeme arasına yerleştirilen yalıtkan veya polimer tabaka metal ile yarıiletken arasında bir kapasitans (C) oluşmasına neden olur. Metal ile yarıiletken arasında oluşan bu kapasitansa MYY kapasitansı adı verilir. MYY yapının kapasitansı, yalıtkan tabakanın oluşturduğu kapasitans C_{ox} (veya C_i) ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} 'den oluşur. Şekil 2.5'de MYY kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.5. MYY yapının kapasitans eşdeğer devresi.

Şekil 2.5'de görülen eşdeğer devresinin çözülmesiyle elde edilecek olan toplam kapasitans değeri Denklem 2.7'de gösterilmiştir [7]:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_i} \quad (2.7)$$

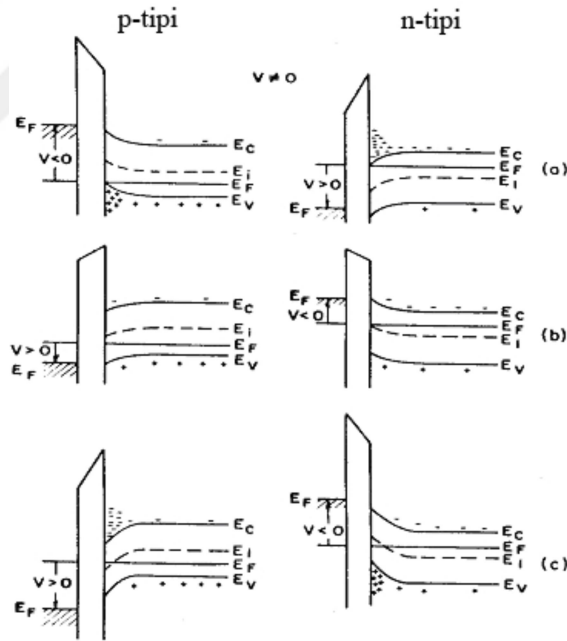
Yukarıdaki denklemde görüldüğü üzere MYY yapının kapasitans eşdeğeri, uzay yük kapasitansı ve yalıtkan/polimer tabakanın kapasitansının seri bağlanması sonucu elde edilir. Yalıtkan/polimer tabakanın kapasitansı Denklem 2.8'de verilmiştir [1],[2],[5]:

$$C_i = \frac{\epsilon_{ox}}{d_i} A \quad (2.8)$$

Buradaki denklemde ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabitini, d_i arayüzey tabakanın kalınlığını ve A ise doğrultucu kontağın alanını göstermektedir. MYY yapının kapasitansını değiştirebilecek tek nicelik ise uzay yükü kapasitansıdır. MYY yapının kapasitans-voltaj ($C-V$) eğrisi üç grupta incelenebilir. Bunlar yığılma bölgesi, tüketim bölgesi ve terslenim bölgesidir.

2.3.1. Yığılma Bölgesi

MYY yapıda, metale uygulanacak olan ön voltajın pozitif olması durumunda ($V_g > 0$) ortaya çıkan elektrik alan nedeniyle çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar yarıiletken arayüzeyine toplanmaya başlar ve bunun sonucunda n-tipi MYY yapısında bantların yukarı doğru bükülmesi gerçekleşir (Şekil 2.6(a)). Bantlarda görülen bu bükülme yüzeye yakın yerlerde gerçekleşir. Çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronların arayüzeydeki birikme olayına “yığılma” denir.



Şekil 2.6. $V \neq 0$ durumunda ideal MYY yapının enerji-bant şeması (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) terslenim.

2.3.2. Tüketim Bölgesi

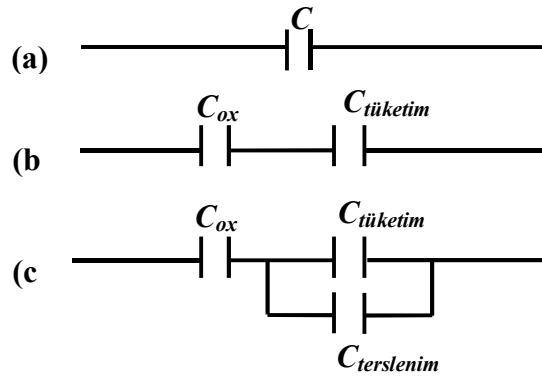
Bir MYY yapıda, metale uygulanan voltajın küçük negatif olması durumunda ($V_g < 0$) ortaya çıkan elektrik alan nedeniyle çoğunluk yük taşıyıcısı elektronlar yarıiletken arayüzeyinden uzaklaşır ve geride pozitif yük bırakmış olur. Bu durum sonucunda

yariletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğu, yariletken yüzeyindeki elektron yoğunluğundan daha fazla olmaya başlar. Bunun sonucunda n-tipi MYY yapısında enerji bantları aşağı doğru bükülmeye başlar (Şekil 2.6(b)). Uygulanan voltaj ile tüketim tabakasının (W_D) genişliğinde bir bölgede elektronların azalması sebebiyle bir tüketim bölgesi oluşur. Dielektrik sabiti ϵ_s olan bir yariletkenin tüketim bölgesinin genişliği aşağıdaki şekildedir:

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.9)$$

2.3.3. Terslenim Bölgesi

MYY yapısında, metale uygulanacak olan büyük bir negatif voltaj ($V_G \ll 0$) sonucu enerji bantlarında daha fazla bükülme meydana gelmeye başlar. N-tipi MYY yariletkenin yüzeyinde çoğunluk taşıyıcı olan elektronların azalmasından dolayı azınlık taşıyıcı olan hollerin yoğunluğu artmaya başlar. Ortaya çıkan bu durum sonucunda Fermi enerji seviyesi, saf durumdaki enerji seviyesinin (E_i) altına doğru kaymaya başlar (Şekil 2.6(c)). N-tipi yariletken yüzeyi artık p-tipi yariletken yüzeyi gibi davranır. Gerçekleşen bu olay yariletken yüzeyinin terslenimi adını alır. İdeal bir MYY yapıda yükler yariletken içinde ve metalin yalıtkan bölgeye yakın kısmında bulunurlar. Bu yapıya uygulanacak olan doğru akım (dc) sonucunda yalıtkan bölgeden yük geçişi sağlanamaz.

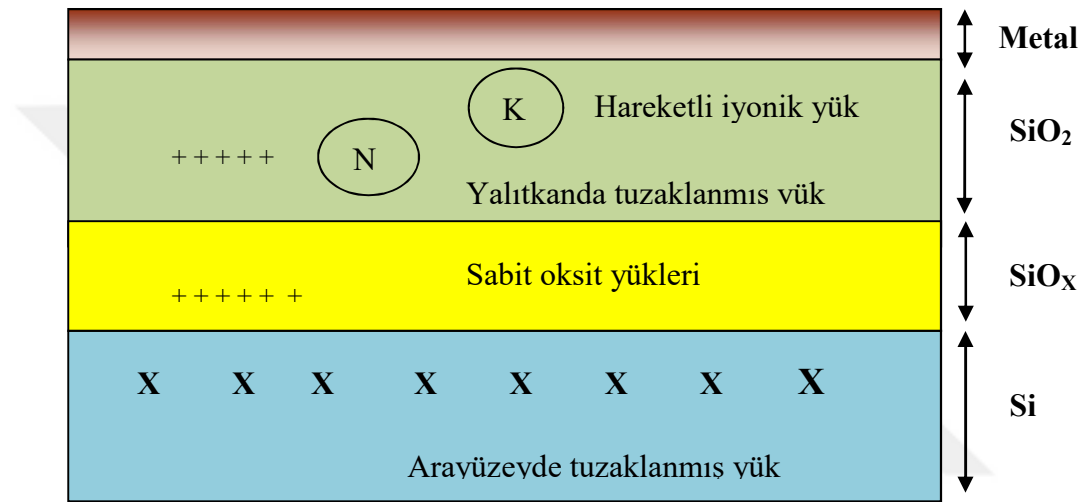


Şekil 2.7. İdeal MYY yapının (a) yığılma, (b) tüketim ve (c) terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri.

Şekil 2.7’de ideal MYY yapının yığılma, tüketim ve terslenim bölgelerinin eşdeğer devreleri verilmiştir [1],[2],[4].

2.4. MYY YAPILARDA İDEAL DURUMDAN SAPMALAR

Gerçek MYY yapılar da yarıiletken ile yalıtkan arasında kalan bölge elektriksel olarak nötr değildir. Malzemenin üretimi sırasında meydana gelen safsızlıklar, kırık bağlar, tuzaklanmış yükler, hareketli iyonlar, sabit oksit yükleri ve arayüzey yüklerinin bulunması gibi durumlar malzemenin elektriksel özelliklerinin ideal MYY yapıdan farklı olmasına sebep olur [2]. Gerçek bir MYY yapı için ideal durumdan sapmalara neden olan kusurlar Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bunlar, arayüzey durumları, sabit yüzey yükleri, hareketli iyonlar ve iyonize tuzaklardır.



Şekil 2.8. Gerçek bir MYY yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.

2.4.1. Arayüzey Durumları

Arayüzey durumu, yarıiletken ile yalıtkan arasında malzemelerin arayüzeyinde bir enerji seviyesidir. Arayüzey durumları verici veya alıcı seviyeler olabilmekte beraber valans bandı ve iletim bandı ile yük alışverişi yapabilmektedirler. Arayüzey durumlarındaki Q_{ss} yük yoğunluğu, yalıtkan malzemenin kalınlığından ve yarıiletken içindeki katkı yoğunluğundan etkilenmez. Arayüzey durumları MYY malzemenin kapasitansına etki eder ve ideal bir MYY’den sapmalara sebep olur.

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şunlardır:

Kapasite: Malzeme içindeki bir arayüzey durumuna, yine malzeme içinde izinli başka bir arayüzey durumunun eklenmesi sonucu ortaya çıkar. Bu eklenme sonucunda temel yük başına bir kapasite eklenmesi gerçekleşir. Uygulanan voltaj doğrultusunda bu kapasite değeri keskin bir pik şeklinde ortaya çıkacaktır. Arayüzey durum seviyesi,

Fermi enerji seviyesinden daha düşük olacağı için ortaya çıkan bu pikler voltaj için görülür.

İletim: Yük taşıyıcılarının arayüzey durumları tarafından tuzaklanması ve salınması döngüsü gerçekleşirken bir zaman gecikmesi meydana gelir. Arayüzey durumlarında meydana gelen bu gecikme eşdeğer bir RC devresi ile tanımlanabilir. Ortaya çıkan bu zaman gecikmesi dolma-boşalma zamanı olup ve $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$ şeklinde gösterilir. Burada denklemde gösterilen R_{ss} değeri arayüzey direncidir [2]. Arayüzey kapasitansı olan C_{ss} ise aşağıdaki şekilde verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial C_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.10)$$

Arayüzey potansiyeli: Yukarıda anlatılmış olan arayüzey durumlarının kapasite ve iletme etkileri ac sinyal etkisi altındadır. Ancak bu duruma ek olarak arayüzey durumlarının bir de dc etkisi bulunmaktadır. Arayüzey durumlarında bulunan yükler dolayısıyla arayüzeyin elektrik alanı değişmektedir. Bu sebepten dolayı arayüzey durumlarının mevcut olduğu zamanlarda arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumda yeterli olacak potansiyelden daha fazlası gerekmektedir. Bu durum kapasite-voltajın zorunlu genişlemesinin (stretchout) etkisidir.

Arayüzey durumları ideal bir MYY'deki elde edilecek $C-V$ eğrilerinde bir kaymaya neden olur. Arayüzey durumlarındaki durum yoğunluğu aşağıdaki şekildedir:

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

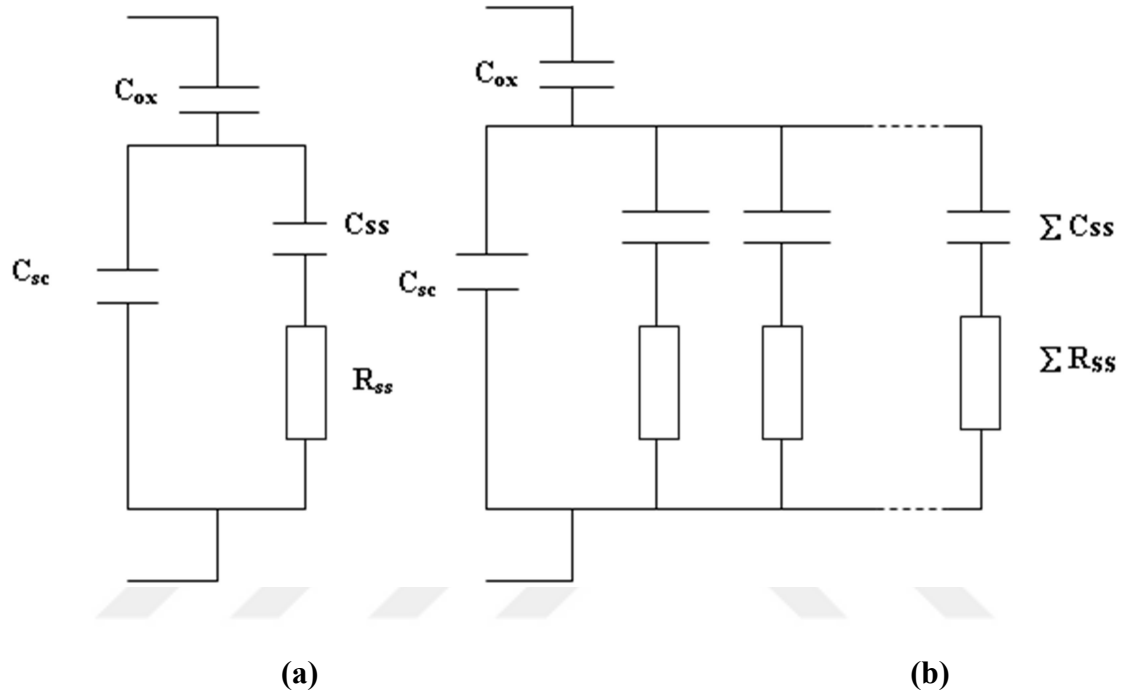
Denklem 2.11'de görüldüğü üzere N_{ss} durum yoğunluğu birim enerji başına birim arayüzey durum yüküdür. Denklemde görülen E enerjidir ve $E=q\psi_s$ şeklinde verilir. E 'nin diferansiyeli alınıp denklem 2.11'de yerine yerleştirildiğinde durum yoğunluğu aşağıdaki şekilde olacaktır:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (2.12)$$

Yük taşıyıcıların bir arayüzey durumu tarafından işgal edilme olasılığı, malzemenin Fermi seviyesine göre belirlenir. Malzemenin yüzey potansiyeli değiştirildikçe buna

bağlı olarak arayüzey enerji seviyesinde de bir değişim meydana gelir. Bunun sonucunda bağlı Fermi seviyesi değişikliği, bir yük taşıyıcısının arayüzey durumunu işgal etme olasılığını değiştirecektir.

Arayüzey durumlarının, Q_{ss} 'ye paralel bir kapasitans ve aynı zamanda seri bir direnç etkisi yaptığında ortaya çıkan durumun eşdeğer devresi Şekil 2.9'da gösterilmiştir [13].



Şekil 2.9. MYY yapısının (a) bir enerji seviyesi ve (b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için eşdeğer devresi.

2.4.2. Arayüzey yükleri

Arayüzey yükleri MYY yapısında yalıtkan içinde ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeylerinde bulunurlar. MYY yapısı hazırlanırken kullanılan yarıiletken ile yalıtkan malzemenin kristal yapılarının farklı olmasından kaynaklı olarak burada yerel yükler sebep olurlar. Bu yükler negatif de olabilmekle birlikte genelde pozitif yüklerdir. MYY yapının arayüzeyinde negatif veya pozitif yüklerinin bulunması durumunda yüksek frekans değerleri altında yapılan ölçümlerde voltaj eksenini boyunca $C-V$ eğrilerinde değişimler meydana gelir. Bu yükler elektriksel ölçümlerde yarıiletken-yalıtkan arayüzeyine tabaka şeklinde yerleşmiş yükler gibi gözlemlenir. Malzemenin $C-V$ eğrilerinin uygulanan voltajın negatif değerlerine doğru kaymasına pozitif yükler sebep olmaktadır. Buna benzer şekilde $C-V$ eğrisinin uygulanan voltajın pozitif değerlerine doğru kaymasına sebep veren yükler ise negatif yüklerdir [7]-[14].

2.4.3. Hareketli iyonlar

Hareketli iyonlar genellikle yalıtkan film içinde metal-yalıtkan ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeylerinde bulunurlar. Bu iyonlar 100 °C üzerindeki sıcaklık değerlerinde hareketli olan Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ gibi iyonlardır [15]. Bu iyonlar, genellikle malzemelerin üretimi sırasında kullanılan kimyasalların içinde mevcut olmaları, tutucuların kirli olması, oksitleme fırını, oksitleme gazlarındaki safsızlıklar gibi durumlardan kaynaklı olarak kristal yüzeye yapışarak malzemeye uygulanacak olan elektrik alan etkisi altında hareket etmeye başlayıp MYY yapısının ideal durumdan sapmasına yol açan kusurlardır [16].

2.4.4. İyonlaşmış tuzaklar

İyonlaşmış tuzaklar kimyasal yapı bozukluklarından kaynaklı ortaya çıkan ve yalıtkan tabaka içinde bulunan tuzaklardır. İyonlaşmış tuzaklarda verici veya alıcı tipte olabilmekle birlikte yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişinde bulunabilirler. Bu alışveriş sonucunda bu bölgede fazladan bir yük oluştururlar. Elektron-hol çiftinin iyonlaştırıcı bir radyasyon etkisi ile yalıtkan tabakası içinde meydana gelmesi sonucu bunların bir kısmı oksit tabak içinde tuzaklanabilirler. Malzemenin üretimi esnasında ortaya çıkan elektron-hol tuzakları ise malzemenin üretimi sonrasında gerçekleştirilecek olan tavlama işlemi ile ortadan kaldırılabilmektedir. Malzeme içindeki iyonlaşmış olan tuzaklar elektron yakalayarak ya da elektron bırakarak yüksüz hale geçerler ve MYY yapısının $C-V$ eğrilerine etki ederler. Malzemeye uygulanan voltaj değerinin negatif değerden pozitive doğru arttırıp ölçülen $C-V$ değeri ile bunun tam tersi olan uygulanan voltajın pozitif değerden negatife doğru arttırıp ölçülen $C-V$ değerleri arasında farklılıklar ortaya çıkar [17]. İki yönde yapılan ölçümlerden elde edilen kapasitans değerlerindeki yaşanan kayma miktarı, MYY yapının yalıtkan içindeki tuzaklarının miktarını göstermektedir.

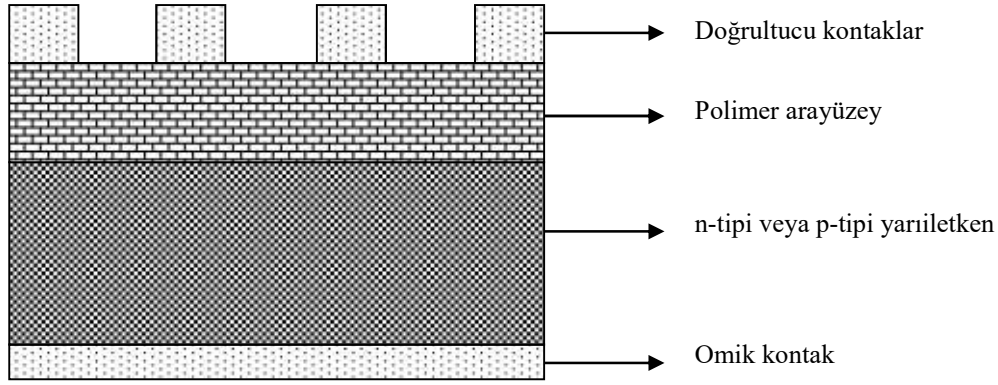
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. GİRİŞ

Elektronik ve optoelektronik uygulamalarında SBD'ler doğru beslemede düşük voltaj değerlerinde kolaylıkla ilettime geçebilmeleri, gürültü seviyelerinin düşük ve verimlerinin yüksek olması avantajlarından dolayı oldukça tercih edilen devre elemanlarıdır [18]. Aynı zamanda, SBD'lerin yüksek frekanslar altında da hızlı anahtarlama gibi avantajları dolayısıyla diğer diyotlara göre daha yaygın kullanıma sahip olmalarında önemli etkindir [18].

MY malzemelerin kontak haline getirilmesi sonucu SBD yapısı oluşur. Bu yapıda metal ile yarıiletken arasına bir polimer tabaka yerleştirildiğinde ise MPY SBD oluşur. MPY SBD'lerin üretimi esnasında kullanılan yalıtkan veya polimer arayüzey tabakaları elde edilen elektronik cihazın elektriksel karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [19]. SBD'lerin üretiminde organik arayüzey tabanın kullanımı inorganik arayüzey tabakanın kullanımı ile kıyaslandığında kolay üretim teknikleri, farklı özelliklerdeki malzemelerin kolaylıkla üretilip SBD'e kolayca kaplanabilmesi ve aynı zamanda polimer arayüzeyin yarıiletken malzemenin arayüzey durumlarını daha etkin pasive etmesi diğer Schottky diyot yapılarına kıyasla daha iyi elektriksel sonuçlar vermesini ve bu nedenle daha çok tercih edilebilir olmasını sağlamaktadır.

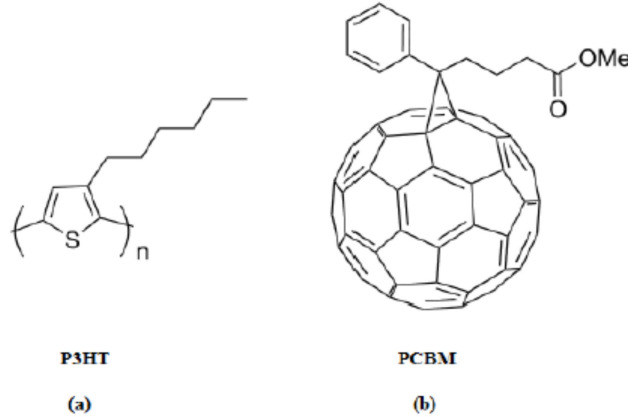
MPY yarıiletkenler, seçilen bir yarıiletken alttaşın üzerine polimer yarıiletken malzemenin spin kaplama veya sprej gibi farklı tekniklerle kaplanması ve oluşan bu polimer/yarıiletken malzemenin alt ve üst metal kontakları alınarak malzemenin Schottky bariyer diyota dönüştürülmesi ile elde edilir. (Şekil 3.1). MPY SBD'ler de, yarıiletken ile metal arasında meydana gelecek olan yük geçişlerinin düzenlenmesi ve üretilecek olan aygıtın performansının artırılması için metal ile yarıiletken arasına yüksek dielektrik sabitli polimer malzemeler yerleştirilir. Bu tabakaların görevi yüzeyi pasivize etmek, sızıntı akımlarını engellemek ve düzgün bir akım iletim mekanizması gerçekleştirmektir. MPY tipi SBD yapılarının hazırlanmasında doğrultucu kontak ve omik kontak oluşturmak için uygun iş fonksiyonuna sahip metaller kullanılır.



Şekil 3.1. MPY SBD'un şematik gösterimi.

Bu tez çalışmasında, MPY SBD yapısı yukarıdaki avantajları göz önüne alınarak çalışılmış olup polimer olarak metal ile yarıiletken malzeme arasına poly (3-hexylthiophene): 6],[6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (P3HT:PCBM) organik karışımı kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle P3HT organik malzemenin tercih sebebi iletkenlik değeri ve kristallenebilirlik oranının yüksek olmasıdır Şekil 3.2 (a) [21].

Kimyasal yapısı Şekil 3.2 (b)'de gösterilen PCBM ise iyi bir katkı malzemesi olup, P3HT ile karıştırıldığında yüksek performanslı cihazların ortaya çıktığı bilinmektedir [22]. Ayrıca, P3HT:PCBM organik karışımı kullanılarak üretilmiş olan güneş gözelerinde verim değerinin % 6,5 seviyelerine ulaştığı rapor edilmiştir [23].



Şekil 3.2. (a) P3HT ve (b) PCBM organiklerinin kimyasal yapıları.

Bu tez çalışmasında, Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'ler farklı P3HT:PCBM oranlarında (4:1 ve 10:1) üretilerek oda sıcaklığında ve karanlıkta, kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerin sonucunda, $C-V$ ve $G/w-V$ karakteristiklerinden; direnç (R_i) ve arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) frekansa bağlı olarak elde edilmiştir. $C-V$ ve $G/w-V$ analizi verilerine göre en iyi sonucu

veren diyot için 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. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPS SBD'lerin $C-V$ ve $G/w-V$ analizleri geniş bir frekans aralığında (10 kHz – 2 MHz) ve -10,0 V ile +10,0 V arasındaki gerilimlerde yapılmıştır.

3.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Bu tez çalışmasında, Sigma Aldrich Ltd.'den alınan P3HT ve PCBM organik polimerleri kullanılmış olup 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında izlenen deneysel aşamalar aşağıda sunulmuştur :

3.2.1. Si Alttaşın Hazırlanması:

Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD üretmek için n-tipi, $\langle 100 \rangle$ yönelime sahip tek kristal silisyum (n-Si) pul, alttaş olarak kullanılmıştır. N-tipi tek kristal Si pulun bir yüzeyi fabrikasyon olarak parlatılmış olup kalınlığı 350 ± 25 μm 'dir. Deneysel işlemlere başlanmadan önce Si kristalinin temizlenmesi sırasında takip edilen tüm işlemler daha etkin ve hızlı temizlik için ultrasonik banyo içinde yapılmıştır. Si pul RCA temizleme yöntemiyle [20] kimyasal olarak temizlenmiştir. RCA tekniği ile temizleme işlemi tamamlandıktan sonra Si pulun yüzeyinde meydana gelebilecek oksit oluşumunu engellemek amacıyla inört gaz olan Helyum (He) ile kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. Omik Kontağın Oluşturulması:

Üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin kontakları için kullanılacak malzemeler iş fonksiyonlarına uygun (omik kontak için gümüş) şekilde seçilip kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Temizlenen Si pulların arka (mat) yüzeyi omik kontak oluşturmak amacıyla maske kullanılmadan ~ 2500 Å kalınlığında gümüş (Ag) metali ile kaplanmıştır. Kontakların kaplama işleminde Şekil 3.3'te görülen ve Düzce Üniversitesi Fizik Bölümü Numune Hazırlama Laboratuvarı'nda bulunan NANOVAK NVBJ-300TH marka termal buharlaştırma sistemi kullanılmış olup kontakların kalınlığı termal buharlaştırma sisteminde bulunan dijital kalınlık ölçüm monitörü ile takip edilmiştir.



Şekil 3.3. Termal buharlaştırma sistemi.

3.2.3. P3HT:PCBM Polimer Karışımın Hazırlanması ve Kaplanması:

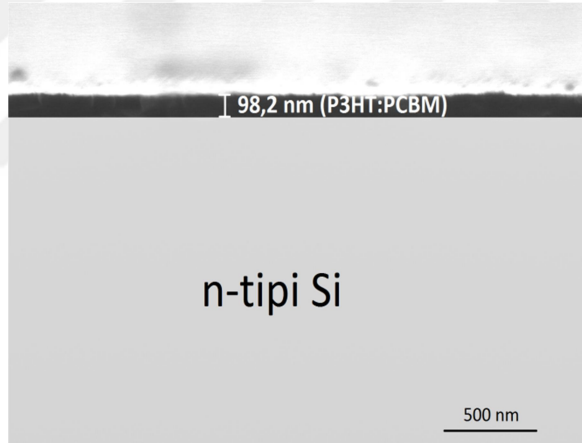
Bu tez çalışmasında üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin aktif katmanını farklı katkı oranlarına sahip P3HT:PCBM organik polimer karışımları oluşturmaktadır. Bu karışımın hazırlanabilmesi için öncelikle toz halde bulunan organiklerin çözücüler içinde sıvı hale getirilmesi gerçekleştirilmiştir. Hem P3HT hem de PCBM organik polimerlerinin ortak çözücüsü klorobenzen olduğu için her bir polimer farklı tüplerde yaklaşık olarak 3 saat süreyle 25 mg/mL'lik çözeltiler oluşturacak şekilde manyetik balıklar yardımıyla 60 °C'de karıştırılmış ve sıvı polimer çözeltiler elde edilmiştir. Polimerlerin hazırlanmasından sonra bu tez çalışması için 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM organik polimer karışımları hazırlanıp bir gece boyunca homojen bir çözelti elde etmek amacıyla manyetik karıştırıcıda 60 °C'de karıştırılmışlardır.

Elde edilen P3HT:PCBM organik polimer çözeltileri spin kaplama tekniği kullanılarak daha önce temizlenmiş olan Si pulların parlatılmış yüzüne kaplanmıştır. Organik polimer tabakanın kaplama işlemi, Düzce Üniversitesi Fizik Bölümü Numune Hazırlama Laboratuvarı'nda bulunan spin kaplama cihazı kullanılarak dakikada 1500 devir sabit dönme hızı altında 30 saniye süreyle yapılarak yaklaşık olarak 1000 Å kalınlığında polimer kaplaması elde edilmiştir. Si alttaşın üzerine kaplanan polimerin kalınlığı Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) laboratuvarlarında bulunan SEM (taramalı elektron

mikroskobu) ile kesit alanı analizi ile ölçülmüş olup üretilen malzemenin kesit alanını gösteren SEM görüntüsü Şekil 3.5’de yaklaşık 100 nm olarak verilmiştir. Kaplama işlemi bittikten sonra organik film içerisinde bulunan çözücünden (klorobenzen) kurtulmak amacıyla kaplanan numuneler bir plaka üzerinde 15 dakika süreyle 80 °C’de bekletilerek çözücünün buharlaşması sağlanmıştır.



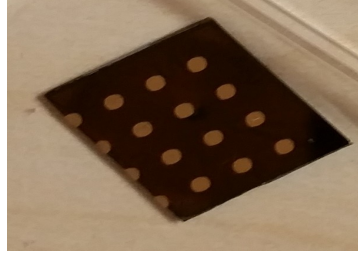
Şekil 3.4. Spin kaplama sistemi.



Şekil 3.5. SEM kesit alanı ölçümü.

3.2.4. Doğrultucu Kontakın Oluşturulması:

Doğrultucu kontaklar için Au metali kullanılmıştır. 1 mm çaplı daireler içeren paslanmaz çelik maske kullanılarak farklı oranlarda hazırlanmış P3HT:PCBM organik filmlerin üzerine dairesel şekilli ~2500 Å kalınlığa sahip altın (Au) doğrultucu kontakların büyütülme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Kontakların kaplama işleminde termal buharlaştırma sistemi kullanılarak, kontakların kalınlığı termal buharlaştırma sisteminde bulunan dijital kalınlık ölçüm monitörü ile takip edilmiştir.



Şekil 3.6. Üretilen SBD'lerin doğrultucu kontak büyütülmesinden sonraki görünümü.

3.2.5. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri:

Hazırlanan MPY SBD yapının temel elektriksel (C , G/w , R_s , N_{ss} , v.b.) özellikleri geniş bir frekans (10 kHz - 2 MHz) aralığında, uygulanan gerilime bağlı olarak $C-V$ ve $G/w-V$ ölçüm yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Farklı frekanslardaki empedans ölçümleri ($C-V$ ve $G/w-V$) Şekil 3.7'de gösterilen 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) kullanılarak geniş voltaj (-10,0 V – +10,0 V) ve frekans aralıklarında (10 kHz – 2 MHz) bilgisayara takılan bir ac/dc çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir.



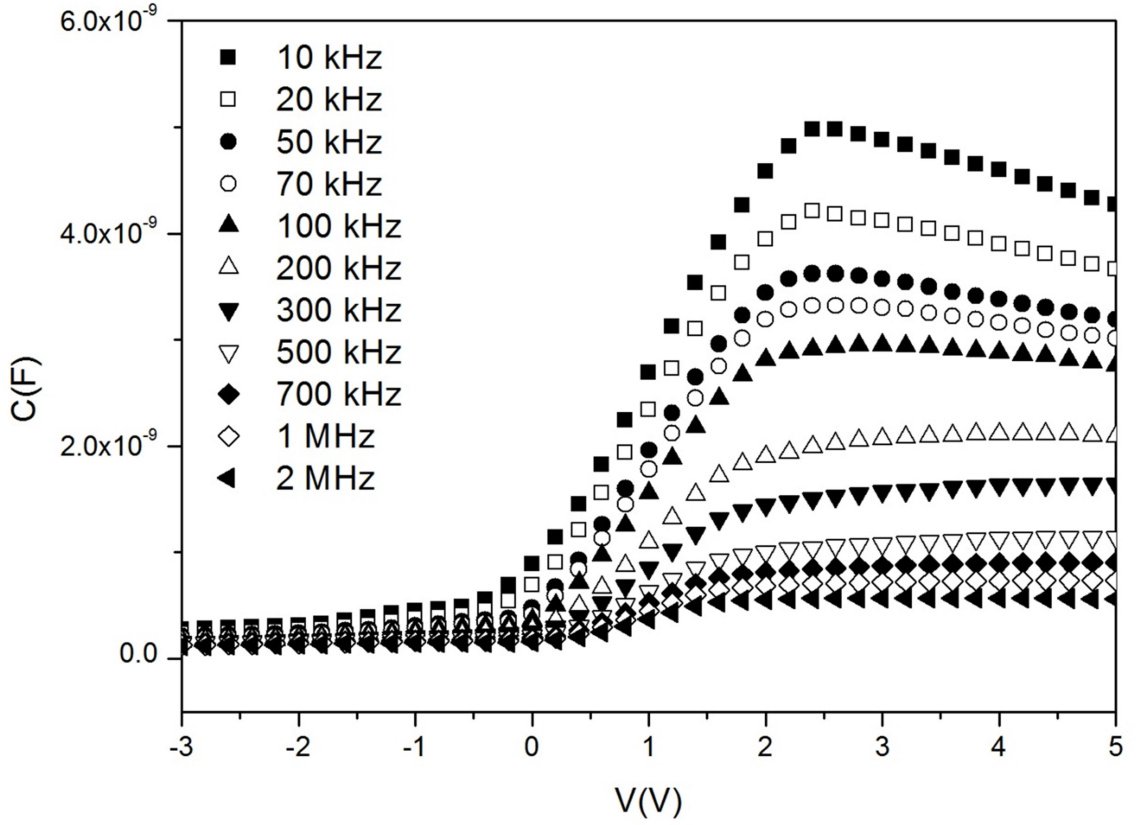
Şekil 3.7. Düşük ve orta frekans empedans analizmetresi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

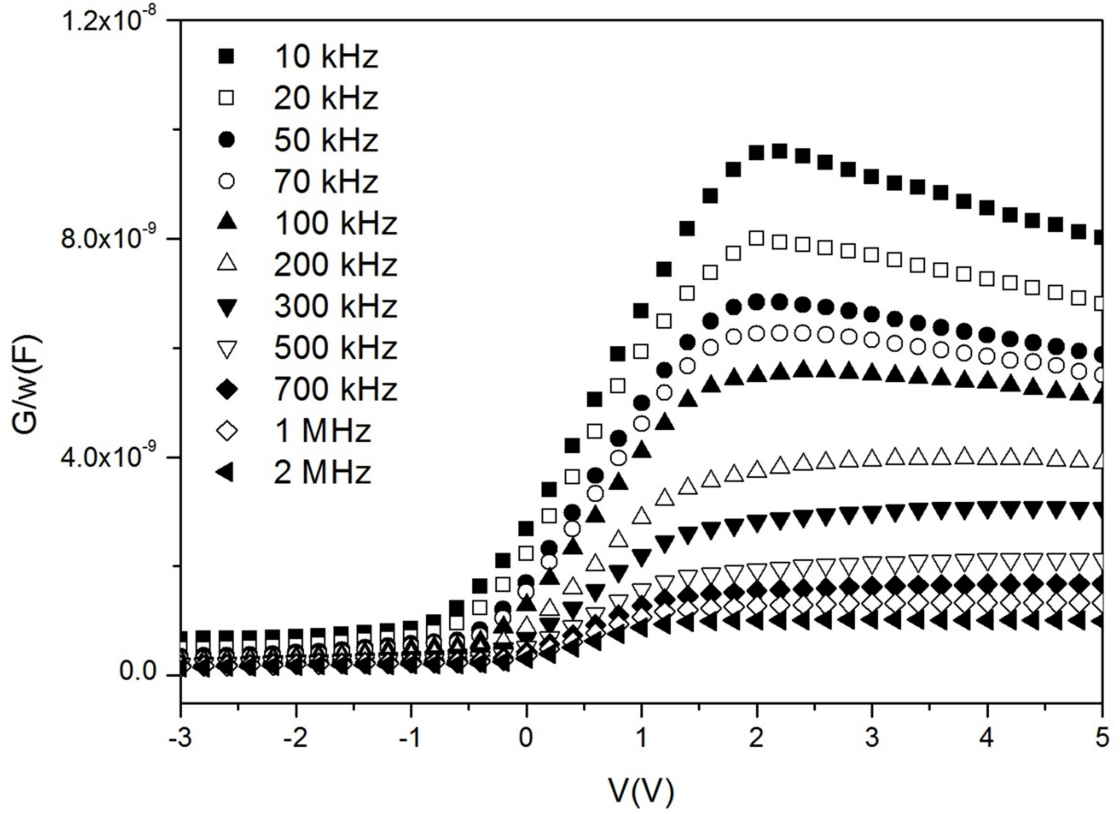
Bu tez çalışması kapsamında, 4:1 ve 10:1 katkı oranlarında P3HT:PCBM polimer karışımı kullanılarak Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'ler üretilmiştir. Üretilen SBD'lerin kapasitans-voltaj ($C-V$) ve iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) ölçümleri oda sıcaklığı altında gerçekleştirilmiş olup kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar olacak şekilde geniş frekans aralığı (10 kHz – 2 MHz) ve voltaj aralığı (-10,0 V – +10,0 V) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda, $C-V$ ve $G/w-V$ ölçüm sonuçları kullanılarak Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD yapısının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplanmıştır.

4.1. ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLER

4:1 oranında P3HT:PCBM organik karışıma sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin $C-V$ ve $G/w-V$ grafikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2'de gösterilmiştir. Şekillerde açıkça görüldüğü üzere çalışılan MPY SBD'nin $C-V$ karakteristiği frekansa ve gerilime oldukça kuvvetli bir biçimde bağlı olup frekans değerinin artmasıyla birlikte kapasitans değerlerinde azalma gözlenmektedir. Bu durumun başlıca sebepleri yarıiletken malzemenin metal kontaklar ile arasında oluşan seri direncinin kapasitansa etkisi ve malzemenin arayüzeyinde ve yasak enerji aralığında bulunan yüklerin düşük frekans değerlerinde ac sinyali takip edebilmelerinden dolayı malzemenin kapasitansına etki etmesidir. Frekans değeri arttıkça arayüzeyde bulunan yükler ac sinyali takip edemezler ve böylece kapasitans değerine katkıları azalır. Bu durum sonucunda malzeme ideal $C-V$ karakterinden uzaklaşır [5], [7].



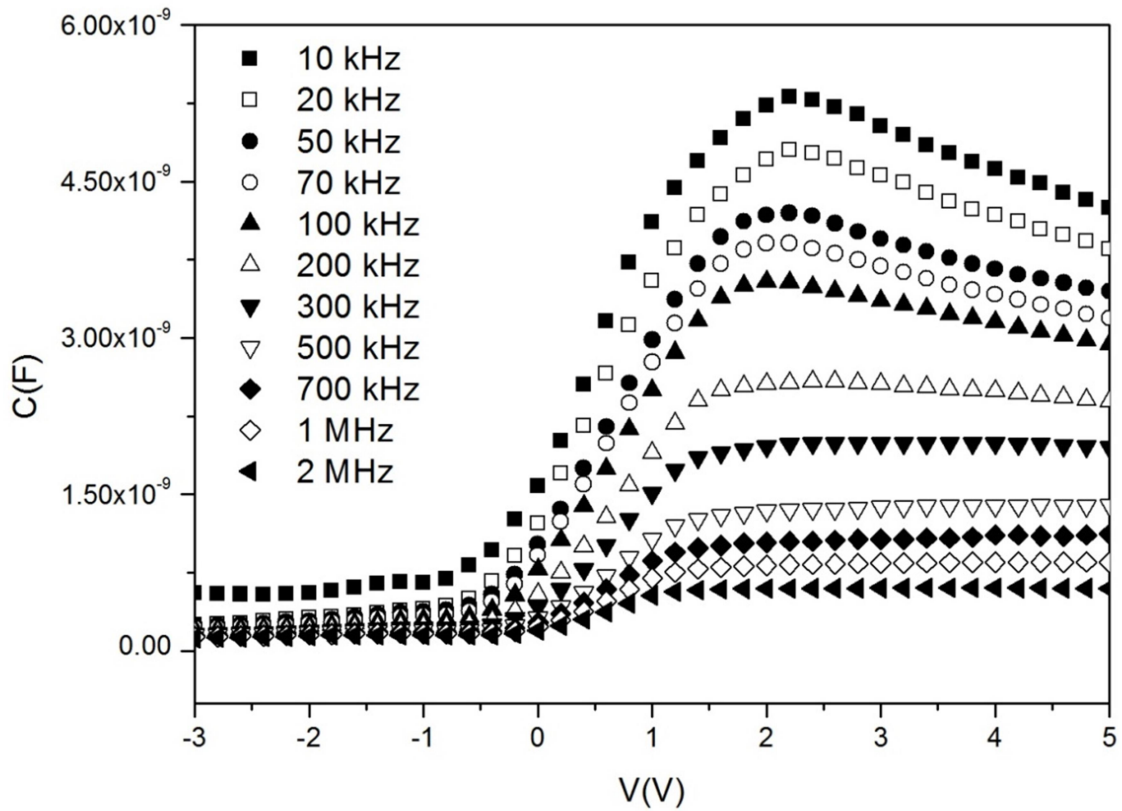
Şekil 4.1. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $C-V$ karakteristiği.



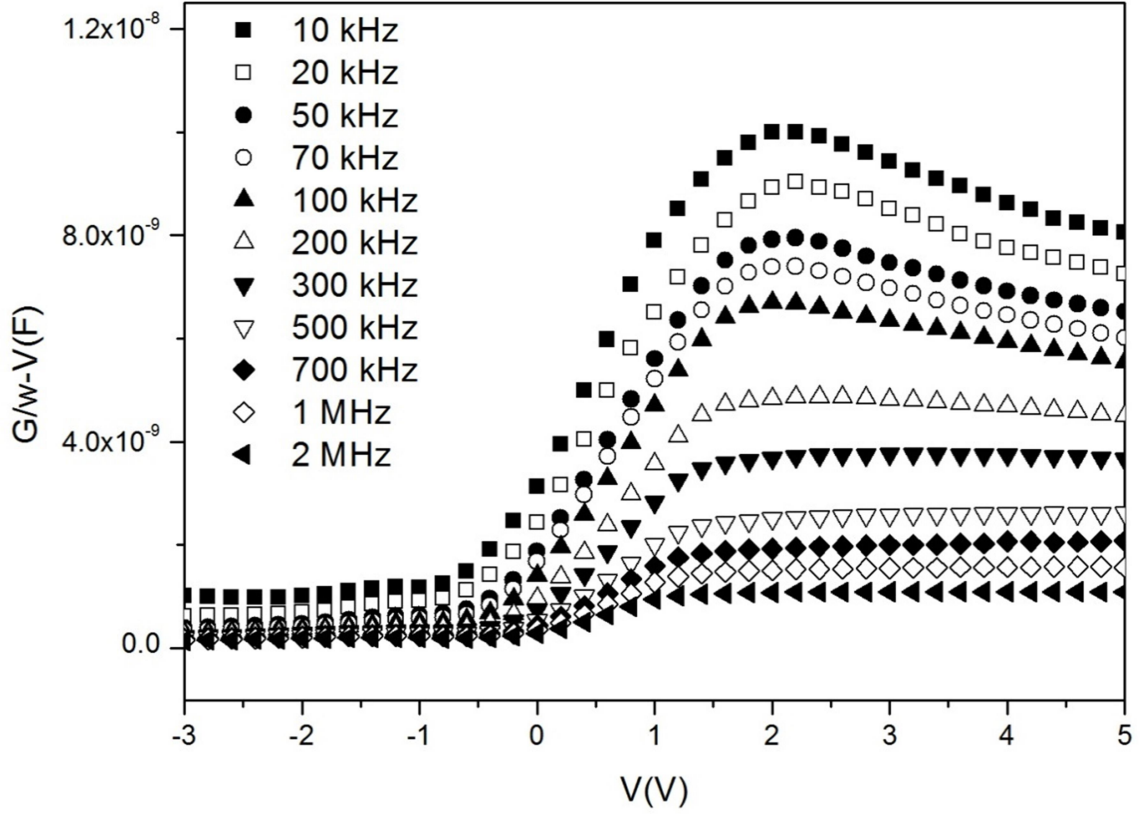
Şekil 4.2. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $G/w-V$ karakteristiği.

Bu tez çalışması için üretilen diğer katkı oranı olan 10:1 P3HT:PCBM katkı oranı içeren Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'ye ait $C-V$ ve $G/w-V$ karakteristikleri ise sırasıyla

Şekil 4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir. Aynen 4:1 katkı oranı kullanılan diyotta gözleendiği gibi 10:1 katkı oranı kullanılan MPY SBD'nin $C-V$ karakteristiği de frekansa ve gerilime bağıli şekilde değişim göstermektedir. Frekans değerinin artmasıyla birlikte arayüzey ve yasak enerji aralığında bulunan yüklerin ac sinyali takip edememesi dolayısıyla $C-V$ değerinde azalma görölmektedir. Frekansın yüksek olduğu (≥ 500 kHz) değerlerde diyotun $C-V$ eğrisine arayüzey ve yasak enerji aralığından katkı olmadığı görölmektedir. Diğer yandan, her iki malzemeye de uygulanan gerilimin negatif bölgesinde (-3 V – 0 V aralığında) kapasitans ve iletkenlik eğrilerinin voltaja bağıli olarak neredeyse değişmediği yani etkilenmediği gözlemlenmiştir. Malzemelerin gösterdiği bu özelliklerinden dolayı kapasitans ve iletkenlik karakteristikleri incelenirken ölçümlerin frekansa bağıli yapılması oldukça büyük önem taşımaktadır.



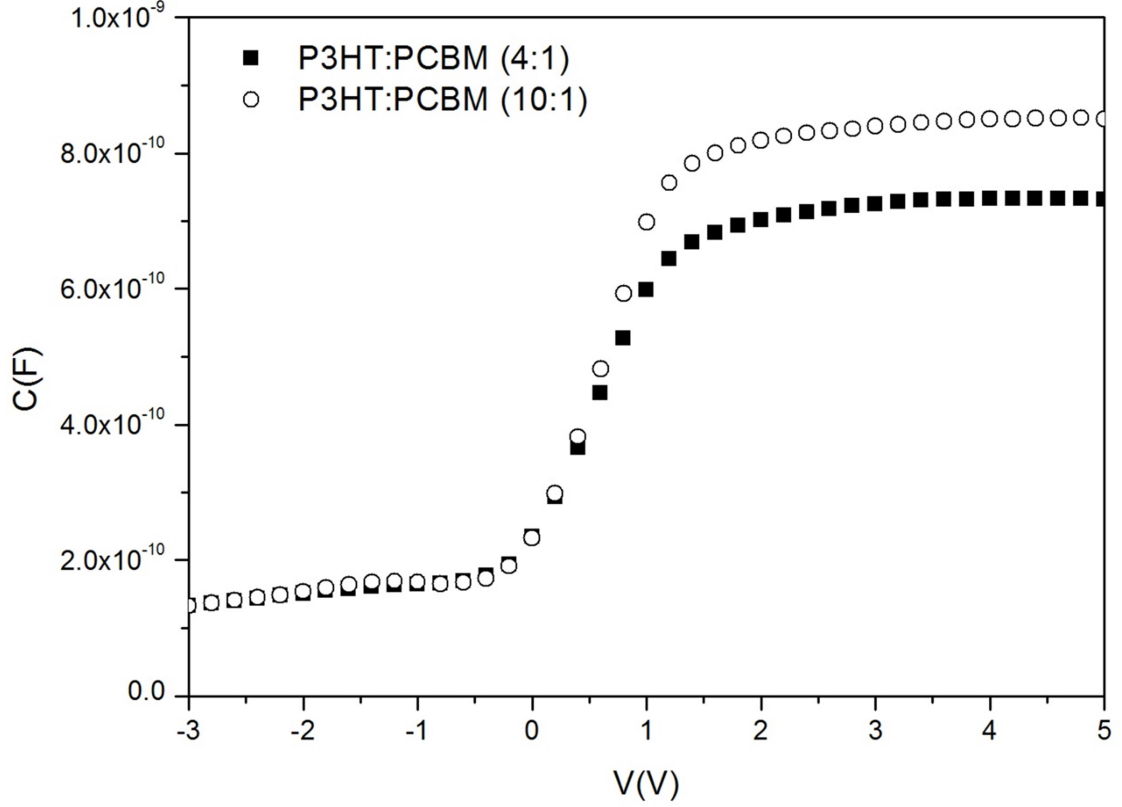
Şekil 4.3. 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $C-V$ karakteristiği.



Şekil 4.4. 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip SBD'nin $G/w-V$ karakteristiği.

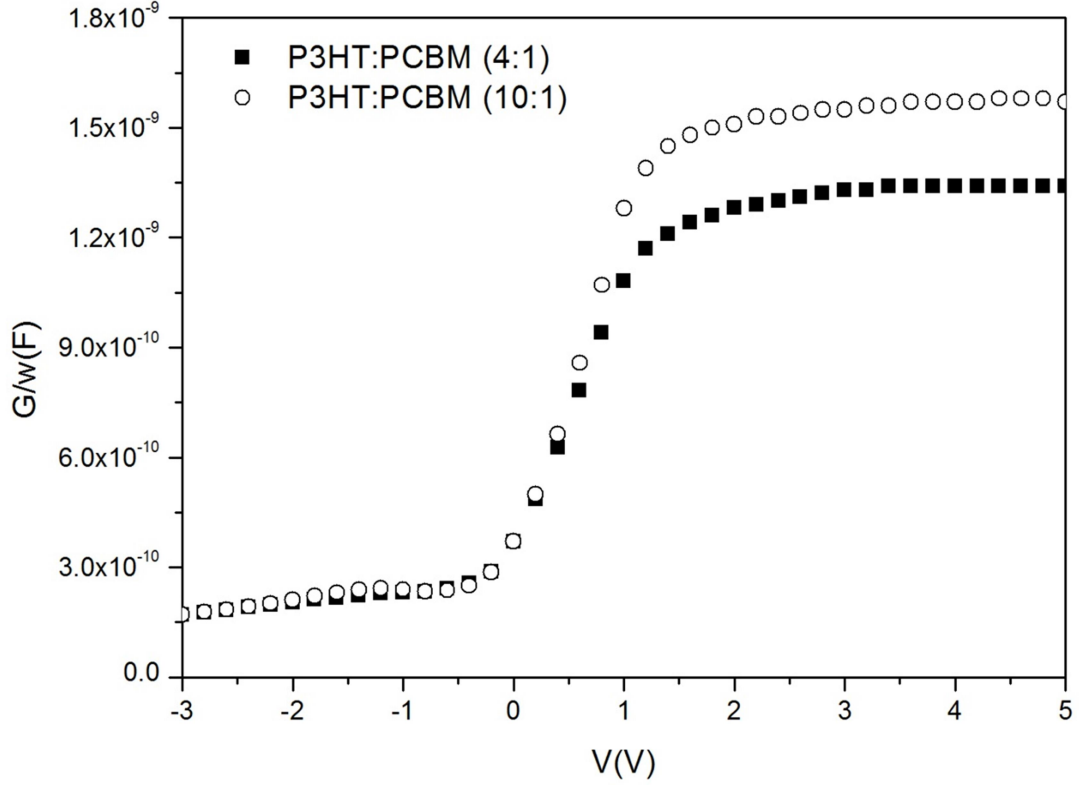
4:1 ve 10:1 katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin $C-V$ ve $G/w-V$ eğrilerinden frekansa bağlı yarımalar olduğu görülmektedir. Kapasitans ve iletkenlikteki frekansa bağlı olarak oluşan bu yarımalar arayüzey durumlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu tez çalışmasında, metal ile yarıiletken arasına kaplanan arayüzey polimer tabakasının yaklaşık 100 nm olan kalınlığı dolayısıyla arayüzey durumları metale geçemezler ve arayüzey durumları ile yarıiletken dengede olurlar. Ancak, metal ile yarıiletken arasına kaplanan arayüzey tabakanın kalınlığı 30 Å'dan daha küçük olduğunda, arayüzey durumları metale geçebilirler [7].

Üretilen SBD'lerin P3HT:PCBM katkı oranlarına bağlı olarak sabit 1 MHz frekans değerindeki $C-V$ ve $G/w-V$ karakteristiklerinin kıyaslanması sırasıyla Şekil 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere farklı P3HT:PCBM oranları kullanılarak üretilen SBD'ler için PCBM katkısının artışı ile birlikte ileri besleme bölgesindeki kapasitansın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.5. 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranları kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin 1 MHz frekans değerindeki kapasitans-voltaj ($C-V$) karakteristikleri.

Gözlemlenen bu durumun başlıca sebebinin, malzeme içindeki PCBM katkısının artırılmasından kaynaklı olarak MPY yapısının arayüzey durumlarının pasivize olmasından ortaya çıktığı düşünülmektedir. Arayüzey durumlarının pasivize edilmesi, malzemenin yasak enerji aralığı ve arayüzey durumlardaki tuzaklarda mevcut olan yüklerin etkisini kaybetmesine ve böylece malzemenin kapasitans değerinin de azalmasına neden olacaktır. Şekil 4.6'da MPY SBD'deki PCBM miktarındaki artış ile birlikte SBD'nin iletkenlik değerinde bir azalma olduğu açıkça görülmektedir. PCBM katkısının artmasıyla gözlemlenen iletkenlik değerindeki azalmanın sebebi olarak PCBM katkısının artmasıyla malzemenin iletim mekanizmasında değişikliklerin meydana geldiği düşünülebilir.

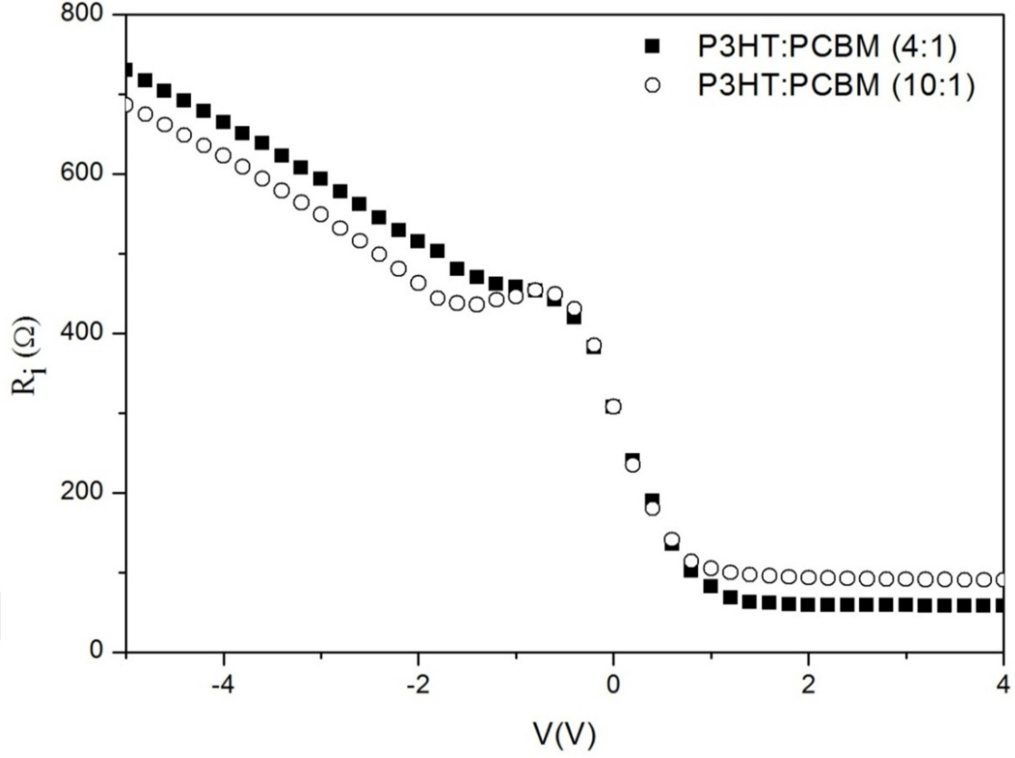


Şekil 4.6. 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranları kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin 1 MHz frekans değerindeki iletkenlik-voltaj ($G/w-V$) karakteristikleri.

4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip olan MPY SBD'lerin direnç değerleri frekansa bağlı $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri kullanılarak aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

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

Bu denklemde kullanılan C_m ve G_m parametreleri sırasıyla yapılan ölçümlerden elde edilen güçlü yığılım bölgesindeki kapasitans ve iletkenlik değerlerini ifade ederken ω ise açısal frekanstır. İdeal bir diyotta seri direnç (R_s) sıfıra yaklaşırken şant direnci (R_{sh}) sonsuza gitmektedir. Ancak, malzemelerin üretimi aşamasında ideal koşullar sağlanamadığı için bu ideal durumdan sapmalar görülmektedir. Bu tez çalışmasında, 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranlarında üretilmiş olan Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin 1 MHz frekans değerindeki direnç- voltaj grafiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı P3HT:PCBM oranı kullanılarak hazırlanmış Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY Schottky bariyer diyotların 1 MHz frekans değerindeki R_s - V karakteristikleri.

Grafikte görülen ve ileri beslem bölgesi olarak tanımlanan pozitif voltaj bölgesindeki direnç değeri diyotun seri direncini, ters beslem bölgesi olarak tanımlanan negatif voltaj bölgesindeki direnç değeri ise şant direncini vermektedir. Her iki malzeme için yapılan ölçümler sonucunda daha fazla PCBM içeren 4:1 oranında katkılı olan MPY SBD'nin seri direnci 57,8 Ω iken düşük PCBM içeren 10:1 oranında katkılanmış MPY SBD'de bu değer 90,3 Ω olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan, beklendiği üzere, şant dirençleri yüksek PCBM katkı oranlı (4:1 P3HT:PCBM için) MPY SBD için 730 Ω iken düşük PCBM katkılı (10:1 P3HT:PCBM için) SBD'nin şant direnci 687 Ω olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında yüksek PCBM katkı oranına sahip (4:1 P3HT:PCBM için) MPY SBD'nin seri direncinin daha düşük ve şant direncinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip MPY SBD'nin C - V değerinin 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip MPY SBD'den düşük olmasıyla da uyum içindedir. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip MPY SBD'nin ileri beslem altındaki kapasitans değerinin daha düşük olmasının bir sonucu olarak bu diyotun daha iyi bir iletme sahip olması ve seri direncinin azalması beklenen bir durumdur. Bu durum, PCBM katkı oranının artırılmasıyla malzeme içindeki arayüzey durumlarında azalma olduğunu göstermektedir [13], [26].

SBD'ler için direnç değerlerinin hesaplanması ve yorumlanmasından sonra üretilen diyotların kalitesini kıyaslayabilmek adına çalışılması gereken diğer bir önemli parametre ise arayüzey durum yoğunluklarıdır (N_{ss}). 4:1 ve 10:1 katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin arayüzey durum yoğunlukları Hill-Coleman metodu kullanılarak hesaplanmış olup aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilmiştir [26]:

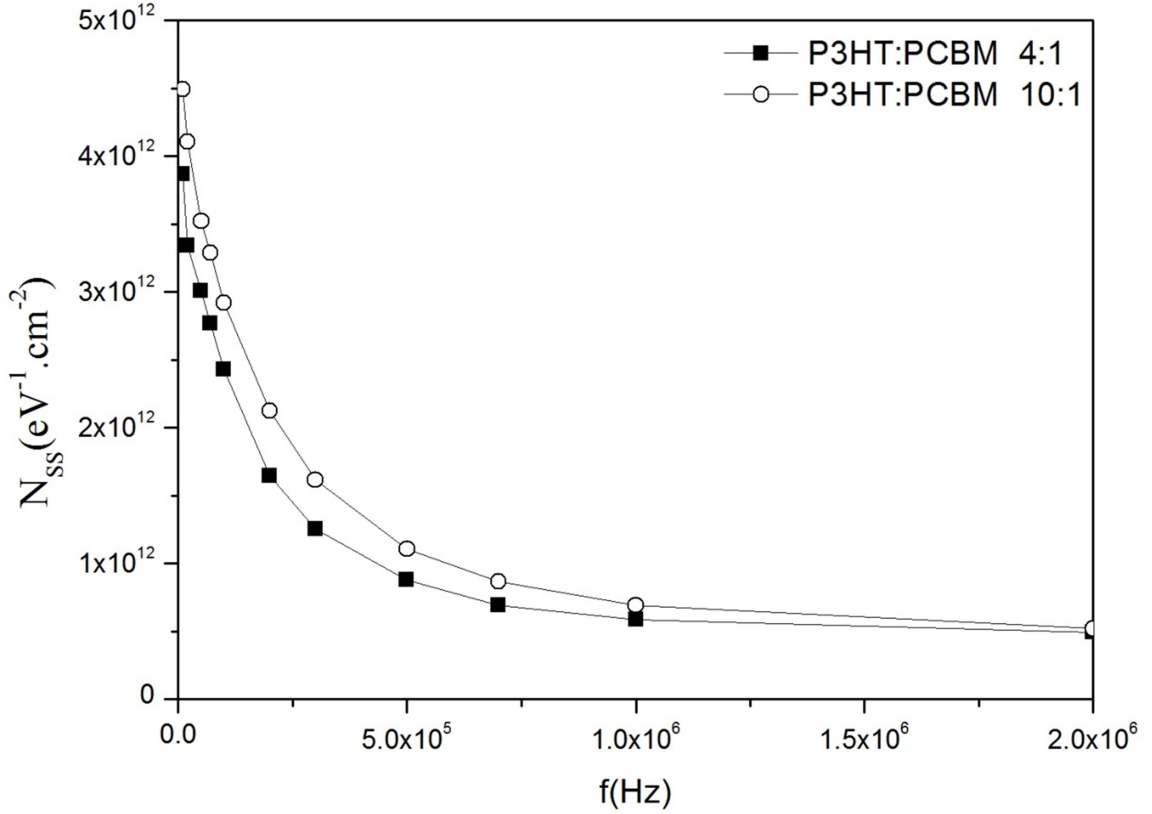
$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{\left(\left((G_m / \omega)_{\max} / C_{ox} \right)^2 + \left(1 - C_{\max} / C_{ox} \right)^2 \right)} \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklemde C_{max} ve $(G_m/w)_{max}$ değerleri malzemelerin $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümlerinden elde edilen kapasitans ve iletkenlik değerlerinin pik yaptığı noktalara karşılık gelen değerlerdir. Polimer tabakanın kalınlığının yukarıda bahsi geçen 30 Å'dan oldukça büyük olmasından kaynaklı olarak metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan malzemeymiş gibi düşünülüp yalıtkan malzeme yaklaşımı yapılacak olursa C_{ox} malzemelerdeki yalıtkan tabakanın kapasitans değerini vermektedir. C_{ox} değeri şu denklem ile hesaplanabilir:

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

Bu denklemdeki C_{ma} ve G_{ma} değerleri malzemelerin kuvvetli yığılım bölgelerindeki sırasıyla kapasitans ve iletkenlik değerleridir.

Denklem 4.2 ve 4.3 kullanılarak 4:1 ve 10:1 katkı oranlarına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'ler için N_{ss} değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.8'de her iki MPY SBD için elde edilen N_{ss} değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin frekansa bağlı arayüzey yoğunluğu (N_{ss}) değişim grafiği.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip olan MPY SBD'nin N_{ss} değerleri frekans aralığının 10 kHz'den 2 MHz'e değişimi ile $3,87 \times 10^{12}$ cm²/eV değerinden $4,89 \times 10^{11}$ cm²/eV değerine azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde, 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip MPY SBD'nin N_{ss} değerlerinin de 10 kHz – 2 MHz frekans aralığında artan frekans ile $4,49 \times 10^{12}$ cm²/eV değerinden $5,20 \times 10^{11}$ cm²/eV değerine azaldığı açıkça görülmektedir. N_{ss} değerlerinin frekansa kuvvetli bir şekilde bağlı olmasının nedeni düşük frekanslarda bütün arayüzey durumlarındaki taşıyıcıların ac sinyalini kolaylıkla takip edebilirken yüksek frekans değerlerinde arayüzey durumlarındaki taşıyıcıların ac sinyalini takip edememesi yani arayüzey durumlarındaki taşıyıcıların ac uyarılmaya cevap verememesi olarak açıklanabilir.

Farklı P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip MPY SBD'ler için katkı miktarının N_{ss} profiline olan etkisi incelendiğinde PCBM oranı yüksek 4:1 katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin N_{ss} değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Üretilmiş olan MPY SBD'lerde polimer arayüzeyde bulunan PCBM katkı oranının artırılmasıyla N_{ss} değerlerinde oluşan azalmanın polimer arayüzey tabakası ile metalin arasındaki bariyer yüksekliğinin (Φ_{B0}) azalması ve SBD içindeki yük

taşıyıcılarının hareket kabiliyetindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, N_{ss} 'in P3HT:PCBM katkı oranlarına bağlı olarak değişiminin diğer bir nedeni de PCBM katkı oranının artırılması ile birlikte malzeme içinde daha fazla kusurun pasivize edilmiş olabileceğidir. Sonuç olarak, 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin $C-V$ ve $G/w-V$ analizlerinden elde edilen elektriksel parametrelerin frekansa ve katkı oranına bağlı olarak gözlemlenen değişimleri polimer arayüzeyindeki N_{ss} 'e atfedilebilir.

4.2. FREKANS BAĞLI DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

Kısım 4.1'de tartışılan elektriksel analizler sonuçları dikkate alındığında 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin daha iyi elektriksel performans gösterdiği sonucuna varılabilir. Bu nedenle, tezin bu kısmında 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen MPY SBD'nin dielektrik özellikleri analiz edilmiştir.

4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri kullanılarak dielektrik analizi için frekansa bağlı dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kaybı (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}), elektrik modülünün gerçel (M') ve sanal (M'') kısımları elde edilmiştir.

Kompleks permitivite malzemelerin elektriksel ve dielektrik özelliklerinin fiziksel ve kimyasal davranışları konusunda önemli bilgiler verir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir [27]-[29] :

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

Bu denklemde ϵ' dielektrik sabiti yani depolanan enerji, ϵ'' ise dielektrik kayıp yani harcanan enerjidir. Uygulanan bir pozitif voltaj altında (kuvvetli yığılım bölgesi) frekansa bağlı olarak dielektrik sabiti hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır [30]:

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

Denklem 4.5'te C malzemenin kapasitansı C_0 ise boşluğun kapasitans değeridir ve şu

şekilde ifade edilir:

$$C_o = \varepsilon_o \left(\frac{A}{d} \right) \quad (4.6)$$

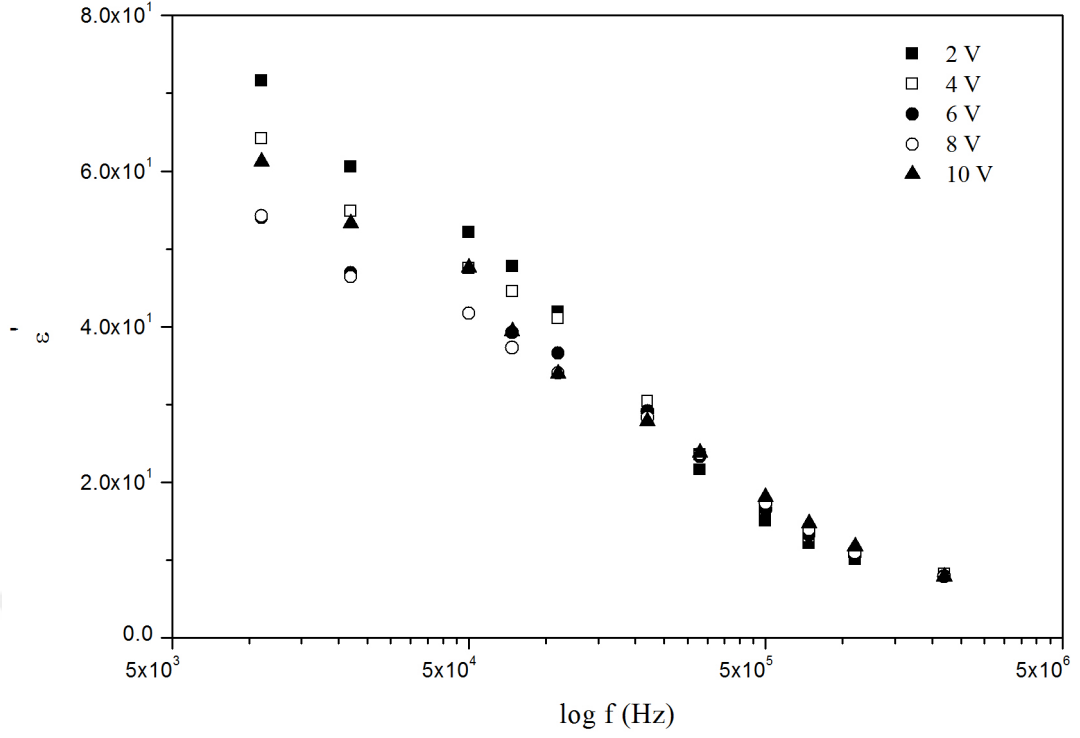
Burada, A değeri cm^2 cinsinden doğrultucu kontağın alanı, d parametresi kaplanan polimer arayüzey tabakasının kalınlığını ve ε_o ise boşluğun dielektrik geçirgenliğidir ($\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm). Kompleks permitivitenin sanal kısmı olan dielektrik kayıp ise aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenir:

$$\varepsilon'' = \frac{G}{wC_o} \quad (4.7)$$

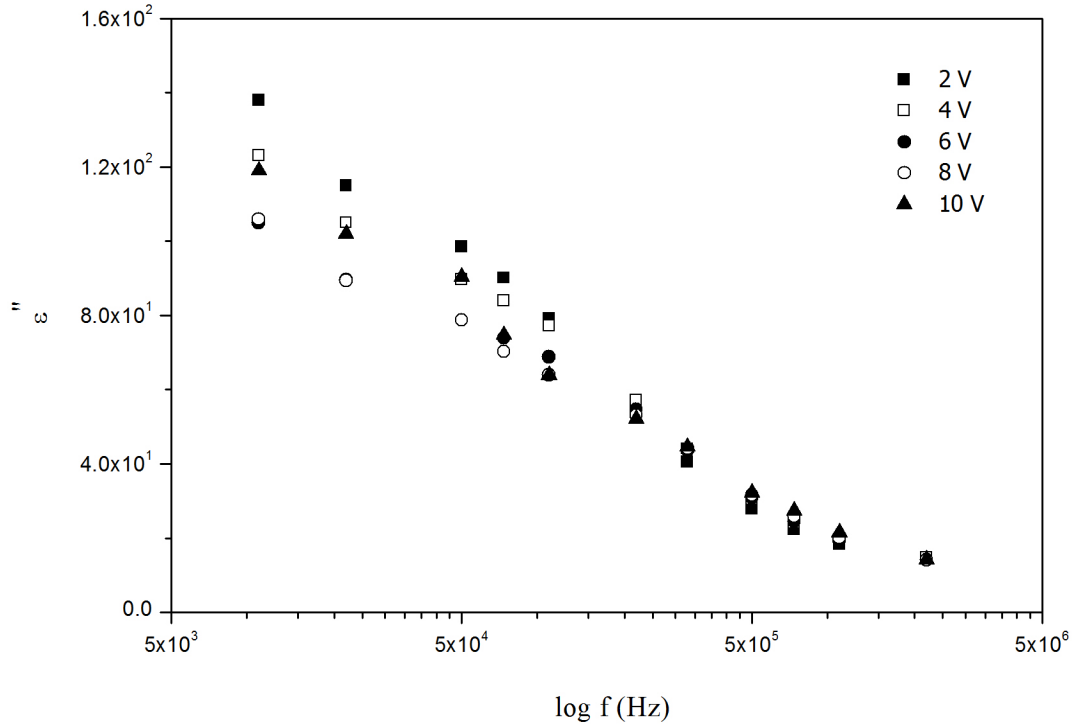
G üretilen MPY SBD'nin iletkenliği ve w açısal frekans değeridir. Kayıp açısı ($\tan\delta$) kompleks permitivitenin gerçel ve sanal kısımları kullanılarak şu şekilde hesaplanır [31]:

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

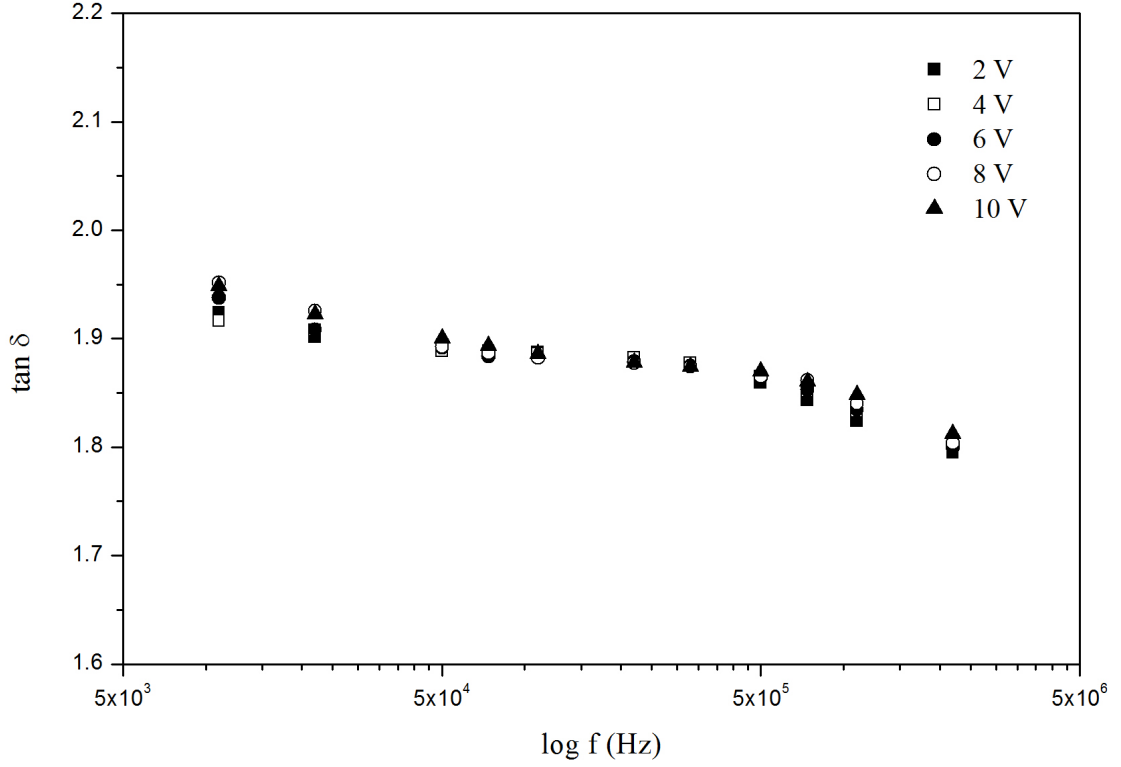
Denklem 4.8'de açıkça görüldüğü üzere $\tan\delta$ değerinde oluşacak değişimler, ε'' ve ε' değerlerinde meydana gelen değişimlerdir. ε' , ε'' ve $\tan\delta$ değerlerinin gerilime ve frekansa bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.9 ve 4.10'da görüldüğü üzere ε' ve ε'' parametreleri frekansın artmasıyla azalmaktadır. Düşük frekans değerlerinde (< 500 kHz) ε' ve ε'' değerleri uygulanan gerilime bağlı bir değişim gösterirken yüksek frekans değerlerine (≥ 500 kHz) doğru gidildikçe ε' ve ε'' değerleri gerilimden bağımsız bir davranış sergilemektedir. Frekansa bağlı olarak ortaya çıkan bu davranış, arayüzey tuzaklarında bulunan elektrik dipollerin düşük frekans değerlerinde polarizasyona katkıda bulunurken, frekansın artmasıyla bu dipollerin uygulanan frekans doğrultusunda yeniden düzenlenebilmesi için gerekli zamana sahip olamamaları ve bunun sonucunda dipollerin polarizasyona olan katkısının azalmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, ε' ve ε'' değerleri gerilimden bağımsız hale gelerek birbiri ile örtüşmeye başlarlar [32]-[34]. Şekil 4.11'de ε' ve ε'' değerlerinden elde edilen $\tan\delta$ parametresinin voltaj ve frekanstan bağımsız olarak neredeyse hiç bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD 'nın frekansa bağlı dielektrik sabit (ϵ') değişim grafiği.



Şekil 4.10. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı dielektrik kayıp (ϵ'') değişim grafiği.



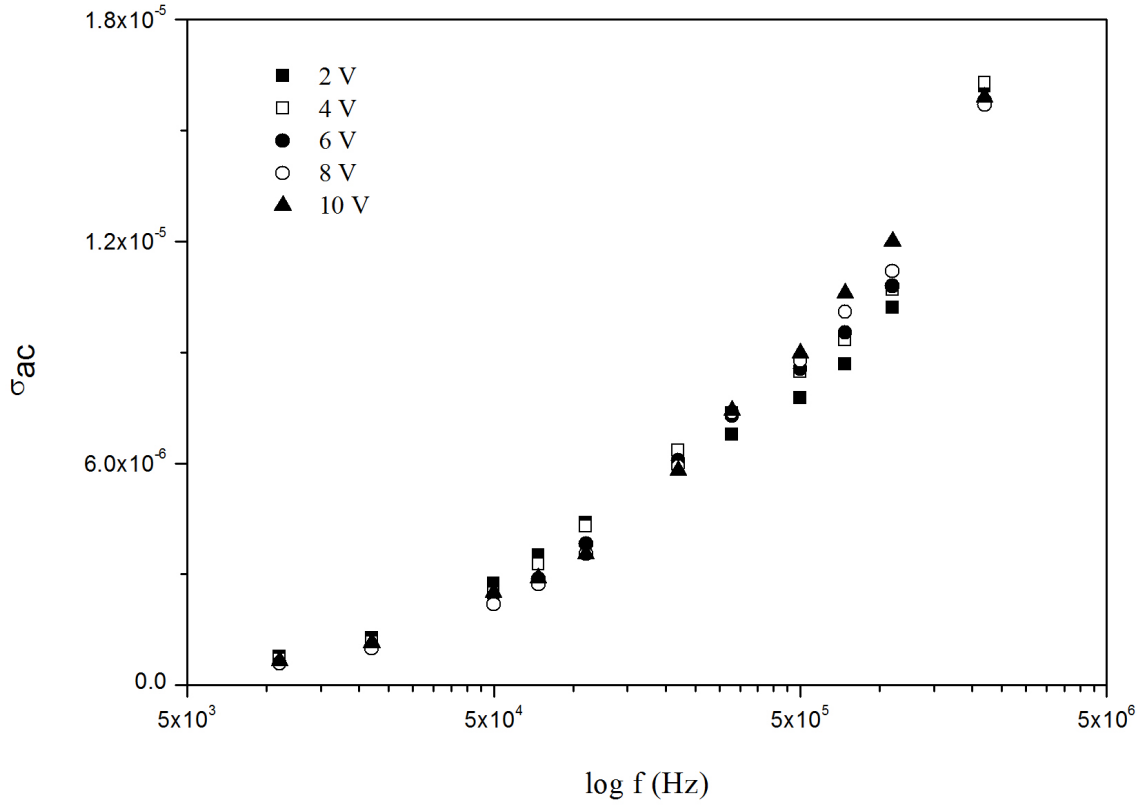
Şekil 4.11. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY Schottky bariyer diyotun frekansa bağlı kayıp açısı ($\tan\delta$) değişim grafiği.

Ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) üretilen malzemenin karakteristiği hakkında önemli bilgiler veren bir parametredir ve aşağıdaki denklem ile belirlenir:

$$\sigma_{ac} = w\varepsilon''\varepsilon_0 \quad (4.9)$$

Şekil 4.12’de 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD’nin frekans ve gerilime bağlı σ_{ac} değerleri gösterilmiştir.

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere artan frekans değerleri ile birlikte ac iletkenliğinin de arttığı görülmektedir. Frekansın artmasıyla birlikte iletkenliğin artması polarizasyonun azalmasından kaynaklanmaktadır. Malzeme içindeki polarizasyon azalınca daha fazla taşıyıcının iletme katkı sağlaması sonucu ac iletkenlik değeri artmaktadır. Ayrıca düşük frekanslarda (< 500 kHz) σ_{ac} değeri gerilimden bağımsız bir davranış gösterirken frekans arttıkça σ_{ac} gerilime bağlı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

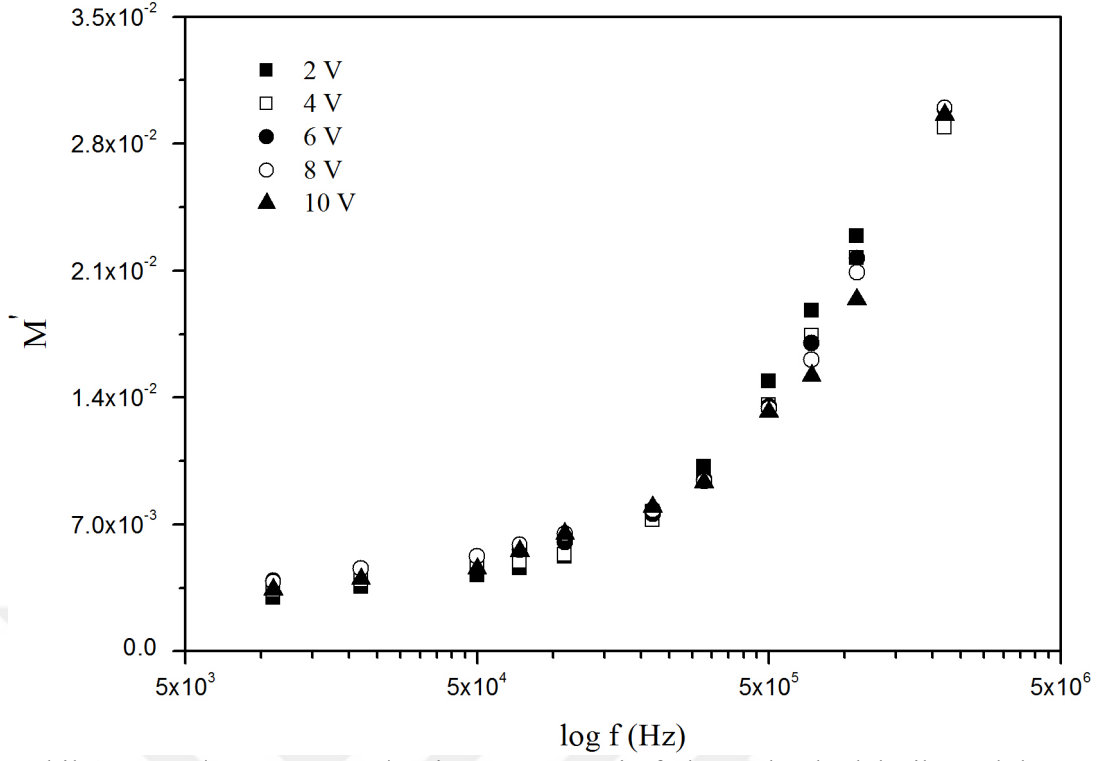


Şekil 4.12. 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY Schottky bariyer diyotun 2-10 V aralığında frekansa bağlı ac elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) grafiği.

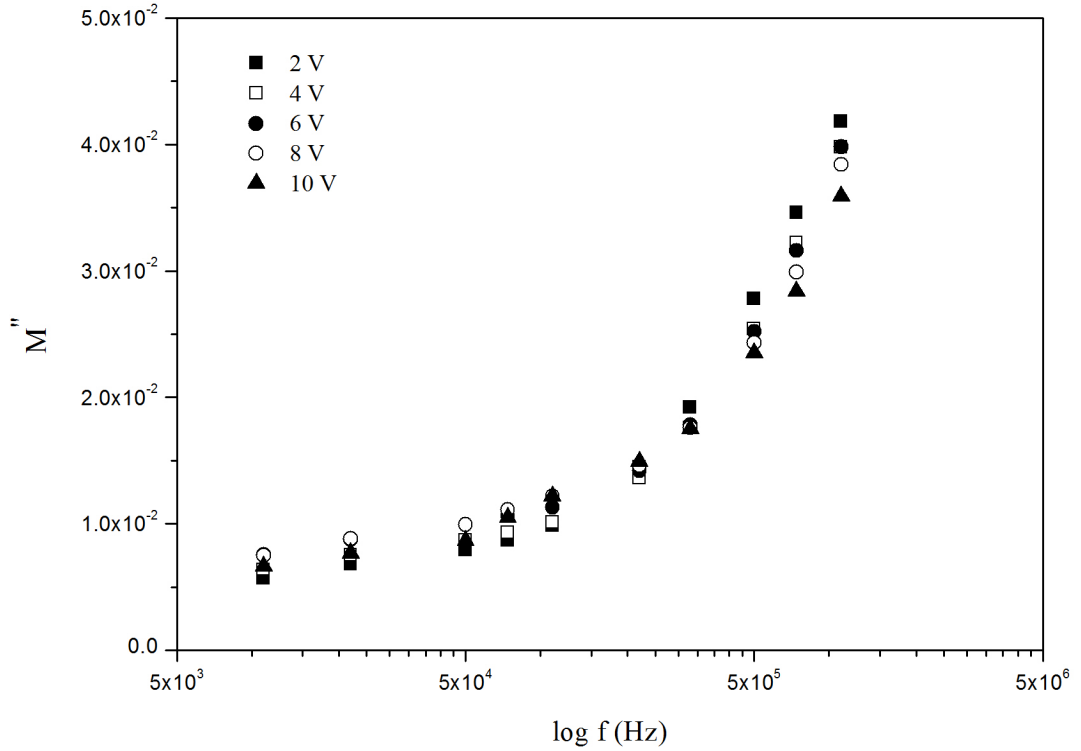
Malzemelerin dielektrik analizleri için son zamanlarda kullanımını artan elektrik modülü (M^*) parametresi ϵ' ve ϵ'' parametreleri kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [35]:

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

4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD için elektrik modülünün gerçel (M') ve sanal (M'') kısımlarının voltaj ve frekansa bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin frekansa bağlı elektrik modülünün gerçel kısmının (M') grafiği.



Şekil 4.14. Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD frekansa bağlı elektrik modülünün sanal kısmının (M'') grafiği.

Frekans değerindeki artışa bağlı olarak ϵ' ve ϵ'' değerlerindeki azalma sonucu M' ve M'' değerlerinde artış görülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.13 ve 4.14'de frekansa bağlı

olarak MPY SBD'nin elektrik modülünün gerçel ve sanal kısmı frekans arttıkça artıp maksimum değere ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra M' ve M'' değerleri düşük frekans değerlerinde gerilimden bağımsız bir davranış sergileyip sıfıra doğru yaklaşırken, artan frekansla birlikte gerilime bağımlı bir hale gelmektedir. Ortaya çıkan bu davranış dielektrik durulma mekanizmasının frekansa bağlılığına atfedilmektedir [36],[37].



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'ler üretilmiştir. Üretilen MPY SBD'lerin karanlıkta ve oda sıcaklığında geniş frekans (10 kHz – 2 MHz) ve voltaj (-10,0 V – +10,0 V) aralığı kullanılarak $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Her iki üretilen SBD içinde $C-V$ ve $G/w-V$ değerlerinin frekansa kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu görülmüştür. Frekansın artmasıyla C ve G/w değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. $C-V$ ve $G/w-V$ değerlerindeki frekansa bağlı bu değişimin sebebi şu şekilde açıklanabilir: arayüzeyde bulunan yükler düşük frekans değerlerinde (< 500 kHz) ac sinyali takip ederek malzemenin kapasitansına etki ederken, frekans değerinin yüksek seviyelere (≥ 500 kHz) ulaşmasıyla arayüzeyde bulunan bu yüklerin ac sinyalini takip etme yeteneklerini kaybederek malzemelerin kapasitansına daha fazla etki edemeyişleridir.

Katkı oranlarına bağlı olarak $C-V$ ve $G/w-V$ analizlerinin kıyaslanabilmesi amacıyla 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranlarına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'lerin $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri 1 MHz frekans değerinde karşılaştırılmıştır. 4:1 oranında P3HT:PCBM organik karışımına sahip olan MPY SBD'nin iletkenlik ve kapasitans değerlerinin 10:1 oranında P3HT:PCBM karışımına sahip MPY SBD'den daha düşük olduğu görülmüştür. Katkı oranına bağlı olarak gözlemlenen bu değişimin sebebinin artan PCBM katkısıyla birlikte arayüzey durumlarının pasivize edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. MPY SBD'lerin organik arayüzeylerinin katkı oranlarının diyotların direnci üzerine etkisi karşılaştırıldığında ise öncelikle ileri beslem bölgesindeki seri direnç değerleri ele alındığında yüksek PCBM katkılı olan seri direnç değeri, düşük PCBM katkılı diyottan daha düşük olarak elde edilmiştir. MPY SBD'lerin ters beslem bölgesinden elde edilen şant dirençlerinde ise yüksek PCBM katkılı SBD'nin düşük katkılı SBD'den daha yüksek bir değerde olduğu görülmektedir.

P3HT:PCBM katkı oranları değiştirilerek üretilen MPY SBD'lerde PCBM oranının malzemenin N_{ss} davranışı üzerine etkisini araştırmak amacıyla frekansa bağlı N_{ss} değerlerindeki değişim incelenmiştir. P3HT:PCBM arayüzey polimer malzemesinde

bulunan PCBM miktarının artmasıyla birlikte N_{ss} değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak polimer arayüzey tabakası içerisinde bulunan artan PCBM miktarı ile birlikte malzemedebulunan çeşitli kusurların pasivize edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'ler için yapılan $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümleri sonucunda elde edilen elektriksel analizler dikkate alındığında 4:1 P3HT:PCBM katkı oranına sahip Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin daha iyi elektriksel performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, MPY SBD'nin dielektrik özellikleri sadece 4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak üretilen SBD için analiz edilmiştir.

4:1 P3HT:PCBM katkı oranı kullanılarak hazırlanan Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin dielektrik analizleri frekansa bağlı $C-V$ ve $G/w-V$ ölçümlerinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda frekans ve gerilime bağlı dielektrik sabit (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülünün gerçel (M') ve sanal kısmı (M'') ile birlikte ac elektrik iletkenlik (σ_{ac}) parametreleri elde edilmiştir. Düşük frekans bölgesinden (< 500 kHz) yüksek frekans bölgesine (≥ 500 kHz) doğru frekans değerinin artmasıyla ϵ' ve ϵ'' parametrelerinin azaldığı görülmüştür. Yüksek frekans değerlerinde ise ϵ' ve ϵ'' parametreleri gerilimden bağımsız hale gelerek ϵ' ve ϵ'' değerleri birbirleri ile örtüşmeye başlamıştır. Yüksek frekans bölgesinde dipollerin elektrik alanı takip edememelerinden dolayı ϵ' ve ϵ'' parametrelerinin gerilime olan bağılılığının azaldığı görülmektedir. Düşük frekans bölgelerinde ise ϵ' ve ϵ'' parametrelerinde meydana gelen değişimin sebebinin üretilen SBD'nin arayüzeyinde bulunan tuzaklardaki yükler ve yüzey polarizasyonundan olduğu düşünülmektedir. ϵ' ve ϵ'' parametrelerinden elde edilen $\tan\delta$ değerinde frekansın değişmesiyle birlikte kayda değer bir değişimin olmadığı bulunmuştur. M' ve M'' parametrelerinde ise frekansın artmasıyla birlikte ϵ' ve ϵ'' nün azalması sonucu artış gösterdiği elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, 4:1 ve 10:1 P3HT:PCBM oranları kullanılarak üretilmiş olan MPY SBD'lerde yüksek PCBM oranına (4:1) sahip olan Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin daha ideal MPY SBD özellikleri gösterdiği bulunmuştur. Diğer bir ifadeyle, PCBM malzemesinin P3HT:PCBM arayüzey tabakasındaki oranının artırılmasıyla Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD diyotun temel elektriksel parametrelerinin geliştirildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Au/P3HT:PCBM/n-Si MPY SBD'nin dielektrik özelliklerin frekansa ve gerilime güçlü bir biçimde bağlı olduğu bulunmuştur.

6. KAYNAKLAR

- [1] Rhoderick E.H., Williams R.H., *Surfaces, Interfaces and Schottky Barriers, Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd Ed., Oxford, England, Clarendon Press, 1988.
- [2] Sze S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 1981.
- [3] Wilson A., *The Theory of Electronic Semiconductors, Proceeding of the Royal Society A*, 1931.
- [4] Sharma B.L., *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, New York and London, Plenum Press, 1984.
- [5] Lu G., *Organic Semiconductor*, University of Rochester 2006.
- [6] Neamen D.A., *Semiconductor Physics and Devices*, 2nd ed., New York, USA, Mc Graw-Hill, 1997.
- [7] Nicollian E.H., Brews J.R., *MOS Physics and Technology*, New York, USA, John Wiley & Sons, 1982.
- [8] Farag A.A.M., Yahia I.S., Fadel M., “Electrical and photovoltaic characteristics of Au/n-CdS Schottky diode”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 4906-4913, 2009.
- [9] Farag A.A.M., Ashery A., Ahmed E.M.A., Salem M.A., “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.
- [10] Yakuphanoglu F., “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.
- [11] Akkal B., Benamara Z., Bouiadjra N.B., Tizi S., Gruzza B., “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.
- [12] Tüzün Özmen Ö., “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.
- [13] Aydemir U., “*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.
- [14] Goetzberger A., Klausmann E., Schulz M.J., “Interface states on semiconductor/insulator surfaces”, *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 226-233, 1976.
- [15] Schroder D.K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 337-379, 1998.

- [16] Ghandhi S.K., *VLSI Fabrication Principles*, John Wiley & Sons, New York, pp. 401-405, 1983.
- [17] Hofstein S.R., Warfield G., “Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer”, *Solid-State Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 321-341, 1965.
- [18] Hackam R., Harrop P., “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.
- [19] Yakuphanoglu F., “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.
- [20] Reinhardt K.A., Kern W., *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*, 2nd ed., William Andrew Publishing, New York, 2008.
- [21] Prosa T.J., Winokur M.J., McCullough R.D., “Evidence of a novel side chain structure in regioregular poly (3-alkylthiophenes)”, *Macromolecules*, vol. 29, pp. 3654-3656, 1996.
- [22] Burkhard G.F., Hoke E.T., Scully S.R., McGehee M.D., “Incomplete exciton harvesting from fullerenes in bulk heterojunction solar cells”, *Nano Letters*, vol. 9, pp. 4037-4041, 2009.
- [23] Kim J.Y., Lee K., Coates N.E., Moses D., Nguyen T.-Q., Dante M., Heeger A.J., “Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing”, *Science*, vol. 317, no. 5835, pp. 222-225, 2009.
- [24] Reinhardt K.A., Kern W., *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*, 2nd ed., William Andrew Publishing, New York, USA, 2008.
- [25] Demirezen S., Sönmez Z., Aydemir U., Altındal Ş., “Effect of series resistance and interface states on the I–V, C–V and G/w–V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature”, *Current Applied Physics*, vol. 12, no. 1, pp. 266-272, 2012.
- [26] Hill W.A., Coleman C.C., “A single-frequency approximation for interface-state density determination”, *Solid-State Electronics*, vol. 23, no. 9, pp. 987-993, 1980.
- [27] Daniel V.V., *Dielectric Relaxation*, Academic Press, London, vol.162, pp.558, 1967.
- [28] Zaafour A., Megdiche M., Gargouri M., “AC conductivity and dielectric behavior in lithium and sodium diphosphate $\text{LiNa}_3\text{P}_2\text{O}_7$ ”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 584, no. 25, pp. 152-158, 2014.
- [29] Zaki H.M., “AC conductivity and frequency dependence of the dielectric properties for copper doped magnetite”, *Physica B*, vol. 363, no. 1-4, pp. 232-244, 2005.
- [30] Kaya A., Vural Ö., Tecimer H., Demirezen S., Altındal Ş., “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.
- [31] Smyth C.P., “Dielectric behavior and structure”, *McGraw-Hill*, New York, 1995.

- [32] Rajasekar K., Subbarayan A., Sathyamoorthy R., “AC and dielectric properties of thermally evaporated p-type $(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{70} (\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{30}$ thin films”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 15, pp. 2515-2522, 2006.
- [33] Yücedağ İ., “*Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi*”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye 2007.
- [34] Kaya A., Altındal Ş., Şafak Asar Y., Sönmez Z., “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.
- [35] Aral H.E., *MIS yapıların dielektrik özelliklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara-Türkiye 2010.
- [36] Popescu M., Bunget I., *Physics of Solid Dielectrics (Materials Science Monographs, 19)*, Elsevier Science Ltd., 1984.
- [37] Dökme İ., Altındal Ş., Gökçen M., “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.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serpil KARASU
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.05.1971 / DÜZCE
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : serpilkarasu81@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2017
Lisans	Fizik Bölümü	Yıldız Teknik Üniversitesi	1994
Lise		Düzce Lisesi	1988

YAYINLAR:

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

A.1. Karasu S., Öztürk A., Şağban H.M., Tüzün Özmen Ö., “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.

B) Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (Proceedings) basılan bildiriler :

B.1. Karasu S., Şağban H.M., Öztürk A., Tüzün Özmen Ö., “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)*, Antalya, Turkey, 2015, s. 140.

PROJELER:

1. *Au/P3HT:PCBM/n-Si Schottky Bariyer Diyotların Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Analizi*, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi, Proje No: BAP 2016.05.02.422, Araştırmacı, 2016–2017.

