

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**GENİŞ FREKANS ARALIĞINDA DİKEY GRAFEN-PVP/*n*-Si
SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

GİZEM KOCA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOÇ. DR. OSMAN ÇİÇEK

HAZİRAN - 2022

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Gizem KOCA tarafından hazırlanan “**GENİŞ FREKANS ARALIĞINDA DİKEY GRAFEN-PVP/n-Si SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **28.06.2022** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Osman ÇİÇEK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK Kastamonu Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÖKDAĞ Karabük Üniversitesi

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V.

Prof. Dr. İzzet ŞENER

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.



Gizem KOCA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENİŞ FREKANS ARALIĞINDA DİKEY GRAFEN-PVP/n-Si SCHOTTKY BARIYER DİYOTUN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

GİZEM KOCA

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DOÇ. DR. OSMAN ÇİÇEK

Bu çalışmada, Altın (Au) ve Silikon katmanlı, spin kaplı grafen-PVP ince filme dayalı heteroeklem yapının C_m ve G_m/ω ölçümleri kullanılarak gerilime bağlı ve geniş frekans aralığında (5kHz-5MHz) elde edilen elektrik ve dielektrik özellikleri incelendi. Seri direnç (R_s), fermi enerji seviyesi (E_F), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), tüketim tabakasının genişliği (W_d), kurulma voltajı (V_{bi}), iletkenlik bandına ait etkin taşıyıcı yoğunluğu (N_C), maksimum elektrik alanı (E_m), katkılanan verici atomlarının yoğunluğu (N_D), bariyer yüksekliği (Φ_{BO}) gibi elektriksel parametreler hesaplandı. Deneysel olarak, kapasitans (C) ve iletkenlik (G/ω) değerleri frekans azaldıkça artmaktadır. Aynı zamanda, gerilime bağlı olarak tükenme ve yığılım bölgelerinde artış göstermektedir. Özellikle seri direnç ($R_s -V-f$) eğrisi, yığılım ve tükenme bölgelerinde düşük frekans değerlerinde pik verir, yüksek frekanslara doğru bu pik azalır. Arayüzey durum yoğunluğu ($N_{ss} -V$) değerleri ise oda sıcaklığında ve -3V ile 3V aralığında pozitif beslem bölgelere doğru artmaktadır. Dielektrik özellikleri incelendiğinde; dielektrik sabiti (ϵ'), ac iletkenlik (σ_{ac}), dielektrik kaybı (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modüllerinin gerçek ve imajiner kısımları (M' and M'') hesaplandı. Hesaplara göre dielektrik sabiti ve kaybı, frekans arttıkça azalmakta olup $\tan\delta$ değerinde ise çok küçük bir değişiklik gözlenmektedir. σ_{ac} , gerçek ve imajiner kısımlar ise frekans arttıkça artmaktadır. Deneysel olarak, yüksek dielektrik sabiti (ϵ_{max}'), geleneksel malzemelerin (SiO_2 vb.) ve PVP'ye uygun katkılı malzemelerin maksimum değerinden çok yüksektir. Sonuçlar, yüksek değere sahip grafen-PVP ince filmin geleneksel bir cihaz yerine metal-organik/polimer-yarı iletken cihaz teknolojilerinde bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Au/grafen-PVP/n-Si yapısı için tüm bu parametrelerin kuvvetle frekansa bağlı olduğu bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER:Metal-Organik/Polimer Yarıiletkenler, Schottky Heteroeklem, $C/G-V-f$ karakteristikleri, Dielektrik Özellikleri, Frekansa bağlı elektriksel özellikler.

Haziran 2022, 57 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF VERTICAL GRAPHENE-PVP/*n*-Si SCHOTTKY BARRIER DIODE IN A WIDE FREQUENCY RANGE

GİZEM KOCA

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. OSMAN ÇİÇEK

In this study, the electrical and dielectric properties of the heterojunction structure based on spin coated graphene-PVP thin film on silicon with Gold (Au) Schottky contacts were investigated using voltage-dependent C_m and G_m/ω measurements in a wide frequency range (5kHz-5MHz). Fermi energy level (E_F), Series resistance (R_s), the density of allowed energy states in the conduction band (N_C), interfacial state density (N_{ss}), set-up voltage (V_{bi}), depletion layer width (W_d), maximum electrical field (E_m), concentration of donor atoms (N_D), potential barrier height (Φ_{bo}) were calculated. Experimentally, the capacitance and conductivity values increased with decreasing frequency, in the depletion and accumulation regions. In particular, the series resistance curve peaks at low frequency values in the accumulation and depletion regions, and this peak decreased towards high frequencies. The $N_{ss} - V$ values increased with towards positive bias regions, in the range of -3V to 3V. When the dielectric properties are examined, dielectric constant (ϵ'), ac conductivity (σ_{ac}), dielectric loss (ϵ''), tangent loss ($\tan\delta$), real and imaginary parts (M' and M'') of electrical modules were calculated. According to the calculations, the dielectric constant and loss decreased with increasing frequency, and a very small change in the $\tan\delta$ value was observed. AC conductivity, M' and M'' increased with increasing frequency. Experimentally, the high dielectric constant (ϵ_{max}) is higher than the maximum value of conventional materials (SiO_2 etc.) and doped materials suitable for PVP. The results show that the high value graphene-PVP thin film has potential in metal organic semiconductor device technologies rather than a conventional device. As a result, it was found that all these parameters were strongly frequency dependent for the Au/graphene-PVP/*n*-Si structure.

KEYWORDS: Metal-organic/polymer-semiconductors, Schottky Heterojunction, Capacitive and conductive characteristics in bias interval, Dielectric properties, Frequency dependent electrical properties.

June 2022, 57 Page

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tez çalışması boyunca planlama, araştırma ve oluşum süreçlerinde her türlü ilgi ve destek sağlayan, bana tüm titizliğiyle yol gösterip, bilgilendirme ve yönlendirmeleriyle çalışmamı şekillendiren çok değerli sayın danışman hocam Doç. Dr. Osman ÇİÇEK'e en içten dileklerle teşekkürlerimi arz ederim.

Ayrıca, sevgilerini, desteklerini, varlıklarını hissettiren ve beni bu günlere getiren, hayatımın her anında koşulsuz şartsız yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, üzerimde sonsuz emekleri bulunan ve tez çalışmam süresince fedakarlıklarıyla destek sağlayan canım babam Celal KOCA'ya, canım annem Semra KOCA'ya, canım kardeşim Ceren KOCA'ya en kalbi duygularıyla sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

GİZEM KOCA

Kastamonu, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER	5
2.1 Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar	5
2.1.1 Metal/ n tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar.....	6
2.1.2 Metal / n tipi Yarıiletken Omik Kontaklar.....	8
2.2 Metal-Oksit/Yalıtkan-Yarıiletken (MOS) Yapısı.....	9
2.2.1 İdeal MOS Yapısı	10
2.2.1.1 Yığılım bölgesi.....	14
2.2.1.2 Tüketim bölgesi.....	15
2.2.1.3 Tersinim bölgesi.....	16
2.3 Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Yöntemi.....	17
2.4 Dielektrik Özellikleri.....	19
2.4.1 Dielektriksiz Paralel Plakalı Kondansatör	19
2.4.2 Dielektrikli Paralel Levhalı Kondansatör	20
2.4.3 Dielektrik Kutuplanma	22
2.4.4 Kutuplanma Yükleri	23
2.4.5 Dielektrik Sabitinin Hesaplanması	23
3. DENEYSEL YÖNTEM	27
3.1 Schottky Heteroeklem Yapısının Hazırlanması	27
3.2 Deneysel Ölçüm Düzenekleri.....	28
4. DENEYSEL BULGULAR	29
4.1 Frekansa Bağlı Elektriksel Özellikler.....	29
4.2 Dielektrik Özellikleri.....	40
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Metal n tipi Schottkylarda $\Phi_m > \Phi_s$ elektron enerji-bant diyagramı: (a) Metal ile yarıiletken arasında kontak yapılmadan önceki enerji-bant diyagramı (b) Metal ile yarıiletken arasında kontak oluşturulduktan sonraki enerji-bant diyagramı	7
Şekil 2.2 Metal n tipi Schottky kontaklarda elektron enerji bant diyagramı: (a) Termal denge altındaki durumu (b) Doğru beslem altındaki durumu (c) Ters beslem altındaki durumu	7
Şekil 2.3 Metal n tipi yarıiletken omik kontakta $\Phi_m < \Phi_s$ durumundaki enerji bant diyagramı (a) Birbirinden ayrı metal ve yarıiletken; (b) Termal dengede kontak (c) Yarıiletken negatif beslem altında (d) Yarıiletken pozitif beslem altında.	9
Şekil 2.4 Bir metal oksit/yalıtkan yarıiletken yapının şema gösterimi	10
Şekil 2.5 İdeal olan bir MOS yapı için n tipi yarıiletken enerji bant diyagramı	11
Şekil 2.6 MOS kapasitansının eşdeğer devresi	13
Şekil 2.7 MOS yapısının yığılım durumundaki (a) Yük dağılımı (b) Enerji-bant diyagramı.....	15
Şekil 2.8 MOS yapısının tüketim durumundaki (a) Yük dağılımı (b) Enerji-bant diyagram.....	16
Şekil 2.9 MOS yapısının tersinim durumundaki (a)Yük dağılımı (b)Enerji-bant diyagramı.....	17
Şekil 2.10 (a) (b) Arayüzey tuzaklarını, C_s ve R_s içeren eşdeğer devre (c) Düşük frekans limiti (d) Yüksek frekans limiti	18
Şekil 2.11 Dielektriksiz paralel levhalı kondansatör.....	19
Şekil 2.12 Dielektrikli paralel levhalı kondansatör.....	21
Şekil 2.13 Elektrostatik kuvvet altında dipollerin yönelimleri	23
Şekil 2.14 RC eşdeğer devresi	25
Şekil 2.15 Dielektrikli bir kondansatördeki AC akım.....	26
Şekil 2.16 Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_C) ile kayıp akımı (I_i) arasındaki ilişki	26
Şekil 3.1 Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi.....	28
Şekil 4.1 Au/grafen-PVP/ n -Si Schottky diyodun frekansa bağlı $C_m - V$ değişim grafiği	30
Şekil 4.2 Farklı frekans aralığındaki C_m^{-2} ve V arasındaki ilişki grafiği.....	32
Şekil 4.3 Schottky aygıtın farklı frekanslardaki $\log G_m / \omega - V$ grafiği	35
Şekil 4.4 Aygıtın yapısının frekansa bağlı $R_s - V$ eğrisi.....	37
Şekil 4.5 Oda sıcaklığında farklı gerilimlerde Schottky heteroeklem yapısının eşdeğ paralel iletkenlik $G_P/\omega - \log(f)$ eğrilerine frekansın bağıllığı.....	38
Şekil 4.6 Aygıtın yapısının zaman sabiti (τ) karakteristiği	39
Şekil 4.7 Aygıtın yapısının frekansa bağlı N_{ss} karakteristiği	40
Şekil 4.8 Aygıtın yapısının dielektrik sabitinin frekansa bağıllık grafiği	42
Şekil 4.9 Aygıtın yapısının frekansa bağlı dielektrik kaybının değişim grafiği	43
Şekil 4.10 Frekansa bağlı aygıtın kayıp açı faktörünün değişim grafiği.....	43
Şekil 4.11 Aygıtın AC elektriksel iletkenliğin frekansa bağlı grafiği.....	44
Şekil 4.12 Aygıtın frekansa bağlı $M' - V$ karakteristiğinin değişim grafiği	45

Şekil 4.13 Aygıtın frekansa bağlı M'' - V karakteristiğinin değişim grafiği 46



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Metal n tipi kontak oluşumu	6
Tablo 4.1 Farklı frekanslarda Schottky heteroeklem yapısının hesaplanan elektronik parametreleri	34
Tablo 5.1 Metal-Organik-Yarıiletkenlerin 1000 kHz'de hesaplanan parametrelerin karşılaştırılması	48



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
B	: Bor
Ga	: Galyum
N	: Azot
F	: Fosfor
As	: Arsenik
Au	: Altın
Si	: Silikon
V_{bi}	: Kurulma voltajı
W_d	: Tükenme tabakası genişliği
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
E_F	: Fermi enerji seviyesi
E_i	: Saf Fermi enerji seviyesi
E_v	: Değerlik (valans) bandı enerjisi
E_c	: İletkenlik bandı enerjisi
R_s	: Seri direnç
N_C	: İletim bandında izin verilen enerji durumlarının yoğunluğu
N_D	: Au ve Si arasındaki verici atomların yoğunluğu
Φ_{B0}	: Bariyer yüksekliği
E	: Elektrik alan
E_m	: Maksimum elektrik alanı
$\Delta\phi_B$: Görüntü kuvvet bariyerinin düşürülmesi
ϵ'	: Dielektrik sabiti
ϵ''	: Dielektrik kayıp
$\tan\delta$: Kayıp açısı faktörü
σ_{ac}	: AC iletkenlik
M'	: Elektrik modülünün gerçek kısmı
M''	: Elektrik modülünün sanal kısmı
Φ_{B0}	: Bariyer yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	: Elektron ilgisi
C	: Kapasitans
C_{ox}	: Oksit tabakanın kapasitansı
C_{sc}	: Uzay yükü kapasitansı
C_D	: Tüketim kapasitansı
C_m	: Ölçülen kapasitans
G_m	: Ölçülen İletkenlik
ϵ_{OX}	: Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
V_G	: Metal plakaya uygulanan gerilim
V_{ox}	: Yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim
d_{ox}	: Yalıtkan tabakanın kalınlığı

R_{sh}	: Kısa devre direnci
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı
Ψ_B	: Saf Fermi ile Fermi enerji seviyesi arasındaki fark
Ψ_s	: Arayüzeydeki bant gerilimi
Q_{sc}	: Uzay yükü
A_{ox}	: Oksit tabakanın yüzey alanı
d_{ox}	: Plakalar arası uzaklık
V_0	: Potansiyel fark
τ	: Arayüzey tuzakların ömrü
σ	: Birim alan başına düşen yük yoğunluğu
m_e^*	: Elektronun etkin kütlesi
m_0	: Elektronun boş uzaydaki kütlesi

Kısaltmalar

PVA	: Polivinil alkol
DI	: Deiyonize
MS	: Metal-yarıiletken
SD	: Schottky diyotlar
PVP	: Polivinil pirolidon
MOS	: Metal-oksit/yalıtkan-yarıiletkenler
OFET	: Organik alan etkili transistörler
OLED	: Organik ışık yayan diyotlar
OSC	: Organik güneş pili
C-V-f	: Kapasitans-voltaj-frekans
G/ ω-V	: İletkenlik-voltaj
AC	: Alternatif akım

1. GİRİŞ

Günümüz elektronik cihazlarının temelinde, Schottky kontak temelli metal-oksit/yalıtkan-yarıiletken yapılar (MOS) yani Schottky diyotlar yer almaktadır. Gelişen malzeme biliminin bir sonucu olarak, yeni ve endüstriyel organik malzemeler, ince filmler kullanarak yapıların cihaz performansını artırarak Schottky heteroeklem yapısına dönüştür (Güçlü vd., 2019) (Sharma, 1984). Organik malzemeler, örneğin PEDOT: Pss, polivinil alkol (PVA) (Demirezen, 2020) (Pawde, 2008), poli (3-heksiltiofen) (Chaudhary, 2019), polivinil pirolidon (PVP) (Alptekin, 2019) vb. Schottky diyotlar metal ile yarıiletkenin sıkıca kontak edilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu yapılar yüksek frekanslarda gerilim düşümü, hızlı yön değiştirmesi, iletkenliği, yalıtkanlık özellikleri arasındaki ani geçişlere hızlı tepki verebilmesi gibi önemli avantajlara sahiptir. Üretimi ve kullanımı yarıiletken endüstrisinde hızla yaygınlaşmıştır. Buna bağlı, metal yarıiletken (MS) ve arayüzey tabakaya sahip MOS yapılar hakkında deneysel, teorik olarak pekçok araştırma yapılmaktadır (Çiçek vd., 2020; Ersöz vd., 2016; Gökçen vd., 2012). MS kontakların yüzey alanlarının geniş olmasının yanında kolay üretim teknolojisi ve düşük maliyetle üretilme özelliğine sahiptir. Bu avantajlar sayesinde yarıiletken teknolojisinde genellikle kullanılan kontaklar olarak yerlerini almaktadır (Aydemir, 2009; Kaya, 2010; Rhoderick ve Williams, 1988; Tan, 2016; Tecimer, 2018). Teknolojik alanda büyük ilgi gören MS yapılar, elektronik cihazların daha detaylı bir şekilde araştırılmasına fayda sağlamaktadır. MS yapılar, iş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontak olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Schottky yapıların üretiminde bu tür kontakların tercihi önem taşımaktadır (Bilkan vd., 2015).

MOS yapıların hazırlanmasında, yarıiletkenin p-tipi veya *n*-tipi malzeme özelliğine göre uygun iş fonksiyonu metaller seçilir. Bu şekilde metal ile yarıiletken arasında potansiyel engel yüksekliği oluşturulur (Baran, 2015; Erbaş Aral, 2010). Metal ve yarıiletken yapılar temas halindeyken aralarındaki yüklerin ayrışması sonucu aralarında Schottky engel yüksekliği meydana gelir. Engel yüksekliği, MS yapıların yüzeylerinde oluşan ısıl değişim farklılığına önemli ölçüde duyarlıdır. Bununla

beraber, yarıiletkenin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimleri ve engel yüksekliğini kontrol etmekte katkıda bulunmaktadır (Sağlam, 2004).

Bu bilgilerle beraber Schottky ve Mott, engel yüksekliğinin nasıl oluştuğuna dair araştırmaya başlamış ve engel oluşumuna açıklama getirerek bu konuya destek sağlamıştır. Engel yüksekliğinin hesaplanmasının yanında engel oluşumu hakkında çeşitli model ve öneriler getirerek desteklemiştir (Neamen, 1997; Sze,1981).

Schottky diyotlarla ilgili Cowley ve Sze'nin, gerçekleştirdikleri başlangıç çalışmalarında, farklı arayüzey tabakalarında oluşan engel şekillerini gözlemlemişlerdir (Cowley ve Sze,1965). Aynı zamanda çeşitli metaller kullanarak MS yapılar arasında engel yüksekliğinin oluştuğunu ileri sürmüşlerdir. Metalden yarıiletkene şeklinde görülen engel yüksekliği oluşumunun temelde arayüzey tabakası ve kalınlığına, iş fonksiyonlarına, yüzeyin hazırlanma şartlarına, arayüzeyde oluşan engel yoğunluğuna, yarıiletkenin katkı yoğunluğuna, uygulanan ön gerilim değerine ve yapının sıcaklığına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Aydemir, 2014).

MOS yapılarda, kaçak akımının arttığı durumlarda cihazın performansı olumsuz etkilenebilir. Yalıtkan tabakayı yüksek dielektrik sabitli malzemedan tercih etmek bu sızıntı akımını minimuma indirgeyecektir. Sızıntı akımı düşük olan MOS yapılar, tepki verme süreleri hızlı ve güç kayıpları az olmakla birlikte, daha kararlı çalışan elektronik cihazların üretilmesini sağlar. Ayrıca organik güneş pili (OSC), organik ışık yayan diyot (OLED), organik alan etkili transistörler (OFET), (Alptekin, 2019; Chaudhary, 2019; Özmen,2014) vb. aygıtlar elektronik uygulamalarda oldukça tercih edilir. Özellikle yüksek dielektrik dayanımı, daha iyi şarj kapasitesi, kristal yapısı ve yüksek suda çözünürlüğü gibi özellikleriyle PVP uygun katkı malzemeleri kullanılarak geliştirilebilir veya değiştirilebilir (Alptekin, 2019; Pawde, 2008;). Ek olarak, grafen mükemmel elektriksel iletkenlik, yüksek dielektrik geçirgenlik ve suda çözünürlük gibi özelliklere kolayca sahiptir. Ayrıca organik/polimer nanokompozitler, yapısındaki çok sayıda oksijen sayesinde kolayca katkılanabilir (Kim vd., 2009). Özellikle, PVP, örneğin metaller ve grafen gibi katkı malzemeleri kullanılarak geliştirilebilir veya değiştirilebilir.

Temel elektronik bileşenlerin fiziksel ve elektriksel özelliklerini araştırmak yarıiletken teknolojisinde önemlidir.

Bu nedenle araştırmaların bir kısmı, yeni yarı iletken malzemelerin hazırlanması veya mevcut yarı iletkenler üzerinde yüksek dielektrik (Si_3N_4 , TiO_2 gibi) yalıtkan veya organik/polimer ince film tabakaları oluşturarak performansın artırılmasının belirlenmesi ile ilgilidir (Sreenu, 2017).

Yalıtım tabakasının türüne karar verirken, kaçak akımı en aza indirecek, kontrol edilecek ve birçok yüzey koşulunu pasifleştirecek malzemelerin seçilmesi de önemlidir (Sağlam, 2004). Literatürde birçok organik / polimer ince film tabanlı çalışma olmasına rağmen, modifiye edilmiş PVP ince filmlerin Schottky heteroeklem yapılarının elektronik özellikleri üzerindeki performansının anlaşılması ve analiz edilmesi için gereklidir.

Schottky heteroeklem yapılarda, altın (Au), gümüş (Ag), ve alüminyum (Al) vb. metallerin kullanılması tercih edilir. Farklı saflıkta metal kullanmak ve daha yüksek saflıkta olması buna bağlıdır. Bunun yanısıra, genellikle silikon (Si), germanyum ve galyum-arsenit gibi yarı iletkenler kullanılır. Burada özellikle Si, kolay yüzey pasivasyonu, yüksek sıcaklık değerlerindeki kararlı yapısı ve doğası gereği bol olması sayesinde düşük maliyeti nedeniyle elektronik cihazlarda kullanılan önemli bir malzemedir (Nicollian ve Brews, 1982).

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, MS ve MOS gibi yapıların özellikleri, kullandıkları alanlar, bunların ölçüm parametreleri, Si ve grafen malzemesinin hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde, MS doğrultucu ve omik kontakların yapısı, iş fonksiyonları, enerji bant diyagramları, MOS yapılar, ideal MOS yapılar, yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemi ve dielektrik özelleri anlatıldı. Üçüncü bölümde, numunelerin hazırlanma aşamaları, deneysel ölçüm sistemleri hakkında detaylı bilgi verildi. Dördüncü bölümde, kapasitans-voltaj (C_m-V) ve iletkenlik-voltaj ($G_m/\omega-V$) ölçümlerinden elde edilen veriler ve grafik görüntüleri incelendi. Beşinci bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilip literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak gerekli öneriler sunuldu.

Bu çalışmada, Schottky heteroeklem yapılarına dayanan performansı artırmak için Au ve Si plaka arasında büyütülen bir grafen-PVP ince film tabakasının frekans tepkisi araştırılmıştır.

Geliştirilen LabVIEW tabanlı programı kullanan elektronik ve dielektriksel parametreler, 5 kHz ile 5 MHz frekans aralığında ve oda sıcaklığında

$C-V-f$ ve $G/\omega-V-f$ ölçümlerinin ham verilerinden hesaplandı. Kurulma voltajı (V_{bi}), tükenme tabakası genişliği (W_d), arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}), fermi enerji seviyesi (E_F), seri dirençler (R_s), iletim bandında izin verilen enerji durumlarının yoğunluğu (N_C), Au ve Si arasındaki verici atomların yoğunluğu (N_D), bariyer yüksekliği Φ_{B0} , maksimum elektrik alanı (E_m) ve görüntü kuvvet bariyerinin düşürülmesi ($\Delta\Phi_B$) gibi elektronik parametreler ve kayıp açısı faktörü ($\tan\delta$), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik sabiti (ϵ'), ac iletkenlik (σ_{ac}), elektrik modüllerinin gerçek ve imajiner kısımları (M' and M'') gibi dielektrik özellikleri incelendi. N_{ss} profili ayrıca birleşik yüksek - düşük frekans kapasitans yöntemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, elektronik aygıtların performansına etkisi açısından sonuçlar incelenmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Literatürde Schottky yapılar olarak da bilinen MS, bir metal ve bir yarıiletkenin kuvvetli bir şekilde temas hali ile oluşur. Yarıiletken kristallerin iletkenliklerinin ayrıntılı olarak araştırılması karakteristik özelliklerini daha iyi anlayabilmek açısından önem taşımaktadır. Yarıiletken kristal ile temas edilecek metal veya alaşım, mümkün olduğunca en olası küçük direnç altında atomik boyutta temas etmelidir. Temasın temiz, pürüzsüz ve kullanılan metallerin yeterince yüksek saflıkta oluşu kontakın ideal olduğunun göstergelerinden biridir (Card ve Rhoderick, 1971; Rhoderick ve Williams, 1988).

Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale doğru yük alışverişi olur. Bu, termal denge de denilen Fermi seviyeleri eşitlenene kadar devam eder (Rhoderick ve Williams, 1988; Ziel, 1968). Böylece, metal ve yarıiletken arasında kutuplaşan yüklerle beraber bir potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}) meydana gelir. Taşıyıcıların(elektronlar) çoğunlukta olduğu n-tipi yarıiletken tarafında difüzyon yolu ile metalin ön yüzeyine geçerler ve arkasındadeşikler(holler) bırakır. Böylelikle metal ve yarıiletken arasında bir bölge meydana gelir ve burada hareket eden yükler olmadığı için “yalıtkan arayüzey tabakası” olarak adlandırılır. Schottky ve Mott teorisinde potansiyel engele, maddelerin iş fonksiyonlarındaki fark neden olmaktadır (Sharma, 1984).

Metal-yarıiletken Schottky diyotların üretiminde omik ve doğrultucu kontakların seçimi son derece önemlidir. Vakum seviyesi, bir metalin dışarısındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m) olarak adlandırılan kavram, bir elektronu Fermi enerji seviyesinden (E_F) vakum seviyesine uyararak veya bir elektronu metalden bir elektron koparıp serbest hale getirmek için gereken enerji miktarıdır. Vakum- yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri arasında olan enerji miktarı farkı ise yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) olarak adlandırılmaktadır.

Doğrultucu kontak türlerinde, n tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarına bağlı olarak $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda, yük taşıyıcıları bir taraftan diğer tarafa (metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale doğru) daha kolay hareket edebilmektedir.

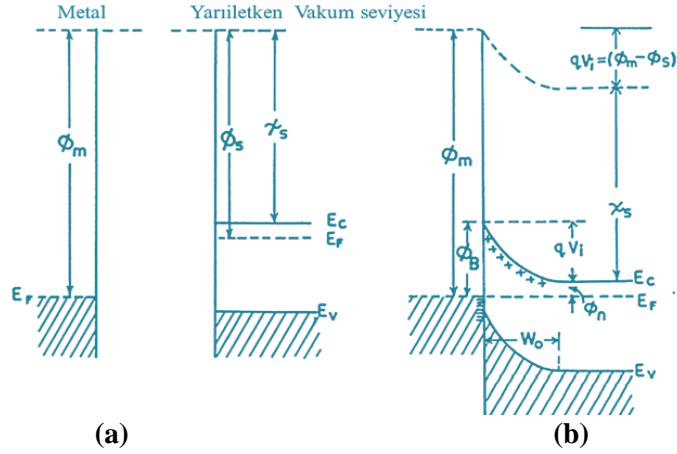
Metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşmayan omik kontak türlerinde ise, n tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarına bağlı olarak $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda, yükler serbest olarak hareket edebilmektedir. Doğrultucu ve omik kontak türlerinin oluşumu n -tipi yarıiletkenler için Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Metal n tipi kontak oluşumu

KONTAK ÇEŞİDİ	n -tipi yarıiletken
Doğrultucu Kontak	$\Phi_m > \Phi_s$
Omik Kontak	$\Phi_m < \Phi_s$

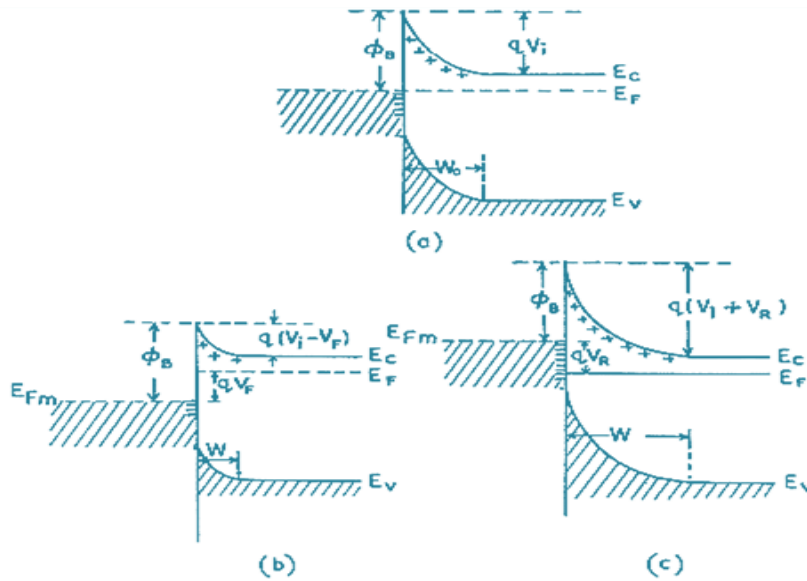
2.1.1 Metal/ n tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Kontaklar

Bir metal bir yarı iletkenle temas edildiğinde, n tipi yapılarda $\Phi_m > \Phi_s$ olması durumunda arayüzeyde bir Schottky bariyeri oluşur. Bu da, elektronların bir yönde kolayca hareketini sağlarken, ters yöndeki hareketlerini zorlaştırır. Zorlaştırmayı her iki maddenin enerji-bant diyagramı ile açıklamak mümkün olmaktadır (Ziel, 1968). Kontak yapılmadan önceki ve kontak oluşturulduktan sonraki durumlar için enerji bant diyagramları Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi n -tipi bir yarıiletkenin E_F seviyesi iletkenlik(conductance) bandına yakındır ve iletkenlik bandının (E_C) alt tarafından itibaren ölçülür.



Şekil 2.1 Metal n tipi Schottkylarda $\Phi_m > \Phi_s$ elektron enerji-bant diyagramı: (a) Metal ile yarıiletken arasında kontak yapılmadan önceki enerji-bant diyagramı (b) Metal ile yarıiletken arasında kontak oluşturulduktan sonraki enerji-bant diyagramı (Sharma, 1984)

Kontak oluşturulduğunda, elektronlar yarıiletkenden metale doğru hareket ederler. Bu esnada yüzeyde iyonize donörler kalır. Bu değişimden sonra Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Yarıiletkenin $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar düşen enerji seviyesine bağlı olarak Şekil 2.1.b'de görüldüğü gibi yüzeyde bir potansiyel engel meydana gelir. Bu engelin yüksekliği metal tarafında ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır. Potansiyel engel tabakasının kalınlığı iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna ve V difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır [36]. Bir metal n tipi yarıiletken diyodun denge altındaki, ters ve doğru beslemdeki enerji bant diagramı Şekil 2.2'de gösterilmektedir (Sze,1981).



Şekil 2.2 Metal n tipi Schottky kontaklarda elektron enerji bant diyagramı: (a) Termal denge altındaki durumu (b) Doğru beslem altındaki durumu (c) Ters beslem altındaki durumu (Sharma, 1984)

İlk olarak Şekil 2.2 (a)'da doğrultucu kontağın termal dengedeki enerji bant diyagramı gösterilmektedir. Bu durumda metal ve yarıiletken içerisinde bazı elektronlar enerji kazanarak, elektron potansiyel engeli geçebilecek büyüklüğe ulaşır. Böylece kontakta eşit miktarda ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer. Şekil 2.2 (b)'de görüldüğü gibi, yarıiletken pozitif bir gerilim uygulandığında engel yüksekliği yarıiletken doğru geçen elektronlar için değişmez ve buna bağlı olarak akım da değişmez. Yarıiletken bakıldığında, iletkenlik bandı qV kadar yükseliş gösterdiğinde metale geçecek elektronlar için de engel yüksekliği qV kadar azalma gösterecektir. Netice olarak metalden yarıiletken doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artış gösterecektir.

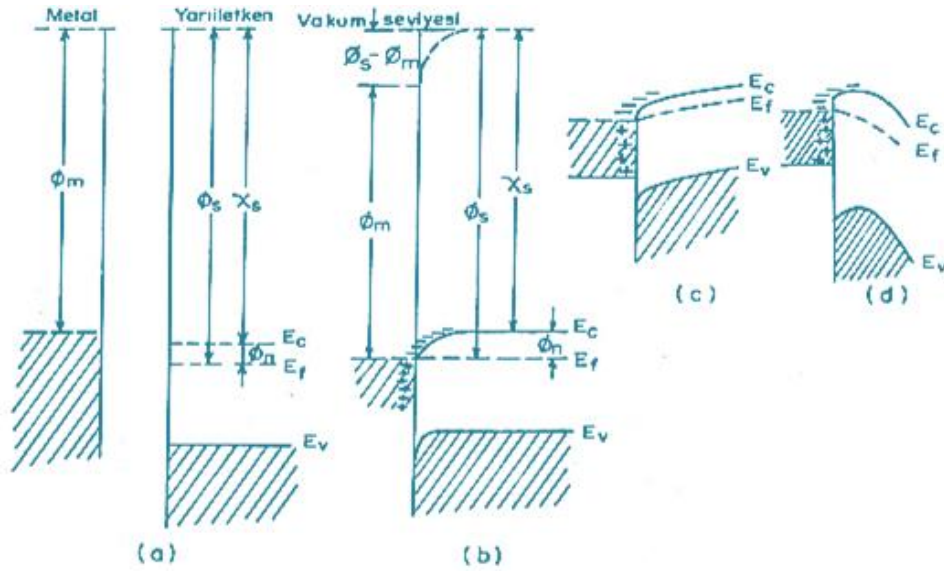
Şekil 2.2 (c)'de, yarıiletken tarafına negatif gerilim uygulandığında tüketim bölgesinin genişliğinin azaldığı görülmektedir. İletkenlik bandı qV kadar alçalır ve metale doğru elektron akımı dengedeki haline göre değersel artış gösterir.

2.1.2 Metal /n tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Metal n tipi yarı iletkenlerde, yarıiletkenin E_F 'si metalinkinden daha yüksek olduğunda omik kontak oluşur (Aydemir, 2009; Li, 2006; Ziel, 1968). Bu kontaklarda yük taşıyıcıların akışında herhangi bir kısıtlama yoktur, iki doğrultuda da elektronların kolayca hareket edebildiği kontaklardır. Metalden yarıiletken ve yarıiletken metale kolayca yük akışı olur. Omik kontakta bir V gerilimi uygulandığında, oluşan potansiyel doğrultucu kontağın aksine sadece Schottky bölgesinde değil, bütün yarıiletken boyunca dağılacaktır. Omik kontak elde edebilmek için n -tipi yarıiletken yüzeyine buharlaştırılan metal, yarıiletkenle alaşım haline getirilir. Daha sonra, yarıiletkenin yüzeyinde bir n^+ tabakası oluşturmak için belirli bir sıcaklıkla tavllanır. Tavlamayla metalin difüze olduğu tabaka, yarıiletken gövdeye göre elektron bakımından daha zengindir (Sze ve Kwok, 2007).

Termal dengede, yarı iletkende hiçbir tükenme bölgesinin oluşmadığı ve her iki tarafta elektron akışına engel olmadığı açıktır ve temas halinden önceki enerji-bant diyagramı Şekil 2.3 (a)'da gösterilmiştir. Ayrıca net elektron akışı ve dolayısıyla net akım akışı yoktur. Metal ve yarı iletken arasında yakın bir temas kurulduktan sonra, metal

üzerindeki elektronlar yarı iletkenin iletim bandına akar. Bu elektronlar sınır bölgesinin yakınında bir yüzey yükü olarak birikir ve metalin sınırında pozitif yükler bırakırlar. Yarıiletken kısmına doğru akarak negatif yüzey yükü oluşturur. Bu geçişler sebebi ile omik kontaklara enjeksiyon kontakları da denir (Ziel, 1968). Sonuçta temas bölgesinde dipol tabakası meydana gelir ve Şekil 2.3(b)'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Metal n tipi yarıiletken omik kontakta ait $\phi_m < \phi_s$ durumundaki enerji bant diyagramı (a) Birbirinden ayrı metal ve yarıiletken; (b) Termal dengede kontak (c) Yarıiletken negatif beslem altında (d) Yarıiletken pozitif beslem altında (Sharma, 1984).

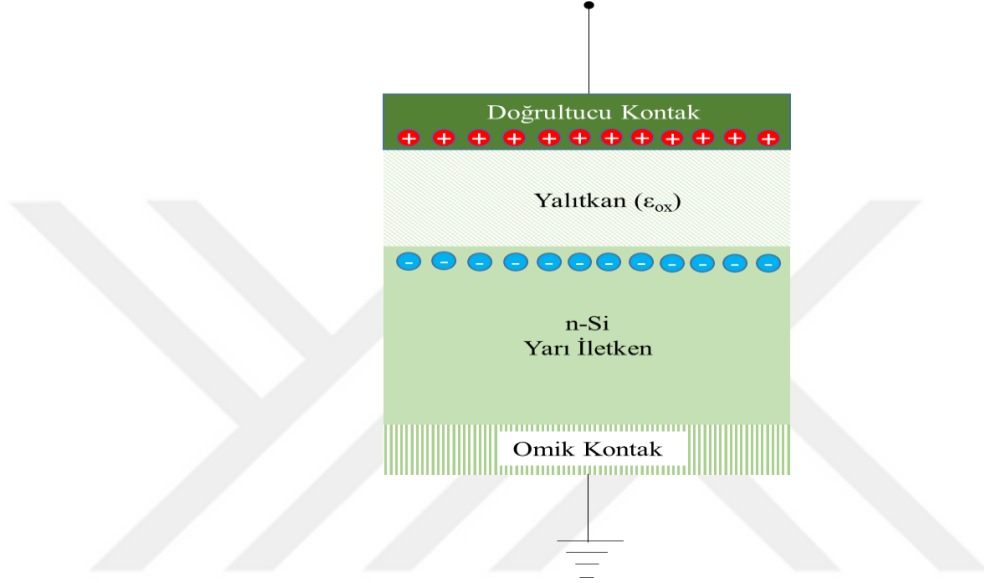
2.2 Metal-Oksit/Yalıtkan-Yarıiletken (MOS) Yapısı

Metal-oksit/yalıtkan-yarıiletken (MOS) yapıları oluşturmak için, yarıiletken alt tabaka oksit/yalıtkan malzeme ile kaplanır ve üzerine doğrultucu metal kontak yerleştirilir. Yarıiletkenin diğer yüzeyine ise ikinci bir metal katman olarak bir omik kontak kaplanır. Bu şekilde MOS yapıları oluşturulur (Card ve Rhoderick, 1971; Neamen, 1997).

Yarıiletken cihazların güvenilirlik ve kararlılık ile ilgili karşılaşılan sorunların çoğu, yüzey koşullarıyla yakından ilişkilidir. MOS kapasitörler sayesinde yüzey fiziğinin anlaşılması, cihaz işlemleri için büyük önem taşır. Doğal yolla veya deneysel üretilen bir yalıtkan oksit tabaka sayesinde, metal yarıiletkenlerden ayrılır. MOS yapılarında önemli bir özellik olan yalıtkan tabaka sayesinde, metal ve yarıiletken arasında yük

akışı düzenlenir. Diğer bir önemli özelliği ise dielektrik özelliği göstermesidir. Bu özelliği ile de paralel levhalı kondansatörlere benzemektedir (Cowley ve Sze, 1965).

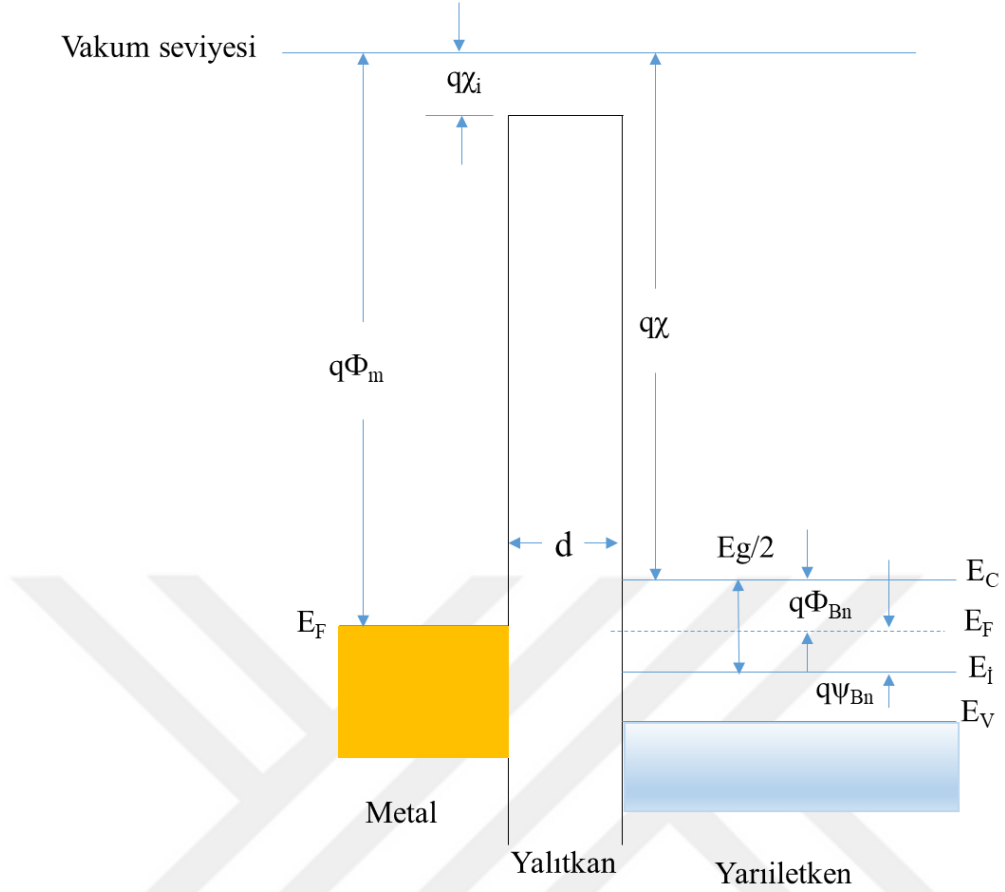
Bir metal oksit/yalıtkan yarıiletken yapının şema gösterimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi d_{ox} yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı, ϵ_{ox} yalıtkan oksit tabakanın dielektrik sabitidir.



Şekil 2.4 Bir metal oksit/yalıtkan yarıiletken yapının şema gösterimi

2.2.1 İdeal MOS Yapısı

Şekil 2.5'te ideal olan bir MOS yapısı için yani $V=0$ gerilimine sahip enerji bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 İdeal olan bir MOS yapı için n tipi yarıiletken enerji bant diyagramı (Sze ve Kwok,2007)

İdeal olan bu tip Schottky kontaklar çok küçük değerde R_s ve N_{ss} 'ye ve çok yüksek ($\sim M\Omega$) R_{sh} 'ye sahiptir ve idealite faktörü 1 olarak kabul edilir (Nicollian ve Brews, 1982; Rhoderick ve Williams, 1988; Sze, 1981).

İdeal bir MOS yapısında olması gereken özellikler şöyle sıralanabilir (Cowley ve Sze, 1965; Gökçen, 2005; Nicollian ve Brews, 1982):

1) Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıya sıfır beslem yani herhangi bir gerilim uygulanmadığı durumlarda, Φ_m ve Φ_s arasındaki fark sıfırdır ($\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s = 0$) ve n tipi için şu şekilde verilir (Sze,1981):

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \Phi_m - (\chi + \Phi_n) \quad (2.1)$$

Bu formülde, χ elektron ilgisi, bir elektronun vakum seviyesi ile yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı arasındaki enerji farkıdır. ψ_B ise $E_F - E_i$ farkını, E_g yarıiletkenin yasak enerji bant aralığını ifade eder.

2) D.C. gerilim uygulandığında, yalıtkan içerisinde yük geçişi gerçekleşmez yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.

3) Herhangi bir gerilim uygulandığında, yarıiletkene ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde oluşan yükler eşit miktarda olmakla birlikte zıt yönlüdürler. Yalıtkanın içinde ve yarıiletkenle olan arayüzeyinde tuzak, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Bununla birlikte, arayüzey durumları ve arayüzey yükleri de bulunmaz.

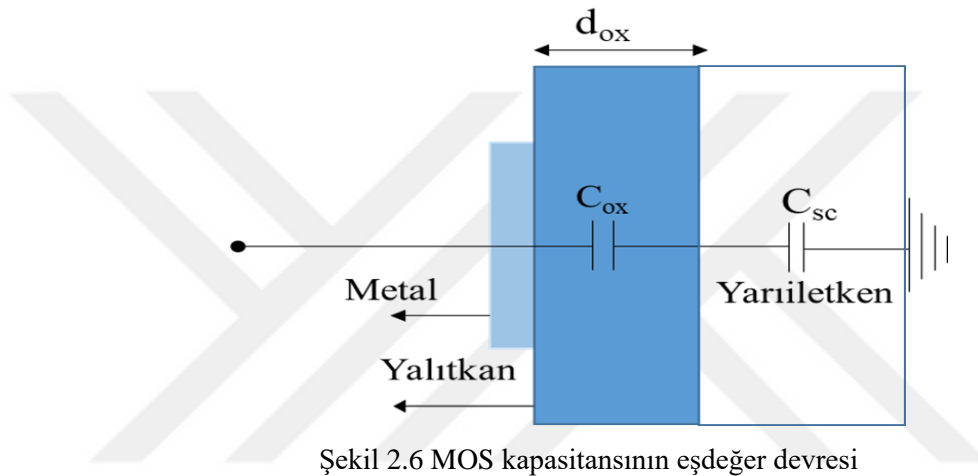
Yarıiletkenlerde azınlık ve çoğunluk yük taşıyıcıları katkı atomunun cinsine göre belirlenir. Si kristalinin n veya p tipinde oluşması hangi element ile katkılındığına bağlıdır. Bor (B), alüminyum (Al), galyum (Ga) gibi 3A grubu elementlerinden herhangi biri ile katkılanırsa sonucunda p tipinde oluşur. P tipi silikonda, çoğunluk yük taşıyıcıları holler olurken, azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır. Azot (N), Fosfor (F), Arsenik (As) gibi 5A grubu elementlerinden herhangi biri ile katkılanırsa sonucunda n tipinde oluşur. Burada ise çoğunluğu elektronlar oluştururken, azınlığı ise holler oluşturur.

İdeal bir MOS yapıdaki metal elektroda gerilim uygulandığında yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az olmakla birlikte uygulanan gerilime bağlıdır. Arayüzeyde bantların bükülmesine neden olan uzay yükü (Q_{sc}) oluşur. Termal denge durumunda oluşan uzay yük yoğunluğu potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende Yarıiletkende metallerdeki göre serbest olmayan yükler vardır ve bu yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcıları olarak adlandırılır. Uygulanan gerilime bağlı olarak yük, uzay yükü bölgesinde veya arayüzey bölgesinde yığılmalara neden olur. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da oksit arayüzey tabakası üzerine düşer. Buna göre, MOS yapıya uygulanan gerilim için:

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.2)$$

denklemini yazılabilir. Bu denklemde V_{ox} oksit arayüzey tabakasındaki gerilim, ψ_s ise arayüzeydeki bant gerilimidir (Cowley ve Sze, 1965).

Yarıiletken ile metal katmanlar arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı bir kapasitans oluşmaktadır. Oluşan bu kapasitansa MOS kapasitansı ismi verilmektedir. MOS kapasitansı arayüzeyin dielektrik sabitine bağlı olmakla birlikte özelliklerini, metal ile yarıiletken arasında bulunan oksit ve oksit-yarıiletkenin arayüzeyi belirlemektedir (Tataroğlu, 2006).



Şekil 2.6 MOS kapasitansının eşdeğer devresi

Yukarıdaki Şekil 2.6'da verilen MOS kapasitansının eşdeğer devresinin hesaplanması ile oluşan toplam kapasitans değeri Denklem 2.3'te belirtilmiştir (Nicollian ve Brews, 1982).

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc}} \quad (2.3)$$

Burada, C_{sc} uzay yükü kapasitansını ifade ederken, C_{ox} yalıtkan tabakanın kapasitansını ifade eder. Metal-yalıtkan-yarıiletken maddenin kapasitans eşdeğeri, bu denklemde de ifade edildiği gibi C_{ox} ile C_{sc} 'nin seri bağlanmasıyla meydana gelir. C_{ox} hesabı Denklem 2.4'de gösterilmektedir (Lu, 2006; Rhoderick ve wiilliams, 1988; Sze,1981):

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.4)$$

Eşitlikteki,

ϵ_{ox} : Yalıtkan levhanın dielektrik sabitidir.

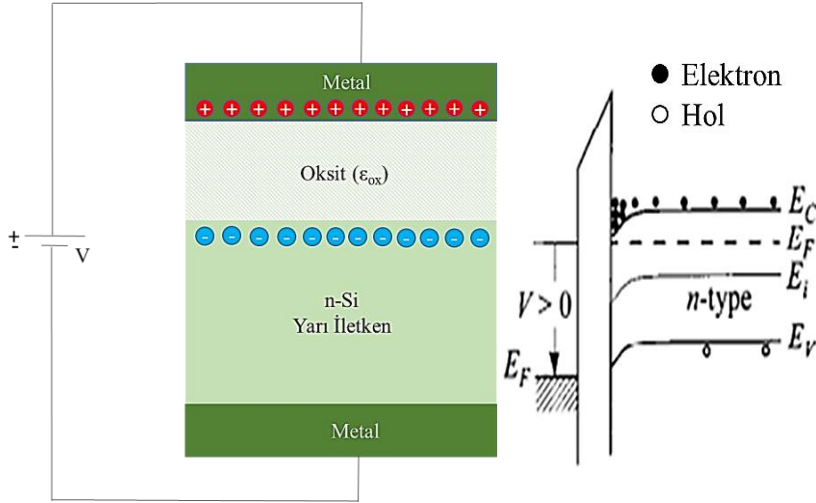
d_{ox} : Arayüzeydeki levhanın kalınlığıdır.

A_{ox} : Doğrultucu kontağın yüzey alanıdır.

Tüm bu ifadeler gerilime bağlı olmadıklarından, C_{ox} değeri buna bağlı olarak uygulanan gerilimle değişmez. Böylelikle, MOS yapının kapasitansındaki değişiminde yalnızca C_{sc} etkili olur. n tipinde MOS yapının C - V grafiği V_G 'ye bağlı olarak üç farklı bölgede incelenir. İdeal bir MOS kapasitörünün uygulana gerilimin büyüklüğüne göre yarıiletken yüzeyinde temel olarak üç durum bulunabilir (Cowley ve Sze, 1965; Neamen, 1997; Nicollian ve Brews, 1982).

2.2.1.1 Yığılım bölgesi

Herhangi bir gerilim altında olmadan, n tipi bir yarıiletkende yapısal olarak elektronlar çoğunluktadır. MOS yapıda, metal ile yarıiletken arasında pozitif bir gerilim uyguladığımızda yani $V_G > 0$ durumunda, arayüzey içerisinde bir elektrik alanı oluşur. Metale uygulanan pozitif gerilimle birlikte Φ_m seviye olarak aşağı iner ve değersel artış gösterir. Bu alan sayesinde, yarıiletken yüzeyindeki elektronları kendisine doğru çekecek, holleri itecektir. Bu prensibe göre, holler yarıiletkenin arayüzeyine doğru çekilecek, oksit-yarıiletken arayüzeyindeki iletkenlik(conductance) bandında ise daha fazla elektronlar birikecektir (Cooke, 1990; Gökçen, 2005; Nicollian ve Brews, 1982). Arayüzeyde birikme olması nedeni ile “yığılım” adı verilir. Buna bağlı olarak, Şekil 2.7 (a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Sonuç olarak, C_{sc} sonsuza gider ve ölçülen kapasitans C , oksit tabakanın kapasitansı C_{ox} olmaktadır (Kaya, 2010).



Şekil 2.7 MOS yapısının yığılım durumundaki (a) Yük dağılımı (b) Enerji-bant diyagramı (Ahiboz,2017; Sze ve Kwok, 2007)

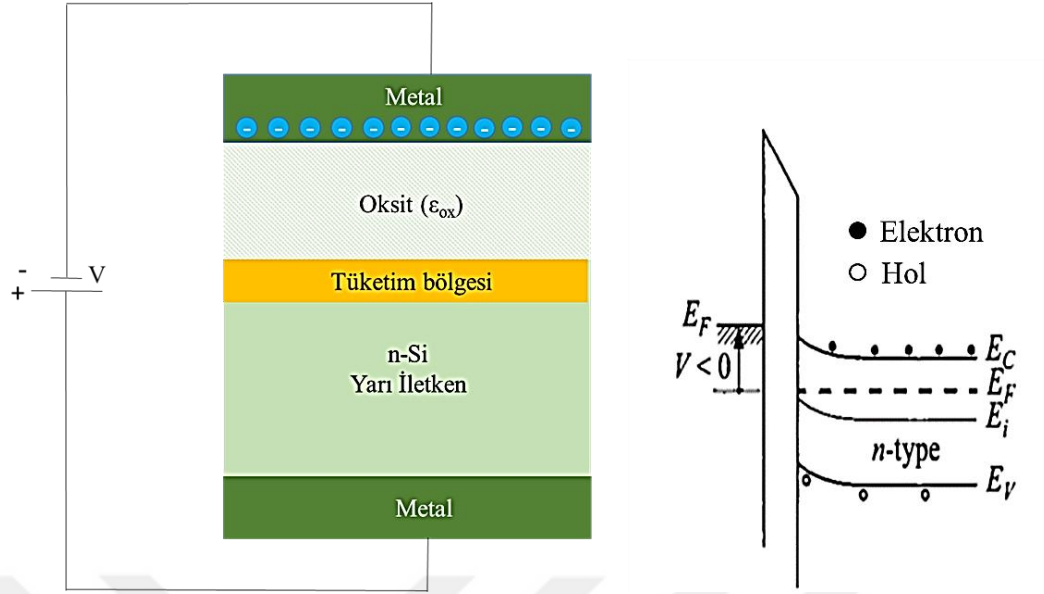
2.2.1.2 Tüketim bölgesi

MOS yapıda, metal ile yarıiletken arasında negatif bir gerilim uyguladığımızda yani $V_G < 0$ durumunda, arayüzey içerisinde elektrik alan oluşur. Metale elektronlar gönderildiğinde Φ_m seviye olarak yukarı çıkar ve değersel azalış gösterir. Elektrik alan sayesinde elektronları iterek yüzeyden uzaklaştırır. Sonuç olarak bu bölgede pozitif yükler(holler) oluşur.

Böylece, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğu yüzeydeki elektron yoğunluğuna oranla fazlaşır ve bunun sonucunda E_C ve E_V aşağı yönde bükülmeye başlar. Uygulanan gerilimle değişen tüketim tabakasının (W_D) genişliği kadar bir bölgede, elektronların sayısının azalmasına bağlı olarak yarıiletken yüzeyinde bir tüketim bölgesi meydana gelir. ϵ_s dielektrik sabitine sahip yarıiletkenin tüketim bölgesinin genişliği,

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.5)$$

bu denklemlerle hesaplanır.

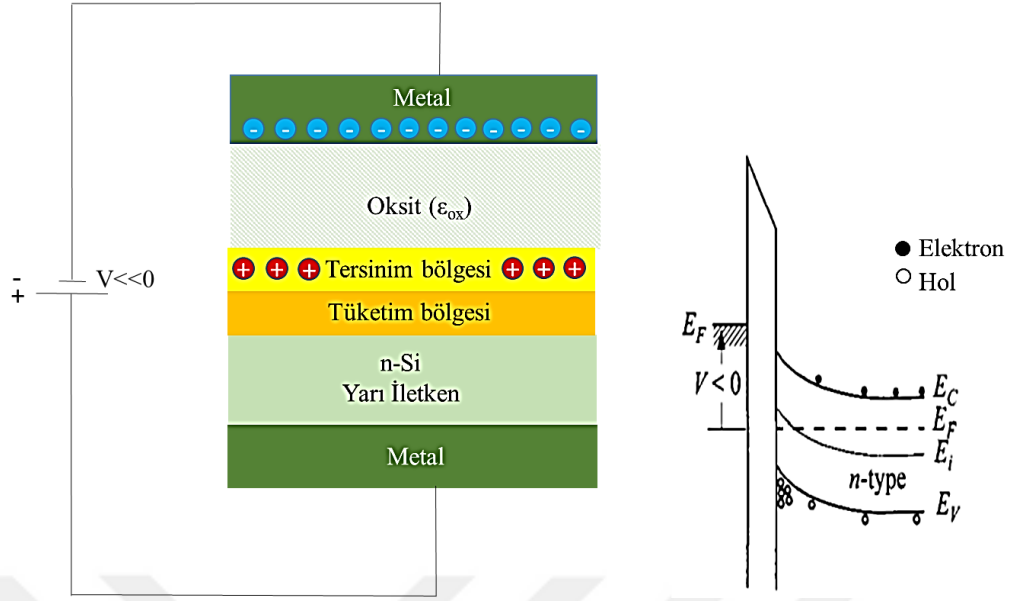


Şekil 2.8 MOS yapısının tüketim durumundaki (a) Yük dağılımı (b) Enerji-bant diyagramı (Ahiboz, 2017; Sze ve Kwok, 2007)

2.2.1.3 Tersinim bölgesi

MOS yapıda, metal ile yarıiletken arasında çok çok küçük negatif bir gerilim uyguladığımızda yani $V_G \ll 0$ durumunda, arayüzey içerisinde elektrik alan oluşur. Uygulanan çok çok küçük negatif gerilimin etkisiyle kendisine doğru daha fazla sayıda holleri çekecektir. Buna bağlı olarak, fermi enerji seviyesi (E_F) saf fermi enerji seviyesinin (E_i) altına düşer ve yarıiletken yüzeyinde holler artmaya başlar. Ardından yarıiletken yüzeyi n tipi değil p tipi davranır. Elektronların AC sinyalini takip edebilme durumuna göre MOS kapasitansı değişir. Küçük frekans değerlerinde takip edebilir (Sze ve Kwok,2007).

AC sinyalini orta frekans değerlerinde takip edebilmesi yavaşlayacağından dolayı orta frekans eğrileri görülür. Sinyal yüksek frekanslarda takip edilemeyeceğinden kapasitans C_{min} 'de kalır (Sze ve Kwok,2007).



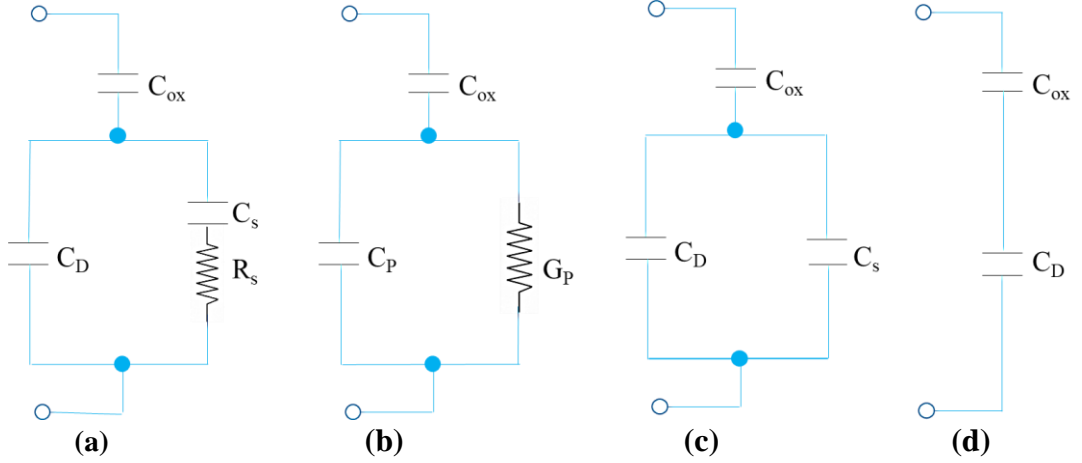
Şekil 2.9 MOS yapısının tersinim durumundaki (a)Yük dağılımı (b)Enerji-bant diyagramı (Ahiboz, 2017; Sze ve Kwok, 2007)

2.3 Yüksek-Düşük Frekans Kapasitans Yöntemi

Hem yüksek hem de düşük frekans kapasitansını birleştiren bu yöntem Castagne ve Vapaille tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin avantajı, karşılaştırma için herhangi bir teorik hesaplama gerektirmemesidir. Düzgün olmayan bir katkılama profili için böyle bir hesaplama karmaşık olup tercih edilmemelidir (Castagné, 1971).

Bir gerilim uygulandığında, Fermi seviyesi arayüz-tuzak seviyelerine göre aşağı veya yukarı yönde hareket eder ve arayüz tuzaklarında bir yük değişimi meydana gelir. Bu yük değişikliği MOS kapasitansını etkiler ve ideal MOS eğrisini değiştirir. Arayüz-tuzak etkisini içeren temel eşdeğer devre Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Şekilde C_{ox} ve C_D sırasıyla yalıtkanın kapasitansı ve yarıiletkenin tükenme bölgesindeki kapasitansıdır.

C_s ve R_s arayüzey tuzakları ile ilişkili kapasitans ve dirençtir ve bu nedenle aynı zamanda enerjinin fonksiyonlarıdır. $C_s R_s$ arayüz tuzaklarının frekans davranışını belirleyen arayüz-tuzak ömrü τ olarak tanımlanır. Şekil 2.10 (a)'daki eşdeğer devredeki paralel kol, frekansa bağlı kapasitans C_P ona paralel bağlı olan frekansa bağlı iletkenlik G_P 'ye dönüşür.



Şekil 2.10 (a) (b) Arayüzey tuzaklarını, C_s ve R_s içeren eşdeğer devre (c) Düşük frekans limiti (d) Yüksek frekans limiti (Sze ve Kwok,2007)

Düşük frekans limitinde, R_s sıfıra ayarlanmıştır ve C_D , C_s 'ye paraleldir. Yüksek frekans limitinde ise C_s - R_s kolu açık devre olup yok sayılmaktadır. Fiziksel olarak bu, tuzakların sinyale cevap verebilecek kadar hızlı olmadığı anlamına gelmektedir. Bu iki durum için düşük frekans C_{LF} ve yüksek frekans kapasitansları C_{HF} sırasıyla, eşdeğer devreler kendi içlerinde çözüldüğünde aşağıdaki denklemler elde edilir:(Sze ve Kwok,2007).

$$C_{LF} = \frac{C_i (C_D + C_s)}{C_i + C_D + C_s} \quad (2.6)$$

$$C_{LF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.7)$$

Bu denklemler ve eşdeğer devreler, daha sonra tartışılacak olan arayüz tuzaklarının ölçümünde faydalı olacaktır. Bu denklemlerden düşük frekans-yüksek frekans metodunu şu şekilde ifade etmek mümkündür (Sze ve Kwok, 2007):

$$C_s = \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - C_D$$

$$= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \quad (2.8)$$

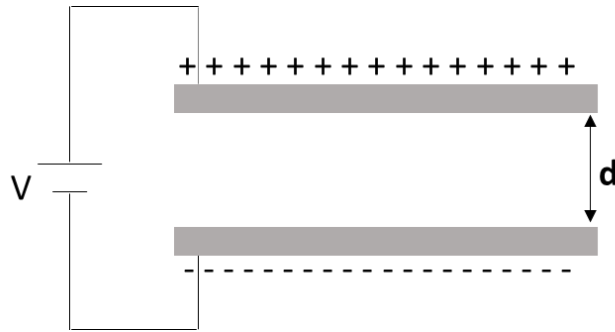
2.4 Dielektrik Özellikleri

Elektrik akımı taşıyabilecek serbest elektronlara sahip olmayan, bir elektrik alanıyla enerjilenme özelliği taşıyan maddelere dielektrik maddeler denir. Bu özellikleri ile iletkenlerden ayrılmaktadırlar. Elektrik alan içerisinde dielektrik bir madde yerleştirildiğinde, oluşan kuvvet altında pozitif ve negatif yükler zıt yönlerde hareket edeceklerdir. Buna bağlı olarak dielektrik, elektriksel dipol moment kazanır (Tareev, 1979). Elektrostatik kuvvet altında pozitif ve negatif yükler yer değiştirecektir. Sonuç olarak, net bir yönelmenin meydana geldiği denge kutuplanması elde edilir. Dielektriklerin en önemli özelliği bu şekilde bir elektrik alanın etkisi altında kutuplanabilmesidir.

Dielektrik özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan parametrelerin başında dielektrik sabiti ve kayıp açısı faktörü gelmektedir. Pek çok madde için bu değerler elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak frekansa bağlı olunan durumlarda elektrik alanın etkisindedir (Tareev, 1979).

2.4.1 Dielektriksiz Paralel Plakalı Kondansatör

Kondansatörün levhaları arası boşken görülen durum Şekil 2.11.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Dielektriksiz paralel levhalı kondansatör

Kondansatörün paralel levhaları arasında boşluk olduğunda herhangi bir yük geçişinden bahsedilemez. Levhaların uçlarına üreteç bağlandığında kondansatör yüklenir. Levhalar zıt olarak $+Q$ ve $-Q$ yüklerle yüklenir.

Levhalar arası boşken, arada meydana gelen boşluğun elektrik alan şiddeti, (Oral,1983)

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

şeklinde hesaplanır.

Burada, ϵ_0 boşluğun geçirgenlik sabiti olup değeri $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ 'dir. σ , kondansatörün bir levhası üzerinde birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğu miktarıdır. Levhalar arasında oluşan potansiyel fark,

$$V_0 = E_0 \cdot d \quad (2.10)$$

şeklinde hesaplanır. Burada d , levhalar arasındaki uzaklıktır. Toplam yük miktarı σA olan paralel plakalı kondansatörün sığası,

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} = \frac{E_0 A}{d} \quad (2.11)$$

olarak ifade edilir. Aynı zamanda kondansatörün levhaları arasındaki bölge için elektrik yerdeğiştirme olarak da isimlendirilir.

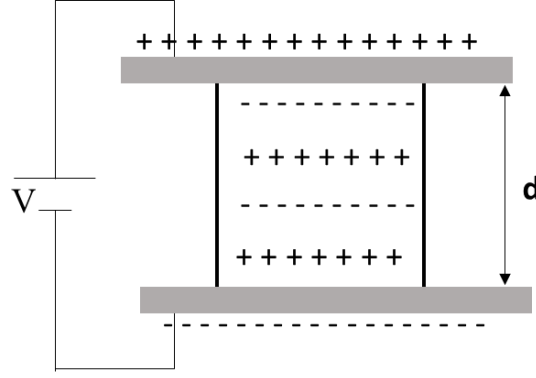
Elektrik yerdeğiştirme,

$$D = \sigma = E_0 \cdot \epsilon_0 \quad (2.12)$$

şeklinde hesaplanır (Fröhlich, 1958; Oral, 1983).

2.4.2 Dielektrikli Paralel Levhalı Kondansatör

Kondansatörün levhaları arasına dielektrik madde konulduğunda görülen durum Şekil 2.12'de gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Dielektrikli paralel levhalı kondansatör

Plakalar arasında dielektrik madde yokken kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 ve elektrik alanı E_0 olsun.

$$V = V_0 / \epsilon'$$

Kondansatörün levhaları arası dielektrik maddeyle tamamen doldurulduğunda, Q yük miktarında bir değişim olmadığından, sığada artış gözlenir ve bu artış ϵ' çarpanı kadardır. Bu çarpana dielektrik sabiti denir. Birden büyük olmakla birlikte bu sabit boşluğun geçirgenlik sabiti (ϵ_0) cinsinden ifade edilir.

Elektrik alan,

$$E = \frac{\epsilon_0}{\epsilon'} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanır. Kondansatör üzerindeki Q yükü değişmez ve sığanın değeri ise ϵ' çarpanı kadar artmaktadır ve

$$C = \frac{Q_0}{V} = \frac{\epsilon' Q_0}{V_0} = \epsilon' C_0 \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanır. Böylece levhalar arasındaki bölge dielektrik madde ile tamamen doldurulduğunda sığa,

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (2.15)$$

şeklinde hesaplanabilir. Plakalar arasına yerleştirilen dielektrik materyelin dielektrik sabiti ne kadar yüksekse, sığa o ölçüde artacaktır.

2.4.3 Dielektrik Kutuplanma

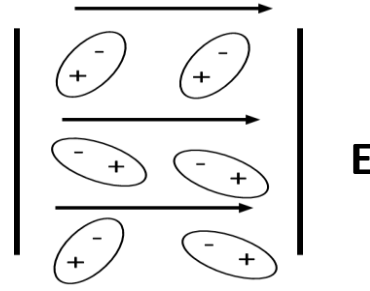
Dielektrikler, iletkenlik sağlayacak herhangi bir serbest taşıyıcıya sahip değildir. Elektrostatik kuvvet altında zıt yüklerin farklı yönlerde küçük yer değiştirmeleri oluşabilecek tek harekettir. Yer değiştirmeler dipol momentlerin oluşumuna neden olur. Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik yerleştirildiğinde potansiyeli azalır ve buna bağlı olarak elektrik alan şiddeti de azalır. Böylelikle birim yüzeydeki net yük miktarı da azalma gösterir. Bu durum, yüzeyde + ve - işaretli yüklerin oluşması ile mümkün olmaktadır. Elektrik alan içerisine bir iletken yerleştirildiği zaman, alan tarafından uygulanan etkisi ile yer değiştirirler ve etki ile meydana gelen yüklerin elektrik alanı elektrostatik denge kurulduğunda dış alanı nötrleştirir yani iletken içinde elektrik alan sıfır olur (Oral, 1983; Tareev, 1979).

Bazı dielektrikler dipol(polar) içerir. + ve - işaretli yükler çok az miktarda birbirlerinden ayrılmakla birlikte N_2O örnek verilebilir. Pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi ile elektronların ağırlık merkezinin çakıştığı moleküller ise polar olmayan moleküllerdir. H_2 gibi.

Kondansatörün levhaları arasına dielektrik madde konulduğunda, dielektriğin levhalara denk gelen yüzeylerinde yükler oluşur.

Bir elektrik alan içerisine dielektrik madde yerleştirildiğinde, bir yük hareketi gerçekleşmez ve elektronlar çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylelikle dielektrik kutuplanır. Elektrostatik kuvvet etkisi kalktığında atomlar normal hallerine dönmekle beraber dipoller kaybolur (Oral, 1983; Tareev, 1979).

Polar olmayan moleküller kutuplandığında, yükleri geri çağıran kuvvetler meydana gelir. Molekülden moleküle göre değişim gösteren bu kuvvetler, farklı kutuplanmalara neden olur (Oral, 1983). Dıştan uygulanan elektrik alanın kuvveti bu kuvvetlere eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılmaya devam eder.



Şekil 2.13 Elektrostatik kuvvet altında dipollerin yönelimleri

Dipoller dış elektrik alana maruz kalmadığında rastgele yönelme gösterirler. P dipol momentleri dış elektrik alan etkisinde kaldıklarında ise paralel şekilde yönelme gösterirler. Bu durum Şekil 2.13’de gösterilmektedir (Tareev, 1979; Yücedağ, 2007). Kısmen yönelen bu dipoller, zıt yönlü bir iç elektrik alan oluşturur. Eğer dielektriğin molekülleri daimi dipol momentine sahip değilse dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.

2.4.4 Kutuplanma Yükleri

Kondansatörün paralel levhaları arasına dielektrik malzeme konularak oluşturulan kutuplanma sonucunda dielektrik malzemenin tamamı, yüksüz hale gelerek polarize olur. Net oluşan kuvvet dielektriğin levhalara bakan yüzeylerinde zıt işaretli yükler oluşturacaktır. Dielektrik bütününde yüksüz olacağı için, yüzeydeki + ve - yükler eşit olmalıdır. Yüzeydeki bu yükler çok ince tabaka içerisinde olup yakınındaki atomların etkisi altındadır. Dielektrik maddenin yüzeyine iletken bir levha dokundurduğunda iletkenin temas ettiği yüzeyden yükler kalkmayacaktır. Bu sebeple bağlı yükler olarak da isimlendirilir. İletkende serbest yükler bulunmakta olup, polarize bir yalıtkanda ise oluşan yükler bağlı yüklerdir (Oral, 1983; Tareev, 1979).

2.4.5 Dielektrik Sabitinin Hesaplanması

Dielektrikler, uygulanan elektrostatik kuvvete karşı duyarlıdır. Bu, dielektriklerin elektriksel özelliklerini incelemek için önemli bir özelliğidir. Paralel levhali kondansatör dielektrik madde ile doldurularak yapısının admittans ile karakterizasyonu sağlanır.

Admittans,

$$Y = G + i\omega C \quad (2.16)$$

şeklinde hesaplanır (Sze, 1981; Tataroğlu, 2004; Wert ve Thomson, 1970). Bu eşitlikte, ω açısal frekanstır. Aynı zamanda admittans,

$$Y = G + i\omega(C_0 \mathcal{E}^*) \quad (2.17)$$

şeklinde de ifade edilebilir. C_0 kondansatörün plakalar arasında dielektrik madde olmadığındaki sığa, \mathcal{E}^* ise dielektrik maddenin boşluktaki bağıl dielektrik sabitidir

$$\mathcal{E}^* = \mathcal{E}' - i \mathcal{E}'' \quad (2.18)$$

ve şeklinde hesaplanır (Wert ve Thomson, 1970; Daniel, 1967). Burada \mathcal{E}' depolanan enerjiyi, \mathcal{E}'' kaybolan enerjiyi belirtir. Denklem 2.16 kullanılarak denklem 2.17'de yerine konulduğunda,

$$Y = G + i\omega C_0(\mathcal{E}' - i \mathcal{E}'') \quad (2.19)$$

$$Y = (G + \omega \mathcal{E}'' C_0) + i\omega C_0 \mathcal{E}' \quad (2.20)$$

bu eşitlikler elde edilir (Daniel, 1967; Von Hippel, 1959). Y 'nin sanal ve gerçel kısımları Denklem 2.19'da gösterilmiştir. Y 'nin tersi alındığında empedans elde edilmiş olur ve $Z = \frac{1}{Y}$ 'dir. Denklemde Y 'nin yerine Denklem 2.15 yazıldığında,

$$Z = \frac{1}{i\omega C + G} = \frac{1}{i\omega C_0 \mathcal{E}^*} \quad (2.21)$$

şekline dönüşür.

Denklem 2.20'de, Denklem 2.17'deki ifade yerine yazıldığında gerçel ile sanal kısmın ifadeleri,

$$\mathcal{E}' = \frac{C}{C_0} \quad \text{ve} \quad \mathcal{E}'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (2.22)$$

olarak elde edilir (Smyth, 1955; Tataroğlu, 2004; Wert ve Thomson, 1970).

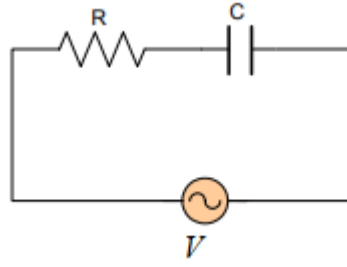
Dielektrik maddeye ($V=V_0 \cos\omega t$) şeklinde AC gerilimi uygulandığında, numune üzerinden geçen akım,

$$I=(\mathcal{E}^*C) \frac{dV}{dt} \quad (2.23)$$

şeklinindedir. şekil 2.14'teki gibi Bir RC (resistor-capacitor) eşdeğer devresi ile eşleştirildiğinde,

$$I = I_R + iI_C \quad (2.24)$$

şeklinde hesaplanır.



şekil 2.14 RC eşdeğer devresi

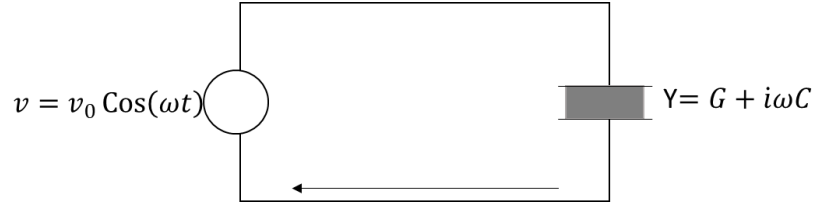
Gerçel bileşen olarak isimlendirilen I_R , gerilimle aynı fazdadır. İmajiner bileşen olarak isimlendirilen I_C ise gerilimle farklı fazdadır. Polarize dielektrikler için, D elektrik yerdeğiştirme veya elektrik akı yoğunluğu olup levhalar arasındaki toplam akım yoğunluğu,

$$J = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt}(E\mathcal{E}' - iE\mathcal{E}'') = (i\omega\mathcal{E}' + \omega\mathcal{E}'') E \quad (2.25)$$

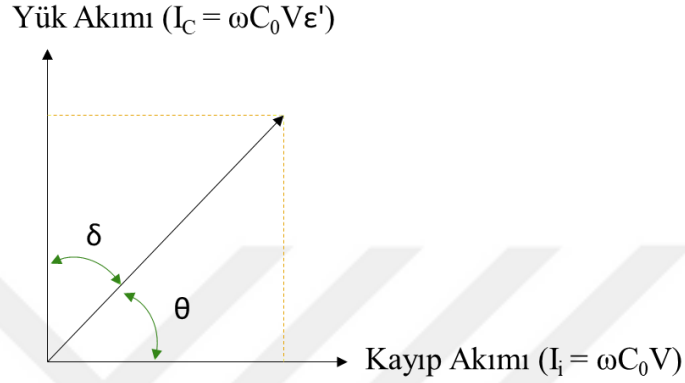
elde edilir. Böylece ziletkenlik,

$$\sigma = \frac{J}{E} = i\omega\mathcal{E}' + \omega\mathcal{E}'' \quad (2.26)$$

şeklinde hesaplanır.



Şekil 2.15 Dielektrikli bir kondansatördeki AC akım



Şekil 2.16 Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_C) ile kayıp akımı (I_i) arasındaki ilişki

Paralel plakaları arasında dielektrik malzeme olan kondansatörden geçen akım grafiği Şekil 2.12' de verilmiştir. Burada δ kayıp açısı faktörünü, θ güç faktörünü ifade eder. δ terimi, elektrik alan ile farklı faza sahip olan elektrik yerdeğiştirmesi arasındaki faz kaymasıdır. Numune üzerindeki AC gerilim etkisi nedeniyle meydana gelir. Grafikteki $\tan \delta$, numunede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarıdır. Ölçüm esnasında, akımın gerçel ve sanal bileşenlerinin oranıdır.

$$\tan \delta = \left| \frac{I_R}{I_C} \right| = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.27)$$

şeklinde hesaplanır (Daniel, 1967; Fröhlich, 1958; Hippel, 1954).

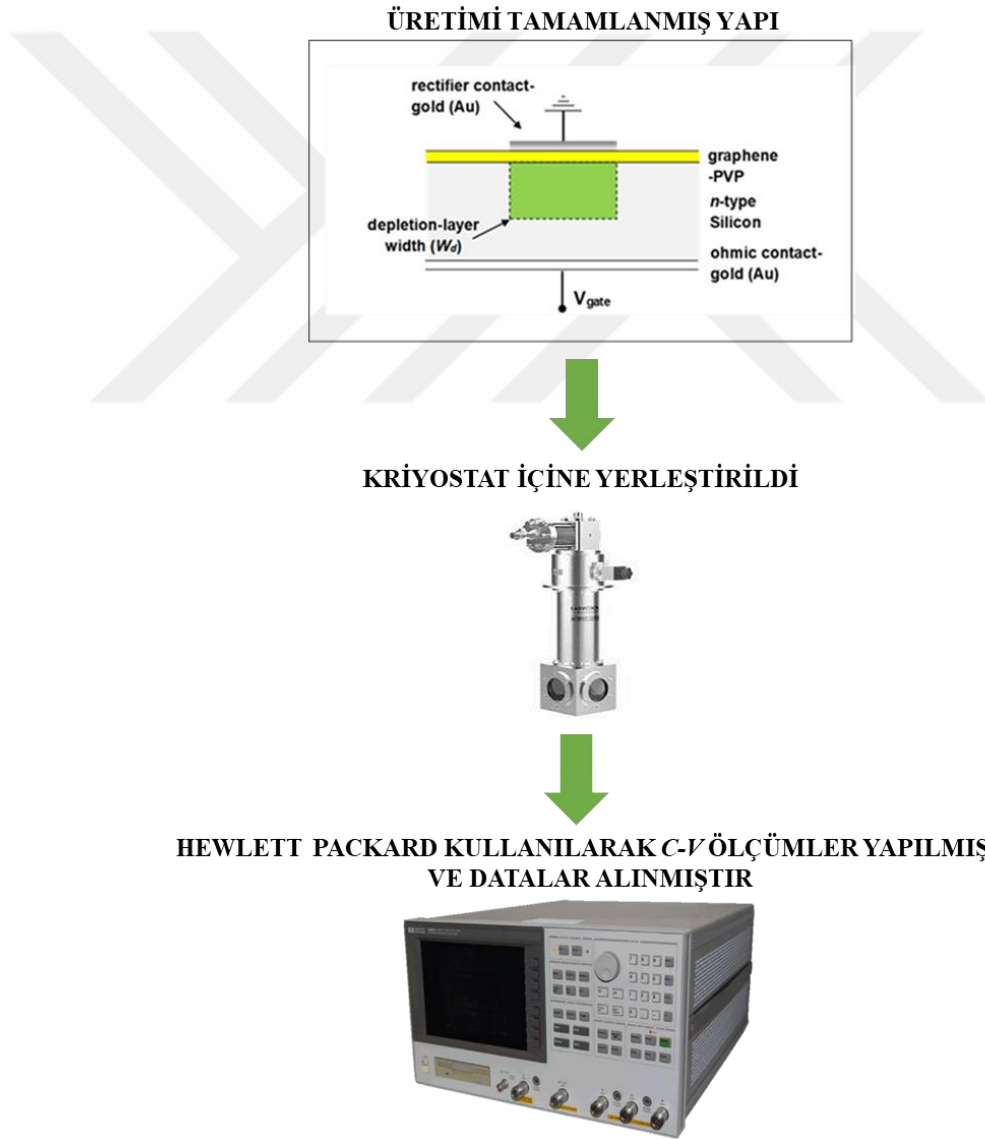
3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Schottky Heteroeklem Yapısının Hazırlanması

İlk olarak polivinil pirolidon (PVP), silikon substrat ve grafen tozu hammadde olarak satın alındı. Au / *n*-Si metal yarı iletkeni, Au ve *n*-Si arasında bir grafen-PVP ara katmanı geliştirilerek hazırlandı. Au / grafen-PVP / *n*-Si tipi Schottky heteroeklem yapının üretim işlemlerinden önce grafen malzemesini sentezlemek için PVP ve deiyonize (DI) su kullanılmıştır. Toz karışımlarını 10 dakika DI suda dağıtmak için ultrasonikasyon yöntemi kullanıldı. Tipik olarak, suda dağılmış grafen-PVP malzemeleri, bir ultrasonik banyo kullanılarak ultrasonik ışınlama ile hazırlanır. Işınlama 10 dakika sürdü. Bundan sonra, *n*-katkılı (*n*-Si) tabaka, yüzey boyunca doğal oksit tabakalarını çıkarmak için 40 saniye boyunca amonyum peroksit içerisine batırıldı. Ardından asit çözeltilerine daldırıldı. Bu işlem ($H_2SO_4: H_2O_2: H_2O = 3: 1: 1$) 60 saniye ve ($HCl: H_2O = 1: 1$) 1 dakika süreyle gerçekleşti. İkinci olarak, deiyonize su *n*-Si tabakasını 5 dakika boyunca durulamak için 18 MΩ direnç kullanıldı ve nitrojen (N_2) gazı ile kurutuldu. Temizlemeden sonra, neredeyse yüksek saflıkta (% 99.999) 150 nm kalınlığında Au, yüksek vakumlu termal buharlaştırma sisteminde, yaklaşık 10^{-6} Torr'da *n*-Si alttaşı tamamen arkasında büyütüldü. Düşük dirençlerin omik temasını elde etmek için *n*-Si/Au, N_2 atmosferinde $500^\circ C$ 'de 5 dakikalık bir zaman aralığında tavlansmıştır. Sonuç olarak, grafen - PVP nanokompozit malzemeler bir Si alttaşı üzerine spin kaplama tekniği ile kaplandı. % 5 sulu PVP çözeltisi, damıtılmış suda çözündürüldü ve 0,1 g sonokimyasal hazırlanmış grafen nanomateryal, polimerik çözeltiliye ilave edildi ve karışım, bir ultrasonik banyo kullanılarak iyice dağıtıldı. Daha sonra hazırlanan numune, spin kaplama yönteminin bir damlasıdır. Son olarak, yüksek saflıktaki Au, 10 mm ve 150 nm kalınlıktaki noktalar halinde arayüz polimer tabakasının yüzeyine termal olarak buharlaştırıldı. Üretilen numuneler ince bir Cu (bakır) tutucuya Ag (gümüş) yardımı ile yapıştırılarak elektriksel ölçümler yapılmıştır.

3.2 Deneysel Ölçüm Düzenekleri

Kapasitif ve dielektriksel parametreler için gereken tüm ölçümler Kastamonu Üniversitesi Fen Fakültesi Yarıiletken Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kapasitans-gerilim ($C/G-\omega-V$) ölçümlerinde ise bir empedans analizörü olan Hewlett Packard 4192 A LF (5kHz- 5MHz) kullanılmıştır. Tüm bu ölçümler Hewlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart aracılığıyla kontrolü sağlanarak Janis vpf-475 kriyostat içinde $\sim 10^{-3}$ Torr basıç altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçüm sisteminin şematik görüntüsü aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.1 Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi

4. DENEYSEL BULGULAR

Aralarına grafen katkılı PVP yerleştirilerek hazırlanan Schottky heteroeklem yapısının geniş bir frekans aralığında (5kHz-5MHz) elektriksel ve dielektrik özelliklerini incelemek için, kapasitans ve iletkenlik ölçümleri gerçekleştirildi. Bunun akabinde, ilgili eğriler, çizelgeler elde edildi. Tüm bu ölçümleri oda sıcaklığında ve hem doğru hem de ters ön gerilim için yapıldı. Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metre ile -3V ile 3V aralığında gerçekleştirildi. Bütün ölçümler tersinim, tükenim ve yığılım bölgelerinde elde edildi. Frekansa bağlı olarak bu ölçümler kullanıldı ve yapının W_d , R_s , N_{ss} , V_{bi} , E_F , N_C , E_m , N_D , Φ_{Bo} gibi bazı temel elektriksel ve dielektrik parametrelerin değerleri hesaplandı. Elde edilen deneysel bulgular mevcuttaki literatürle karşılaştırmalı olarak incelendi. Aynı zamanda metal ve yarıiletken arasında grafen-PVP'nin, R_s ve N_{ss} 'bu temel elektriksel parametreler üzerine etkisi araştırıldı. Dielektrik özelliklerinden ise, $\tan\delta$, ϵ' , ϵ'' , M' and M'' , σ_{ac} hesaplandı.

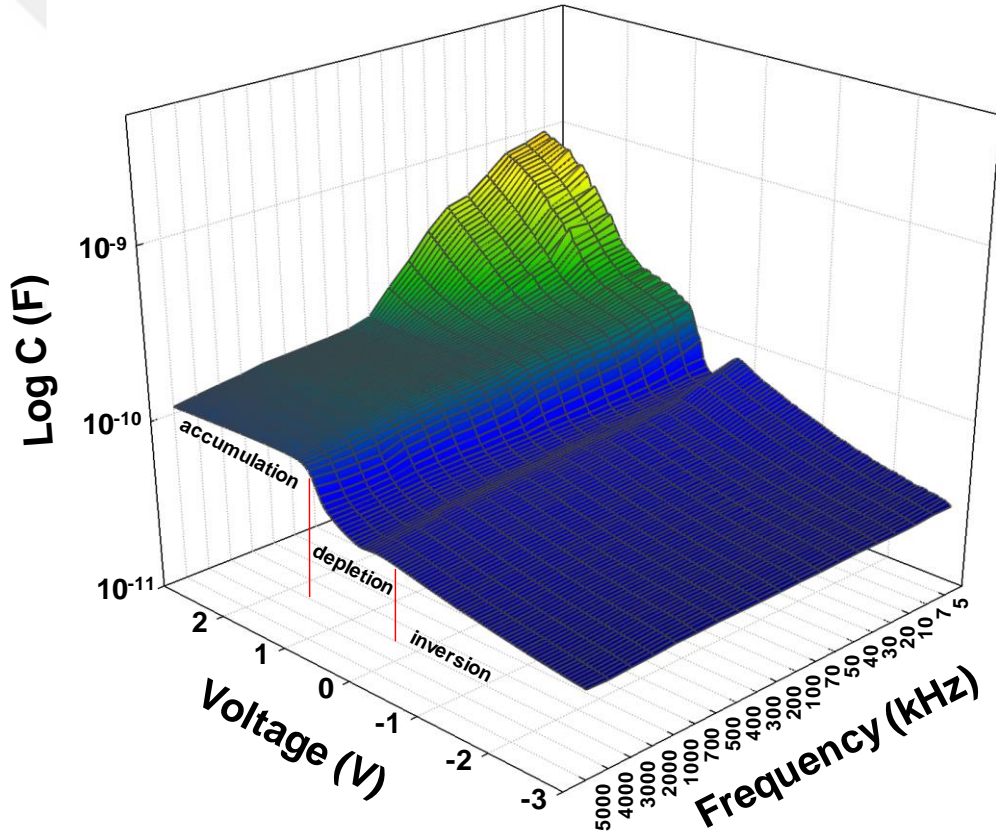
4.1 Frekansa Bağlı Elektriksel Özellikler

Au/grafen-PVP/n-Si Schottky heteroeklem yapının kapasitans ve iletkenlik ölçümleri, 5kHz-5MHz, -3 V ile +3 V aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Grafikler Şekil 4.2 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekildeki grafiklerde de açıkça görülmektedir ki hem C_m ve hem G_m/ω değerleri önemli ölçüde frekansa bağlıdır ve ölçümlerin yapıldığı frekans aralığının geniş olması, yapının temel elektriksel özellikleri hakkında kapsamlı ve önemli bilgiler elde edilmesini sağlar. Yakın zamanlarda literatürde, metal yalıtkan yarıiletken yapılar hakkında pekçok deneysel çalışma yer almaktadır (Çiçek vd., 2020; Ersöz vd., 2016; Gökçen vd., 2012).

C_m -V grafiğinde yığılım, tüketim ve tersinim bölgeleri Şekil 4.2'de açıkça görülmektedir.

Grafiklerdeki değişimler özellikle tüketim ve yığılım bölgelerinde olmaktadır. Tüketim bölgesinde oluşan yarılma Si ile grafen-PVP arasındaki ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş N_{ss} 'in varlığına atfedilebilir (Şahingöz, 2008).

Genellikle literatürde C_m-V ve $G_m/\omega-V$ eğrilerinin artan gerilim değeriyle artıp, artan frekans değeriyle azaldığından bahsedilir. Ama bu, düşük ve orta frekanslarda N_{ss} 'nin gevşeme zamanına ve AC sinyalin frekansına bağlı değişiklik gösterebilir. Şöyle ki düşük frekans değerlerinde ($f \leq 100$ kHz) N_{ss} AC sinyali takip edebilir. Buna rağmen, yüksek frekans değerlerinde ($f \geq 500$ kHz) nerdeyse hiçbir N_{ss} AC sinyalini takip edemez (Nicollian ve Goetzberger, 1967). Buna karşın, Schottky Heteroeklem yapısı için yığılma, tüketim ve tersinim bölgelerine karşılık gelen sonuçları kullanarak frekans tepkisi analiz edildiğinde, yapının kapasitansı artan gerilimle artarken, güçlü ters bölgeye doğru kademeli olarak azalır ve tüketim bölgesinde artan frekansla ile azalmıştır.



Şekil 4.1 Au/grafen-PVP/n-Si Schottky diyodun frekansa bağlı C_m-V değişim grafiği

Kapasitansın değeri gerilim değeri artış gösterdiğinde artmaktadır. Grafen-PVP (MOS) yapı, tüketim bölgesinde $f \leq 100$ kHz frekans değerlerinde ve 0 gerilim altında arayüzey durum yoğunluk dağılımından dolayı yığılma bölgesinde şiddetli bir pik

vermektedir. Bu pikin büyüklüğü artan frekans değerleri ile hızla azalış göstermektedir.

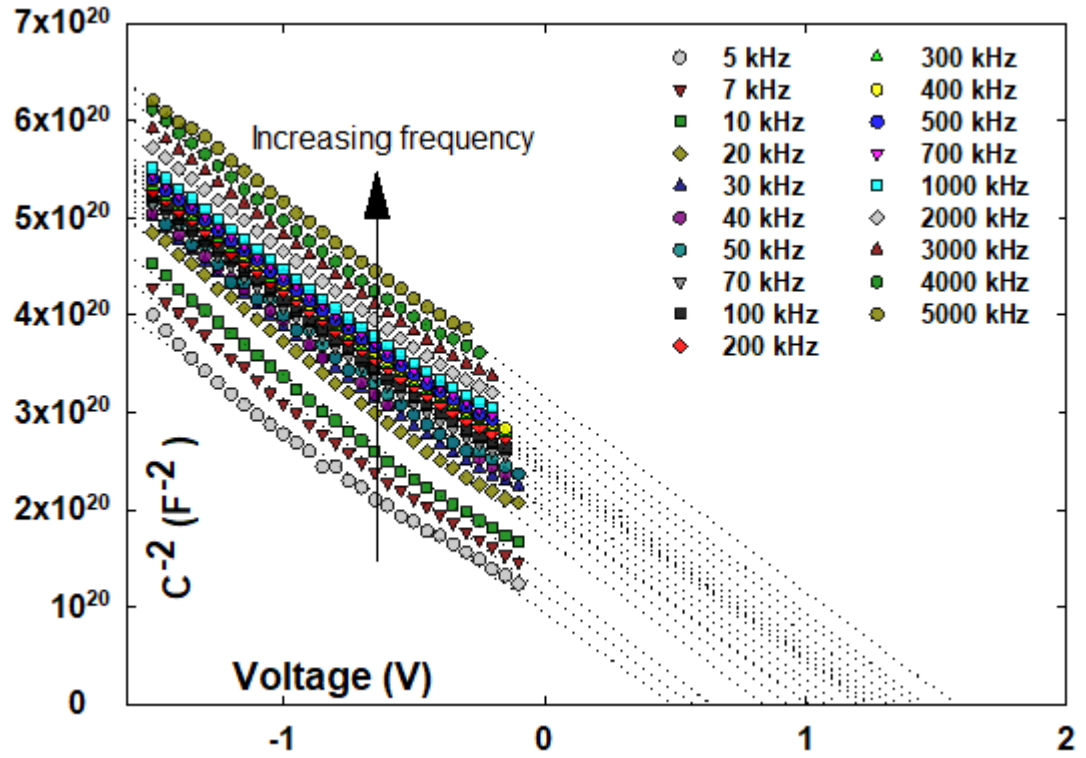
Konumu ise negatif gerilim bölgesine doğru kayma göstermekle birlikte fazla değişmemektedir. Yani frekans değerinin artışı ile kapasitans değerleri azalmakta ve düşük frekans değerlerinde gözlemlenen pik kaybolmaktadır. Bu, yapının R_s ve metal ile yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş N_{ss} ' ye atfedilmiştir. Sebebi şöyle açıklanabilir: Metal ve yarıiletken arasındaki tuzaklar farklı yaşama ömrüne (τ) sahiptir. Periyot ($T=1/2\pi f$), $f \leq 100$ kHz değerlerinde bunların ömründen büyüktür. Böylece N_{ss} ' in $f \leq 100$ kHz değerlerinde AC sinyali takip edebildiğinden dolayı frekansa bağlı ek bir C oluşmaktadır. Yani, $f \geq 50$ kHz değerlerinde AC sinyalin T ' si, arayüzey durumlarının τ ' sından küçüktür. Bu durumda, τ yüksek frekans değerlerinde T ' yi çok küçüldüğünden takip edemez. Bundan dolayı, $f \geq 500$ kHz frekans değerlerinde N_{ss} AC sinyalini takip edemez. Böylelikle arayüzey kapasitansını ihmal edilebilecek kadar küçülmesine sebep olur (Nicollian ve Brews, 1982; Sze, 1981; Gökçen, 20003; Depas vd., 1994; Kar ve Narasimhan, 1987; Akkal vd., 2000). Tersinim bölgesinde, yeterince küçük negatif gerilimlerde C ve G/ω değerlerinde önemli bir değişme olmamaktadır. Gerilim bu bölgede neredeyse hiç etkili olmamaktadır. Bu durum, N_{ss} ' in $f \geq 500$ kHz değerlerinde sinyali takip edemediğinden artan frekans değerleri ile giderek azaldığını gösterir. Literatürde N_{ss} ' den hiçbir katkının gelmemesi için $C-V$ ölçümü en az 500 kHz' de yapılmalıdır. En fazla ise tüm arayüzey durumlarını görebilmek için 100 Hz' de yapılmalıdır (Akkal vd., 2000; Cowley ve Sze, 1965; Depas vd., 1994; Gökçen, 2003; Kar ve Narasimhan, 1987; Nicollian ve Brews, 1982).

Değişken frekanslarda, V_D , N_C , W_D vb. Schottky heteroeklem yapısı elektronik parametreleri Şekil 4.1'de verilen $C^{-2}-V-f$ eğrilerinden hesaplanmıştır. Burada eğrilerin gerilim eksenini kestiği noktalar V_{bi} ' yi ϕ_m ler ise N_a değerlerini verir. Her frekans için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Ayrıntılı kapasitans analizi için Schottky heteroeklem yapısı $C^{-2}-V-f$ ilişkisi aşağıdaki ilişki kullanılarak açıklanmıştır (Bülbül ve Zeyrek, 2006; Parlaktürk vd., 2007; Sze, 1985; Zeyrek ve Acaroğlu, 2013):

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_D} (V_{bi} + V_R) \quad (4.1)$$

Burada; V_R , ters besleme voltajını, q elektronik yükü, sırasıyla ϵ_s ve ϵ_0 , yarıiletken malzemenin ve boşluğun dielektrik sabitini, N_D katkılanan verici atomlarının yoğunluğunu ve A temas alanını temsil eder. Schottky heteroeklem yapısının C_m^{-2} - V - f sonuçları değerlendirildiğinde, her bir frekans değeri için yaklaşık $-2V$ ile $2V$ arasında çizilen C_m^{-2} - V - f doğrusal bir davranış gösterdiği ve hemen hemen her birinin paralel olduğu görülmüştür. Bu eğrilerin eğim çizgileri çizilip denklemler elde edildiğinde, her frekans için her bir doğrunun eğiminden incelenen V_D ve N_D değerleri çizgilerin gerilim eksenini kestiği noktadaki değerler kısaca V_{bi} değerleri kullanılarak hesaplanır.

Şekil 4.3'te grafen-PVP temelli Schottky heteroeklem yapısının V_{bi} değerlerinin artan frekansla yaklaşık $0.5V$ ile $1.5V$ aralığında arttığı ve yüksek tepki gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.2 Farklı frekans aralığındaki C_m^{-2} ve V arasındaki ilişki grafiği

V_{bi} sayesinde her bir frekans değeri için C_m^{-2} - V - f grafiğinden elde edilen V_D (Zeyrek ve Acaroğlu, 2013):

$$V_{bi} = V_D - \frac{kT}{q} \quad (4.2)$$

C_m^{-2} - V - f eğrilerinin kesişme noktalarından ve eğimlerinden hesaplanan W_D tüketim tabakasının genişliği (Zeyrek ve Acaroğlu, 2013):

$$W_D = \left(\frac{2\varepsilon_S \varepsilon_0 (V_{bi} + V_R)}{qN_D} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

Grafen bazlı Schottky heteroeklem yapısının bilinen Fermi seviyesi (E_F) (Zeyrek ve Acaroğlu, 2013):

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.4)$$

Burada, N_C malzemesinin iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu $4.82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e^*/m_0)$ ifadesine eşittir ve m_e^* elektronunun etkin kütlesi, m_0 elektronun boş uzaydaki kütlesi ve kT/q termal enerjidir (Kittel, 2005). Ayrıca, $\phi_{Bo}(C-V)$ engel yüksekliği ve V_D , E_F ve $\Delta\phi_B$ arasındaki ilişki denklem 4.5'te gösterilmiştir:

$$\phi_{Bo(C-V)} = V_D + E_F - \Delta\phi_B \quad (4.5)$$

Burada $\Delta\phi_B$, görüntü kuvvet bariyerinin alçalmasıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Rhoderick, 1978; Sze, 2005):

$$\Delta\phi_B = \left(\frac{qE_m}{4\pi\varepsilon_S \varepsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4.6)$$

Denklem 4.7'de E_m , elektrik alanını ifade eder ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$E_m = \left(\frac{2qN_D V_{bi}}{\epsilon_s \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4.7)$$

C_m - V - f ölçümleri kullanılarak yukarıdaki hesaplama teknikleri ile tüm elektronik parametreler elde edilmiş ve Tablo 4.1'de ifade edilmiştir.

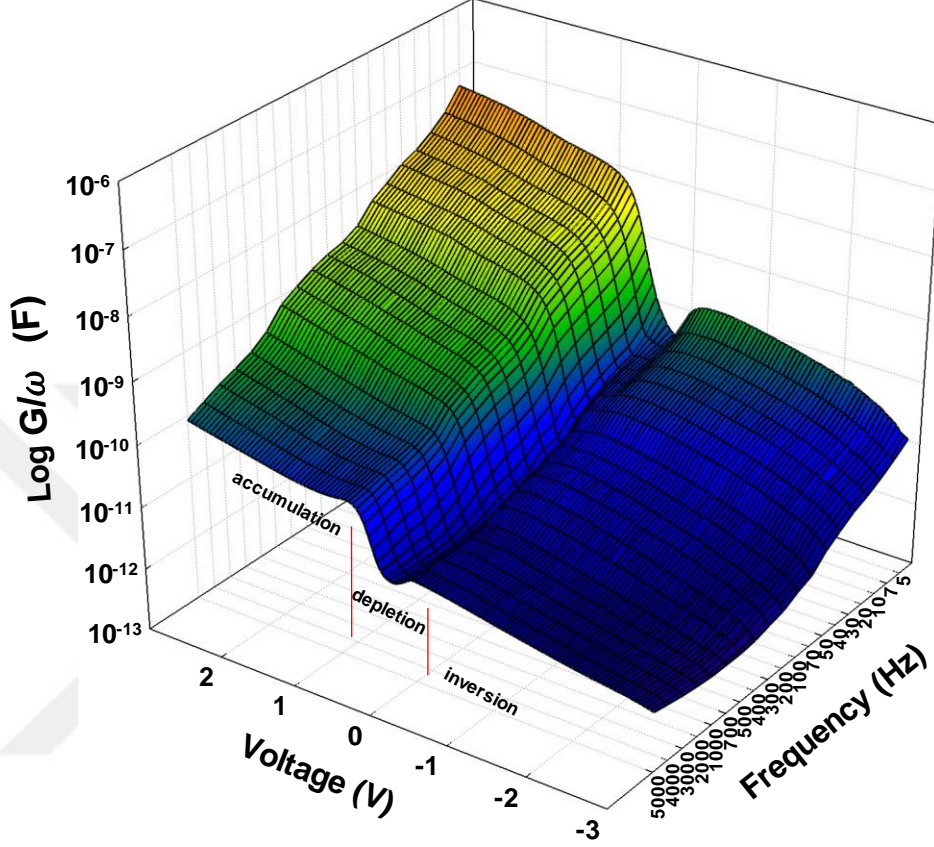
Burada, yapının W_D , $\Phi_{B0}(C-V)$, $\Delta\phi_B$ ve E_m değerleri artan frekansla artarken, N_D değerlerinin azaldığı açıkça gözlemlenmiştir. W_D , $\Phi_{B0}(C-V)$ ve N_D değerleri sırasıyla artan frekansla $1,69 \times 10^{15}$ - $7,28 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $0,63$ - $1,46 \text{ }\mu\text{m}$ ve $0,745$ - $1,438 \text{ eV}$ aralıklarında değişir.

Tablo 4.1 Farklı frekanslarda Schottky heteroeklem yapısının hesaplanan elektronik parametreleri

f	N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	qV_{bi} (eV)	$\Phi_{B0}(C-V)$ (eV)	$\Delta\phi_B$ (eV)	W_D (nm)	E_m (V/cm)	R_s ($\text{k}\Omega$) at 3.5V
5kHz	$6,29 \times 10^{14}$	0,268	0,032	0,319	0,006	76	$2,50 \times 10^3$	2,73
7kHz	$6,47 \times 10^{14}$	0,267	0,167	0,450	0,008	169	$2,75 \times 10^3$	2,77
10kHz	$8,79 \times 10^{14}$	0,259	0,448	0,721	0,012	237	$1,10 \times 10^4$	2,67
20kHz	$8,83 \times 10^{14}$	0,259	0,732	1,003	0,131	303	$1,41 \times 10^4$	2,30
30kHz	$8,87 \times 10^{14}$	0,259	0,776	1,047	0,0133	311	$1,45 \times 10^4$	1,96
40kHz	$8,89 \times 10^{14}$	0,259	0,801	1,071	0,0134	316	$1,48 \times 10^4$	1,60
50kHz	$8,91 \times 10^{14}$	0,259	0,844	1,114	0,0136	324	$1,52 \times 10^4$	1,53
70kHz	$8,95 \times 10^{14}$	0,259	0,880	1,150	0,0138	330	$1,55 \times 10^4$	1,44
100kHz	$9,03 \times 10^{14}$	0,259	0,926	1,195	0,0139	337	$1,61 \times 10^4$	1,38
200kHz	$9,16 \times 10^{14}$	0,258	0,991	1,260	0,0143	346	$1,67 \times 10^4$	1,29
300kHz	$9,21 \times 10^{14}$	0,258	1,024	1,292	0,0144	351	$1,70 \times 10^4$	1,23
400kHz	$9,25 \times 10^{14}$	0,258	1,048	1,316	0,0145	354	$1,72 \times 10^4$	1,13
500kHz	$9,27 \times 10^{14}$	0,258	1,064	1,332	0,0146	357	$1,74 \times 10^4$	1,05
700kHz	$9,25 \times 10^{14}$	0,258	1,100	1,368	0,0147	363	$1,77 \times 10^4$	0,87
1000kHz	$9,21 \times 10^{14}$	0,258	1,133	1,401	0,0147	370	$1,79 \times 10^4$	0,65
2000kHz	$9,12 \times 10^{14}$	0,258	1,202	1,470	0,0150	382	$1,83 \times 10^4$	0,32
3000kHz	$9,08 \times 10^{14}$	0,258	1,248	1,516	0,0151	390	$1,86 \times 10^4$	0,19
4000kHz	$9,03 \times 10^{14}$	0,259	1,284	1,552	0,0152	396	$1,89 \times 10^4$	0,14
5000kHz	$8,99 \times 10^{14}$	0,259	1,310	1,579	0,0152	401	$1,90 \times 10^4$	0,13

Uygulanan sinyalin frekansının ($\omega = 2\pi f$) bir fonksiyonu olarak, Nicollian ve Brews tarafından önerilen C_m ve paralel iletkenliğe (G_m/ω) bağlı kabul, Nicollian ve Brews tarafından önerilen frekansın bir fonksiyonu olarak ($\omega = 2\pi f$) ifade edilebilir. Schottky

heteroeklem yapıları için aşağıdaki gibidir (Kılıçoğlu, 2007; Nicollian ve Brews, 1982):



Şekil 4.3 Schottky aygıtın farklı frekanslardaki $\text{Log } G_m/\omega - V$ grafiği

Yığılım, tüketim, tersinim bölgelerinde farklı frekanslardaki MOS yapının $G_m/\omega - V$ grafiği Şekil 4.4'te açıkça gösterilmektedir. Artan gerilim değeri ile artış göstermekte, artan frekans değeri ile ise azalış göstermektedir. G_m/ω değerleri, artan gerilim ile kuvvetli birikme bölgesinde artarken, kuvvetli ters çevirme bölgesine doğru giderek azalır. Frekans artarken, güçlü birikim bölgesinde G_m/ω değerlerinin tepe noktası azalırken, aynı zamanda birikim bölgesine doğru kaymıştır.

Düşük ve orta seviye frekanslarda bu davranışlar, N_{ss} 'in gevşeme zamanına ve AC sinyalin frekansına bağlı olarak değişim gösterebilir (Chelkowski, 1980; Gökçen, 2005; Tataroğlu vd., 2005; Tataroğlu, 2006). O halde, düşük açısız frekanslarda yapılan $C_m - V$ veya $G_m/\omega - V$ ölçümleri için T , arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden büyük olacaktır.

Dolayısıyla, tüm N_{ss} 'ler çok küçük frekanslarda ($f \leq 100$ kHz) AC sinyalini takip edebilirken, yüksek frekanslarda ($f \geq 50$ kHz), neredeyse hiç bir N_{ss} AC sinyalini takip edemez (Depas vd., 1994; Hung ve Cheng, 1987; Kar ve Dahlke, 1972; Nicollian ve Brews, 1982; Sharma, 1984; Sze, 1981; Tataroğlu vd., 2003; Tataroğlu vd., 2005). Orta frekans değerlerinde ise N_{ss} 'lerin AC sinyalini takip etme gücü frekans değerinin azalması ile artış göstermektedir. Kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinde, tersinim ve tükenim bölgesinde N_{ss} 'ler etkili olurken, yığılma bölgesinde seri direnç etkilidir (Depas vd., 1994; Kar ve Dahlke, 1972; Kar ve Narasimhan, 1987; Schulz ve Klausmann, 1979).

Au/grafen-PVP/n-Si yapısının her voltaj değerine karşılık gelen kapasitans ve iletkenlik grafiklerinin kuvvetli yığılma bölgesindeki değerleri 4.8'deki eşitlikte yerine yazılarak her gerilim değeri için R_s değerleri hesaplandı (Cowley ve Sze, 1965).

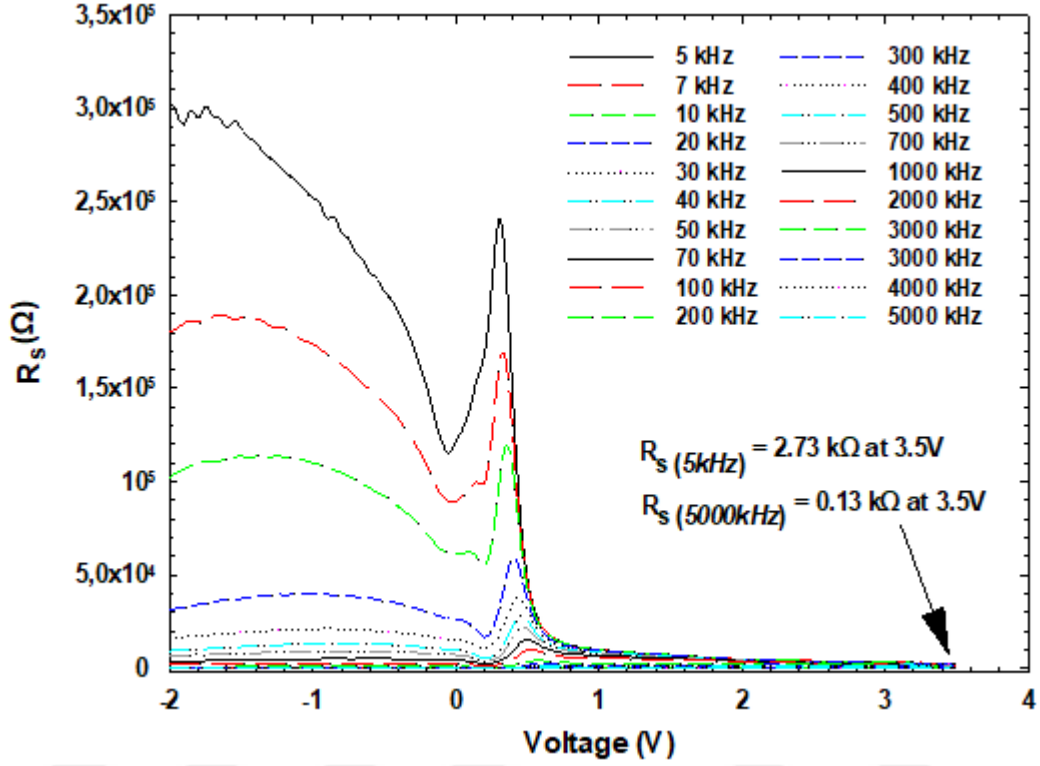
R_s değerleri, tüm frekans değerleri ve farklı gerilim değerleri için frekansa bağlı olarak denklem 4.8'den faydalanılarak elde edildi. C_m - V ölçümlerinde admitans metodu kullanıldı. Bu metot, Nicollian ve Brews tarafından geliştirilmiş olup, diğer metotlara göre daha doğru, pratik ve hassastır (Smyth, 1955).

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad (4.8)$$

Burada C_{ma} kuvvetli yığılma bölgesindeki kapasitans değeridir. G_{ma} ise kondüktans değeridir. Bu yapıların kuvvetli yığılma bölgesindeki C_m ve G_m/ω değerlerinden gerçek seri direnç değeri hesaplanır. Gerilime bağlı R_s değerlerini elde etmek için de bu formül kullanılır. Şekil 4.5' te görüldüğü gibi R_s değeri, frekansa ve uygulanan gerilime oldukça bağlıdır. Her bir gerilimde artan frekans değeri ile R_s değeri azalma göstermektedir. Frekansa bağlılık, yüksek gerilimlerde ve yığılma bölgesinde azalmaktadır.

Aygıtın gerilime bağlı seri direnç eğrisi, farklı frekans değerlerine bağlı olarak elde edilmiş ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekle bakıldığında, $0 \leq V \leq 1$ V aralığında frekansa bağlı olarak seri direnç maksimuma ulaşmaktadır.

Azalan frekans değeri ile güçlü yığılma bölgesine yönelen R_s grafiği için, frekans değeri arttıkça piklerin genliğinin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.4 Aygıtın yapısının frekansa bağlı R_s -V eğrisi

Frekansa ve gerilime kuvvetli bir şekilde bağlı olan seri direnç, bölgeden bölgeye değişme göstermektedir. Si yasak enerji bandı aralığındaki taşıyıcıların, metal ile yarıiletkenin arayüzeyinde bulunan tuzaklardan kaçacak enerjiye sahip olduklarını bu davranışla desteklemektedir. Bununla birlikte, arayüzeydeki yükler AC sinyalini yüksek frekanslarda ($f \geq 50$ kHz) takip edememektedir. Bu durumlar, Si yasak enerji bandı aralığındaki metal/yarıiletken arayüzeyinde yerleşmiş olan yük tuzaklarından kaynaklanmaktadır (Chattopadhyay ve Raychaudhuri, 1992).

Literatürde N_{ss} dağılımını elde etmek için düşük-yüksek frekanslarda kapasitans (C_{LF} - C_{HF}) yöntemi (Nicollian ve Brews, 1982; Sze, 1980) ve admittans yöntemi (Kılıçoğlu, 2007; Nicollian, 1967; Nicollian ve Brews, 1982) kullanılmaktadır. N_{ss} dağılımı C_{LF} - C_{HF} yöntemi ile belirlenir.

Uygulanan sinyalin açısal frekansının (ω) bir fonksiyonu olarak paralel iletkenlik değeri (G_p/ω), Nicollian ve Brews (Kılıçoğlu, 2007; Nicollian ve Brews, 1982) tarafından önerilen, MOS yapılar için istatistiksel modele göre aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$G_p/\omega = \frac{\omega C_m C_i^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} = \frac{q N_{ss}}{2\omega\tau} \ln[1 + (\omega\tau)^2] \quad (4.9)$$

Bu denklemde,

C_m : Herhangi bir öngerilim altında ölçülen kapasitans değeri,

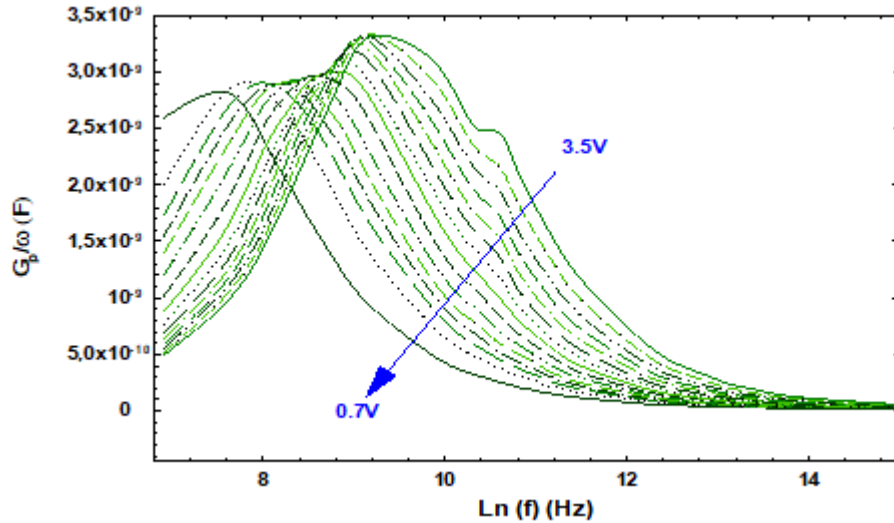
G_m : Herhangi bir öngerilim altında ölçülen iletkenlik değeri,

ω : Açısal frekans,

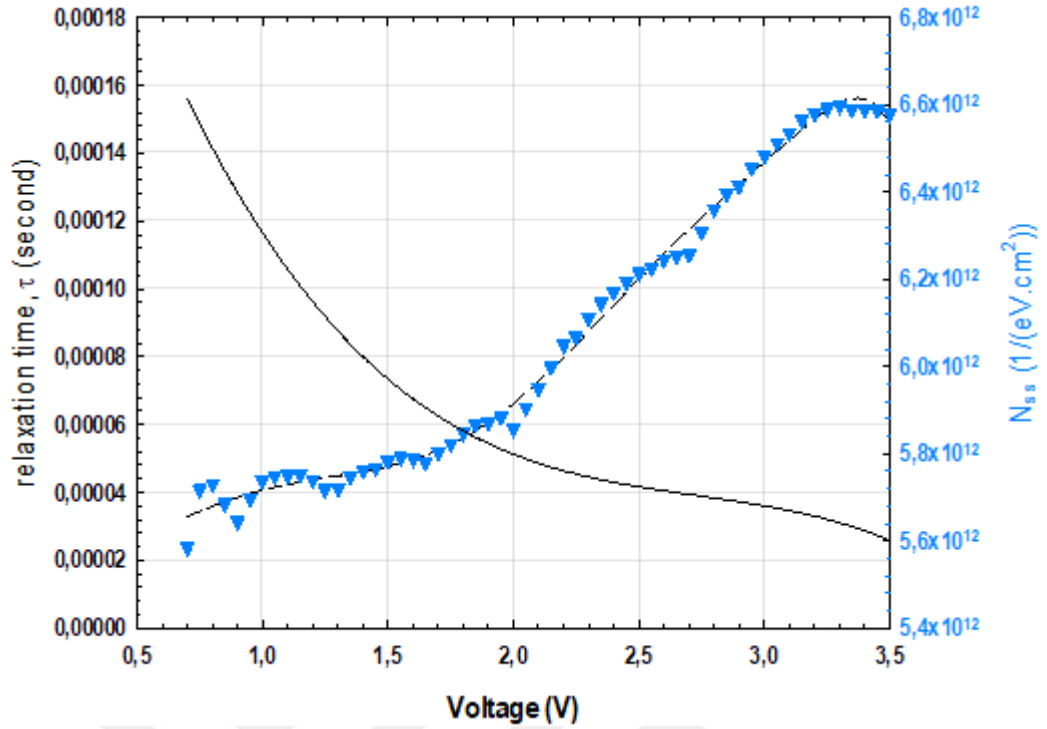
τ : Arayüz tuzağı ömrü olarak da bilinen gevşeme süresidir,

C_{ox} : Oksit tabakanın kapasitansıdır.

Farklı voltajlar uygulandığında G_p/ω grafiğinin vermiş olduğu pik Şekil 4.5'te açıkça gösterilmektedir. Ek olarak, pikin genliği azalır ve gerilimin azalması ile daha düşük frekanslara doğru kayar. Bu davranış, ara yüzey enerji seviyelerinin yaklaşık olarak sürekli bir dağılımın varlığından kaynaklanır.



Şekil 4.5 Oda sıcaklığında farklı gerilimlerde Schottky heteroeklem yapısının eşdeğer paralel iletkenlik $G_p/\omega - \log(f)$ eğrilerine frekansın bağıllığı



Şekil 4.6 Aygıtın yapısının zaman sabiti (τ) karakteristiği

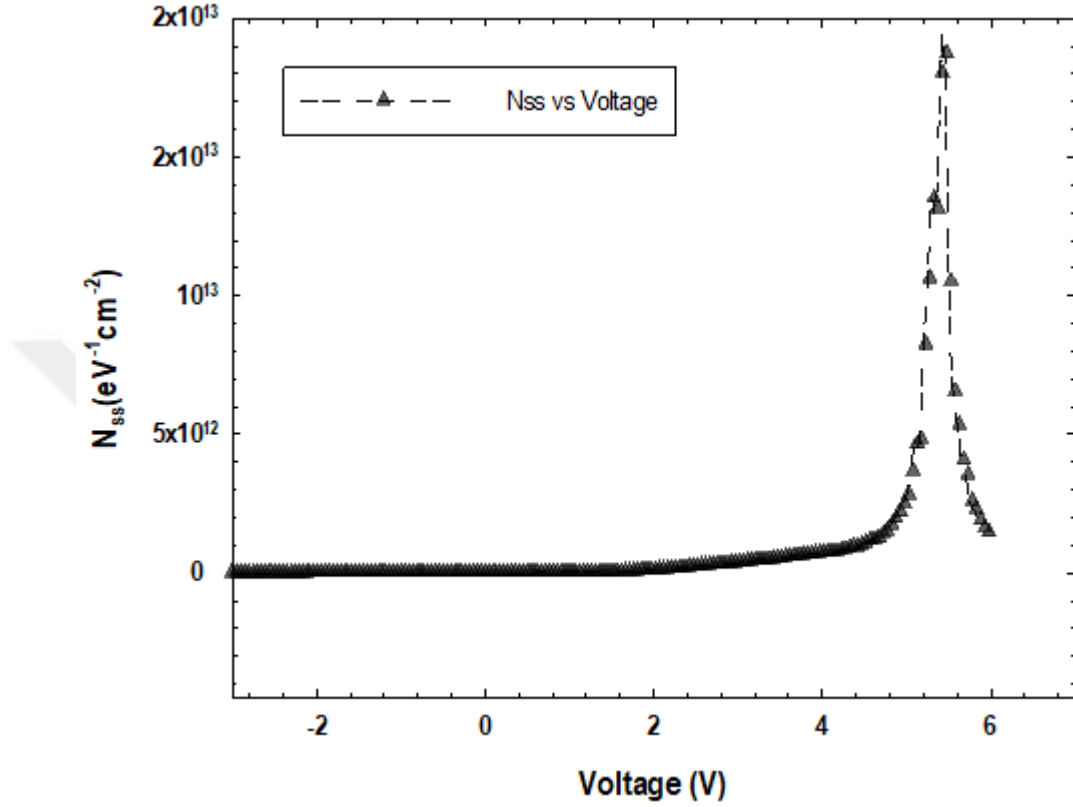
Şekilde 4.6'da görülmekte olup hem tersinim hem de tükenme bölgesinde pik vermektedir. Literatürde de arayüzün yoğunluk piki ifade ettiği görülmektedir (Sağlam, 2004). Bu sonuçlar, arayüz polimer tabakası ile yarıiletken arasında N_{ss} 'nin iki ayrı bölgede localize olduğunu göstermektedir.

$C_{LF} - C_{HF}$ (Castagné ve Vapaille, 1971; Kelberlau ve Kassing, 1981; Kılıçoğlu, 2007; Nicollian ve Brews, 1982;) ve kondüktans metodu kullanılarak N_{ss} elde edildi (Kılıçoğlu, 2007; Nicollian ve Brews, 1982; Sze, 1980). ($C_{LF} - C_{HF}$) metodu arayüzey yoğunluklarını belirlemekte kolaylık sağlamaktadır. Buna göre (Kılıçoğlu, 2007) N_{ss} düşük ve yüksek frekans değerlerinde olmakla beraber iki şekilde hesaplanabilir. N_{ss} 'deki taşıyıcılar 5 kHz'de AC sinyalinin kolay bir şekilde takip edebilirken, yüksek frekansta (5MHz) takip edemez. N_{ss} 'in gerilime bağlı değerleri denklem 4.10'dan hesaplanabilir.

$$N_{ss} = \frac{1}{qA} \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right] \quad (4.10)$$

Tersinim ve tükenim bölgelerinde pik veren N_{ss} Şekil 4.7'de açıkça gösterilmektedir.

Bu da, N_{ss} 'lerin ara yüzey polimer tabaka ve yarıiletken arasında bu iki ayrı bölgede lokalize olduğunu göstermektedir. Literatürde N_{ss} ' in pik verdiği ayrıca görülmektedir (Altındal vd., 2012; Demirezen ve Altındal, 2009; Demirezen vd., 2013).



Şekil 4.7 Aygıtın yapısının frekansa bağlı N_{ss} karakteristiği

4.2 Dielektrik Özellikleri

Dielektrik özellikler, kapasitörlere ve transistörlere dayalı elektronik cihazlar için çok önemlidir. Au/Grafen-PVP/*n*-Si Schottky heteroeklem yapısının $\tan\delta$, ϵ' , ϵ'' , M' ve M'' σ_{ac} değerleri elektriksel özelliklerinin incelendiği koşullarda incelenmiştir. Tüm bu ölçümler oda sıcaklığında ve geniş frekans aralığında (5kHz-5MHz) gerçekleştirildi.

Kompleks permitivite (ϵ^*), elektrik alan ve materyal arasındaki etkileşimi tanımlar. Bu, malzemelerin elektriksel ve dielektrik özelliklerinin kimyasal ve fiziksel davranışları hakkında bilgiler verdiğinden incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Grafen-PVP ara yüzey tabakasının kapasitans ile iletkenlik verileri değerlendirildi. Yalıtkan tabaka için kompleks geçirgenlik,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (4.11)$$

şeklinde hesaplanır (Afendiyeva, 2008; Daniel, 1967; Kar ve Narasimhan, 1987; Pissis ve Kiritsis, 1997). Bu denklemden, ε' , ε'' sırasıyla depolanan enerji ve harcanan enerjiyi gösterir. Kuvvetli yığılım bölgesinde ($V_G > 0$) frekansa bağlı olarak ε^* ın gerçel kısmı olan dielektrik sabiti aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir (Kaya, 2014):

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (4.12)$$

C_0 : Boşluğun kapasitans değeridir ve $C_0 = \varepsilon_0(A/d)$ olarak ifade edilir.

d : polimer arayüzey tabaka kalınlığıdır. İletkenlik ölçümleri yapılarak bulunan sonuçlar,

$$\varepsilon'' = \frac{G_m d_{ox}}{\omega \varepsilon_0 A} = \frac{G_m}{\omega C_{ox}} \quad (4.13)$$

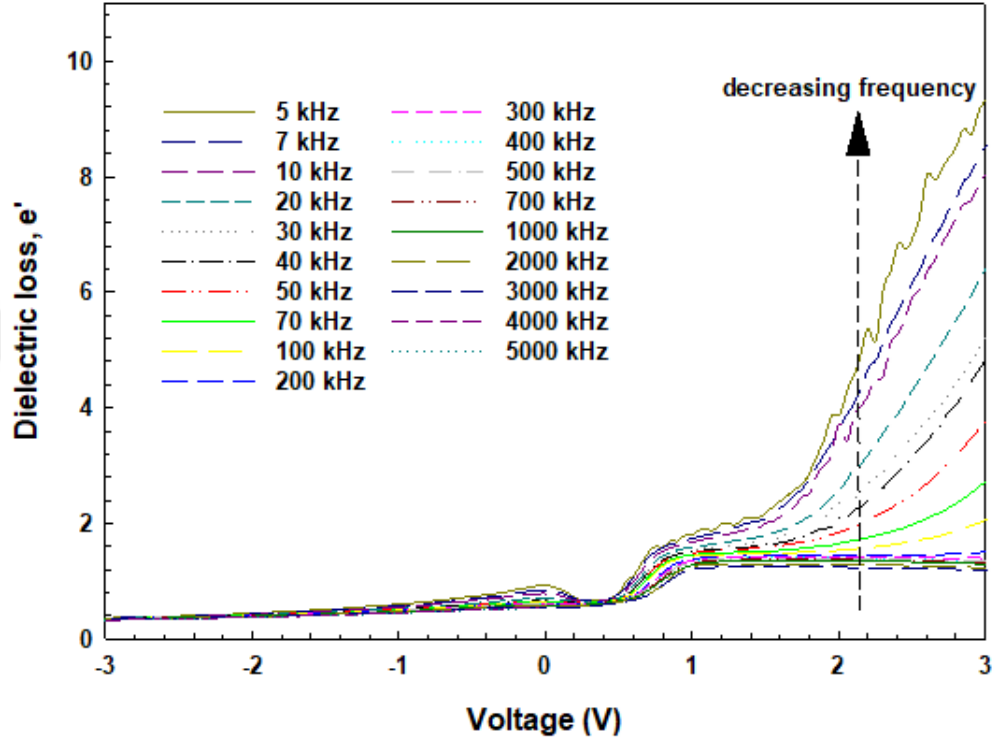
şeklinde hesaplanır. $\tan \delta$ değeri sanal ve gerçel kısımların oranı şeklinde hesaplanır (Tataroğlu, 2006):

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4.14)$$

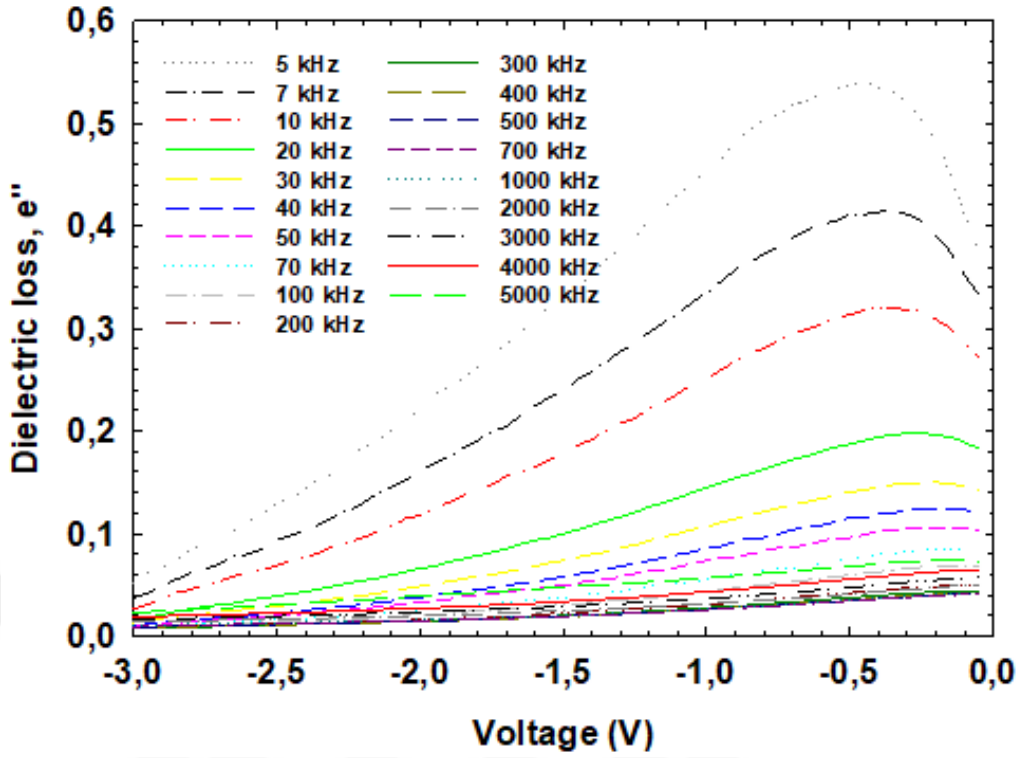
Denklem 4.11'den de görüldüğü üzere, ε' ve ε'' parametrelerinde oluşan değişimler $\tan \delta$ değerinde oluşacak değişimleri etkileyen faktördür. $\tan \delta$, ε' ve ε'' nın frekansa bağlı oluşan grafikler sırası ile gösterilmektedir. Frekans değerinin azalması ile ε' ve ε'' değerlerinde gerçekleşen artış Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da açıkça gösterilmektedir. Şekillerden anlaşılacağı gibi $f \leq 100$ kHz bölgesinde uygulanan gerilime önemli ölçüde bağımlı iken, $f \geq 500$ kHz değerlerinde gerilimden bağımsız olmaktadır. Frekansa bağımlı olan bu davranış, arayüzey polarizasyonuna olumlu katkı sağlayan elektrik dipollerinin alanı izleyememesinin sonucudur (Rajasekar vd., 2006; Yücedağ, 2007).

Artan frekans değerleriyle birlikte bu dipollerin yeniden düzenlenebilmesi adına yeterli kadar zamanı olmadıklarından dolayı polarizasyona olan etkileri azalmaktadır. Sonuç olarak ε' ve ε'' , $f \geq 500$ kHz değerlerinde gerilimden bağımsızdır ve değersel olarak yaklaşık aynıdır (Kaya vd., 2013).

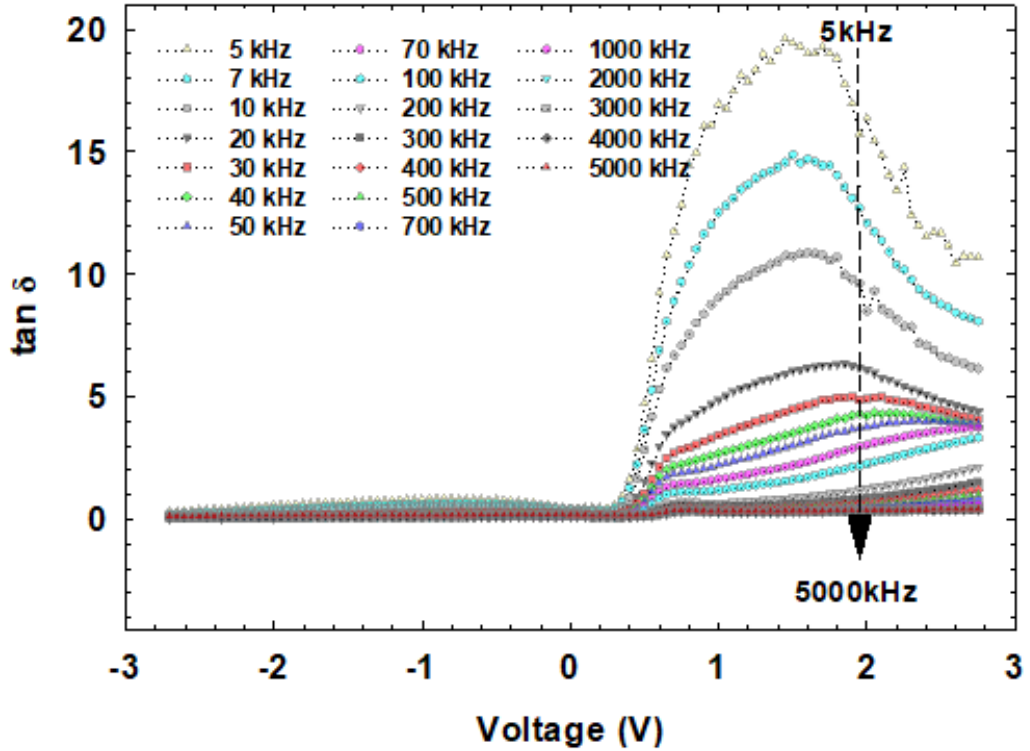
Grafikten de görüldüğü üzere, $\tan\delta$ değerinin önemli ölçüde özellikle zayıf inversiyon bölgesinde frekansa bağlı olduğunu ve bir tepe davranışı gösterdiğini göstermektedir. Piklerin yoğunluğu azalan frekansla azalırken, dış elektrik alanındaki yüzey yüklerinin yeniden yapılandırılması nedeniyle konumları pozitif önyargı bölgesine doğru kayar.



Şekil 4.8 Aygıtın yapısının dielektrik sabitinin frekansa bağlılık grafiği



Şekil 4.9 Aygıtın yapısının frekansa bağlı dielektrik kaybının değişim grafiği

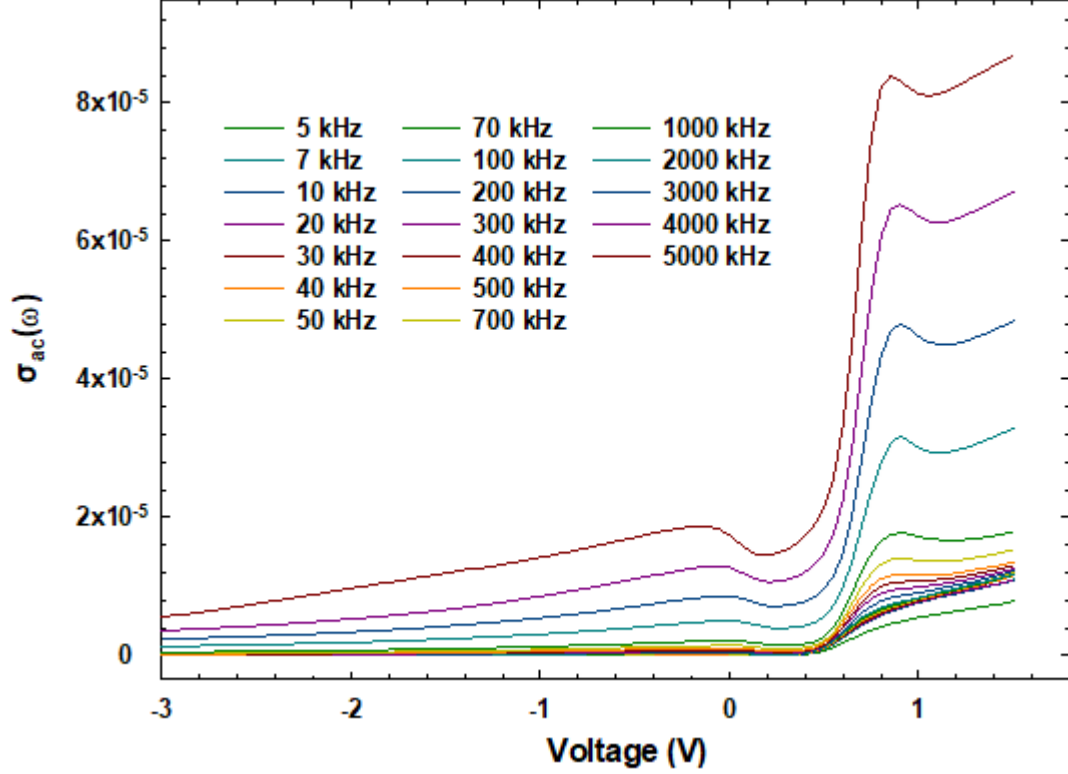


Şekil 4.10 Frekansa bağlı aygıtın kayıp aç faktörünün değişim grafiği

Bir malzemenin karakteriyle ilgili bilgi veren AC malzemenin elektriksel iletkenlik dağılımı (σ_{ac}) önemli parametrelerdendir ve aşağıdaki denklem kullanılarak

hesaplanabilir (Dökme vd., 2008):

$$\sigma_{ac} = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (4.15)$$



Şekil 4.11 Aygıtın AC elektriksel iletkenliğin frekansa bağlı grafiği

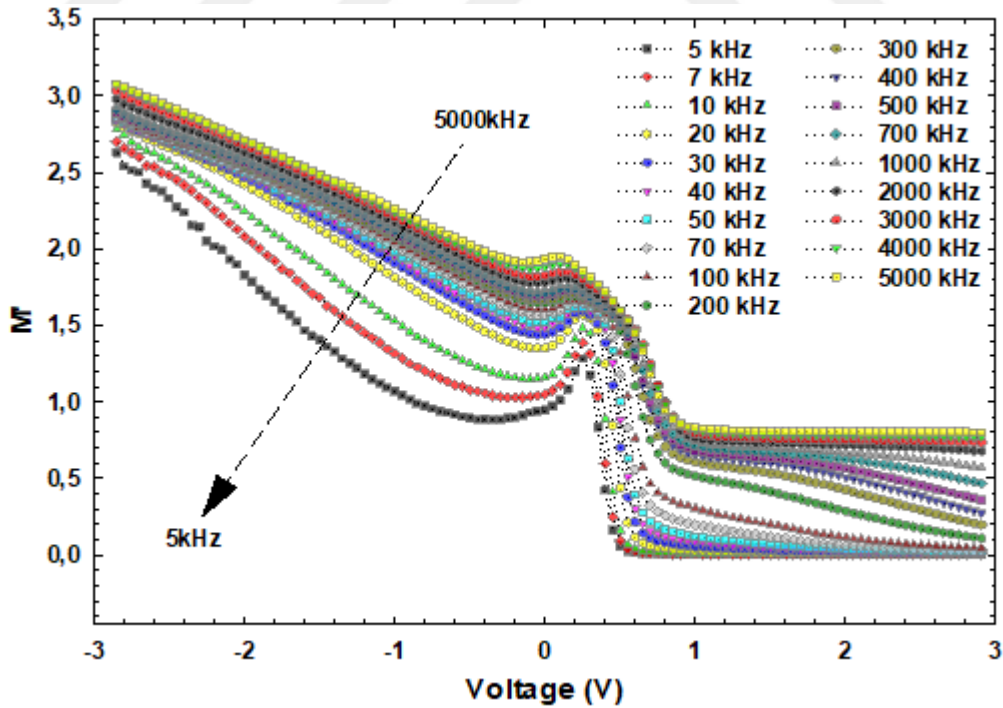
Frekansın artması ile AC iletkenlik değerinin arttığı Şekil 4.13'te açıkça görülmektedir. Bu artış, artan frekansla polarizasyonun azalmasına bağlıdır. AC polarizasyonu azaltarak daha fazla taşıyıcı katkıda bulunur. Böylece, iletkenlik ve σ_{ac} artar. $f \leq 100$ kHz frekans değerlerinde σ_{ac} 'nin gerilimden bağımsız olduğu görülürken, yüksek frekans değerlerine doğru ise σ_{ac} 'nin gerilimden bağımsız olduğu gözlenmiştir. Metal oksit/organik yarı iletken yapıya dayalı yüksek veya ultra kapasitörler, enerji yakalama ve depolama uygulamaları için metal ve yarı iletken arasında uygun yüksek dielektrik katmanların büyütülmesiyle elde edilir. Bu nedenle, dielektrik özelliklerin performansı hakkında çok fazla çalışma vardır.

Kompleks elektrik modülü formülizasyonu, dielektrik materyallere uygulanabilecek bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından diğer yöntemlere kıyasla daha çok tercih edilmekte ve üretilen heteroeklem yapıların dielektrik özelliklerinin analizini tanımlamak için kullanılmaktadır (Pissis ve Kiritsis,

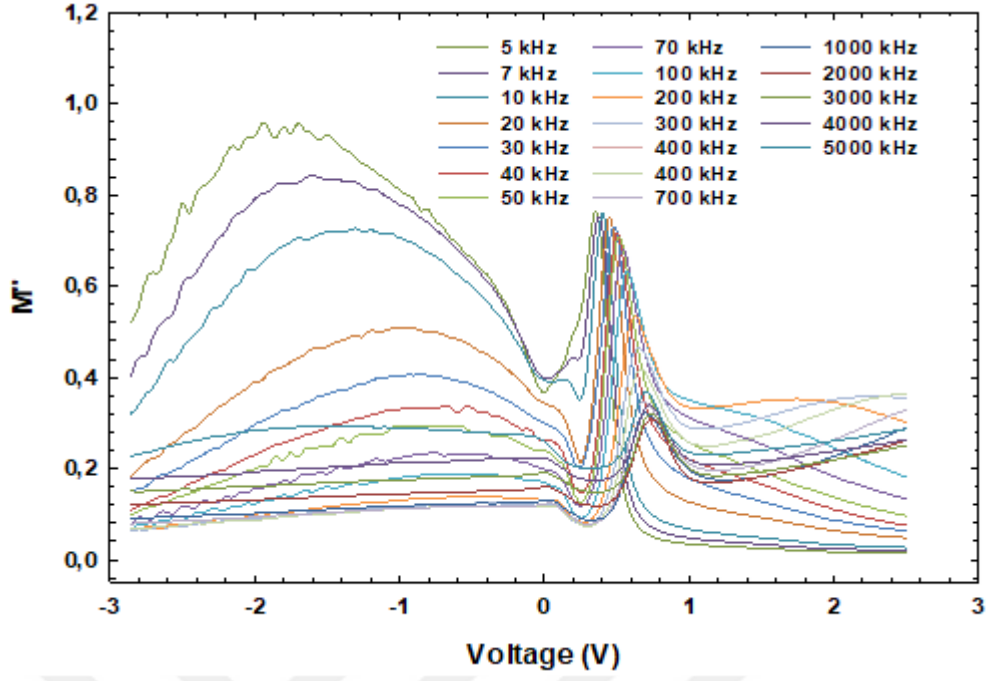
1997). M^* ile ifade edilen kompleks elektrik modülü şu denklemden faydalanılarak hesaplanabilir (Demirezen, 2013).

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon'} = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + (\varepsilon'')^2} \quad (4.16)$$

Gerilime bağlı $M'-V$ ve $M''-V$ parametreleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te açıkça gösterilmiştir. ε' , ε'' değerlerinde frekansın artmasıyla azalma meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak artan frekans ile $M'-V$ ve $M''-V$ değerlerinde artma meydana gelmektedir. Aynı zamanda bu değerler, gerilimden bağımsız davranarak $f \leq 100$ kHz bölgesinde sıfıra doğru yaklaşmakta, artan frekans değeri ile gerilime bağlı davranış göstermektedir. Özellikle tüketim bölgesinde uygulanan ön gerilimin güçlü bir fonksiyonu olduğu elde edilmiştir. Arayüz tuzak yükler grafiklerindeki piki açıklamaktadır. $M''-V$ grafiğindeki pikler azalan frekansla negatif öngerilim bölgesine kaymaktadır. M' ve M'' karakteristiklerinin davranışları bu bölgedeki, dielektrik durulma mekanizmasının frekansa bağlı olmasına atfedilebilir (Dökme vd., 2008).



Şekil 4.12 Aygıtın frekansa bağlı $M'-V$ karakteristiğinin değişim grafiği



Şekil 4.13 Aygıtın frekansa bağlı M'' -V karakteristiğinin değişim grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kapasitans yöntemi Schottky diyotlarda, diyota uygulanan gerilime bağlı olarak ölçülen kapasitans değerlerine dayanmaktadır. İdeal durumda, yüksek frekanslarda kapasitans değerinin frekanstan etkilenmediği bilinmektedir. Ancak, metal ve yarıiletken arasında doğal olarak oluşan ya da depolanarak meydana getirilen bir oksit/yalıtkan tabakanın varlığı ve oksit/yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde durum/tuzakların yer alması aygıtı ideallikten uzaklaştırır. Aygıtı AC uygulandığında bu yükler tuzaklanabilir ya da salınabilir. Bu durum, uygulanan frekansla aygıtın kapasitans ve iletkenlik değerlerinin değişmesine neden olur (Nicollian ve Brews, 1982; Northrop ve Rhoderick, 1978).

Bu çalışmada, hazırlanan Au/grafen-PVP/n-Si yapısının elektriksel ve dielektrik özellikleri oda sıcaklığında geniş bir frekans (5kHz-5MHz) ve gerilim değeri aralığında gözlemlendi. Deneysel $C-V$, $G/\omega-V$ ölçümlerinden elde edilen parametreler frekansa oldukça bağlı olduğu gözlemlendi. Değerler R_s , E_F , N_{ss} , tüketim tabakasının genişliği W_d , V_{bi} , N_C , E_m , N_D , Φ_{Bo} Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında frekansa bağlı yapılan ölçümler sonucunda $C-V$, $G/\omega-V$ eğrilerinin frekans dağılımına sahip oldukları yer özellikle pozitif gerilim bölgesidir, bu bölgede kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekans değeri ile azalma göstermektedir. Kapasitans ve iletkenlik değerlerinin düşük frekanslardaki büyüklüğü; yapının arayüzey durumlarının dolup boşalması için geçen sürenin frekansa bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır. $f < 100\text{kHz}$ değerlerinde, N_{ss} AC sinyalini takip edebilmektedir. Buna bağlı olarak, frekansa bağlı bir ek C oluşmaktadır. Ancak $f \geq 5\text{ MHz}$ değerlerinde N_{ss} AC sinyalini takip edemez. Literatürde C_m-V ölçümü en az 5 kHz’ de yapıldığında arayüzey durumlarından hiçbir katkı gelmemektedir ve en fazla 100 Hz’ de yapıldığında ise tüm arayüzey durumları görülebilmektedir

Çalışmanın ikinci kısmı olarak ise frekansa bağlı dielektrik özellikler incelendiğinde, frekans değerinin artması ile arayüzey, dipolar veya iyonik polarizasyonun ϵ' , ϵ'' ve arayüzey durumlarına katkısı olmamaktadır. Frekans değerinin artmasıyla ϵ' değerinin azaldığı gözlemlenmektedir.

Bu durum, frekansın artması ile AC doğrultusunda arayüzey dipollerinin yönlenebilmeleri için daha az zamana sahip olmalarına bağlanmaktadır.

C_m-V-f ve $G_m/\omega-V-f$ grafiklerinden görüldüğü üzere temel elektriksel ve dielektrik özellikler gerilim ve frekans ile büyük ölçüde değişmektedir. Özellikle yığılma ve tüketim bölgelerinde değişim gözlemlenmiştir. Tüketim bölgesindeki değişimler N_{ss} , yüzeysel kutuplanmaya ve arayüzey tabakaya atfedilir. Yığılma bölgesindeki değişimler ise yalnızca seri dirence atfedilir.

Üretilen Au/grafen-PVP/*n*-Si tipi MOS yapıların, temel elektriksel ve dielektriksel parametrelerini karşılaştırmak için literatürdeki çalışmalardan elde edilen değerler Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablodan W_d değerlerinin diğer çalışmalardaki değerlerle benzer veya daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu çalışmadaki R_s değerleri diğer çalışmalarda verilen R_s değerlerine kıyasla daha düşük ve ideale daha yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

Tablo 5.1 Metal-Organik-Yarıiletkenlerin 1000 kHz’de hesaplanan parametrelerin karşılaştırılması

Numuneler	Organik İnce Film	W_d (nm)	ϵ_{max}'	R_s (Ω)	Kaynak
Au/grafen-PVP/<i>n</i>-Si	Grafen-PVP	370	111	650	Bu çalışma
Au/(In ₂ O ₃ -PVP)/ <i>n</i> -Si	In ₂ O ₃ -PVP	861	-	-	(Tataroğlu vd. 2020)
Au/Nanografite-PVP/ <i>n</i> -Si	Nanografite-PVP	1245	6,5-0,4	113,45	(Taşçıoğlu vd. 2020)
Au/NiS-PVP/ <i>n</i> -Si	NiS-PVP	-	2,7-0,9	-	(Akbaş vd. 2021)
Au/PVP/ <i>n</i> -Si	PVP	-	2,40-0,20	-	(Altındal vd. 2021)

Sonuç olarak, daha sonraki benzer çalışmalarda doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla deneysel tüm bu ölçümlerden ulaşılan sonuçlar doğrultusunda aşağıda verilen bazı görüşler şunlardır:

- Metal yarıiletken yapılarda SiO_2 arayüzey tabakası yerine büyütülmesi daha düşük maliyetle ve kolaylıkla sağlanabilecek, yüksek dielektrik sabitine sahip saf veya katkılı yalıtkanların kullanılması.
- Schottky diyotlarda iletim mekanizmaları ve metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında daha güvenilir bilgi etmek amacıyla,

frekansa bağlı elektriksel ölçümlerin geniş bir frekans aralığında gerçekleştirilmesi.

- Yapısal ve benzeri analizleri olabildiğince en kısa sürede yapıldıktan sonra elektriksel ölçümlere geçilmesi.
- Elde edilen bulguların doğruluğu ve güvenilirliği açısından ölçümlerin olabildiğince sık gerçekleştirilmesi.
- Tüm ölçümleri vakumlanmış bir kriyostat veya benzeri bir düzenek içinde gerçekleştirmek gürültü, ışık gibi dış etkenlerin etkisini büyük ölçüde azaltacaktır.



KAYNAKLAR

- Afendiyeva, I.M., Dökme, İ., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., & Tataroğlu, A. (2008). Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al-TiW-Pd₂Si/n-Si structures” *Microelectron. Eng.* 85: 247.
- Ahiboz, D. (2017). Electrical characterization of electron selective titanium dioxide and hole selective molybdenum trioxide heterocontacts on crystalline silicon [M.S. - Master of Science]. Middle East Technical University.
- Akbaş, A.M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., & Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). “Frequency dependence of the dielectric properties of Au/(NG: PVP)/n-Si structures,” *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 7657–7670, Feb. doi: 10.1007/s10854-021-05482-9
- Akkal, B., Benamara, Z., Gruzza, B., & Bideux, L. (2000). Characterization of interface states at Au/InSb/InP (100) Schottky barrier diodes as a function of frequency, *Vacuum*, 57: 219-228.
- Alptekin, S., & Altındal, Ş. (2019). A comparative study on current/capacitance: Voltage characteristics of Au/n-Si (MS) structures with and without PVP interlayer. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*, vol. 30, pp. 6491-6499.
- Altındal, Ş., Asar, Y. Ş., Kaya, A., & Sönmez, Z. (2012). Investigation of interface states in Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures with 50 and 826 Å SiO₂ interfacial layer using admittance spectroscopy method” *J. Optoelectron Adv. M*, 14: 998-1004.
- Altındal, Ş., Ulusoy, M., Özçelik, S., & Azizian-Kalandaragh, Y. (2021)“On the frequency-dependent complex-dielectric, complex-electric modulus and conductivity in Au/(NiS: PVP)/n-Si structures,” *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, vol. 32, no. 15, pp. 20071–20081, doi:10.1007/s10854-021-06419-y
- Aydemir, U. (2009). Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin I-V, C-V ve DLTS metodu ile incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-3.
- Aydemir, U. (2014). Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) yapıların hazırlanması ve temel elektriksel özelliklerinin ışık altında incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-4.
- Baran, H. M. (2015). MOS Kapasitörün Elektriksel Özellikleri Üzerine Gama Radyasyonun Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Bhajantri, R. F., Ravindrachary, V., Harisha, A., Ranganathalah, C., & Kumaraswamy G. N. (2007). Effect of barium chloride doping on PVA microstructure positron annihilation study”, *Appl. Phys. A*, 87: 797-805.

- Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San, S. E., & Altındal, Ş. (2015). A compare of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C20H12/p-Si (MPS) type diodes using current–voltage (I–V) and capacitance–voltage (C–V) measurements, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 32: 137-144.
- Brillson, L.J. (1993). *Contacts to Semiconductors*, Noyes Publications, New Jersey, 40-44.
- Bülbül, M. M., & Zeyrek S. (2006). Frequency dependent capacitance and conductance–voltage characteristics of Al/Si₃N₄/p-Si(100) MOS diodes, *Microelectronic Engineering*, cilt 83, pp. 2522-2526.
- Card, H. C., & Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 319.
- Card, H.C., & Rhoderick, E.H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes”, *J.Phys.D: Appl. Phys.*, 4: 1589-1601 (1971).
- Castagné,R, & Vapaille, A. (1971). Description of the interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements, *Surf.Sci.*, 28, pp. 157-193.
- Chattopadhyay, P., & Raychaudhuri, B. (1992). New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diodes, *Solid-State Electron*. 35: 1023-1024.
- Chaudhary, V., Kumar, N., & Singh, A. K. (2019). Solubility dependent trap density in poly (3-hexylthiophene) organic Schottky diodes at room temperature, *Synthetic Metals*, vol. 250, pp. 88-93.
- Chelkowski, A. (1980). *Dielectric Physics*, Elsevier, Amsterdam, 313.
- Cooke, M. J. (1990). *Semiconductor Devices*, Prentice Hall, New York, 294-308.
- Cowley, A. M., Sze, S. M. (1965). Surface state and barrier height of metal semiconductor systems”, *J. Appl. Phys.*, 36 (10): 3212-3221.
- Daniel, V.V. (1967). *Dielectric Relaxation*, Academic Press, London, 1-19, 79-87.
- Demirezen, S. (2013). 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.
- Demirezen, S., & Altındal Yerişkin, S. (2020). A detailed comparative study on electrical and photovoltaic characteristics of Al/p-Si photodiodes with coumarin-doped PVA interfacial layer: The effect of doping concentration. *Polymer Bull*, vol.77, pp. 49-71.
- Demirezen, S., & Altındal, Ş. (2009). On the temperature dependent profile of interface states and series resistance characteristics in

- (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN heterostructures. *Physica B Condensed Matter*, 405: 1130-1138.
- Demirezen, S., Altındal, Ş., & Uslu, I. (2013). Two diodes model and illumination effect on the forward and reverse bias I-V and C-V characteristics of Au/PVA (Bidoped)/n-Si photodiode at room temperature”, *Current Applied Physics*, 13: 53- 59.
- Demirezen, S., Özavcı, E., & Altındal, Ş. (2014). The effect of frequency and temperature on capacitance/conductance– voltage (C/G–V) characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 23: 1-6.
- Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H., & Cardon, F. (1994). Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation, *Solid State Electron*, 37(3): 433-441.
- Dökme, İ., Altındal, Ş., & Gökçen, M. (2008). Frequency and gate voltage effects on the dielectric properties of Au/SiO₂/n-Si structures, *Microelectronic Engineering*, vol. 85, no. 9, pp. 1910-1914.
- Erbaş Aral, H. (2010). MIS Yapıların Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara.
- Farag, A. A. M., Yahia I. S., & Fadel M. (2009). Electrical and photovoltaic characteristics of Au/n-CdS Schottky diode. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 34: 4906-4913.
- Fröhlich, H. (1958). *Theory of Dielectrics*”, Clarendon Press, Oxford, 1-21, 70-78.
- G. Lu. (2006). *Organic Semiconductor*, University of Rochester.
- Gökçen, M. (2003). MOS Yapılarda Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/W-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi”, Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-30.
- Gökçen, M. (2005). MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-3, 13-14.
- Gökçen, M., & Altuntaş, H. (2009). On the profile of temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) structures at various frequencies. *Physica B*, 404(21), 4221-4224. doi:10.1016/j.physb.
- Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş., & Özçelik, S. (2012). Frequency and voltage dependence of negative capacitance in Au/SiO₂/n-GaAs structures”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15: 41–46.
- Güçlü, Ç.Ş., Özdemir, A.F., Karabulut, A., Kökce, A., & Altındal, Ş. (2019). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 89, pp. 26-31.

- Hung, K. K., & Cheng, Y. C. (1987). Determination of Si-SiO₂ interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurement”, *Appl. Surf. Sci.*, 30: 114-119.
- Kar, S., & Dahlke, W. E. (1972). Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si, *Solid-State Electronics*, 15: 221-237.
- Kar, S., & Narasimhan, R. L. (1987). Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures, *J. Appl. Phys.*, 61(12): 5353-5359.
- Kaya, A. (2010). Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların elektrik karakteristiklerinin frekansa bağlı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-3.
- Kaya, A., Altındal, Ş., Asar, Y., & Sönmez, Z. (2013). *Chinese Physics Letters* 30(1), 017301.
- Kaya, A., Vural, Ö., Tecimer, H., Demirezen, S., & Altındal, Ş. (2014). 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.
- Kelberlau, U., & Kassing, R. (1981). Nonequilibrium properties of MIS-capacitors, *Solid-State Electronics*, 24: 321-327.
- Kılıçoğlu T., Aydın, M.E, Topal, G., Ebeoğlu, M.A., & Saygılı, H. (2007). The effect of of a novel organic compound chiral macrocyclic tetraamide-I interfacial layer on the calculation of electrical characteristics of an Al/tetraamide-I/p-Si contact,*Synthetic Metals*, pp. 157:540-545.
- Kim, K., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J. H., Kim, P., Choi, J. Y., & Hong, B. H. (2009). Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, *Nature*, vol.457, pp. 706-710.
- Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley&Sons, USA.
- Li, S. S. (2006). *Semiconductor Physical Electronics*, Springer, New York.
- Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.*”, Mc Graw-Hill, New York, 420-450, 517-523.
- Nicollian, E. (1967). The Si-SiO₂ Interface-Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique, *Bell Syst. Tech. J.*, 46, pp. 1055-1133.
- Nicollian, E.H., & Brews, J.R. (1982). *MOS Physics and Technology*”, John Wiley & Sons, New York, 40-175, 222-226, 423-439.
- Nicollian, E.H., & Goetzberger, A. (1967). *Bell Syst. Tech. J.* 46.

- Northrop, D. C., & Rhoderick E. H. (1978). The Physics of Shottky barriers, in Impedance Devices. Solid State Electronics, 4: 37-73.
- Oral, M. (1983). Elektrostatik, Ege Ün. Matbaası, İzmir, 221-252.
- Özmen, Ö. (2014). Effects of PCBM concentration on the electrical properties of the Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes, Microelectronics Reliability, cilt 54, pp. 2766-2774.
- Parlaktürk, F., Agasiev, A., Tataroğlu, A., & Altındal, Ş. (2007). Current-Voltage (I-V) and Capacitance-Voltage (C-V) Characteristics of Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SnO₂ Structures, G.U. Journal of Science, cilt 20, pp. 97-102.
- Pawde, S. M., Deshmukh, K., & Parab, S. (2008). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol and gelatin blend films, J. Appl. Polymer Sci., vol.109, pp. 1328-1337.
- Pissis, P., & Kiritsis, A. (1997). Electrical conductivity studies in hydrogels. Solid-State Ion. 97:105.
- Pissis, P., & Kiritsis, A. (1997). Solid-State Ionics, vol 97, pp 105-113.
- Rajasekar, K., Subbarayan, A., & Sathyamoorthy R. (2006). Solar Energy Materials and Solar Cells 90(15), 2515.
- Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. (1988). Metal-Semiconductor Contacts. (Second Edition). USA:Oxford [England]: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 20-48.
- Rhoderick E. H., & Williams R. H. (1988). Metal Semiconductor Contacts”, 2nd ed., Oxford Press, 0198593368, USA.
- Rhoderick, E. H. (1978). Monographs in Electrical and Electronic Engineering: Metal-Semiconductor Contacts, Oxford University Press.
- Sağlam, M. E. (2004). Experimental determination of the laterally homogeneous barrier height of Au/n-Si Schottky barrier diodes, Physica B, pp. 348-397.
- Schulz, M., & Klausmann, E. (1979). Transient capacitance measurements of interface states on the intentionally contaminated Si-SiO₂ interface. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 18(2): 169-175.
- Sharma, A. T., Shahnawaz, Kumar, S., Katharria, Y. S., & Kanjilal, D. (2007). Barrier modification of Au/n-GaAs Schottky diode by swift heavy ion irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 263: 424.
- Sharma, B. (1984). Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their, New York: NY: Plenum Press.
- Sharma, B.L. (1984). Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications”, Plenum Press, New York and London, 49-118.

- Sharma, B.L. (1984). Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions Their Applications, Plenum Press, New York and London, 1-118.
- Smyth, C.P. (1955). Dielectric Behavior and Structure: Dielectric Constant and Loss, Dipole Moment and Molecular Structure, McGraw-Hill, New York.
- Soylu, M., & Yakuphanoglu, F. (2011). Photovoltaic and interface state density properties of the Au/n-GaAs Schottky barrier solar cell. *Thin Solid Films*, 519: 1950-1954.
- Sreenu, K., Venkata Prasad, C., & Rajagopal Reddy, V. (2017). Barrier parameters and current transport characteristics of Ti/p-InP Schottky junction modified using orange G (OG) organic interlayer, *J. Electron. Mater.* vol. 46, pp. 5746-5754.
- Sze, S. M. (1980). *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. New York, Wiley.
- Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices* 2nd ed.", John Wiley & Sons, New York, 362-390.
- Sze, S.M.(1985). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, John Wiley&Sons, USA.
- Sze, S. M., & Kwok, K. Ng. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*" 3rd ed., John Wiley & Sons, 9780470068328, New Jersey.
- Sze, S.M. (2005). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*.
- Şahingöz, R., Kanbur, H., Voigt, M., & Soykan, C. (2008). The determination of interface states and series resistance profile of Al/polymer/PEDOT-PSS/ITO 46 heterojunction diode by I-V and C-V methods", *Synthetic Metals*, 158:727-731.
- Tan, O. S. (2016). ZnO arayüzey tabakalı Schottky engel diyotlarının hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin aydınlatma şiddetine bağlı incelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-9.
- Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*, Mir Publishers, Moscow, 67-95, 140-156.
- Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers.
- Taşçioğlu, İ., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y., & Altındal, Ş. (2020). "Frequency-dependent admittance analysis of Au/n-Si structure with CoSO₄-PVP interfacial layer," *J. Electron. Mater.*, vol. 49, no. 6, pp. 3720–3727, Mar. doi: 10.1007/s11664-020-08091-0.
- Tataroğlu, A. (2004). MOS Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans ve Radyasyon Miktarına Bağlı İncelenmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-53.

- Tataroğlu, A. (2006). Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures, *Microelect. Eng.*, 83: 2551-2557.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ő., & Azizian-Kalendaragh, Y. (2020). C-V-f and G/ω -V-f characteristics of Au/(In₂O₃-PVP)/n-Si (MPS) structure. *Physica B: Condensed Matter*, 582, 411996. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.411996>
- Tataroğlu, A., Altındal, Ő., & Bülbül, M.M. (2005). Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure, *Microelectronic Engineering*, 81: 140-149.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ő., Karadeniz, S., & Tuğluoğlu, N. (2003). Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures response to radiation and frequency, *Microelectronic Journal*, 34(11): 1043-1049.
- Tataroğlu, B. (2006). MIS Yapıların Frekans ve Radyasyona Bağlı Temel Elektriksel Parametreler”, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-5.
- Tecimer, H., Tan, S. O., & Altındal Ő. (2018). Frequency-dependent admittance analysis of the metal–semiconductor structure with an interlayer of Zn-doped organic polymer nanocomposites”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65 (1): 231-236.
- Von Hippel, A. R. (1954). *Dielectric Materials and Applications*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Von Hippel, A. R. (1959). *Dielectrics and Waves*, John Wiley & Sons, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234.
- Wert, C.A., & Thomson, R.M. (1970). *Physics of Solids*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 410-421, 388-403.
- Yücedağ, İ. (2007). Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Yücedağ, İ. (2007). Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik zelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi”, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-53.
- Zeyrek, S., & Acaroğlu, E. (2013). The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C–V and G/ω –V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes,” *Current Applied Physics*» cilt 13, pp. 1225.
- Ziel, A. (1968). *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall International Inc., Minnesota, 119-124.