



**Au/(NANOĞRAFİT-PVP)/n-Si (MPS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE
ELEKTRİK İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR FREKANS
VE VOLTAJ ARALIĞINDA İNCELENMESİ**

Ahmet Muhammed AKBAŞ

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2021

ETİK BEYAN

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

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

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

Ahmet Muhammed AKBAŞ
28/05/2021

Au/(NANOĞRAFİT-PVP)/n-Si (MPS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİK
İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR FREKANS VE VOLTAJ
ARALIĞINDA İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Ahmet Muhammed AKBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2021

ÖZET

Bu tez çalışmasında döndürme yöntemi ile üretilen nanografite (NG) katkı polivinilpirolidon (PVP)/n-Si yapısının geniş bir frekans (1kHz-5MHz) ve voltaj ($\pm 3V$) aralığında, oda sıcaklığında C-V-f ve G/ ω -V-f karakteristiği sunulmuştur. Bu sayede temel difüzyon potansiyeli (V_D), katkılanmış verici yoğunluğu (N_D), Fermi enerji düzeyi (E_F), maksimum elektrik alan (E_m), tükenme katman kalınlığı (W_d) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) her bir frekans için çizdirilen C^{-2} -V-f grafiklerinin eksen kesim noktası ve eğiminden türetilmiştir. Ayrıca ara yüzey durumlarının (N_{ss}) enerji yoğunluk dağılımı ve bunların durulma zamanı (τ) değerleri iletkenlik yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen düşük N_{ss} değerleri kullanılan NG-PVP polimer ara katmanın pasifleştirici etkisinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Dielektrik özellikleri bakımından da incelemeye tabi tutulan Au/NG-PVP/n-Si MPS yapısında polimer ara katmanın kullanımının ara yüzey durumlarına (N_{ss}), seri dirence (R_s), karmaşık dielektrik sabitinin (ϵ^*) gerçel ve sanal bileşenlerindeki kutuplanmaya, kayıp tanjanta ($\tan\delta$), elektriksel iletkenliğe (σ) ve karmaşık elektrik modülüne (M^*) etkileri aynı frekans aralığında -1 ila +2 V aralığında incelenmiş ve karakteristikleri belirlenmiştir. Ayrıca R_s ve karmaşık empedansın (Z^*) frekansa bağlı profili dielektrik sabitinin gerçel ve sanal bileşenleri kullanılarak türetilmiştir. Elektrik modülünün sanal bileşeninde ve $\tan\delta$ 'da görülen pik davranışının durulma zamanı, ara katman ile n-Si ara yüzeyinde yerleşmiş N_{ss} 'in uzaysal dağılımından ve ara yüzey/dipol kutuplanmasından kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Ara yüzey durum yoğunluğunu azalması, yüzey kusurlarını gidermesi ve yüksek dielektrik değeri (6,5) sayesinde NG-PVP yaygınca kullanılan oksit/yalıtkan katmanların yerini alabilecek uygun bir aday olmuştur.

Bilim Kodu	: 20226
Anahtar Kelimeler	: Au/polimer/n-Si yapısı; Frekans tepkisi; N_{ss} , τ ve seri direncin enerjiye bağlılığı; Dielektrik özellikler ve iletkenlik üzerinde kutuplanma etkisi.
Sayfa Adedi	: 83
Danışman	: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

THE FABRICATION OF Au/(NANOGRAPHITE-PVP)/n-Si (MPS) STRUCTURES
AND INVESTIGATION OF THEIR ELECTRICAL AND DIELECTRICAL
PROPERTIES IN A WIDE RANGE OF FREQUENCY AND VOLTAGE

(Ph. D. Thesis)

Ahmet Muhammed AKBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2021

ABSTRACT

In this thesis study, the frequency response on profile of $C-V-f$ and $G/\omega-V-f$ characteristics of spin-coated nanographite (NG)-doped polyvinylpyrrolidone (PVP)/n-Si structures in a wide frequency (1kHz-5MHz) and voltage ($\pm 3V$) ranges at room temperature. Hereby, the basic parameters of the structure such as diffusion potential (V_D), doping donor density (N_D), Fermi energy level (E_F), maximum electric field (E_m), depletion layer thickness (W_d), and barrier height (Φ_B) are derived by using the intercept and slope of $C^{-2}-V-f$ plot for each frequency. Additionally, the energy density distribution of surface states (N_{ss}) and their relaxation time values (τ) are also obtained from the conduction method. The lower N_{ss} values are the consequence of passivation effect of the used nanographite (NG)-PVP polymer interlayer. In the Au/NG-PVP/n-Si MPS structures, which are examined in scope of dielectrical properties, the consequences of applying (NG-PVP) interlayer on surface states (N_{ss}), series resistance (R_s), and polarization effects on the real and imaginary parts of the complex dielectric constant (ϵ^*), loss-tangent $\tan\delta$, electrical-conductivity (σ), and complex electric-modulus (M^*) have been investigated in -1V and +2V voltages and in the same frequency voltage. Additionally, the frequency-dependent profile of both R_s and complex-impedance (Z^*) were extracted by using the ϵ' and ϵ'' values. The observed peak characteristics in M'' and $\tan\delta$ versus V and frequency plots was attributed to relaxation-time and spatial distribution of N_{ss} located at interlayer/n-Si interface, interfacial/dipole polarization. Owing to lowering N_{ss} , surface dislocations and having high dielectric value (6,5), NG-PVP becomes a very proper candidate instead of commonly used oxide/insulator layers for this purpose.

Science Code	: 20226
Key Words	: Au/polymer/n-Si structure; Frequency response; Energy dependence of N_{ss} , τ , Series resistance; Polarization effects on dielectric properties and conductivity.
Page Number	: 83
Supervisor	: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimi süresince sabrı ve yol göstericiliği ile yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a, çalışmalarda desteklerini cömertçe sunan kıymetli hocam Prof. Dr. Adem TATAROĞLU'na, doktora tezi çalışmasını yerine getirirken örnek hazırlama ve karakterizasyon konularında yardımcı olan Yashar AZIZIAN-KALANDARAGH'a ve Ömer SEVGİLİ'ye şükranlarımı sunarım. Doktora çalışmalarının yayın sürecinde katkılarından dolayı Doç. Dr. Osman ÇİÇEK hocama teşekkür ederim.

Tüm eğitim ve iş yaşantımda sonsuz fedakârlık ile emek veren canım annem Sabiha AKBAŞ başta olmak üzere kıymetli aileme ve sevgili eşim Pınar AKBAŞ'a aldığım her kararda verdikleri destekten ötürü sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER	7
2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar	7
2.2. Bariyer Oluşumu	8
2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklar için Schottky-Mott Teorisi	8
2.4. Metal-Yarıiletken Ara Yüzeylerin Sınıflandırılması	14
2.4.1. Yüzey durumlu ve yalıtkan ara yüzey katmanlı kontaklar	14
2.5. İdeal Schottky Yapıları	16
2.5.1. İdeal MPS yapılar (kapasitör/Schottky diyot)	16
2.5.2. Schottky Bariyerin Kapasitansı	18
2.5.3. Metal-polimer-yarıiletken yapılarda yüzey potansiyelinin voltaja bağılılığı.....	20
2.5.4. Metal-polimer-yarıiletken yapılarda ara yüzey durumları	24

	Sayfa
2.5.4. Ara yüzey durum yoğunluğu ölçüm yöntemi	27
2.6. Dielektrik Özellikler.....	28
2.6.1. Dielektrik malzemeler	28
2.6.2. Boş ve dielektrikli paralel levha kapasitörü	29
2.6.3. Dielektrik kutuplanma	30
2.6.4. Kutuplanma türleri.....	32
2.6.5. Dielektriklerde durulma.....	34
2.6.6. Dielektrik Sabiti ve Kayıp Ölçüm Yöntemi (Admitans).....	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM	39
3.1. Polivinilpirolidon (PVP)	39
3.2. Silisyum (Si).....	39
3.3. Alttaş Temizliği.....	41
3.4. Kontak Metallerinin Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Yapılması.....	41
3.5. Nanografite Katkılı PVP Ara Katmanın Döndürme Yöntemiyle Hazırlanması...	43
3.6. Ölçüm Sistemi	44
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
4.1. Yapısal Analiz	45
4.1.1. X-ışını kırınım analizi (XRD)	45
4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi	46
4.2. Elektriksel Karakteristiğin İncelenmesi	46
4.3. Dielektrik Karakteristiğin İncelenmesi	59

	Sayfa
4.3.1. Kapasitans ve kondüktans	59
4.3.2. Dielektrik özellikler.....	61
4.3.3. AC elektriksel iletkenlik:.....	64
4.3.4. Elektrik modülü:.....	66
4.3.5. Empedans spektroskopisi:	68
5. SONUÇ	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Si kristalinin temel fiziksel özellikleri.	40
Çizelge 4.1. Frekansa göre deneysel olarak elde edilen V_0 , N_D , E_F , E_m , W_d , V_D , c_2 , n , $\Delta\Phi_B$, Φ_B , $\Phi_{B(C-V)}$ ve R_s değerleri değerleri.	53



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için n tipi yarıiletken metal kontağına ait elektron enerji bant diyagramı (a) birbirinden ayrık nötr malzemeler ve (b) kontak gerçekleştikten sonraki termal denge durumu.	8
Şekil 2.2. n-tipi yarıiletkenlerdeki doğrultucu kontakların $\Phi_m > \Phi_s$ (a) termal denge durumunda, (b) ileri beslemede ve (c) ters besleme durumları için elektron enerji bant diyagramları.	12
Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda metal ve n tipi yarıiletken (a) ayrık durum, (b) termal dengede kontak durumu, (c) yarıiletkeni negatif besleme durumu ve (d) yarıiletkeni pozitif besleme durumu için elektron enerji bant diyagramı.	13
Şekil 2.4. Ara yüzey katmanı ve yüzey durumları içeren metal-yarıiletken kontağına ait elektron enerji bant diyagramı.	15
Şekil 2.5. Sıfır beslemede ideal MIS yapının denge durumunda enerji bant diyagramı.	16
Şekil 2.6. İdeal bir MPS yapının farklı beslemeler altındaki (a) yığılma, (b) tükenme ve (c) tersinim durumlarındaki enerji bant diyagramları.	18
Şekil 2.7. Termodinamik denge sağlanmadan önce polimer bir arayüzey tabakasına sahip n-tipi yarıiletken elde edilen MPS Schottky diyot yapısının enerji bant diyagramı.	21
Şekil 2.8. MPS yapılarının (a), (b) Ara yüzey durum yoğunluğu etkisi altındaki, (c) düşük frekanslı ve (d) yüksek frekanslı AC sinyal uygulandığı durumdaki eşdeğer devreleri.	23
Şekil 2.9. Polimer ve yarıiletken yapısındaki yük ve durumların tesviri.	24
Şekil 2.10. R_s etkisinin eklendiği (a) tükenim durumunda, (b) yığılma durumunda, (c) ve (d) basit gösterim ile eş değer devre modelleri.	26
Şekil 2.11. Boş paralel levha kapasitörü.	29
Şekil 2.12. Dielektrikli paralel levha kapasitörü.	30
Şekil 2.13. Dielektrik malzeme ile doldurulan paralel levha kapasitöründe kutuplanma.	32
Şekil 2.14. (a) Elektronik kutuplanma, (b) iyonik kutuplanma, (c) yönelimsel kutuplanma ve (d) uzay-yük kutuplanması olmak üzere kutuplanma türleri ve elektrik alana tepkileri.	32

Şekil	Sayfa
Şekil 2.15. Kutuplanmanın frekansa bağılılığı.....	33
Şekil 2.16. Dielektrik sabitinin gerçel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağılılığı	36
Şekil. 2.17. Dielektrikli bir kapasitörde yük akımı (I_c) ve kayıp akım (I_l) ilişkisi.	38
Şekil 3.1. PVP'nin kimyasal formül yapısı ve fiziksel görünümü.	39
Şekil 3.2. Elmas ve elmas benzeri Si (ve Ge) yapılara ait kristal yapı.....	40
Şekil 3.3. Termal buharlaştırma sistemine ait vakum odası çizimi.....	42
Şekil 3.4. (a) arka yüzey için kullanılan tamamı açık örnek tutucu, (b) dairesel kontaklar için gölge maske ve (c) fabrikasyonu bitmiş MPS yapının çizimi.....	42
Şekil 3.5. Döndürme yönteminde (a) polimer serimi, (b) döndürme ile yayma, (c) döndürme ile buharlaştırarak filmin oluşması aşamaları.....	43
Şekil 3.6. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının eşdeğer devresi.....	44
Şekil 4.1. Nanografıt yapısına ait XRD deseni.	45
Şekil 4.2. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının (a) tasviri, (b) termodinamik denge durumundaki, (c) yığılma, (d) tükenme ve (e) tersinim durumlarındaki enerji bant diyagramları	47
Şekil 4.3. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının $C-V-f$ karakteristiği.....	48
Şekil 4.4. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının $G/\omega-V-f$ karakteristiği.	49
Şekil 4.5. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının R_s-V-f karakteristiği.	50
Şekil 4.6. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının $C^{-2}-V-f$ karakteristiği.	51
Şekil 4.7. Frekansa bağılı ($\ln(f)$) N_D ve Φ_B davranışı.	54
Şekil 4.8. Farklı voltajlarda $C-\ln(f)$ grafikleri.	55
Şekil 4.9. Farklı voltajlarda $G/\omega-\ln(f)$ grafikleri.	56
Şekil 4.10. Farklı voltaj değerlerinde paralel kondüktans, $G_p/\omega- \ln(f)$ eğrileri.....	57
Şekil 4.11. İletkenlik bandından uzaklık seviyelerine göre enerji değerlerine (E_c-E_{ss}) karşın ara yüzey durumları (N_{ss}) ve bunların durulma zamanları (τ).	58
Şekil 4.12. Farklı frekans değerlerinde voltaja bağılı (a) kapasitans ve (b) kondüktans karakteristikleri.	60

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Au/(NG-PVP)/n-Si yapısının farklı besleme voltajında frekansa karşı (a) kapasitans ve (b) kondüktansın değişimi.....	61
Şekil 4.14. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait değişen frekanslarda (a) $\varepsilon'-V$, (b) $\varepsilon''-V$ ve (c) $\tan\delta-V$ grafikleri.	63
Şekil 4.15. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait değişen voltajlarda (a) $\varepsilon'-\text{Log}f$, (b) $\varepsilon''-\text{Log}f$ ve (c) $\tan\delta-\text{Log}f$ grafikleri.	64
Şekil 4.16. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı frekanslarda $\sigma_{ac}-V$ grafikleri...	65
Şekil 4.17. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı voltajlarda $\sigma_{ac}-\text{Log}f$ grafikleri.....	66
Şekil 4.18. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı frekanslarda (a) $M'-V$ ve (b) $M''-V$ eğrileri.	67
Şekil 4.19. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı voltajlarda (a) $M'-\text{Log}f$ ve (b) $M''-\text{Log}f$ eğrileri.	68
Şekil 4.20. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı frekanslarda (a) $Z'-V$ ve (b) $Z''-V$ eğrileri.	69
Şekil 4.21. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı voltajlarda (a) $Z'-\text{Log}f$ ve (b) $Z''-\text{Log}f$ eğrileri.....	69
Şekil 4.22. Farklı frekanslarda uygulanan voltaj ile faz açısı (θ)'nın değişimi.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. HP 4192 LF empedans analizörü ve IEEE-488 AC/DC dönüştürücü takılı bilgisayar.....	44
Resim 4.1. Nanografite yapısına ait SEM görüntüsü.....	46



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simge	Açıklaması
A	Diyotun alanı
$\text{\AA}$	Angstrom
Au	Altın
C	MIS yapının kapasitansı
C_0	Boş kapasitörün sığası
C_{ma}	Ölçülen kapasitans
C_i	Yalıtkan tabakanın kapasitansı
Q_{sc}	Uzay yükü
d	Polimer film kalınlığı
E	Enerji
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığının
E_V	Değerlik bandı enerji seviyesi
G_{ma}	Ölçülen iletkenlik
Hz	Frekans birimi (hertz)
k	Boltzmann sabiti
N_D	Katkılanan verici atomları
R_s	Seri direnci
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_i	Yalıtkan üzerine düşen gerilim
Φ_B	Potansiyel engel
Φ_{B0}	Sıfır gerilimde potansiyel bariyeri
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Elektron ilgisi

Simge	Açıklaması
q	Elektron yükü
Ψ_s	Yarıiletken yüzey potansiyeli
ϵ_i	Yalıtkan tabakasının dielektrik sabiti
ϵ_0	Uzayın geçirgenliği
ϵ_s	Yarıiletken dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Dielektrik kayıp
Ω	Direnç birimi, Ohm
ω	Açısal frekanstır
M	Elektrik modülü
$\tan\delta$	Kayıp tanjant
E	Elektrik alan
E_m	Maksimum elektrik alan
$\Delta\Phi_B$	Bariyer alçalması
Φ_n	E_C ile E_F arasındaki fark
n	İdealite faktörü
W_d	Tükenme bölgesi kalınlığı

Kısaltmalar	Açıklaması
AC	Alternatif akım
C-V	Kapasitans-Voltaj
DC	Doğru akım
G/ ω -V	Kondüktans-Voltaj
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken
MS	Metal-Yarıiletken
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Son dönemlerde, metal-yarıiletken (MS) yapıları bilim insanları, mühendisler ve teknoloji şirketleri tarafından büyüyen elektronik endüstrisi doğrultusunda bir hayli önem kazanmıştır. Bir ara yüzey yalıtkan, ferro-elektrik veya organik katman içeren MS yapıları yeni elektronik aygıt geliştirmek üzere radyo, mikrodalga ve tera-hertz frekanslarında küçük voltaj düşme özelliği ile hızlı anahtarlama uygulamalarında çok önemli olmaktadır [1-6]. Bu ara yüzey malzemeler arasında organik/polimer malzemeler, düşük maliyet, esneklik, kolay büyüme yöntemi, düşük sıcaklık üretim, yüksek dayanım, yalıtkanlarla karşılaştırıldığında düşük moleküler ağırlık gibi avantajlara sahiptir. Geleneksel uygulamalarda ara yüzey katman genellikle SiO_2 ve SnO_2 gibi yalıtkan/oksit katmandır. Bu yapılar metal-oksit-yarıiletken (MOS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar olarak adlandırılmaktadırlar [7,8]. Ara yüzey katmanlı MS yapılarında metal, kullanılan ara yüzey katman sayesinde yarıiletkenden yalıtılmış olur ve yarıiletken ile ara yüzey arasında ara yüzey tuzakları/durumlarının (D_{it}/N_{ss}) sürekli bir dağılımı oluşur. MOS/MIS türü yapılar seri dirence (R_s) ve ara yüzey durumlarına (N_{ss}) sahip olduğu zaman elektrik ve dielektrik davranışları özellikle tükenme ve tersinim bölgelerindeki düşük ve orta frekanslarda ideal duruma göre kayda değer şekilde değişiklik göstermektedir [9,10]. Yakın dönemdeki uygulamalar bize termal veya ıslak oksidasyon gibi alışlagelmiş yöntemlerle üretilmiş yalıtkanlar yerine polimerlerin veya polimer kompozitlerin, MS yapının ara katmanı olarak seçilebileceğini göstermiştir. Kolay sentezlenebilirlik ve uygulanabilirlikleri sayesinde organik/polimer ara yüzey katmanları, yarıiletken ve yalıtkan arasında yer alan ara yüzey durumlarını düşürmek için maliyet-etkin bir çözüm sunmaktadır. Öyle ki, bu polimer ara yüzey katmanlar daldırma (dip coating), döndürme (spin coating), elektroğirme (electrospinning) ve sol-gel yöntemleriyle kolaylıkla üretilebilir. Doğaları gereği polimer filmlerin sentezi kolay olup malzeme çeşitliliği oldukça zengindir [11,12].

Işık yayan diyotlar (LEDs), lazer diyotlar (LDs) transistörler, anahtarlama diyotları ve pasivasyon, ohmik kontak, kapı (gate) kontağı, Schottky kontak/diyotlar, optik kaplamalar veya epitaksiyel katmanlar gibi birçok farklı katmanın bir araya getirilmesiyle üretilen diğer ince film aygıtlarda “yüzey kalitesi” performans ve dayanıklılık bakımından büyük rol oynamaktadır. Bu, yarıiletken endüstrisinin ve araştırma-geliştirme çalışmalarının en zorlu noktalarından biridir. Çünkü son zamanlarda, ara katmanlı veya ara katmansız MS yapıların temel bilimsel ve teknik problemleri N_{ss} , R_s , kaçak akım ve bariyer

homojensizliğinin azalışına bağlı olarak performansın artışı ile ilişkilendirilmektedir. Buna bağlı olarak, birçok bilim insanı büyütülen veya kaplanan katmanların aygıt performansı üzerindeki yüzey etkilerini ortadan kaldırmaya çalışmaktadır. Böylece daha dayanıklı, uzun ömürlü aygıtlar üretmeye çalışmaktadırlar.

Polimer ara katmanlar, özellikle metal veya grafen katkılı yüksek dielektrikli polimer ara katmanlar, difüzyon akımlarını ve M-S katmanları arasındaki reaksiyonu engelleyici yalıtkanlık özelliği göstermektedir. Ayrıca polimer pasivasyonu ile N_{ss} ve kristal kusurları iyileştirilmektedir. Çünkü SiO_2 gibi düşük dielektrikli malzemeler kaçak akımı yeterince engelleyemediği için yarıiletken yüzeyindeki boş bağları pasifleştirerek daha fazla N_{ss} 'e neden olmaktadır. Bu durumlardan kaçınmak üzere, araştırmacılar yarıiletken aygıtların performans ve dayanıklılıklarını artırmak üzere düşük maliyetli malzemeler ve metotlar kullanarak daha çok emek sarf etmektedirler. Polimer malzemeler arasında özellikle polivinil-alkol (PVA) ve polivinilpirolidon (PVP) polimerleri suda kolay çözünme, düşük saçma kaybı, iyi yük kapasitesi, yüksek dielektrik dayanım ve katkılamaya bağlı elektriksel özellikleri sebebiyle M-S ara yüzey katmanı olarak tercih edilirler [9,13]. Böylece son zamanlarda araştırmacılar ara katmanları metaller, alaşımlar, yarıiletken nanoparçacıklar ve karbonun allotropları ile katkılama üzerine çalışmaktadırlar [14,15]. Aynı zamanda yüzey-hacim oranı, mekanik dayanım, kapasitif özellikler, ömür uzunluğu ve üretilebilirlik özellikleri bakımından diğer malzemeler arasında baskın olmaktadır [16].

Karbonun allotroplarının üstün özelliklerinden istifade etmek için tüm dünya çapındaki araştırmacılar tarafından yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Karbonun elmas, fulleren, grafen, grafit gibi birçok formu elektrik, mekanik, tribolojik ve termal özelliklerinden dolayı ilgi görmektedir [17-19]. Karbonun bir allotropu olarak grafit, grafen olarak isimlendirilen karbon-karbon bağlarından oluşan iki boyutlu katmanların güçlü Van der Waals kuvvetleri oluşturacak şekilde c-ekseni doğrultusunda istiflenmesinden meydana gelir [20]. Grafenin mükemmel elektronik özellikleri üzerine olan ilgi, ilişkili olan yeni malzemelerin araştırılmasına yol açmıştır. Nanoparçacıklarla birleştirilen polimerler, yani polimer-nanokompozitler, elektriksel, termal, ısıma ve mekanik özellikleri yanında antibakteriyel karakteristiği gibi yeni büyük fonksiyonel özelliklere sahiptir [21]. Polimerleri nanografite (NG) ile katkılamak sadece elektriksel, termal özellikleri iyileştirmemizde yardım etmeyip aynı zamanda bu özellikleri amacımız doğrultusunda ayarlayabilme imkânı sağlamaktadır. NG parçacıkları mekanik dayanımları, yüksek

elektrik iletkenliği kolay sentezlenebilirliği gibi özellikleri sayesinde karbon nano tüpler veya nano fiberlere (CNT/CNF) bir alternatif olarak kullanılabilir [22,23].

N_{ss} ve R_s 'in varlığı MS yapının ideal durumdan sapmasına sebep olmaktadır. N_{ss} genellikle yüzey yapısı, örgü kusurları, yüzey hazırlama ve yarıiletken içindeki safsızlıklardan meydana gelmektedir. R_s ise ohmik ve arka kontaklar, kapıya (gate) yapılan bağlantı kabloları ve yığın (bulk) özdirençten kaynaklanmaktadır [9]. NG katkılı PVP gibi yüksek dielektrikli ara katman kullanımı MIS/MPS yapıları performans ve dayanıklılık açısından uygun hale getirebilmektedir [9,24-31]. Yapıdaki tuzaklar, düşük frekanslarda ilave ölçülen C ve G elde edilmesine yol açmaktadır [25,32-36].

Üretilmiş MPS yapısının (NG katkılı PVP) elektriksel karakteristik davranışları yanında dielektrik perspektiften bakıldığında dielektrik davranışları da kendine özgüdür. Bu sebepten dolayı aynı yapının dielektrik özellikleri de önem arz etmektedir. Yüksek dielektrik sabiti, dielektrik-kayıp ve iletkenlik polimerlerin metaller ve bunların alaşımları, oksitler, karbürler ve nitrürler ile katılanması yoluyla elde edilebilirler. Yüksek dielektrikli malzemeler ultra-kapasitörler için bir ihtiyaç olup yük ve enerji depolamada ve istenmeyen yüzey durumlarını ve kristal kusurlarını azaltmada yaygınca kullanılmaktadırlar [31,37-40]. Bir ara katmanın dielektrik özellikleri katmanın kalınlık ve homojenliği, kutuplanma süreci, ara yüzey durumları, frekans, sıcaklık ve uygulanan voltaj gibi birçok etkene bağlıdır. Düşük ve orta frekans değerlerinde polimer ara yüzey katmanı, yükleri bulundukları konundan hareket ettirecek bir elektrik alan altında kolaylıkla kutuplanabilecektir. Böylelikle MPS yapıları, MS ve MIS yapıları ile karşılaştırıldığında önemli avantajlarının olduğu görülmektedir [41-47]. Son dönemlerde organik veya polimerik dielektrik malzemeler, kolay üretilebilirlik, düşük maliyet, esneklik, üretimde sıcaklık ve enerji sarfıyatı gerektirmemesi gibi avantajlarından dolayı M/S ara yüzeyinde inorganik yalıtkanlar yerine tercih edilmeye başlamıştır [31,42-44].

Oksitler ve saf veya katkılı polimer ara yüzey katmanların elektrik ve dielektrik davranışları, yüzey hazırlama, ara yüzey kalınlığı, dielektrik geçirgenliği, düşük ve orta frekanslarda kutuplanabilirliği, ara yüzey durumları (N_{ss}) ve bunların ömür süreleri (τ), frekans değeri ve uygulanan voltaja bağlılık gösterir. Polimer dielektrikler aynı zamanda, moleküler dipol etkileri ve elektrostatik alan etkileşimlerinden dolayı elektronik ve optoelektronik aygıt uygulamaları için önem taşımaktadır. Genel olarak saf polimerler

düşük dielektrik sabiti ve düşük iletkenliğe sahiptir, fakat bu değerler ve bunların kalitesi polimerin çinko, kobalt, nikel, bizmut, grafen, demir-oksit, bakır-oksit, çinko-sülfür, kadmiyum-sülfür gibi metaller, metal-oksitler/sülfürler gibi malzemelerle katkılanması ile iyileştirilebilmedirler. Dielektrik malzemeler dış bir elektrik alanın etkisi altında kutuplanırlar. Bu elektrik alan zıt yükleri birbirinden ayırır ve bir dipol moment oluşmasını sağlar. Bu özellik sayesinde dielektrikle kapasitörlerde elektrik yükü ve enerji depolamada yaygınca kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda bu malzemeler MISFET/MOSFET gibi alan etkili transistörlerde kapı oksit malzemesi (gate-oxide) olarak kullanılmaktadırlar [45-47]. Uygulanan elektrik alanın frekansı dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Frekansın yükselmesiyle polarizasyon azalmaktadır. Böylece dielektrik sabiti düşer.

Yakın zamanda PVP ve PVA bilhassa, nanoparçacık sentezinde, seramiklerde, kozmetikte, görüntü aygıtlarında, biyomedikal uygulamalarda ve ilaç, elektrik ve metalürji sanayiinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [31,43,48-52].

Grafen karbon atomlarının sp^2 hibritleşmesinden oluşan tek katman yapıdır ve iki boyutlu arı peteği formunda kristal örgüye sahiptir. Bunun yanında yüksek elektron mobilitesi, yüksek dielektrik sabiti, yüksek Young modülüne sahip olduğu bilinmektedir. Üstün termal iletkenliği, ayarlanabilir bant aralığı, görünür bölgede yüksek şeffaflık gibi özelliklerin yanında mekanik dayanıma, ultra ince tek/çok katmana sahip ve çevre dostudur. Tüm bu ayırt edici özellikler sebebiyle fizik ve kimya bilimcilerinin ilgisini oldukça çekmektedir [31,39,52-57]. Grafit ise bu tek katmanların bir araya gelerek oluşturduğu yapılardır. Grafen ve grafen oksit (GO) polimer kompozit için uygun bir malzemedir [39]. Örneğin A. Kaya vd. [56] (GO-PrBaCoO) nanoseraimiklerine ait ϵ' değerlerinin 1 kHz frekansta SiO_2 , TiO_2 ve ferroelektrik ($Bi_3Ti_4O_{12}$) malzemelere ait değerlerden sırasıyla 197 kat, 15 kat ve 3,75 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışmasında, NG-katkılı PVP ince filmleri üretilmiş ve MS yapıları için ara katman olarak kullanılmıştır. $C-V-f$ ve $G/\omega-V-f$ ölçümleri 1 kHz-5 MHz gibi geniş bir frekans ve ± 3 V gibi bir voltaj aralığında, oda sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiştir. C^2-V-f grafikleri oluşturulmuş, doğru uyarlaması yapılarak Schottky bariyer yüksekliği (Φ_B), verici yoğunluğu (N_D), Fermi enerji düzeyi (E_F), maksimum elektrik alan (E_m), tükenme katman kalınlığı (W_d) gibi bazı karakteristik parametreler türetilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise NG katkılı PVP ara yüzey katmanının, ε' , ε'' , $\tan\delta$, M' , M'' ve σ_{ac} üzerindeki etkisini aynı frekans ve voltaj aralığında belirlemek amaçlanmıştır. Tüm bu özelliklerin karakteristiği kayda değer bir şekilde voltaj ve frekans ile değişim göstermektedir. Elde edilen yüksek dielektrik sabiti değeri (6,5) 1 kHz'te bile NG katkılı PVP ara yüzey katmanının yaygın kullanılan oksitlerin yerine kullanılabilecek uygun bir malzeme olduğunu kanıtlamıştır.



2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal yarı iletken doğrultucu sistemleri üzerine yapılan en eski sistematik araştırma, genellikle nokta-kontağın toplam direncin uygulanan voltajın polaritesine ve detaylı yüzey koşullarına bağlılığını 1874'te işaret eden Braun'a atfedilir [58]. Çeşitli türdeki nokta-kontaklar doğrultucu ancak 1904'te uygulama alanı bulabilmiştir. 1931 yılında, Wilson yarıiletkenlerde iletim teorisini katıların bant teorisine dayandırarak formüle etmiştir. Daha sonra bu teori metal-yarıiletken kontaklara uygulanmıştır. 1938 yılında Schottky herhangi bir kimyasal katman olmaksızın yarıiletkendeki durağan uzay yükünden kaynaklı bir potansiyel bariyer oluşabileceğini öngörmüştür. Bu öngöründen kaynaklanan model, Schottky Bariyeri olarak bilinir. Aynı zamanda Mott, metal-yarıiletken kontakları için "Mott Bariyeri" olarak bilinen çok faydalı bir teorik model tasarlamıştır. Bu modeller 1942 yılında termiyonik yayılım (termionic-emission) model ile Bethe tarafından desteklenmiştir.

Doğru akım ve mikrodalga uygulamalarındaki ve diğer yarı iletken cihazların karmaşık parçaları olarak önemlerinden ötürü, metal yarı iletken kontakları kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. Özellikle, fotodetektörler, güneş pilleri, MOSFET'in kapı elektrotu vb. cihazlarda kullanılmaktadır. En önemlisi, yoğun katkılı yarı iletken üzerindeki metal kontak, cihazın içine ve dışına akım iletmek amacıyla her yarı iletken cihaz için gerekli olan bir ohmik kontağı oluşturur [59,60]. Güvenilirlik sebeplerinden ötürü yarıiletken yüzeyle oldukça uygun kontak sağlayan ince film yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. İnce film kaplama yöntemleri yüzeyi çok iyi ıslattığı ve atomik düzeyde bağlantılar sağlayabildiği için bu amaca en uygun yöntem olmuştur. Bu yöntemlerle elde edilen aygıtlarda aygıt performansını, hassasiyet ve tepkisellik açısından özellikleri iyileştirme amacıyla günümüzde de çalışmalar tüm hızıyla devam etmektedir. Bu çalışmalar performans, hız, tepkisellik bakımından sorunlara çözüm bulup güvenilirlikle ilgili aygıt dayanımını artırmaya yönelik iyileştirmeleri de sağlamaktadır. Yüksek vakum buharlaştırma sistemlerinde üretilen ince metal filmler ve ince film teknolojisi bu ve benzeri teknolojilerde önemli bir kilometre taşı olmuştur.

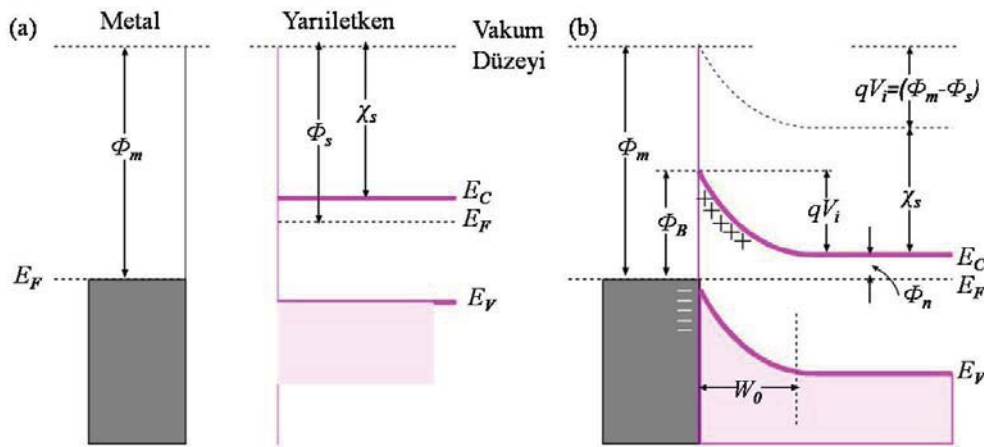
Schottky ve Mott'un modellemelerine göre kontak yapan metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki ilişkiye bağlı olarak bir bariyer oluşumu fikri ile ortaya çıkmıştır. Metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki uyumsuzluk, elektronların transferinde bir bariyer olgusunu ortaya çıkarmıştır.

2.2. Bariyer Oluşumu

Metal, bir yarıiletkenle temas yaptığı zaman metal ve yarıiletken ara yüzeyinde bir bariyer ortaya çıkar. Bu bariyer sığa davranışı yanı sıra akımın kontrolünden de sorumludur. Metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonları kontağın Schottky (doğrultucu) veya ohmik olmasını beklemektedir. “n tipi” yarıiletkenlerde metalin iş fonksiyonu yarıiletkeninkinden büyük olduğu durumda doğrultucu kontak, küçük olduğu durumda ise ohmik kontak elde edilir. “p tipi” yarıiletkenlerde ise bu durum tam tersidir.

2.3. Metal-Yarıiletken Kontaklar için Schottky-Mott Teorisi

Bir metalin bir yarıiletken ile kontak yapması durumunda ortaya çıkan potansiyel bariyeri, metal yarı iletken ara yüzündeki yüklerin ayrılmasından kaynaklanır, böylece yarı iletken içinde hareketli taşıyıcılardan yoksun, yüksek dirençli bir bölge oluşturulur. En eski model, Schottky ve Mott'un bariyer yüksekliğini tanımlamak için ortaya attığı modeldir. Bu modele göre bariyer, iki malzemenin iş fonksiyonları arasındaki farktan gelir. Şekil 2.1'deki enerji bant diyagramı, bariyer oluşumunu tasvir etmektedir.



Şekil 2.1. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için n tipi yarıiletkene metal kontağına ait elektron enerji bant diyagramı (a) birbirinden ayrı nötr malzemeler ve (b) kontak gerçekleşikten sonraki termal denge durumu.

Şekil 2.1.a., iş fonksiyonu Φ_m olan metalin ve metalinkinden küçük iş fonksiyonu Φ_s olan yarıiletkenin elektron enerji bant diyagramını göstermektedir. Bir metalin iş fonksiyonu elektronun Fermi düzeyinden vakum düzeyine çıkabilmesi için gerekli enerjinin miktarı olarak tanımlanır. Vakum seviyesi elektronun metalin hemen dışında olduğu, sıfır kinetik enerjideki seviyedir ve Şekil 2.1.a.'daki referans seviyedir. İş fonksiyonu Φ_m , kristal örgünün periyodik potansiyelinden kaynaklı hacim katkısına ve yüzeydeki muhtemel dipol katmanların varlığından kaynaklı yüzey katkısına sahiptir. İş fonksiyonu Φ_s ise benzer şekilde tanımlanır ve yarıiletkendeki Fermi düzeyinin katkılamaya bağlı değişmesinden dolayı değişkenlik gösterir. Katkılamaya bağlı olmayan bir diğer önemli yüzey parametresi olan elektron ilgisi (electron affinity) χ_s , vakum düzeyindeki ile yarıiletkenin iletkenlik bandının en düşük kenarı ile arasındaki elektronun enerji farkı olarak tanımlanır. İş fonksiyonları ve elektron ilgisi genellikle elektron-volt (eV) cinsinden ifade edilir. Şekil 2.1.a.'da gösterilen yarıiletkende herhangi bir yük birikimi yoktur bu nedenle yüzeydeki bant yapısı bulk malzemedeki ile aynı olup herhangi bir bant bükülmesi gözlenmemektedir.

Şekil 2.1.b., kontağın oluşumu sonrasında ve dengenin ulaşıldığı durumdaki enerji bant diyagramını göstermektedir. İki malzeme sıkı bir şekilde bir araya getirildiği zaman, yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar -ki metaldekilerden yüksek enerjiye sahiptirler- iki taraftaki Fermi düzeyleri çakışana kadar metale doğru akış sağlar. Elektronlar yarıiletkenden çıkıp metale doğru hareket ettikçe, yarıiletken sınırına yakın bölgedeki serbest elektron konsantrasyonu düşer. Elektron konsantrasyonunun azalmasıyla iletkenlik bant kenarı E_c ve Fermi düzeyi E_F arasındaki ayrıklık artar. Termal denge durumunda E_F sabit kalır, iletkenlik bant kenarı E_c Şekil 2.1.b'de görüldüğü gibi yukarı bükülme yapar. Metale geçiş yapan iletkenlik bant elektronları arkalarında verici iyonların pozitif yüklerini bırakır, bu nedenle yarıiletkenin metale yakın bölgesi hareketli yüklerce tükenmiş olur. Böylece yarıiletken tarafında pozitif yük, metale geçen elektronlar sayesinde metal tarafında yüzeye Thomas-Fermi ekranlanma mesafesi kadar uzakta ($0,5 \text{ \AA}$) negatif yük oluşmuş olur. Sonuç olarak Şekil 2.1.b.'de gösterildiği gibi yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan oluşmuş olur. Yarıiletkendeki uzay yükü katmanı kalınlığı kayda değer bir boyuttur. Bunun sebebi, yarıiletkendeki verici konsantrasyonunun metaldeki elektron konsantrasyonundan birkaç derece daha düşük olmasıdır.

Yarıiletkendeki bant bükülmesinin boyutunun ne kadar olduğunu inceleyelim. Metal ile kontak yapmasıyla bir yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının değişmesi beklenmeyeceği için, değerlik bant kenarı E_v , iletkenlik bant kenarı E_c ile paralel olacak şekilde yukarı doğru hareket eder. Bu nedenle, yarıiletkenin elektron ilgisi değişmeden kaldığı kabul edilmektedir. Böylece bir metal-yarıiletken sistemi için termal denge durumunda bariyer yüksekliğini belirleyen önemli nokta vakum düzeyinin geçiş bölgesi boyunca sürekli olmasıdır. Bu yüzden, sürekliliği sağlamak için yarıiletken tarafındaki vakum düzeyi, metal tarafındaki vakum düzeyi ile yaklaşır. Bant bükülmesinin miktarı iki vakum düzeyi arasındaki farka karşılık gelmektedir. Bu, aynı zamanda iki iş fonksiyonu arasındaki farka eşittir. Bu fark, $qV_i = (\Phi_m - \Phi_s)$ ile verilir. Burada V_i kontak potansiyel farkı olup volt ile ifade edilir. qV_i yarıiletkenden metale hareket etmek isteyen elektron için potansiyel bariyeridir. Fakat metal tarafından bakıldığında farklı şekilde ifade edilir ve şu şekilde verilir;

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.1)$$

$$\Phi_s = \chi_s - \Phi_n \quad (2.2)$$

Olduğu için;

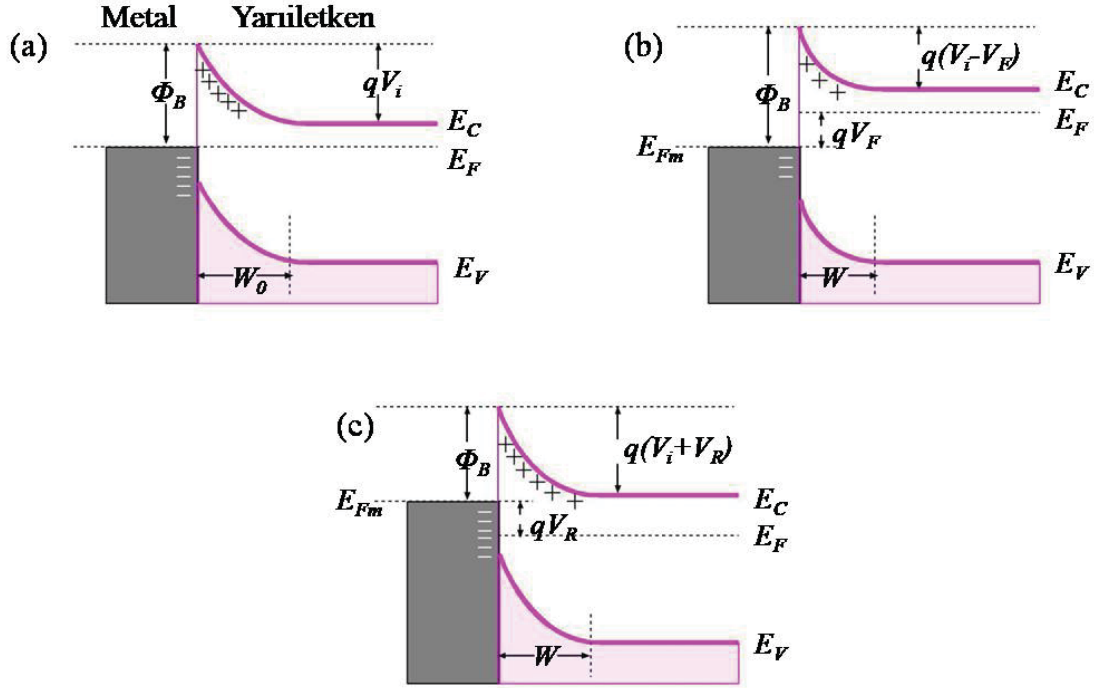
$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (2.3)$$

Burada $\Phi_n = (E_c - E_F)$, Fermi düzeyinin yasak enerji bant aralığına nüfuzunu, q ise elektron yükünü temsil etmektedir. Eş. 2.1, Schottky tarafından bildirilmiştir. Aynı zamanda Schottky'den bağımsız olarak Mott tarafından da aynı yaklaşım bildirilmiştir. Daha sonra bu Schottky limiti olarak anılacaktır. Eş. 2.1 elde edilirken, metal kontağı yapıldıktan sonra yüzey dipolünün Φ_m ve Φ_s 'ye katkılarının değişmeden kaldığı varsayılmıştır.

Potansiyel bariyerin tam şekli uzay yük katmanındaki yük dağılımından hesaplanabilir. Çoğu durumda Φ_B bariyer yüksekliği, kT/q termal enerjiden daha yüksek bir mertebede olur. Yarıiletkendeki uzay yük bölgesi hareketli yük taşıyıcılardan yoksun, yüksek dirençli tükenme bölgesi olur. Bariyerin şekli yarıiletkendeki verici dağılımıyla belirlenmektedir. Schottky yarıiletkenin metal yüzeyine kadar homojen bir şekilde katkılıandığını

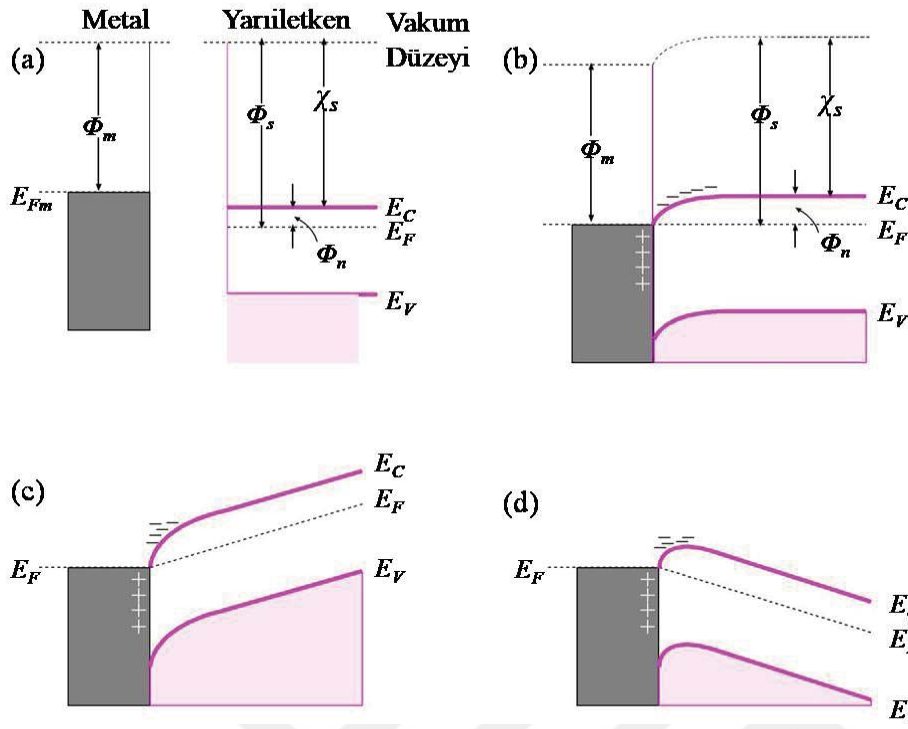
varsaymıştır. Bu tükenme bölgesinde homojen bir yük yoğunluğu sağlamaktadır. Bu sabit uzay yüküne göre elektrik alan mukavemeti, uzay yükü katmanından mesafeye lineer olarak artar. Bu değişim “Schottky bariyer” olarak bilinen parabolik bariyeri meydana getirir. Mott, homojen katkılı bir yarıiletken ile metal arasında sandviç formunda yer almış yükten yoksun ince bir yarıiletken katman olduğunu düşünmüştür. Elektrik alan mukavemeti bu katman boyunca lineer olarak artış göstermektedir. Bu tür bariyere Mott Bariyeri denmiştir. Mott bariyeri, düşük katkılı bir ince katmanın -neredeyse intrinsik-metal ve yüksek katkılı yarıiletken arasına yerleştirildiği durumda karşılaşılr. Bunlara epitaksiyel büyüme ile elde edilmiş yapılar örnek verilebilir.

Kontağın doğrultucu kontak olduğu Şekil 2.2.b.’de görülmektedir. Şekil 2.2.a termal denge durumunda enerji bant diyagramını göstermektedir. Denge durumunda bariyeri aşarak yarıiletkenden metale geçen elektronların oranı ile metalden yarıiletkene geçen ters yönlü elektronların oranı birbirine eşit olduğu için net akım sıfır olur. Tükenme bölgesinde taşıyıcı yoğunluğunun az olması sebebiyle bu bölgenin direnci metal ve doğal yarıiletken ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Uygulanan voltaj bu bölge görünür. Uygulanan voltaj denge durumundaki bant diyagramını potansiyel düşmesine bağlı olarak değiştirmektedir. Metale göre yarıiletken negatif voltajda tutulduğu zaman ($V=V_F$), tükenme bölgesi kalınlığı düşer ve bu bölgedeki voltaj V_i , V_i-V_F ’ye iner. Bu durum Şekil 2.2.b’de gösterilmektedir. Metal tarafında herhangi bir voltaj düşmesi olmadığı için Φ_B besleme voltajından etkilenmeden kalır. Böylece yarıiletkene uygulanan negatif besleme ile yarıiletkenden metale doğru bir elektron akımı ortaya çıkar. Bu kutuplanma için eklem, ileri besleme ile beslenmiştir denilir. İleri besleme akımı V_F voltajı ile üstel olarak artış gösterir. Ters besleme durumuna ait enerji bant diyagramı Şekil 2.2.c’de gösterilmiştir. Burada yarıiletken metale göre pozitif beslemede tutulmuştur ($V=-V_R$) ve potansiyel düşmesi tükenme bölgesi boyunca yükselmiştir (V_i+V_R). Metalden yarıiletkene elektron akışı değişmezken, yarıiletkenden metale elektron akışı denge durumuna göre azalmış olur. Bu da ileri besleme durumuyla kıyaslandığında yarıiletkenden metale daha düşük bir akımın oluşmasını sağlar. Şekil 2.2.b ve 2.c denge dışı durumda tek bir Fermi düzeyinin olmadığını göstermektedir. Elektronların çıktığı bölgedeki Fermi düzeyi elektronların girdiği bölgedeki Fermi düzeyinden yüksektir. Bu açıklanmış durum Şekil 2.2’de belirtildiği gibi $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda geçerlidir.



Şekil 2.2. n-tipi yarıiletkenlerdeki doğrultucu kontakların $\Phi_m > \Phi_s$ (a) termal denge durumunda, (b) ileri beslemede ve (c) ters besleme durumları için elektron enerji bant diyagramları.

$\Phi_m < \Phi_s$ durumunda n tipi yarıiletken için elektron enerji bant diyagramı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekil 2.3.a ayırık yarıiletken ve metal malzemelerinin enerji bantlarını göstermektedir. Kontak oluşturulduktan sonra, elektronlar metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına akış sağlar ve gerisinde (metal sınırında) pozitif yükler bırakır. Bu pozitif yük yarıiletkenin sınır kısmında elektron yığılmasına yol açar. Denge durumu sağlandıktan sonra Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi Fermi düzeyi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar bir büyüklükte yükseliş gösterir.



Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda metal ve n tipi yarıiletken (a) ayrıık durum, (b) termal dengede kontak durumu, (c) yarıiletkeni negatif besleme durumu ve (d) yarıiletkeni pozitif besleme durumu için elektron enerji band diyagramı.

Yarıiletkendeki yığılma katman yükü, Debye uzunluğu mertebesindeki bir kalınlıkta sınırlandırılmıştır ve bu da aslında yüzey yüküdür. Metaldeki elektron yoğunluğu çok yüksek olduğundan metaldeki pozitif yük $0,5 \text{ \AA}$ derinliğe sahip bir yüzey yükü olarak biçim alır. Yarıiletkende herhangi bir tükenme bölgesi oluşmadığı ve ne yarıiletkenden metale ne de metalden yarıiletkene akacak elektronlar için bir potansiyel bariyer olmadığı açıktır. Elektron konsantrasyonu ara yüzeyde yükselmiştir ve yüksek dirençli bölge bu sistemde yığın (bulk) yarıiletken bölgedir. Şekil 2.3.c ve Şekil 2.3.d iki yönlü akım gösterilmektedir. Akımın bulk yarıiletken bölgenin direnci ile belirlendiği ve uygulanan beslemenin yönünden bağımsız olduğu belli olmaktadır. Bu tür doğrultucu olmayan kontaklar genelde ohmik kontak olarak anılır.

Özet olarak n tipi yarıiletken için metal yarıiletken kontak $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda doğrultucu olmayan (ohmik) kontak olur. P tipi yarıiletkenler için ise tersi geçerlidir. Örnek vermek gerekirse $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda enerji bant diyagramı Şekil 2.4.a'daki gibi oluşmaktadır. İki malzeme sıkı kontak yapıldığı durumda elektronlar metalden yarıiletkene Fermi düzeyleri hizalanana kadar akış gerçekleştirir. Bu elektronlar p tipi yarıiletkenler için azınlık yük taşıyıcılarıdır. Yarıiletkende bu elektronlar holler ile

rekombinasyon gerçekleştirdiği zaman iyonize alıcıların uzay yükü ortaya çıkmış olur (Şekil 2.4.b). Uzay yükü bölgesindeki hol konsantrasyonları alıcı konsantrasyonu ile karşılaştırıldığı zaman ihmal edilir derecede azdır. Bunu, kontağın yarıiletken tarafındaki tükenme bölgesinden oluşan uzay yük bölgesi takip eder. Tükenme bölgesi kalınlığı W_0 iyonize alıcı atomların konsantrasyonuna bağlıdır. Bu durum Şekil 2.1.b'deki durum ile benzerlik göstermektedir. Şekil 2.4.b'de gösterilen Φ'_B şöyle verilir.

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

Burada E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığını ifade etmektedir. Eş. 2.1-2.4'ten yola çıkarak $\Phi_B + \Phi'_B = E_g$ eşitliği elde edilir. Benzer yaklaşımla Şekil 4'teki durumda metal-p-tipi yarıiletken kontakların $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak olmadığı (ohmik) görülür.

Deneysel sonuçlara göre metal-yarıiletken kombinasyonlarının büyük bir çoğunluğu doğrultucu kontak ve potansiyel bariyerinden oluşmaktadır. P tipi yarıiletken Schottky bariyer kontakları genellikle düşük bariyer yüksekliğine sahiptir ve nadiren kullanılırlar. Bu yüzden daha sonraki aşamalarda n-tipi yarıiletken üzerine yapılan Schottky kontaklara göre anlatım gerçekleştirilecektir. Bu tez, n-tipi Si yarıiletken üzerine yapılan Schottky bariyer yapısını incelemek üzerine inşa edilmiştir.

2.4. Metal-Yarıiletken Ara Yüzeylerin Sınıflandırılması

Metal ve metal olmayan malzemeler arasındaki ara yüzeyler atomik konfigürasyona yol açan dört genel sınıfta sınıflandırılmaktadırlar. (1) Yalıtkan (veya yarıiletken) ve yüzeyinde fiziksel olarak soğrulmuş metal. (2) Si gibi yüksek kutuplanabilir (dielektrik sabiti $\epsilon_r > 7$) malzeme ile metal arasındaki zayıf kimyasal bağ. (3) yüksek kutuplanabilir yarıiletken ile metal arasındaki kuvvetli kimyasal bağ. (4) Temizlik veya yüzey hazırlama sırasında yüzeyde kalan doğal oksit ile yüksek kutuplanabilir yarıiletken arasındaki sıkı kontak. Bu film ara yüzey katmanına karşılık gelmektedir.

2.4.1. Yüzey durumlu ve yalıtkan ara yüzey katmanlı kontaklar

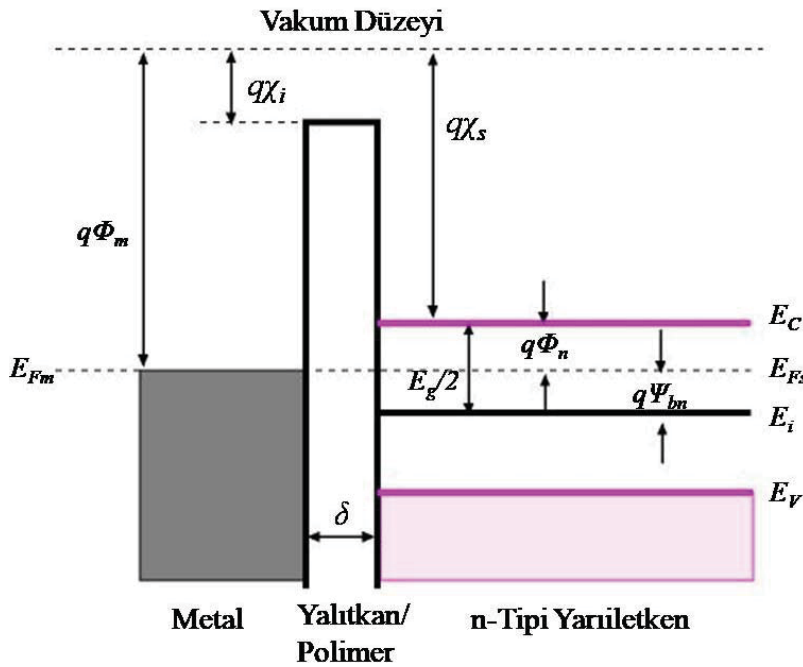
Bu tür kontaklar Northrop ve Rhoderick [61] son zamanlarda Rhoderick [62] tarafından tarif edilen yarıiletken aygıtlarda karşımıza çıkmaktadır. Metal yarıiletken kontak

yarıiletken burada yalıtkan katman ile ayrılmıştır ve iki ayrı sistem olarak inceleme imkânı sağlamaktadır.

2.5. İdeal Schottky Yapıları

2.5.1. İdeal MPS yapılar (kapasitör/Schottky diyot)

MPS yapılarda (veya MIS) yapılarda metal-polimer-yarıiletken üçlü yapısı ara yüzeyleri metal-polimer ve polimer-yarıiletken olmak üzere iki ara yüzeyi ayrıca incelemek icap etmektedir. İdeal durumda yarıiletkende ve metalde polimere yakın bölgelerde bulunmaktadır. Doğru akım uygulandığı durumda polimerden akım geçmez. İdeal dışı duruma sebep olan ise yarıiletken yüzeyinde bulunan durumların varlığıdır. Yalıtkan malzemenin buradaki görevi metaldeki elektronların bu boş durumlara yakalanmaması ve aygıt performansını düşürmemesi için bir bariyer oluşturmaktır. Yarıiletken yüzeyinde kristal sonu olduğu için boş bağlar, kusurlar ve buna bağlı durumlar ortaya çıkmaktadır. Metal ile doğrudan bağlantı yapıldığı zaman bunlar aygıt performansını dramatik bir şekilde düşürmektedir. Yalıtkan bu boş bağları pasifleştirerek durum yoğunluğunu ciddi derecede azaltmaktadır. Aşağıda Şekil 2.5 sıfır beslemede n tipi yarıiletken üzerine inşa edilmiş MPS yapısının enerji bant diyagramı gösterilmiştir.

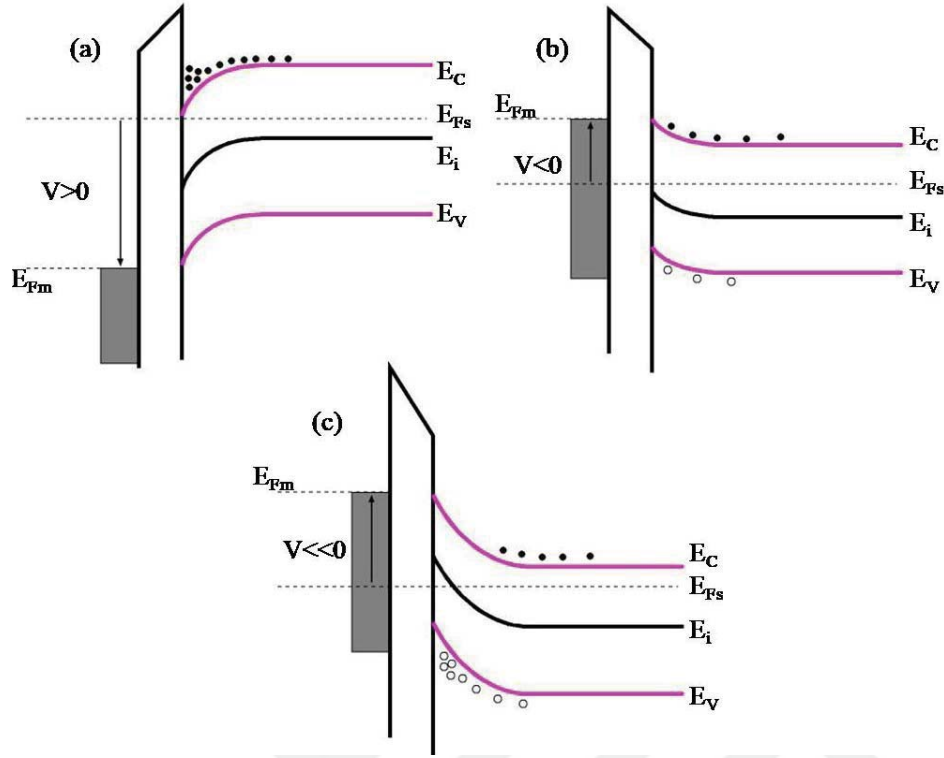


Şekil 2.5. Sıfır beslemede ideal MIS yapının denge durumunda enerji bant diyagramı.

İdeal MPS yapısında kolaylık açısından metal ve yarıiletken arasında herhangi bir iş fonksiyonu farklılığı olmadığı varsayılmaktadır ($\Phi_{ms}=0=\Phi_m-\Phi_s$). Yani n tipi bir yarıiletken üzerine inşa edilen MPS yapı için [60];

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \Phi_m - (\chi_s + \Phi_n) = 0 \quad (2.5)$$

Burada ψ_{Bn} ve Φ_n bant ortası ve bant kenarı Fermi potansiyelleridir. Bir MPS yapı pozitif veya negatif voltajla beslendiği zaman, temelde yarıiletken yüzeyinde üç durum ortaya çıkar (Şekil 2.6). Metale pozitif voltaj uygulandığı durumda ($V>0$) değerlik bant kenarı E_V yukarı doğru bükülme yaparak Fermi düzeyine doğru yaklaşır. İdeal MPS yapısında akan akım sıfırdır, bu nedenle Fermi düzeyi yarıiletkende bükülmeden düz olarak kalmaktadır. Taşıyıcı yoğunluğu enerji farkına (E_F-E_V) üstel olarak bağlı olduğu için bu bant bükülmesi çoğunluk taşıyıcıların (elektronlar) yarıiletken yüzeyine yakın bölgede yığılmasına neden olmaktadır. Bu durum “yığılma” durumudur. Küçük negatif voltaj uygulandığı zaman ($V<0$), bantta aşağı doğru bükülme gerçekleşir ve çoğunluk taşıyıcılar yok olur (tükenir). Bu durum “tükenme” durumudur. Negatif voltaj büyütüldüğü durumda ($V<<0$) bant bükülmesi çok daha büyük gerçekleşmektedir. Böylelikle azınlık taşıyıcı yoğunluğu (holler) elektronlara göre yarıiletken yüzeyinde daha fazla birikme yapmaktadır. Bu durumda taşıyıcılık terse döndüğü için “tersinim” durumu ortaya çıkmış olur. P tipi yarıiletken için taşıyıcı türü ve voltaj yönü ters olduğu durumda aynı olgular geçerli olmaktadır.



Şekil 2.6. İdeal bir MPS yapının farklı beslemeler altındaki (a) yığılma, (b) tükenme ve (c) tersinim durumlarındaki enerji bant diyagramları.

2.5.2. Schottky Bariyerin Kapasitansı

P-n eklemler gibi bir Schottky bariyer de kapasitans göstermektedir. Bir istisna ile, n tipi yarıiletken üzerine inşa edilmiş Schottky bariyer diyotlar sanal olarak özgündür. Bu istisna difüzyon kapasitansı olarak kabul edilir. Bir p-n ekleme alternatif voltaj uygulandığı durumda hollerin ileri yarı-çevrim sırasında n tarafa basılmasını negatif yarı çevrim boyunca geri çekilmesi takip eder. AC bileşenin dalgalanmasıyla difüzyon kapasitansı denilen kapasitans ortaya çıkar. Difüzyon kapasitansı azınlık taşıyıcı yüklerin depolanması olgusuyla yakından bağlantılıdır. Schottky bariyer diyotlarda ise azınlık taşıyıcı yük depolanması ve dolayısıyla difüzyon kapasitansı bulunmamaktadır [62].

2.5.2.1. Tükenme (depletion) kapasitansı

Schottky bariyer diyotların kapasitansları tükenme bölgeleri ile ilişkilendirilir. Bu bölge bazı görüşlere göre bir “paralel plaka kapasitörü” görevi görür. Uygulanan ters besleme ile plakalar arasındaki kapasitans artış gösterir. Kapasitans genellikle ters DC (doğru akım) voltajı üzerine bindirilen küçük alternatif voltaj ile ölçülür. Bu diferansiyel kapasitansı

$C(=dQ/dV)$ verir. N tipi yarıiletken Schottky bariyer yapılarında yüzey durumlarının varlığında üç çeşit yük kaynağı bulunmaktadır: dengelenmemiş verici yükleri Q_d , metal yüzeyindeki yükler Q_m ve metal ile birleştirilen yarıiletkendeki hollerden gelebilecek yükler Q_h . Bariyer yüksekliği bant aralığının yarısından net bir şekilde büyükse hollerden gelen katkı ihmal edilemez. Bu durumda yarıiletkenin metale bakan yüzeyi p-tipine dönüşmüş olur. Böylece $Q_d+Q_m+Q_h=0$ olur. Ters besleme voltajı artarsa elektronlar Q_d 'yi artırmak üzere bulk yarıiletken içine yönelir ve holler metale doğru yönelerek Q_h 'nin düşmesine sebep olur. Burada kapasitans değeri $C=dQ_d/dV$ ifadesiyle hesaplanabilir. Tükenme yaklaşımına göre verici yükleri Eş. 2.6 ile verilir.

$$Q_d = (2\varepsilon_s q N_D V_d)^{1/2} \quad (2.6)$$

Burada V_d , V_r ters besleme altındaki difüzyon potansiyelidir ve $V_{d0}+V_r$ 'ye eşittir. V_{d0} ise sıfır beslemedeki difüzyon potansiyelidir. Böylece kapasitans:

$$C = \frac{\partial Q_d}{\partial V_r} = \frac{\partial Q_d}{\partial V_d} = \left(\frac{\varepsilon_s q N_D}{2V_d} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Daha doğru bir hesaplama için:

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s q N_D}{2\{V_d - (kT/q)\}} \right]^{1/2} = \left[\frac{\varepsilon_s q N_D}{2\{\phi_b - \xi + V_d - (kT/q)\}} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

Burada $\xi = E_C - E_F$ 'yi ifade eder. $V_{d0} = \phi_b - \xi$ olduğu için; C^{-2} 'nin V_r 'ye göre çizimi eğimi $2/\varepsilon_s q N_D$ olan lineer bir çizgi halini alır. Bu lineer doğruların voltaj eksenini kestiği nokta $-V_0$ 'a eşit olur o da aslında $-(V_{d0} - kT/q)$ 'ya eşittir. Böylece;

$$V_{d0} = V_0 + \frac{kT}{q} \quad (2.9)$$

ve

$$\phi_b = V_0 + \xi + \frac{kT}{q} \quad (2.10)$$

Elde edilir. Bu, Φ_b ve N_D 'yi belirlemek için önemli bir yöntem sağlamış olur. Beslemeye bağlı ters beslemeli Schottky bariyeri aynı zamanda voltaj kontrollü değişken bir kapasitans anlamına da gelmektedir.

N_D sabit değilse $C^{-2}-V_r$ grafiği lineer davranış göstermez. Fakat bazı bölgelerde yine de $2/\epsilon_s q N_D$ eğimini verecektir. Bu durumda N_D , tükenme bölgesi kenarındaki verici yoğunluğu olmuş olur. Tükenme bölgesi kalınlığı W_d , $C=\epsilon_s/W_d$ eşitliğinden elde edilebilir olmaktadır. Bu sebepten N_D için W_d 'nin bir fonksiyonu olduğundan söz edilebilir [62]. Bu yaklaşım, yarıiletkendeki safsızlık yoğunluğunun ölçülmesinde çok faydalı bir yöntemdir. Bu prensibe dayalı ölçüm yapan birçok ticari cihaz bu alanda kullanılmaktadır [63] Bu yöntem farklı frekanslarda ölçülen kapasitans değerlerinden yola çıkarak frekansa bağlı eklemin davranışlarını, difüzyon potansiyeli, engel yüksekliği, engel yüksekliğindeki varyasyonlar gibi parametreler hakkında bilgi sahibi olunmasına imkân sağlamaktadır.

2.5.3. Metal-polimer-yarıiletken yapılarda yüzey potansiyelinin voltaja bağlılığı

Termodinamik denge koşulları olmaksızın metal, polimer ve n-tipi yarıiletkenin bir araya getirilmesinden oluşan yapının enerji bant diyagramı Şekil 2.7'de verilmiştir. Şekil 2.7'de verilen δ ara yüzey katman kalınlığı, Φ_0 değerlik bandına göre arayüzey durumlarının nötr seviyeleri, V_i ara yüzey boyunca engel alçalması olarak verilir. Yarıiletken yüzey potansiyeli ψ_s , ileri besleme durumu için gerilimin bir fonksiyonudur.

Ara yüzey yük miktarı, yarıiletkenin Fermi düzeyi ile nötr yük düzeyi arasındaki durumlardan ortaya çıkar:

$$Q_{ss}(V) = -qN_{ss}\{E_g - q[\Phi_0 - V_n - \psi_s(V)]\} \quad (2.11)$$

$$\Psi_s(V) = \frac{1}{1+\alpha} \left\{ \left[(\Phi_m - V - \chi) + \alpha \left(\frac{E_g}{q} - \Phi_0 \right) \right] \right\} - V_n \quad (2.14)$$

Elde edilir. Bu durumda α ifadesinden yararlanarak yeni bir katsayı olan c_2 'yi tanımlamak gerekmektedir:

$$c_2 = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i + q^2 \delta N_{ss}} \quad (2.15)$$

Yüzey potansiyeli ifadesi Eş. 2.14 yeniden düzenlenir ve termodinamik denge durumuna geçince $V=0$ olur. Bu durumda Schottky bariyer yüksekliği:

$$\Phi_b = c_2(\Phi_m - \chi_s) + (1 - c_2) \left[\frac{E_g}{q} - \Phi_0 \right] \quad (2.16)$$

c_2 , aynı zamanda teori ile uygulama arasındaki geçişi sağlayan bir parametredir. Yüzey durumlarının yoğunluğu N_{ss} sonsuza doğru gittiğinde c_2 , 0'a gider. Bu da ara yüzey olmadığı durumda oluşturulan Schottky bariyerinin yüksekliğini verir. Bariyer yüksekliği Bardeen sınırına yaklaştığı söylenir [62] ve;

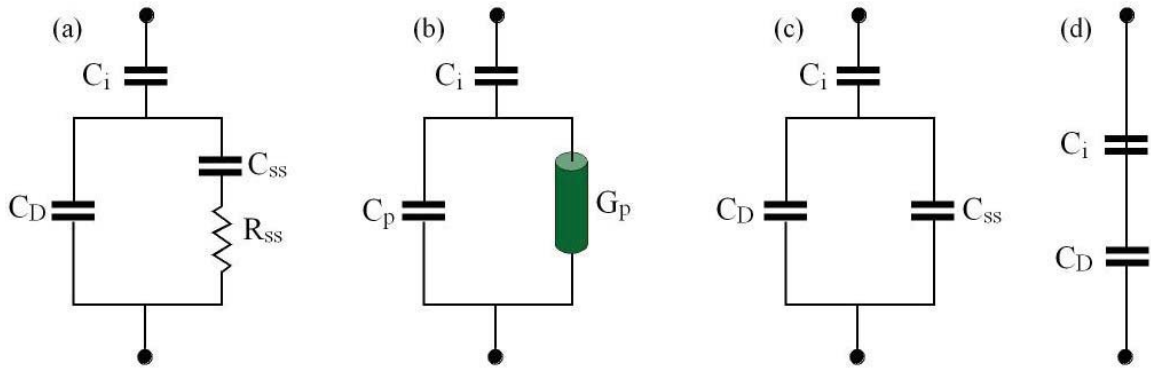
$$\Phi_b = E_g/q - \Phi_0 \quad (2.17)$$

İfadesiyle verilir. N_{ss} seviyesi azaltıldığı durumda ise c_2 parametresi ihmal edilemez düzeyde olur. N_{ss} seviyesi 0'a doğru gittiğinde c_2 , 1'e yaklaşır ve Schottky bariyer yüksekliği;

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (2.18)$$

şekline dönüşür. Burada bariyer yüksekliği Schottky-Mott sınırına yakın olur [62].

Yüksek frekanslı alternatif akım (AC) sinyali uygulandığı durumda ara yüzey durumlarının bu frekansa tepkisi beklenenden farklı olur ve AC sinyaldeki kutuplanma değişimlerini takipte zorlanabilir. Şekil 2.8 (d)'de verilen eş değer devre modellerine göre yüksek frekans AC sinyal uygulanması durumunda yapıda, polimerin kapasitansı ve tükenme bölgesinin kapasitansının seri bağlanmış davranışı ile karşılaşılr.



Şekil 2.8. MPS yapılarının (a), (b) Ara yüzey durum yoğunluğu etkisi altındaki, (c) düşük frekanslı ve (d) yüksek frekanslı AC sinyal uygulandığı durumdaki eşdeğer devreleri.

Zaman sabitinin yüksek frekanslı AC sinyal periyoduyla kıyaslandığında çok uzun kalması, yüklerin ara yüzey durumlarına yerleşip oradan tekrar çıkmasını zorlaştırmaktadır. Kapasitans ifadesi şu şekilde verilir.

$$C = c_2 \left[\frac{\epsilon_s q N_D A^2}{2\{\Phi_b - V_n - c_2 V\}} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

Deneysel çalışmalarda uygun bir metot geliştirmek üzere C^{-2} ifadesi türetilmiştir:

$$C^{-2} = \left[\frac{2\{\Phi_b - V_n - c_2 V\}}{c_2^2 \epsilon_s q N_D A^2} \right] \quad (2.20)$$

Ters besleme bölgesinde voltaja bağlı alınan kapasitans ölçümlerinden çıkılarak C^{-2} -V grafikleri çizildiğinde bu bölgede doğrusal bir davranış elde edilir. Bu doğruların voltaj ekseninde kestiği noktadan kesim voltaj (V_0) değerleri elde edilir. Kapasitansın “-2.” kuvvetindeki c_2 ’nin deneysel değerine ulaşmak için “ dC^{-2}/dV ” yerinde C^{-2} -V grafiklerinin eğimi kullanılır. c_2 ifadesi çekildiği zaman;

$$c_2 = \frac{2}{\epsilon_s q N_D A^2 \left(\frac{dC^{-2}}{dV} \right)} \quad (2.21)$$

olarak elde edilir. Burada C-V yöntemi ile elde edilen bariyer yüksekliği Eş. 2.22’teki gibi olur:

$$\Phi_{b(C-V)} = V_n + c_2 V_0 \quad (2.22)$$

V_n ifadesi de Fermi enerji düzeyi ifadesinden elde edilir:

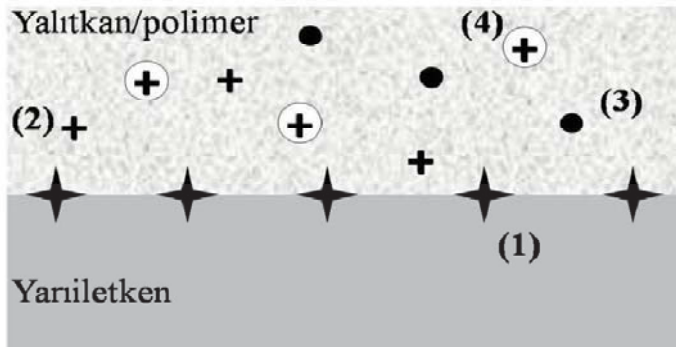
$$V_n \cdot q \cong E_F = kT \cdot \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (2.23)$$

Yine C^{-2} -V grafiklerinin eğimi ($1/\text{eğim}$) kullanılarak verici atom yoğunluğu N_D aşağıdaki Eş. 2.24 ile elde edilir.

$$N_D = \frac{2}{\epsilon_s q A^2} \left(\frac{dV}{dC^{-2}} \right) \quad (2.24)$$

2.5.4. Metal-polimer-yarıiletken yapılarda ara yüzey durumları

Metal ve yarıiletken yüzeylerin bir araya getirilmesiyle elde edilen metal-yarıiletken yapılarında yarıiletken yüzeyinde var olan tuzak yük ve yüzey durumlarının etkileri belirgin bir şekilde aygıt performansında ortaya çıkmaktadır. Ara yüzeye uygulanan polimer gibi bir yalıtkan malzeme ile bu ara yüzey durumlarının etkisi ve davranışında değişiklikler meydana gelir. Bu ikinci durumda polimer içindeki sabit yükler, yalıtkan ve yarıiletken arasındaki yükler, yalıtkindan kaynaklı tuzak durumlar ve aygıt fabrikasyonundan kaynaklı ara yüzey kusurları (durumları) etkin rol oynamaktadır. Bu dört farklı mekanizmanın tasviri Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Polimer ve yarıiletken yapısındaki yük ve durumların tasviri.

Ara yüzey durumları yalıtkan-yarıiletken ara yüzeyinde yalıtkindan ziyade yalıtkan yüzeyi ile ilişkilendirilir. Bu durumlar yarıiletken yüzeyinde ve hatta yarıiletken yasak enerji bant aralığı içine doğru yerleşmiş vaziyette yer alırlar. Ara yüzey durumları, ucu açık atomik bağlara, atomik boşluklara, kristal kusurları, safsızlık, yabancı atom v.b. durumların varlığından kaynaklı pozitif ve negatif yük gibi veya boşluk gibi davranış gösterirler. Bir

yükün bu enerji durumu veya boşluğu ile muhatap olmasından dolayı yüzey yük davranışını ve potansiyelini değiştirmesine sebep olabilmektedir. Daha önce Şekil 2.8.a'da gösterilen eş değer devre modeline göre ara yüzey durumlarından kaynaklı yüzey yük yoğunluğunda değişiklik meydana gelmektedir. Bu yüzey tuzaklarından kaynaklı yük değişimi metal-polimer-yarıiletken yapısında ilave bir kapasitans (C_{it}) değerine sebep olmaktadır. Aynı zamanda iletkenlik üzerinde de etkisi olacağı bilinen bu tuzak yükler ilave bir dirence (R_{it}) yol açacaktır. Bu etkilerin devre modelindeki yeri Şekil 2.8.a'da gösterilmiştir. Ara yüzey durumlarının ömrü (τ_{it}) kapasitans ve direncin çarpımı şeklinde ifade edilir. Bu da ara yüzey durumlarının frekansa verdiği tepkinin ölçülmesinde yardımcı olur. Kapasitans ve direncin bileşkesi ile paralel iletkenlik değeri ortaya çıkar ve Şekil 2.8.b'de gösterilen eşdeğer devreye ulaşılır. Frekans değerine göre eşdeğer devrede kapasitans ve direncin değerlerinde değişiklik meydana gelir ve Şekil 2.8.c ve d'deki eşdeğer devre davranışları elde edilir. Eşdeğer devrenin admitans ifadesi Eş. 2.25'da verilmektedir:

$$Y = \frac{j\omega C_{it}}{1+j\omega C_{it}R_{it}} + j\omega C_D = j\omega C_p + G_p \quad (2.25)$$

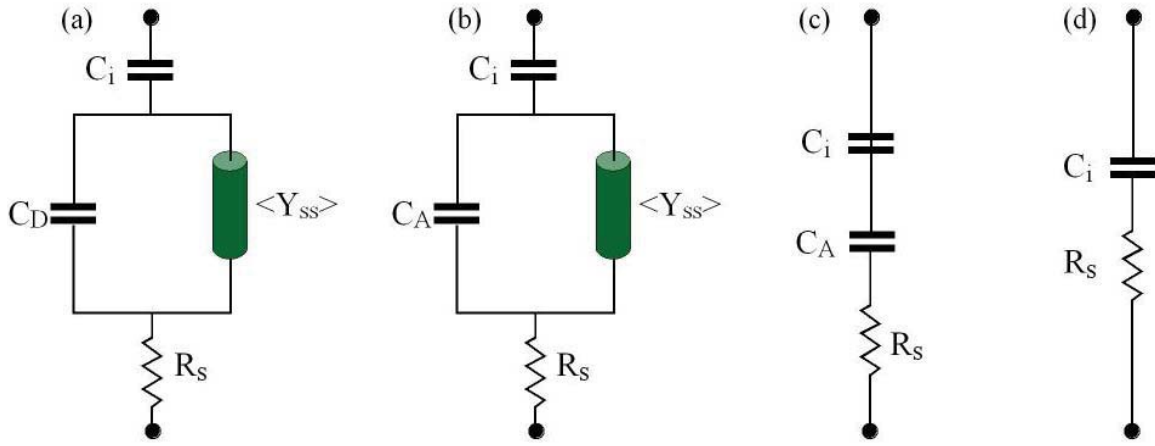
Paralel kapasitans (C_p) ve paralel kondüktans (G_p) ifadeleri:

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1+(\omega\tau_{it})^2} \quad (2.26)$$

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega\tau_{it}C_{it}}{1+(\omega\tau_{it})^2} \quad (2.27)$$

şeklinde verilir.

Paralel kondüktans ifadesi arayüzey durumlarının ömür değerlerini elde etmede yardımcı olacaktır.



Şekil 2.10. R_s etkisinin eklendiği (a) tükenim durumunda, (b) yığılma durumunda, (c) ve (d) basit gösterim ile eş değer devre modelleri [35].

Düşük ve yüksek frekans durumlarında aygıtın davranışına karşılık gelen devre modelleri sırasıyla Şekil 2.12 c ve d’de verilmiştir. Ara yüzey durumlarının kapasitansından kaynaklı reaktans yanında bu durumlardan kaynaklı direnç ihmal edilir ve tükenim kapasitansı ile ara yüzey durumlarından kaynaklı kapasitans birbirine paralel olmuş olur. Yüksek frekans durumunda, arayüzey durumlarının kutuplanma hızını takip edememesinden dolayı burada oluşan kapasitans ve reaktans ihmal edilir. Sonuçta Şekil 2.12.d’de ifade edilen eşdeğer devre modeli ortaya çıkar. Farklı olarak Şekil 2.10’daki tüm devre modellerinde belirtilen seri direnç kondüktans ve kapasitans ölçümlerinde önemli bir fark ortaya çıkarmaktadır. Bu sebepten ötürü seri direncin etkisi de hesaba katılmalıdır. Frekansa göre bu etki farklılık göstermektedir. Yüksek frekanslarda yığılma kapasitörünün iletkenliği (ωC_A), arayüzey durumlarının iletkenliğinden (Y_{it}) çok büyük olduğu Y_{it} devreden çıkarılabilir. Yalıtkanın kapasitansı (C_i) ile seri şekilde kalan yığılma kapasitans değeri çok küçük olduğu için ihmal edilir. Bu durumda Şekil 2.10 d’de basitleştirilmiş haliyle devre modeli polimerin kapasitansı ve seri dirençten oluşmaktadır. Bu yaklaşım kullanılarak seri direnç (R_s) değeri bulunabilir. Güçlü yığılma durumuna göre Eş. 2.25 yeniden yazılırsa;

$$Y_{ma} = j\omega C_{ma} + G_{ma} \quad (2.28)$$

Bu ifadede yer alan C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla ölçülen güçlü yığılma kapasitansı ve iletkenliğidir.

Bu ifadeden yararlanarak empedans ifadesi yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa empedansın reel kısmından seri direnç R_s elde edilir [35]:

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (2.29)$$

2.5.4. Ara yüzey durum yoğunluğu ölçüm yöntemi

Metal-yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) yapılarda ara yüzey durum yoğunluğunu belirlemek üzere E. H. Nicollian ve A. Goetzberger tarafından 1960'lı yıllarda ortaya konulan “iletkenlik yöntemi” oldukça kolay uygulanabilir ve başarılı bir yöntemdir. İletkenlik yönteminin uygulanması MPS yapıda değişen voltaj ve frekans setlerinde iletkenlik ve kapasitans ölçümleri (G_m ve C_m) temeline dayanır [24]. Başlangıç olarak yarıiletken yüzey potansiyelinin (Ψ_s) voltaja göre integralinin çözümü ile başlanır;

$$\Psi_s = \int_{V_a}^{V_G} \left\{ 1 - \frac{C_{LF}}{C_i} \right\} dV_G + \varphi^* \quad (2.30)$$

Burada φ^* integral sabiti olup C_{LF} düşük frekans kapasitans değeridir. C_i ara yüzey yalıtkanının (bu tezde polimer) kapasitans değeridir. V_a , yığılma bölgesindeki besleme voltajıdır. Bu integralin çözümünden polimerin yığılma bölgesindeki kapasitans değeri;

$$C_i = C_m \left[1 \pm \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] \quad (2.31)$$

Polimer ve yarıiletken ara yüzeyindeki durumlarının yarı iletken enerji bant aralığında devamlı bir dağılımı vardır. Frekansa göre normalize paralel iletkenlik ifadesi (G_p/ω);

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qAN_{ss}}{2\omega\tau} \ln[1 + (\omega\tau)^2] \quad (2.32)$$

Deneyssel ölçüm sonuçlarına dayanarak Eş. 2.31'nin de yardımıyla hesaplanan G_p/ω ;

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_i^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_i - C_m)^2} \quad (2.33)$$

eşitliği ile elde edilir. Paralel iletkenlik, yüklerin ara yüzey durumlarına yakalanarak tekrar yayınlanması ile akıma katılması sonucunda bir kayıp yaşar ve durum yoğunluğunun frekansa bağlı davranışını oldukça güzel yansıtır. Durum yoğunlukları (N_{ss}) ve durumların durulma zamanları (τ), G_p/ω değerlerinin frekansa bağlı grafiklerinden elde edilir. Farklı voltaj değerleri için elde edilen her bir eğri belirli bir frekans değerinde tepe noktası

verecektir $\{(G_p/\omega)_{max}\}$. Bu noktadaki frekans değerin karşılık geldiği açısal frekans değeri ile durulma zamanları arasında $\omega=1,98/\tau$ şeklinde bir bağlantı bulunmaktadır. Ek olarak, $N_{ss}=(G_p/\omega)_{max}/0,402qA$ eşitliği kullanılarak durum yoğunluğu değerleri elde edilir. Durum yoğunluklarının bant içindeki konumlarını enerji ekseninde gösterebilmek üzere iletkenlik bandı tabanından uzaklıkları (E_c-E_{ss}) hesaplanır. Bunun için;

$$n(V) = \frac{qV}{kT \cdot \ln(I/I_0)} = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (2.34)$$

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \alpha(V) = \Phi_{B0} + [1 - 1/n(V)]V \quad (2.35)$$

Burada α , bariyer yüksekliğinin voltaja göre türevine eşittir ve Eş. 2.35’da sağ tarafta verilmiştir [64]. Bu bariyer yüksekliği ifadesi ile;

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (2.36)$$

değerleri bu şekilde her voltaj değeri için elde edilir.

2.6. Dielektrik Özellikler

2.6.1. Dielektrik malzemeler

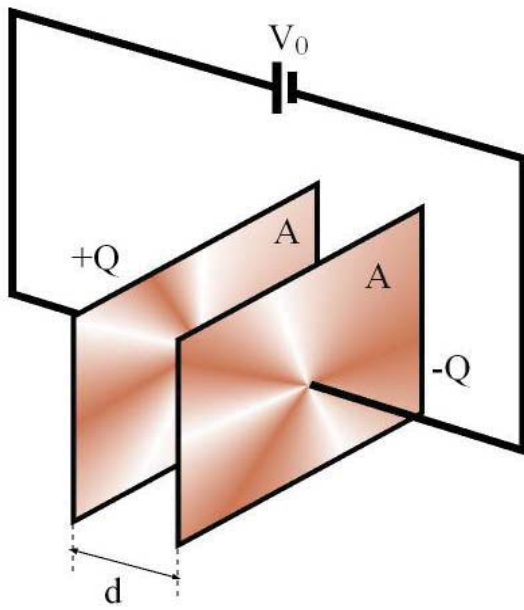
Elektrik alan etkisi altında serbest hareket eden yük taşıyıcıları bulunmayan yalıtkan malzemeleri tanımlamak üzere kullanılan bir ifadedir, dielektrik. Elektrik alana tepki olarak yük merkezlerinde bir kayma meydana gelir ve ortaya kutuplanma olgusu çıkar. Elektrik akımının iletilmesinin istendiği durumda iletken kullanılırken akımı sınırlamak, kaçak akımları engellemek ve gürültü gibi elektronikte istenmeyen dış etkileri bloke etmek için dielektrik malzemeler yaygın bir şekilde kullanılır.

Atom ve moleküllerin yük merkezleri dielektrik malzemeler için eş merkezlidir ve serbest yük neredeyse yoktur. Fakat elektrik alan altında bu malzemelerde “+” ve “-” yükler elektrik alanın etkisi ile konum değişikliği yaparlar. Bu da kutuplanmayı meydana getirir. Bu durumda yükler arasında “dipol moment” meydana gelir. Bu durum elektrik alanın varlığında gerçekleşir. Elektrik alan etkisinden çıkan malzemede yükler tekrar eş merkezli olarak yerlerini alırlar. Dipol momentler ortadan kaybolur.

Dielektrik malzemelerin elektriksel özelliklerini ifade etmede kullanılan parametre “dielektrik sabiti”dir. Dielektrik sabiti elektrik alan şiddetinden bağımsız olup elektrik alan frekansı ve ortam sıcaklığı ile değişiklik gösterebilir.

2.6.2. Boş ve dielektrikli paralel levha kapasitörü

Aralarındaki mesafe (d) ve yüzey alanları (A) belirli olan iki levha bir araya getirildiğinde boş bir paralel levha kapasitörü oluşur (Şekil 2.11).



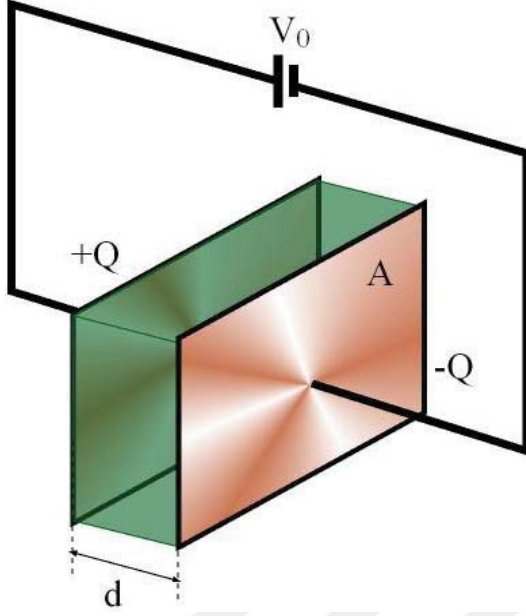
Şekil 2.11. Boş paralel levha kapasitörü.

Levhalar Şekil 2.11’te olduğu gibi doğru akım (DC) bir gerilim uygulandığı durumda levhalar voltaj kutbu ile aynı yönlü olacak şekilde bir Q yükü ile dolmuş olacaktır. Birim yüzeydeki yük miktarı “ $\sigma=Q/A$ ”, boşluğun elektriksel geçirgenliği “ ϵ_0 ” olmak üzere; levhalar arasındaki elektrik alan $E_0= \sigma/\epsilon_0$ ile verilir. Levhalar arasındaki potansiyel fark ise elektrik alan ile levhalar arasındaki mesafenin çarpımı; yani $V_0= \sigma d/\epsilon_0$ ile verilir. Boş levha kapasitör için sığa ifadesi,

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.37)$$

şeklinde elde edilir.

İki levha arası bir dielektrik malzeme ile doldurulduğu durumda (Şekil 2.12) sığa, elektriksel iletkenlik niceliğinin dielektrik malzemenin $\epsilon'(>1)$ dielektrik sabiti kadar artış gösterdiği için aynı oranla artar (Eş. 2.38). Aynı şekilde levhalar arasındaki potansiyel fark da bu çarpanla azalmış olur ($V=V_0/\epsilon'$) ve dolayısıyla elektrik alan; $E=E_0/\epsilon'$ olur.



Şekil 2.12. Dielektrikli paralel levha kapasitörü.

Böylece dielektrikli paralel levha kapasitörünün kapasitansı Eş. 2.38 ile verilir [65,66].

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon' Q}{V_0} = \epsilon' C_0 = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (2.38)$$

2.6.3. Dielektrik kutuplanma

Bölüm 2.6.1.'de bahsedildiği gibi elektrik alan etkisi altına giren bir dielektrik malzemede “+” ve “-” yükler elektrik alan kuvveti vektörüne uygun şekilde yer değiştirme yapar. Çakışık olan yük merkezleri birbirinden ayrılır ve bir kutuplanma meydana gelmiş olur. Buna dielektriğin kutuplanması denir [47,67].

Paralel levhalar arasına bir dielektrik malzeme yerleştirilerek elde edilen bir kapasitör yapısında elektrik alan kaynaklı kutuplanma durumu Şekil 2.13'te tasvir edilmiştir. Elektrik alanın elverdiği şekilde kutuplanma olgusu, dielektrik malzeme içinde “+” yüklerin “-” yüklenmiş levha tarafında; “-” yüklerin ise “+” yüklenmiş levha tarafında

toplanmasıyla tamamlanır. Bu kutuplanma sebebiyle dielektrik malzemede levhalar arasındaki elektrik alanına ters yönde bir elektrik alan ($\vec{E}_p$) ortaya çıkar. Bu elektrik alan, dış elektrik alanına ters olsa da toplam elektrik alan dış elektrik alan ile aynı yönde olup,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (2.39)$$

Nicel olarak net elektrik alan, “ $E_0 - E_p$ ” ifadesine eşittir. Yüzey yük yoğunlukları levhalarda ve dielektrik malzeme yüzeyinde sırasıyla “ σ ” ve “ σ_p ” ile ifade edilir. Levhalar ve dielektrik malzemenin birbirine bakan yüzeylerinde net yük yoğunluğu zıt kutuplu olmaları sebebiyle (Şekil 2.13), “ $\sigma - \sigma_p$ ”ye eşittir. Sonuç olarak net elektrik alan;

$$E = \frac{\sigma - \sigma_p}{\epsilon_0} \quad (2.40)$$

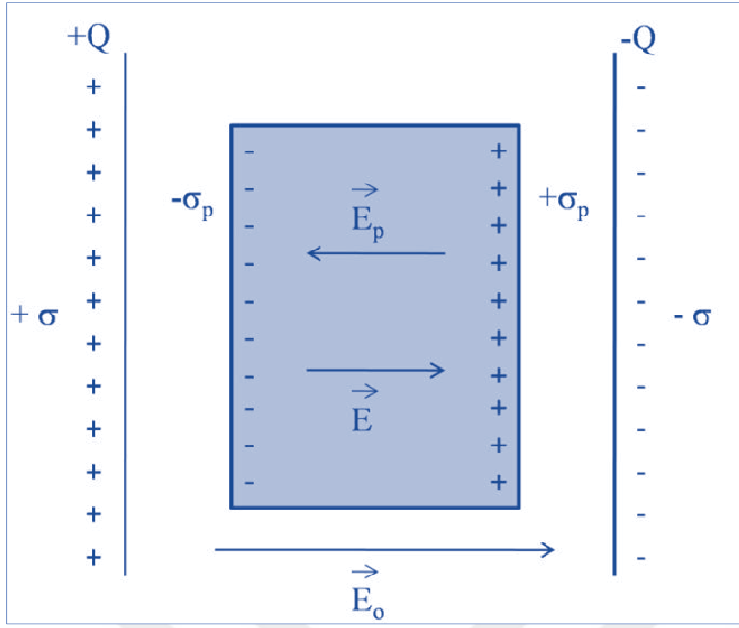
şeklinde verilir. Dielektrik malzeme içinde elektrik alan etkisiyle “+” ve “-” yükler yönelimli bir şekilde konumlanır ve “dipol moment” meydana getirirler. Dielektrik kutuplanma elektrik alan ile aynı yönlü olup lineer bağlıdır. Kutuplanma nicel olarak:

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (2.41)$$

Burada χ dielektriğin elektriksel duyarlılığı olup “ $\epsilon' - 1$ ”e eşittir. Kutuplanmanın bir sonucu olarak dielektrik yer değiştirme büyüklüğü;

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi E = \epsilon' \epsilon_0 E \quad (2.42)$$

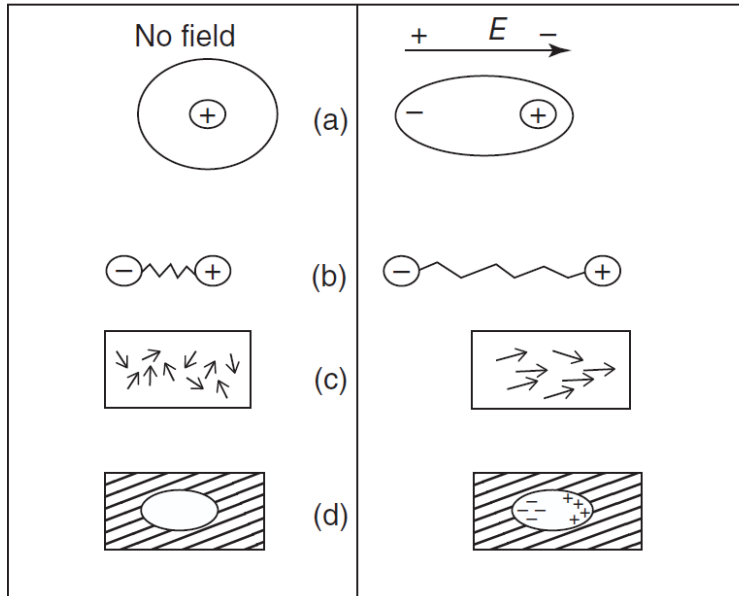
ile verilir [65,66].



Şekil 2.13. Dielektrik malzeme ile doldurulan paralel levha kapasitöründe kutuplanma.

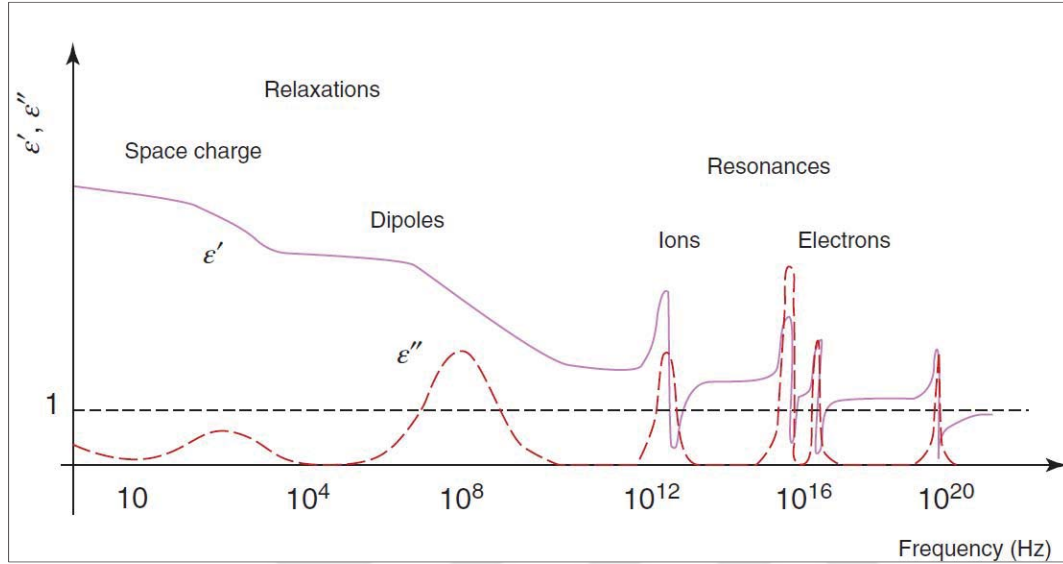
2.6.4. Kutuplanma türleri

Kutuplanma, elektronik kutuplanma, iyonik kutuplanma, yönelimsel kutuplanma ve uzay-yük kutuplanması olmak üzere dört ayrı şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. (a) Elektronik kutuplanma, (b) iyonik kutuplanma, (c) yönelimsel kutuplanma ve (d) uzay-yük kutuplanması olmak üzere kutuplanma türleri ve elektrik alana tepkileri [68].

Bu farklı mekanizmalar beklendiği üzere alternatif elektrik alana farklı frekanslarda tepkileri farklı olmaktadır. Şekil 2.15'te farklı frekans bölgelerinde kutuplanma türlerinin tepkileri eşleştirilmiştir.



Şekil 2.15. Kutuplanmanın frekansa bağıllığı [68].

Elektronik kutuplanma durumunda “+” ve “-” yüklü proton ve elektronların yük merkezleri çakışık haldeyken elektrik alan etkisiyle atom çekirdeği alan doğrultusunda elektronlar ise ters doğrultuda yer değiştirme yapar. Elektronik kutuplanma, nokta çekirdeğin küresel bir elektron bulutu ile çevrelendiğini kabul edilerek daha kolay anlaşılır (Şekil 2.14.a). Elektronlar küçük kütleli olduğu için elektrik alana ve yüksek frekansa daha kolay tepki verir ve optik bölgedeki ($\sim 10^{15}$ Hz) elektrik alan frekansı ile rezonansa girer.

İyonik kutuplanma olgusu birbirine iyonik bağla bağlanmış “+” ve “-” yüklü iyon çekirdeklerinin elektrik alan kuvveti etkisiyle oluşturdıkları kutuplanmadır (Şekil 2.14.b). Burada daha büyük kütleli birimlerin yer değiştirmesi söz konusu olduğu için burada frekans tepkisi elektronik kutuplanmaya göre daha düşüktür.

Yönelimsel kutuplanmada moleküler dipollerin yöneliminden bahsedilir (Şekil 2.14.c). Elektrik alan etkisiyle moleküler dipole sahip malzemelerde dipolün yönelmesiyle bir kutuplanma gerçekleşir. Bu tepkiler mikrodalga bölgesinde gerçekleşmektedir.

Son olarak en yavaş gerçekleşen süreç olan uzay-yük kutuplanması iyonların birçok atomik mesafeyi kat etmesiyle oluşan kutuplanmadır (Şekil 2.14.d). Bu mekanizmanın

frekans tepkisi yüklerin boşluklardan atlayabilme kapasitesine bağlıdır. Genellikle kHz mertebesindeki frekanslarda tepki verir [68]. Dielektrik malzemedeki kutuplanma bu dört ayrı mekanizmanın toplamı şeklinde verilir.

2.6.5. Dielektriklerde durulma

Elektrik alan etkisi altına giren bir dielektrik malzemede elektriksel yer değiştirme (D) elektrik alan ile lineer bağlı bir şekilde ortaya çıkar. Eşdağılımlı ve yönelimsiz dielektrikler için;

$$D = \varepsilon E \quad (2.43)$$

ε , gerçel bir sayı olup zamana bağlı değildir. Belirli bir değişmeyen elektrik alan altında kalan dielektrikte yer değiştirme durağan olur. Bu durumda ε_{st} durağan dielektrik geçirgenlik olmak üzere;

$$D = \varepsilon_{st} E \quad (2.44)$$

Değişken bir elektrik alan altında ise yer değiştirme, zamana bağlı elektrik alandaki değişime ayak uydurmaya çalışır. Elektrik alanda Δt gibi bir zaman diliminde, ΔE gibi bir artma olursa yer değiştirmede de ΔD 'lik bir artma ortaya çıkar.

$$\Delta D = \varepsilon_{\infty} \Delta E \quad (2.45)$$

Açısal frekansı ω ile belirli olan değişken elektrik alan etkisine giren dielektrik malzemede dipol yönelimleri bu periyodik harekete uymaya çalışır. Bu elektrik alan;

$$E = E_i e^{j\omega t} \quad (2.46)$$

ile verilir. Bu elektrik alana maruz kalan dielektrik dipolleri ile elektrik alan arasında bir faz farkı oluşması olasıdır. Dielektrik sabitinin bu faza uyum sağlayan ve sağlayamayan iki bileşeni olacaktır. Bu da karmaşık sayı yardımı ile verilir [18];

$$D = \varepsilon^* E = (\varepsilon' - j\varepsilon'') E \quad (2.47)$$

Yer değiştirmenin gerçel ve sanal kısımları sırasıyla ε' , ε'' ile gösterilir. Karmaşık dielektrik geçirgenlik faktörü;

$$\varepsilon^* = \left\{ \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \right\} + j \left\{ \frac{\omega\tau(\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty)}{1 + (\omega\tau)^2} \right\} \quad (2.48)$$

ile verilir. Burada τ , dielektriğin durulma zamanıdır. Malzemenin türüne, safsızlığına göre değişiklik gösteren bu sabit, sıcaklıkla bağlılık gösterir. “j” ile gösterilen bileşen sanal olup diğer bileşen ise gerçeldir. Elektrik alan ile dielektrik geçirgenliğin çarpma işlemi yapıldığında yer değiştirmenin elektrik alan ile aralarında $\pi/2$ kadar faz farkı olan bileşeni elde edilir. Bu bileşenler;

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.49.a)$$

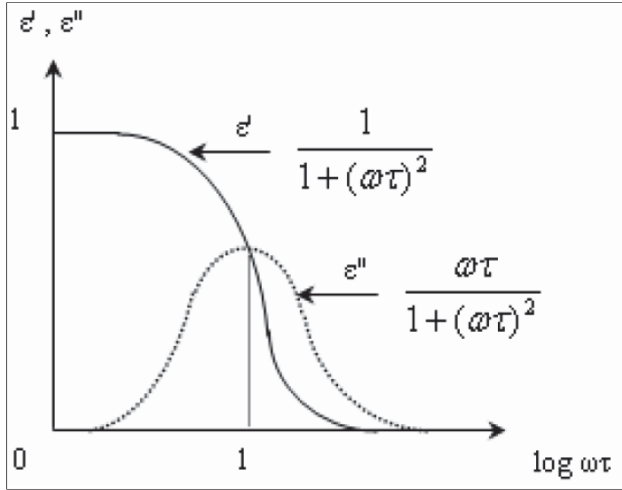
$$\varepsilon'' = \frac{\omega\tau(\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty)}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.49.b)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadeler yalınlaştırılırsa;

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.50.a)$$

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_{st} - \varepsilon_\infty} = \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.50.b)$$

ifadeleri elde edilir [45]. şekil 2.16’de frekansa bağlı dielektrik sabitinin gerçel ve sanal bileşenlerindeki değişim gösterilmiştir. Frekansın durulma zamanı ile kıyaslandığında çok küçük kalması durumunda ($\omega \ll 1/\tau$) Eş. 2.50.a’da dielektrik sabitinin gerçel kısmı ε_{st} ’ye eşit olur. Tersine durumda ise ($\omega \gg 1/\tau$); ε_∞ ’a yaklaşmış olur. Ara frekanslarda ise düz geçişler görülür. Açısal frekansın durulma zamanının tersine eşit olduğu noktada sanal bileşen değerinde bir tepe elde edilmektedir. Bu da deneysel olarak durulma zamanını tayin etmede yardımcı olmaktadır.



Şekil 2.16. Dielektrik sabitinin gerçel ve sanal bileşenlerinin frekansa bağıllığı [70].

Elektrik alan ile faz farkı olan ve eş fazlı bileşenlerin (gerçel ve sanal) oranlanmasıyla dielektriğe verilen enerjinin ne kadarının kayıp edildiğinin ölçütü olarak “ δ ” kayıp açısı değeri belirlenir. Bu da;

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{\varepsilon_{st} + \varepsilon_{\infty}(\omega\tau)^2} \quad (2.51)$$

ifadesi ile verilir [45,69].

2.6.6. Dielektrik Sabiti ve Kayıp Ölçüm Yöntemi (Admitans)

Dielektrik malzeme bir elektrik alan tesiri altına girdiğinde bu elektrik alana verdiği tepki ve alana gösterdiği duyarlılık malzemenin özellikleri açısından önem arz etmektedir. Bu özellikleri incelemek üzere malzeme bir elektriksel devreye benzeştirilir. Paralel levhalar arasına bir dielektrik malzeme yerleştirilirse bu bir kapasitör gibi davranacak ve uygulanan admitans ölçümü ile özelliklerinin karakterizasyonuna imkân sağlayacaktır. Admitans;

$$Y = G + j\omega C = G + j\omega \varepsilon^* C_0 \quad (2.52)$$

ile verilir. Dielektrik sabiti ifadesi admitans ifadesinde yerine yerleştirilirse;

$$Y = (G + \omega \varepsilon'' C_0) + j\omega \varepsilon' C_0 \quad (2.53)$$

ifadesi elde edilir. Görüldüğü gibi admitans ifadesinin sanal ve gerçel bileşenleri oluşmuştur. Empedans ise admitans'ın tersi ($Z=1/Y$) olup, dielektrik sabiti ve kayıp ifadeleri sırayla;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (2.54)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{Gd}{\omega \varepsilon_0 A} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (2.55)$$

olarak sadeleştirilir [66]. Dielektrik malzemenin elektriksel eşdeğer devresi bir RC devresi olabilir. AC voltaj uygulandığı durumda boş kapasitörden geçen akım, gerilimden $\pi/2(=90^\circ)$ kadar öndedir. Levhalar arasına dielektrik malzeme konulduğu durumda ise kutuplanma etkisinden dolayı bir kayıp ortaya çıkar ve bu kayıp sebebiyle faz farkı daha küçük açılara iner. AC voltaj uygulandığı durumda ($V=V_0 \cos \omega t$), kapasitördeki akım;

$$I = I_l + I_c = (G + j\omega \varepsilon' C_0)V \quad (2.56)$$

I_l ve I_c sırasıyla voltaj ile eş fazlı kayıp akımı (loss) ve faz farkı olan yük akımı (charge) ifade etmektedir. G dielektrik malzemenin iletkenliği olup I_l ve I_c ;

$$I_l = GV = \omega \varepsilon'' C_0 V \quad (2.57.a)$$

$$I_c = \omega C V = \omega \varepsilon' C_0 V \quad (2.57.b)$$

ifadeleri ile verilir. Kayıp akımı ve yük akımı olmak üzere iki bileşen olup Şekil 2.17'de gösterilmiştir. “ δ ” ve “ θ ” sırayla kayıp açısı ve güç açısıdır. “ δ ” alternatif elektrik alan altındaki dielektrik malzemenin elektrik alan fazı ile aynı fazda olmayan dielektrik yer değiştirme arasında ki faz farkını ifade eder. Bu açının tanjantı ise kayıp açısı olarak nitelendirilir.

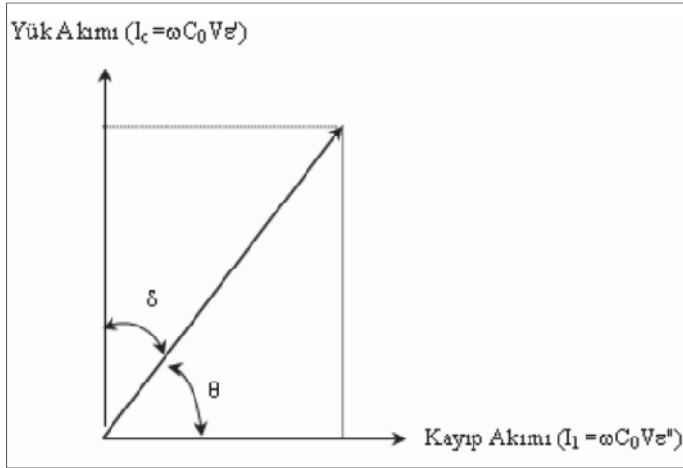
Elektrik modülü M^* ;

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (2.58)$$

ifadesiyle elde edilir [71]. Alternatif akım iletkenliği, σ_{ac} ;

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta \left(\frac{d}{A} \right) = \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega \quad (2.59)$$

eşitliği elde edilir [72].



Şekil. 2.17. Dielektrikli bir kapasitörde yük akımı (I_c) ve kayıp akım (I_l) ilişkisi [73].

Dielektrik malzemede iletkenliğin yükselmesiyle kayıp akım büyüme gösterir bu da kayıp açının büyümesine yol açacaktır. Şekil 2.17’de de görüldüğü gibi kayıp açısı, ölçülen I_l ve I_c akımları oranı ile belirlenir [73]. Bu da;

$$\tan \delta = \left| \frac{I_l}{I_c} \right| = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.60)$$

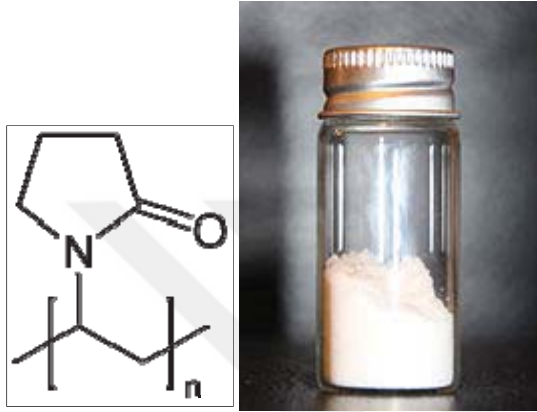
Buradaki kayıp akımın fiziksel anlamı, kapasitöre uygulanan AC voltajın etkisi ile ısınma meydana gelmesidir. Bunun için dielektrik malzemenin kırılma geriliminin altında bir gerilimde çalıştırılıyor olması gerekmektedir. Bu koşul sağlandığı durumda frekansın artışı ile açığa çıkan ısı artacaktır. Frekansın yükselmesiyle dielektrik malzemedeki moleküllerin kutuplanmaya yeterince cevap verememesinden kaynaklı olarak malzeme, verilen elektrik enerjisinin bir kısmını soğurması ile ısınma meydana gelir. Bu durum moleküllerin birbirine sürtünmesi şeklinde de yorumlanır.

Ölçülen iletkenlik ve kapasitans değerleri ile yukarıda bahsedilen bilgilere ulaşılabilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Polivinilpirolidon (PVP)

Polividon veya povidon olarak da bilinen polivinilpirolidon (PVP), N-vinilpirolidon monomerlerinden oluşan suda çözünme özelliğine sahip bir polimerdir [74].



Şekil 3.1. PVP'nin kimyasal formül yapısı ve fiziksel görünümü.

PVP, medikal (ilaç sanayi), kimyasal sanayi gibi kullanım alanları yanında teknoloji sanayinde de kullanılan bir polimer malzemedir. İlaç sanayinde özellikle hacim malzemesi, bağlayıcı, ilaç taşıyıcısı, dezenfektan, kontak lens ve solüsyonları, suni gözyaşı solüsyonlarında kullanım alanı bulunmaktadır [75-80]. Bunların yanında PVP sanayide yapıştırıcılarda tutunma malzemesi, bataryalarda, seramiklerde, fiberglaslarda, mürekkep ve kâğıtlarda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Katot ışını tüplerinde fotorezist çözünürlüğünü artırmak için, diş beyazlatıcı jel, NMR'da kontrast artırıcı ajan, inorganik güneş hücrelerinde stabilizasyon ajanı olarak da kullanılmaktadır [81-84]. Polar bir molekül yapısına sahip olan PVP elektronik uygulama alanlarına da giriş yapmaktadır. Polimer kompozit olarak üretime imkân sağlayan PVP, dielektrik özellikleri sayesinde ilgi görmektedir [85].

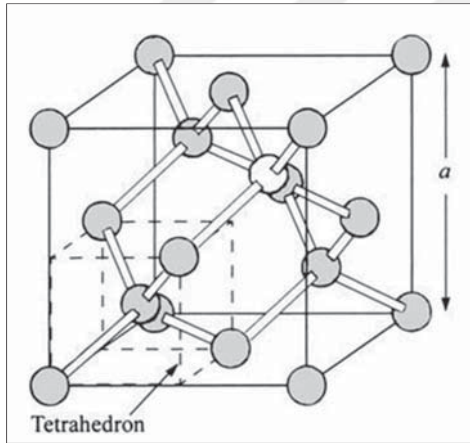
3.2. Silisyum (Si)

Doğal bir yarıiletken olan Si sıkı paket elmas benzeri kristal yapıya sahip 14 atom numaralı ve 28 kütle numaralı 4. Grup elementidir. Yeryüzünde ikinci en çok bulunan element olan Si birçok kullanılan malzemenin ana elementidir. Düşük sıcaklıklarda yalıtkan gibi davranan Si, sıcaklığın yükselmesiyle iletkenlik bandına geçişin kolaylaşması nedeniyle

iletkenlik kazanır. Bu sebepten yarıiletken olarak nitelendirilir. Element hâlde yarıiletkenlik gösteren iki elementten biridir [59]. Bazı temel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Kristal yapısını gösteren çizim Şekil 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Si kristalinin temel fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellik	Değer
Atom ağırlığı	28,09
Kristal yapısı	Elmas-benzeri
Örgü sabiti (Å)	5,43
Yoğunluk (g/cm ³)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandı durum yoğunluğu (cm ⁻³)	2,8x10 ¹⁹
Değerlik bandı durum yoğunluğu (cm ⁻³)	21,04x10 ¹⁹
İntrinsik taşıyıcı yoğunluğu (cm ⁻³)	1,45x10 ¹⁰
Enerji bant aralığı	1,12
Elektron ilgisi, χ (eV)	4,05
Mobilite (cm ² /V.s) (Elektron/hole)	1500/450
Azınlık taşıyıcı ömrü (s)	2,5x10 ⁻³
Erime noktası (°C)	1415
Isıl iletkenlik (W/cm.K)	1.5



Şekil 3.2. Elmas ve elmas benzeri Si (ve Ge) yapıları için kristal yapı [59].

Günümüzde de yarıiletken sanayinde neredeyse kullanılan tek malzeme olan Si, bu tür uygulamalar için yüksek saflık derecesinde olması gerekmektedir. Yeryüzünde genellikle SiO₂ ve farklı oksit türlerinde kararlı bir şekilde bulunan Si bazı ayrıştırma ve saflaştırma işlemlerinden geçirilerek saf kristal hale getirilir. Bunun sonucunda yongalara dönüştürülerek tümleşik devre, işlemci, bellek, transistör (MOSFET vb.) gibi yarıiletken aygıt üretiminde kullanıma alınır. 3. Grup (B, Al, Ga vb.) ve 5. Grup (P, As, Sb) elementlerle katkılanması ile hole ve elektron taşıyıcı yoğunluğu kontrol edilebilen

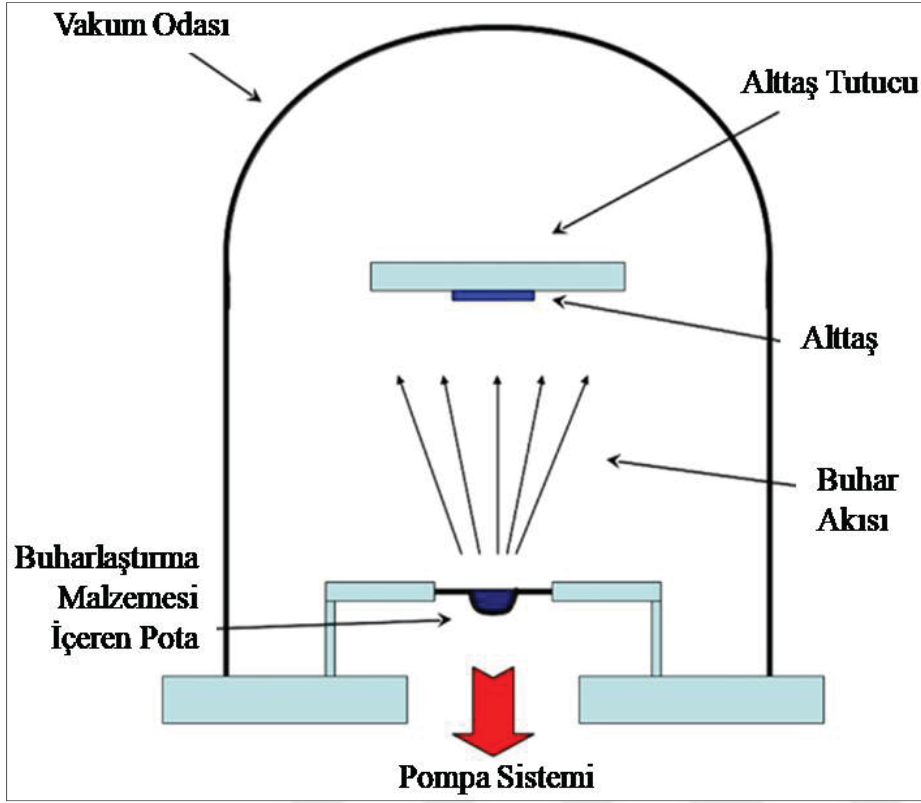
sırasıyla p ve n tipi yarıiletkenle dönüştürülebilir [86]. Tez kapsamında incelemeye tabi tutulan MPS yapılarında 1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$ öz dirence sahip n-Si tek tarafı parlatılmış alttaşlar kullanılmıştır.

3.3. Alttaş Temizliği

Alttaş temizliği işlemi üretimden veya dış ortamdan kaynaklı kirliliklerden arındırılmak üzere uygulanan ve mikrofabrikasyonun en önemli aşaması olarak görülür. Yüzeydeki kirliliklerden arındırmak üzere öncelikle amonyum-peroksit çözeltisinde 1 dakika bekletilerek doğal oksit temizliği yapılır. Ardından sülfürik asit temelli çözelti olan $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:1:1) çözeltisinin 1 dakika uygulanması ile organik kirlilikler tamamen giderilir. Son olarak inorganik (metal v.b.) kalıntılardan arındırmak üzere $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1:1) temizliği de diğer temizlik işlemleri gibi 1 dakika olacak şekilde uygulanır. Alttaş, bolca deiyonize (DI) su ile durulanarak saf azot (N_2) ile kurutulur. Kirliliğe karşı koruma altına alınan alttaşların temizlik işlemleri bu şekilde tamamlanır.

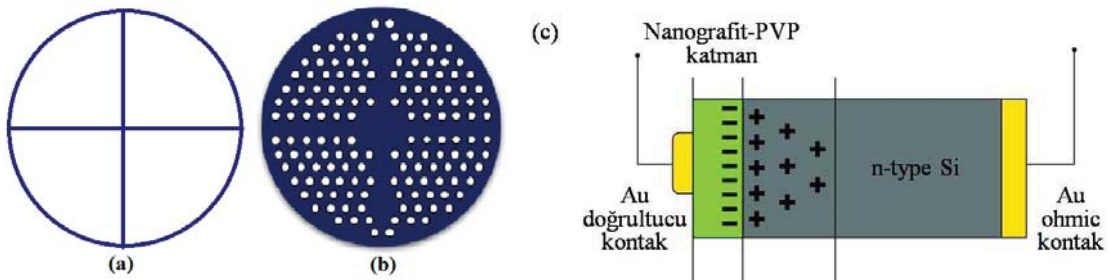
3.4. Kontak Metallerinin Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Yapılması

Termal buharlaştırma yöntemi en çok bilinen buharlaştırma yöntemlerinden biri olup yüksek saflıkta ve kalitede metal ve inorganik ince film üretiminde kullanılan görece düşük maliyetli bir ince film kaplama yöntemidir. Termal buharlaştırma yöntemi isminden de anlaşıldığı gibi kaynak malzemenin vakum ortamında ısıtılıp yüksek sıcaklıklara çıkarılarak buharlaştırılması temeline dayanır. Vakum ortamında kaynama noktası aşağı inen malzemeler elektrik akımı ile ısıtılan pota sayesinde ısınarak buhar fazına kolayca geçirilir. Potalar bir tür direnç şeklinde tasarlanıp üzerinden geçen yüksek DC akım ile ısıtılır. Bu da içinde bulunan genellikle metal malzemeyi ısıtarak buharlaşmasını sağlar. Buharlaşma işlemi film kalitesi açısından yüksek vakum ortamında ($<10^{-6}$ mbar) gerçekleştirilir [87]. Şekil 3.3'te bir termal buharlaştırma sistemine ait vakum odası tasvir edilmiştir. Vakum odasında kaynak olarak bahsi geçen direnç pota ve elektrot bağlantıları, karşıdan görececek şekilde örnek tutucu ve örnek, vakumlamayı sağlayan ve sürdüren pompa bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.3. Termal buharlaştırma sistemine ait vakum odası çizimi [87].

MPS yapı oluşturmak üzere n-tipi Si alttaşların parlak olmayan arka yüzeylerine termal buharlaştırma sistemi ile 200 nm yüksek saflıkta (%99,999) altın (Au) kaplaması yapılarak arka kontakları elde edilmiştir. Kaplanan metale ohmik karakter kazandırmak üzere örnekler 550°C'de 5 dakikalık ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Bölüm 3.5.'te anlatılan PVP katmanının hazırlanıp yüzeye serilmesinin ardından yüzeye gölge maske kullanarak 0,5 mm yarıçapa sahip dairesel kontaklar yine termal buharlaştırma yöntemi ile 200 nm Au kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemle birlikte MPS yapıların fabrikasyonu tamamlanmış olur.

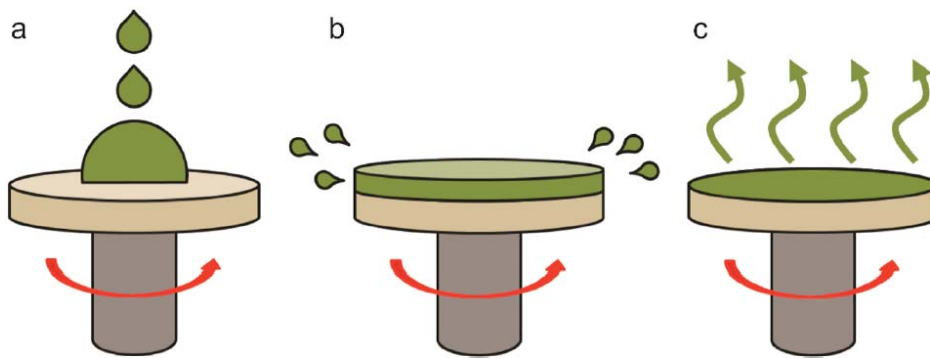


Şekil 3.4. (a) arka yüzey için kullanılan tamamı açık örnek tutucu, (b) dairesel kontaklar için gölge maske ve (c) fabrikasyonu bitmiş MPS yapının çizimi.

3.5. Nanografite Katkılı PVP Ara Katmanın Döndürme Yöntemiyle Hazırlanması

Ticari olarak temin edilen nanografite ve PVP tozları ara yüzey katmanın hazırlanmasında ana madde olarak kullanılmıştır. 0,01 g nanografite (NG) %5 PVP içeren 5 ml sulu çözeltide çözündürülmüştür. Ara yüzey katman için kullanılacak çözelti bu şekilde hazırlandıktan sonra n-Si alttaşı üzerine döndürme yöntemi ile yayılmıştır. Döndürme yöntemi (spin coating) bir alttaşı yüzeyine damlatılan veya uygun miktarda dökülen viskoz bir çözeltiyi yüksek hızlarda döndürerek tüm yüzeye mümkün olduğunca homojen bir şekilde yayarak kaplama işlemidir [88,89]. Döndürme yönteminde kaplanan filmin kalınlığı alttaşı yüzeyine, çözeltinin viskozite, döndürme hızına, döndürme süresine bağlıdır. Viskozite arttıkça kaplama kalınlığı artar. Döndürme hızının artışı ile kaplama kalınlığı azalır. Döndürme süresi artırıldığı durumda kaplama kalınlığı belli miktarda azalır. Kısacası döndürme ile elde edilen mekrezcil kuvvet etkisiyle çözelti dışa doğru savrulmaya çalışılır. Bu etki doğrultusunda film incelmeye çalışır. Döndürmenin devam etmesi ile çözücü uzaklaşır ve film incelerek kararlı bir yapıya kavuşur. Döndürme yöntemi oldukça düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir yöntemdir. Amaca yönelik olarak güzel bir çözümdür. Polimer ince film uygulamalarında oldukça elverişlidir [90].

Hazırlanmış olan NG-PVP çözeltisi n-Si alttaşı üzerine 3000 devir/dakika döndürme hızı ile 150 saniyelik döndürme süresi uygulanarak ara yüzey katman ince filmleri elde edilmiştir.

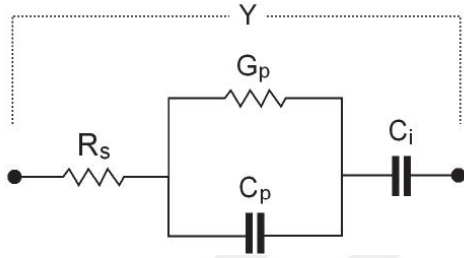


Şekil 3.5. Döndürme yönteminde (a) polimer serimi, (b) döndürme ile yayma, (c) döndürme ile buharlaştırarak filmin oluşması aşamaları [91].

Hazırlanmış olan NG-PVP çözeltisi n-Si alttaşı üzerine 3000 devir/dakika döndürme hızı ile 150 saniyelik döndürme süresi uygulanarak ara yüzey katmanın kaplama işlemi tamamlanmıştır.

3.6. Ölçüm Sistemi

Önceki bölümlerde fabrikasyon aşamaları anlatılan Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si MPS yapılı örneklerin frekansa ve voltaja bağılı kapasitans ($C-V-f$) ve admitans ($G/\omega-V-f$) ölçümleri Hewlett Packard 4192 LF empedans analizör cihazı ile IEEE-488 AC/DC dönüştürücü kart yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin salınım genliği 5 mV-1 V aralığındadır. Frekans erimi 5 Hz-13 MHz aralığındadır. Ölçümler oda sıcaklığında yapıldığı için herhangi bir kriyostat kullanılmamıştır. Aşağıda Şekil 3.6'da ölçümü yapılan Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının eşdeğer devresi bulunmaktadır. Ölçümler bu eşdeğer davranış gözönünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının eşdeğer devresi.



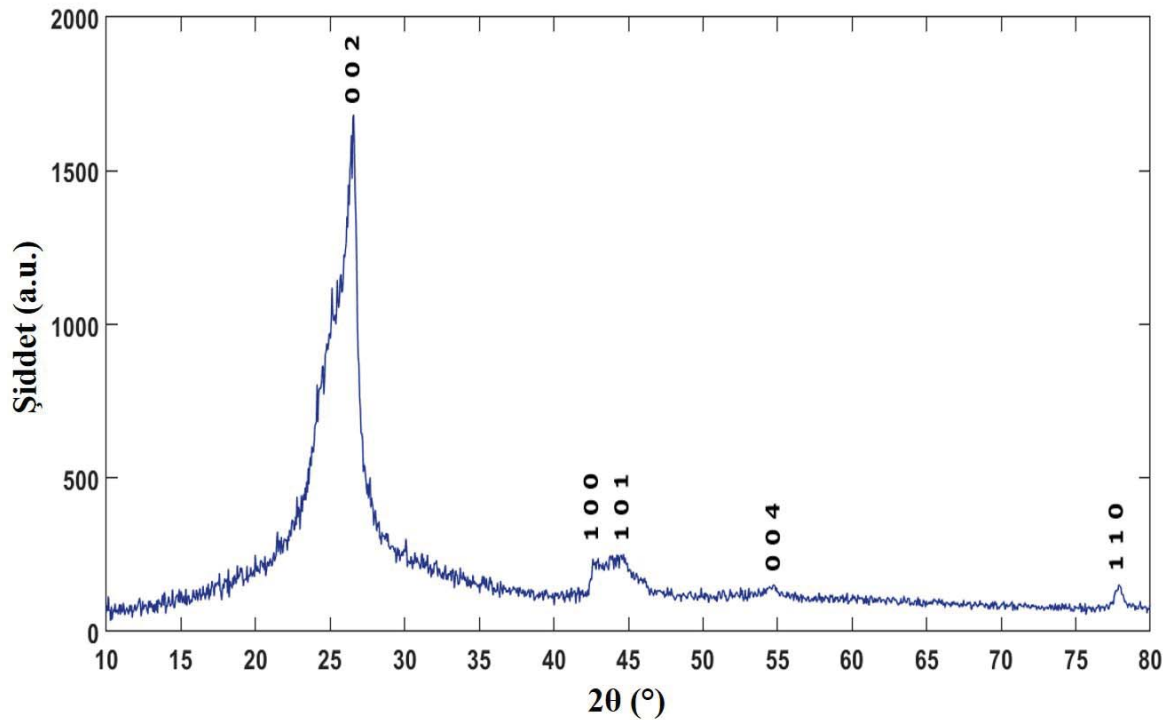
Resim 3.1. HP 4192 LF empedans analizörü ve IEEE-488 AC/DC dönüştürücü takılı bilgisayar.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yapısal Analiz

4.1.1. X-ışını kırınım analizi (XRD)

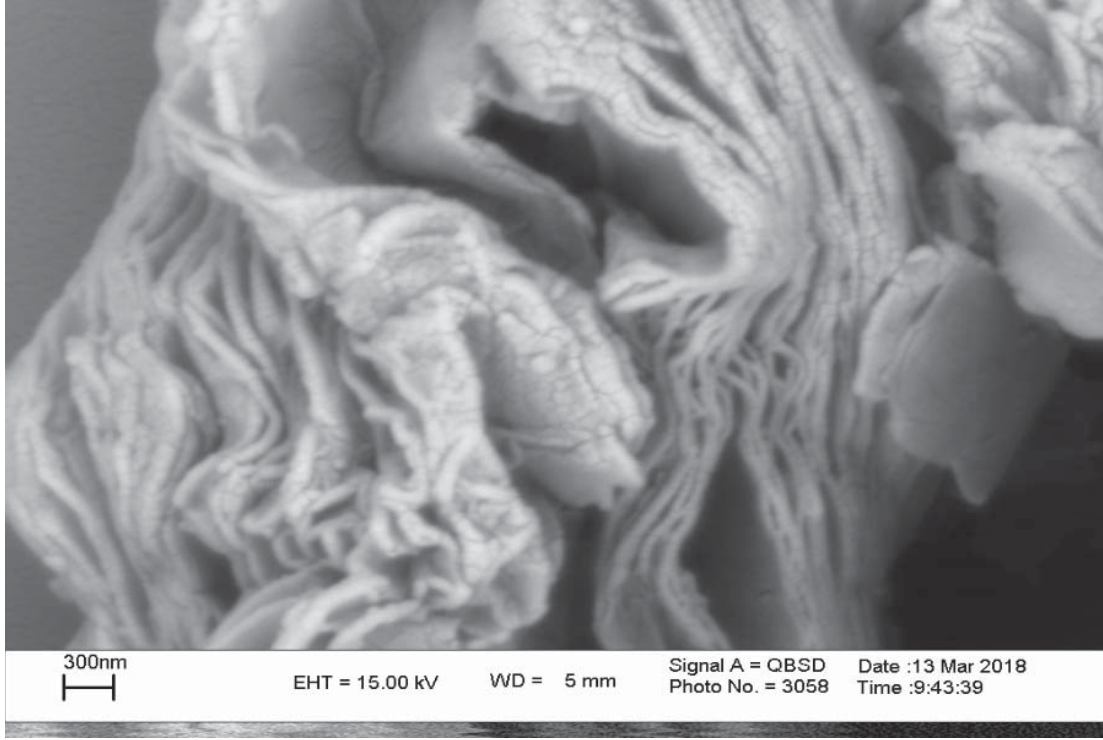
PVP polimer malzemenin içine katılan nano yapıdaki grafitin X-ışını kırınım yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de grafitte ait pikler görülmektedir. Bu pikler 75-1621 JCPDS kart numaralı verileri ile doğrulanmıştır. Bu veri kartına göre $26,6^\circ$ de (002), $42,2^\circ$ ve $44,3^\circ$ ’lerde sırasıyla (100) ve (101) düzlemlerinden gelen verilerdir. Ayrıca 25° civarındaki geniş pik grafitin yığın haldeki katmanlarından gelen katkıya yorulmaktadır [92]. Piklerin yayvan oluşmuş olması malzemenin nano yapıda olduğunu göstermektedir. Yapılan analizde başka malzemelere ait herhangi bir pik oluşmamıştır. Bu da elde edilen nanografitin saf olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1. Nanografit yapısına ait XRD deseni.

4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi

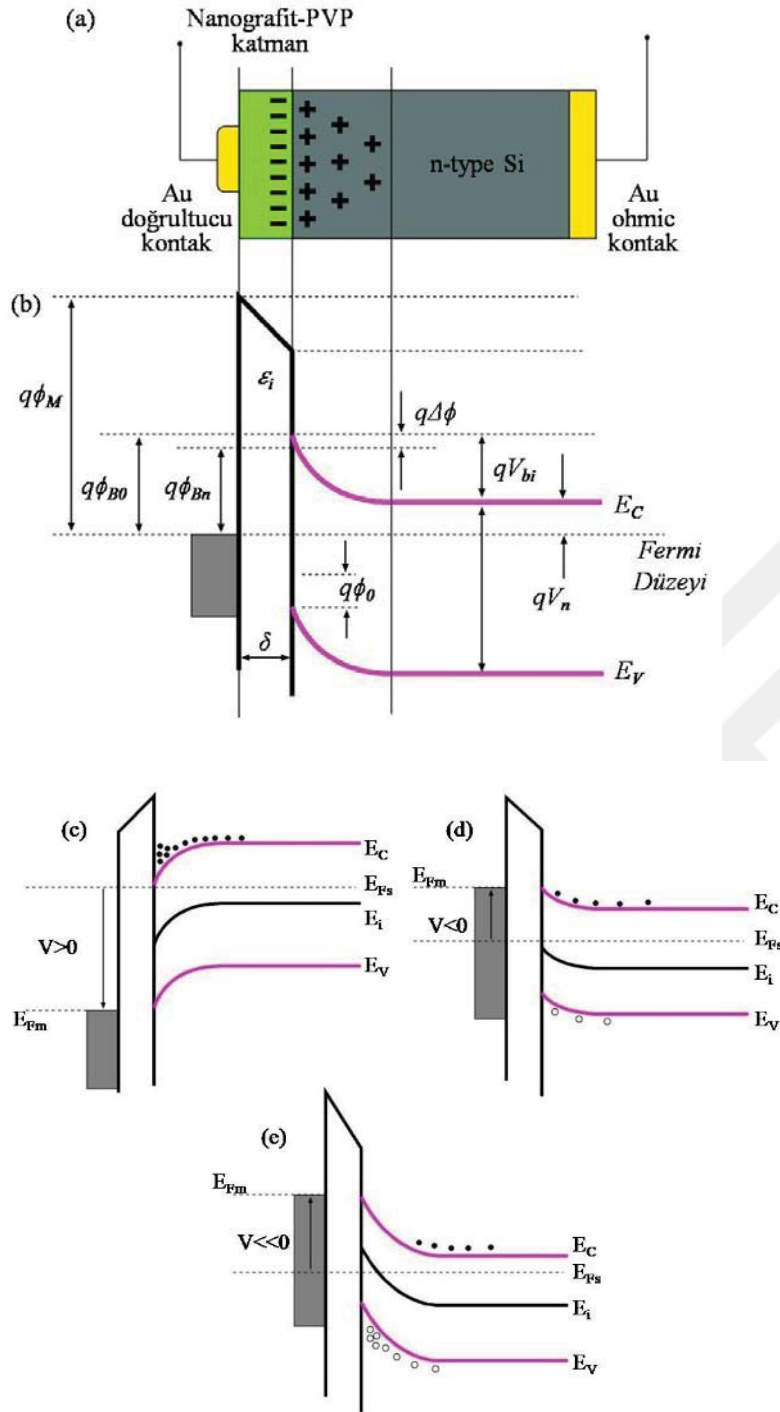
Nanografite yapısına ait SEM incelemeleri gerçekleştirilmiş olup aşağıdaki Resim 4.1’de nanografite yapısının katmanlı yığın hali gözlemlenmiştir. Elektriksel olarak iyi bir iletken olan grafit SEM görüntüsünde tıpkı metallerde olduğu gibi aydınlık görünmektedir.



Resim 4.1. Nanografite yapısına ait SEM görüntüsü.

4.2. Elektriksel Karakteristiğinin İncelenmesi

Şekil 4.2.b’de görüldüğü gibi n-tipi yarıiletken metal elektronlarından yüksek enerji seviyesinde bulunan iletkenlik bandı (E_C) elektronları metale doğru akış yapar. Bu akma, yarıiletken ve metalin Fermi enerji (E_F) düzeyleri çakışık hale gelene kadar devam eder. Böylelikle yarıiletken yüzeyine yakın elektron konsantrasyonunda düşme meydana gelir. Ardından termodinamik denge durumunda, E_F sabit kalır ve sınırdan aşp metale geçen elektronların sayısı ile metalden yarıiletkene akan elektronların sayısı eşit olur. Böylece net akım sıfır olur. Bu yapı pozitif ve negatif besleme ile beslendiği durumda, genel olarak yarıiletken yüzeyinde üç durum ortaya çıkar [35,59]. Bunlar yığılma, tükenme ve tersinim durumlarıdır. Fakat bazen C-V davranışları güçlü yığılma, zayıf yığılma, tükenme, zayıf tersinim ve güçlü tersinim olmak üzere beş ayrı bölge şeklinde de incelenmektedir.

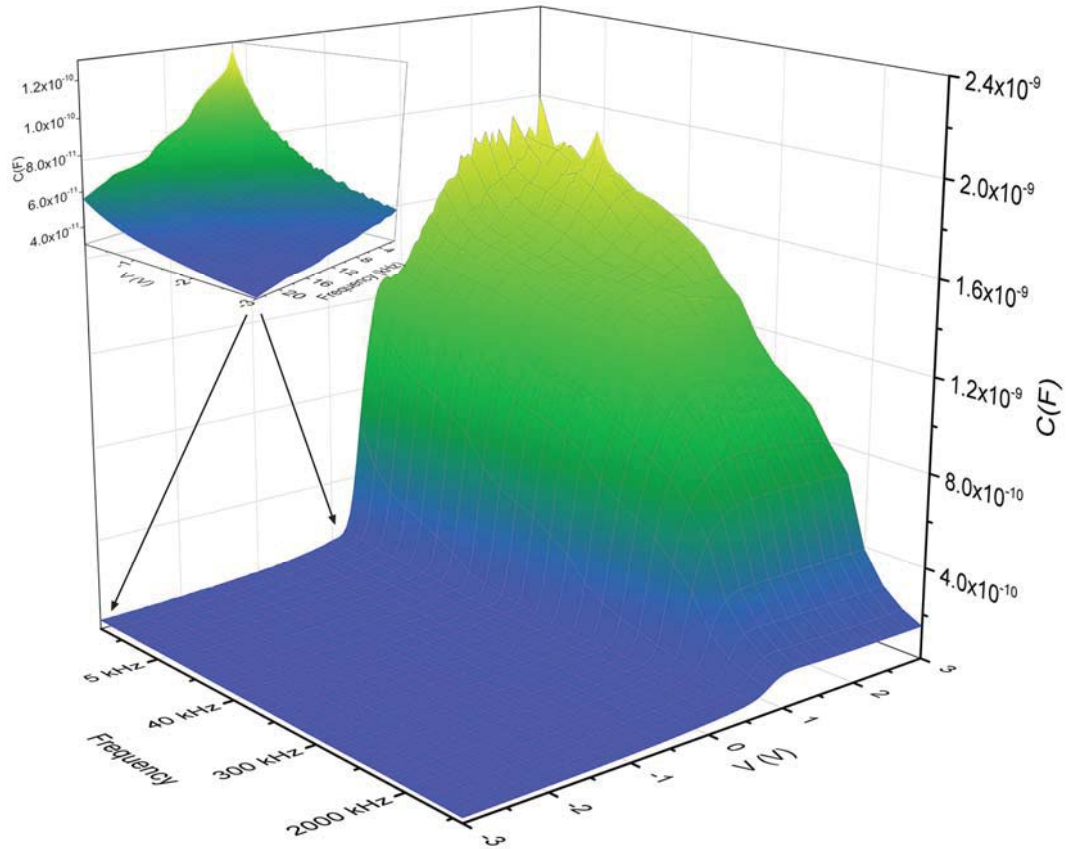


Şekil 4.2. Au/(Nanograft-PVP)/n-Si yapısının (a) tasviri, (b) termodinamik denge durumundaki, (c) yığılma, (d) tükenme ve (e) tersinim durumlarındaki enerji bant diyagramları

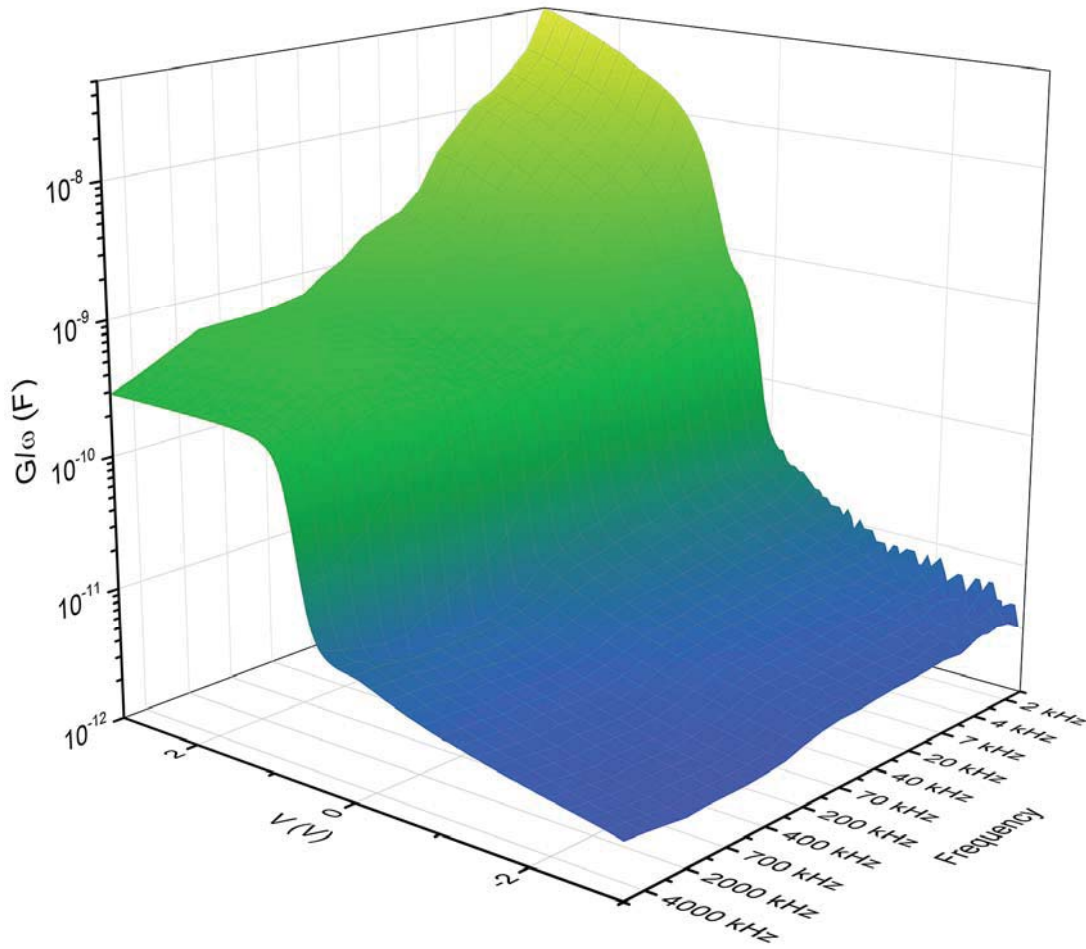
Enerji ve voltaja bağlı durum yoğunluğu (N_{ss}) profilini elde etmek üzere birçok önerilmiş karakterizasyon yöntemi ve çalışmaları mevcuttur [24,24,35,64]. Bu teknikler arasından en doğru sonucu veren yöntem ise Nicollian ve Goetzberger tarafından ortaya konulan admitans/kondüktans tekniğidir [8,24,35]. Bu yöntem geniş bir frekans ve uygulanan voltaj

aralığında birçok $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümü gerektirmektedir. Onlara (Nicollian ve Goetzberger) göre, admitans veya empedans ($Y=(1/Z)=G+j\omega C$) ile N_{ss} arasındaki ilişki bu ölçümler yardımıyla belirlenebilir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının oda sıcaklığında, ± 3 V voltaj aralığında ve 1 kHz'ten 5 MHz'e değişen frekans aralığında ölçülen $C-V-f$ ve $G/\omega-V-f$ davranışları gösterilmektedir. AC sinyalin tepeden tepeye voltaj değeri 50 mV olarak belirlenmiştir. Bu şekillerde hem kapasitans hem de kondüktans davranışlarında tersinim, tükenim ve yığılma bölgeleri rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Ayrıca C ve G/ω 'nin frekansın ve voltajın güçlü bir fonksiyonu olduğu açıkça görülmektedir. Fakat C ve G/ω 'deki değişimler tükenme ve yığılma bölgelerinde yani düşük ve orta frekans değerlerinde oldukça baskındır. Çünkü düşük frekanslarda, ara yüzey durumları (N_{ss}) alternatif akım (AC) sinyalini kolayca takip eder ve ölçülen gerçel kapasitans ve kondüktans değerlerinde ilâve kapasitans ve kondüktans üretirler.



Şekil 4.3. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının $C-V-f$ karakteristiği.



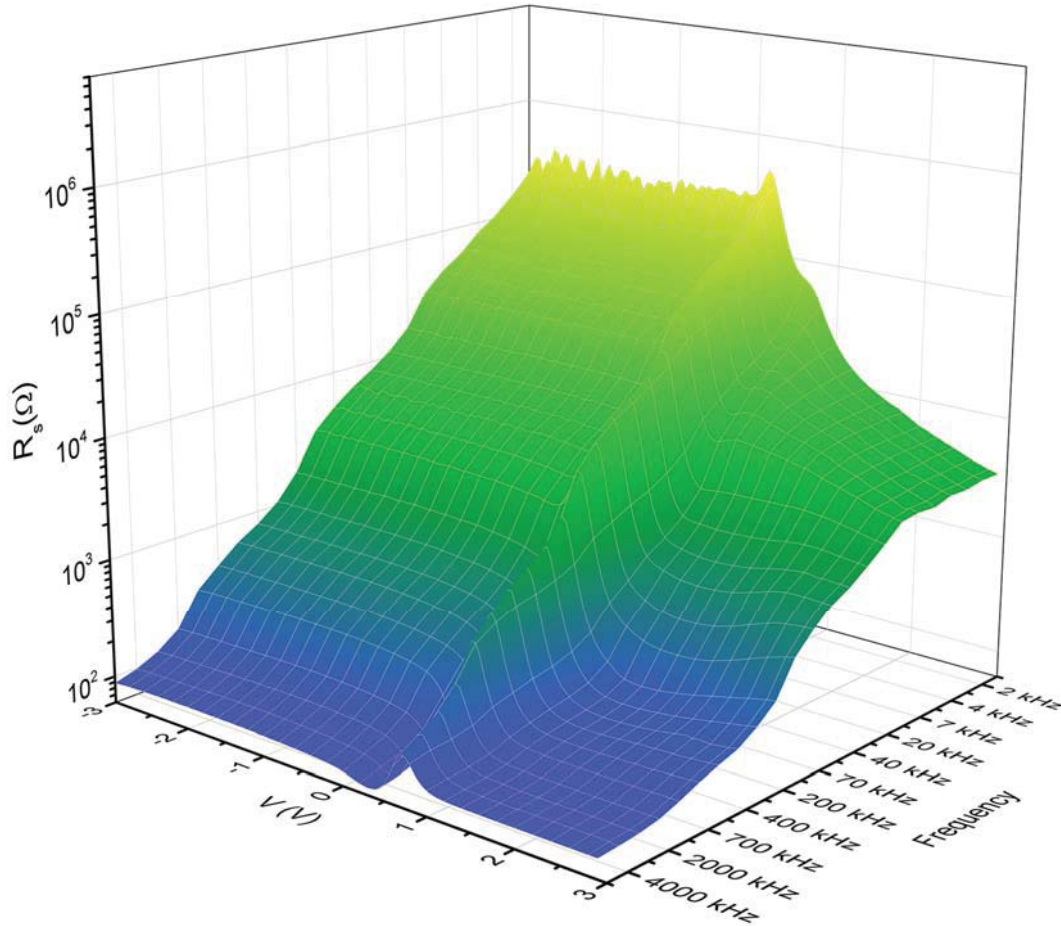
Şekil 4.4. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının G/ω - V - f karakteristiği.

Düşük ve orta frekans bölgelerinde gözlemlenen görece yüksek C ve G/ω değeri, yarıiletken ve kendi durulma zamanları (τ) ile dengede olan N_{ss} 'ten kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan yığılma bölgelerinde C ve G/ω değeriindeki uyumsuzluklar N_{ss} 'ten ziyade seri direnç (R_s)'ten kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle N_{ss} tersinim ve tükenim bölgelerinde baskın iken; R_s sadece yığılma bölgesinde baskındır. N_{ss} yasak enerji bant aralığında yerleşmiş genellikle tekrarlı örgü yapısındaki kopukluktan, bazı safsızlıklardan ve atom boşluklarından kaynaklan tuzaklar oluşturmaktadır. Ama R_s 'in varlığı genellikle arka (n-Si arka yüzeyindeki) ohmik kontak ve ön doğrultu kontaklardan, katkılama atomlarının düzensizliğinden, kristal kusurları ve safsızlıklardan kaynaklanmaktadır.

R_s 'in varlığı C - V - f ve G/ω - V - f çizimlerinin yığılma bölgesinde ideal durumdan sapmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının voltaja bağlı R_s profili C ve G ölçüm verilerinden her frekans değeri için çıkartılabilir. Aşağıda verilmiş olan E_s .

4.1 kullanılarak Nicollian ve Goetzberger metodu ile yapıya ait R_s -V grafikleri elde edilmiştir [35]. Farklı frekans değerlerindeki R_s -V davranışları Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.1)$$



Şekil 4.5. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının R_s -V-f karakteristiği.

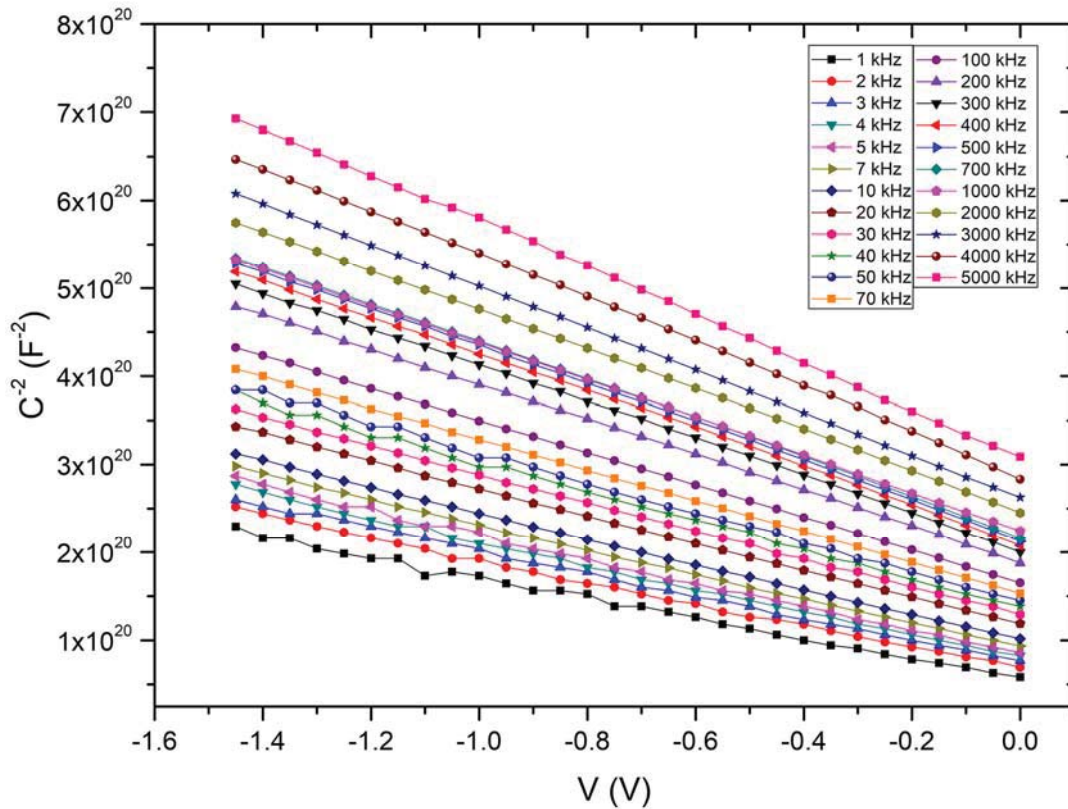
Burada R_s -V eğrileri 0-1V aralığında her frekans için karakteristik bir pik davranışı göstermektedir. Pik yüksekliği azalırken pikin pozisyonu da daha yüksek pozitif voltaj değerlerine doğru frekansın da artışıyla kaymaktadır.

Şekil 4.5'e bakıldığında R_s , bölgeden bölgeye değişmekle beraber frekans ve voltaja bağıllık göstermektedir. Bunun sebebi de polimer ara yüzey katmanı ile n-Si'un yasak enerji bant aralığı arasındaki N_{ss} 'in uzaysal dağılımıdır. Öte yandan Nicollian ve Goetzberger'e göre, R_s 'in gerçel değeri güçlü yığılma bölgesine karşılık gelmektedir [35].

Geniş bir frekans aralığında, ters besleme voltajı (V_R) ile ilişkili olan tükenme bölgesi kapasitansı aşağıdaki Eş. 4.2'de ifade edilmiştir.

$$C^{-2} = \frac{2(V_0 - kT/q + V_R)}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_D} \quad (4.2)$$

Eş. 4.2'de ϵ_s yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği olup Si için 11,68'dir. N_D verici atomların konsantrasyonu, A ise doğrultucu kontağın alanıdır. N_D , Fermi enerjisi (EF), tükenme bölgesi kalınlığı (W_d) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) gibi temel elektriksel parametreleri frekansın bir fonksiyonu olarak belirlemek üzere C^{-2} -V grafikleri her bir frekans için türetilmiş ve hesaplama için kullanılmıştır. Elde edilen ters besleme bölgesindeki C^{-2} -V-f grafikleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada C^{-2} -V çizimleri -1,5 ila 0 V arasındaki bölgede oldukça lineer bir davranış göstermektedir.



Şekil 4.6. Au/(Nanografite-PVP)/n-Si yapısının C^{-2} -V-f karakteristiği.

Kesim voltajı (V_0) ve N_D değerleri, C^{-2} -V grafiklerinin her bir frekansta eksenini kestiği nokta ve eğimi kullanılarak hesaplanmıştır. Son olarak Fermi enerji düzeyi (E_F) ve C-V ölçümü bariyer yüksekliği $\Phi_{B(C-V)}$, sırasıyla aşağıdaki Eş. 4.3 ve 4.5 yardımı ile elde edilmiştir [59].

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (4.3)$$

$$\Phi_B = V_o + kT/q + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.4)$$

$$\Phi_{B(C-V)} = c_2 V_o + kT/q + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.5)$$

Eş. 4.3'te N_C iletkenlik bandı durum yoğunluğudur. kT/q termal enerji, $\Delta\Phi_B$ imaj kuvvet alçalması, c_2 deneysel ve teorik N_D oranıdır. Ara yüzey katmanının var oluşu, N_{ss} ve R_s , yüksek kesim voltajına sebep olmaktadır. Bu etki Çizelge 4.1'de görülebilmektedir. N_{ss} düşük frekanslarda etkin olurken, R_s yüksek frekanslarda etkisini göstermektedir [24,59]. Bu durumda, özellikle yüksek frekanslarda Φ_B , yasak enerji aralığından (E_g) yüksek olmaktadır. Bu sebepten Φ_B , N_D 'nin deneysel ve teorik değerlerin oranı olan c_2 faktörü ile yeniden düzenlenebilir.

Aynı zamanda N_D ve W_d değerleri aşağıda yer alan Eş. 4.6 ve 4.7 ile doğru eğimi ($\tan\theta$) ve kesim voltajı ($V_0 = V_D - kT/q$) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$N_D = 2/(q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 \tan\theta) \quad (4.6)$$

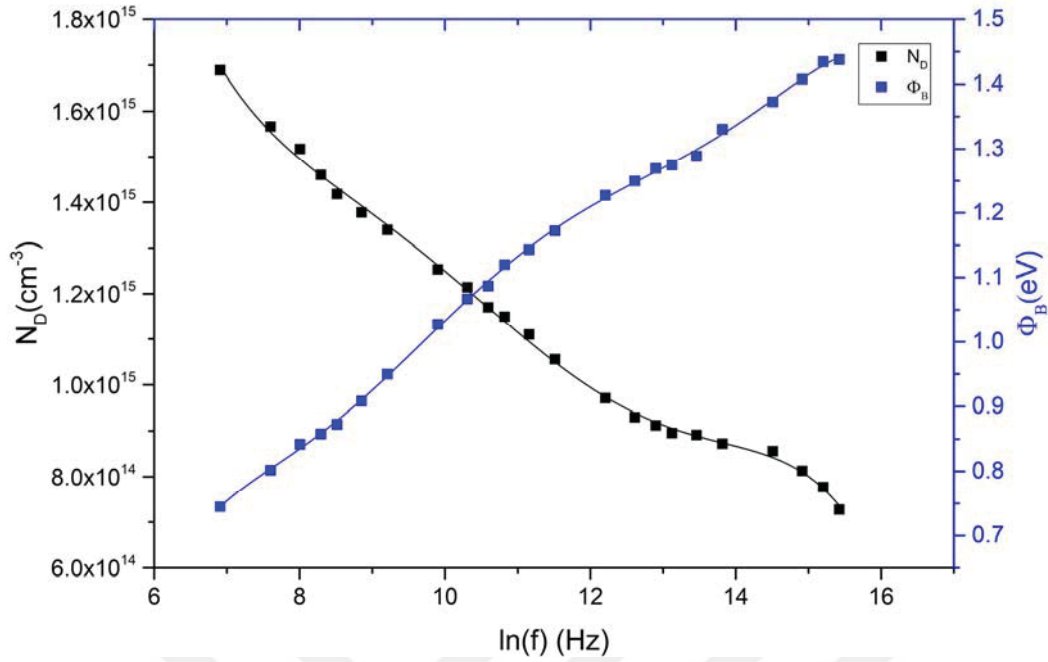
$$W_d = (2\epsilon_s V_d / q N_D)^{1/2} \quad (4.7)$$

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.7'de görüldüğü üzere W_d ve Φ_B değerleri frekansın artışı ile artarken N_D değeri neredeyse üstel bir şekilde azalmaktadır. N_D , W_d ve Φ_B değerleri artan frekansla sırasıyla $1,689 \times 10^{15} - 7,275 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $0,629 - 1,457 \text{ } \mu\text{m}$ ve $0,745 - 1,438 \text{ eV}$ aralıklarında değişim göstermektedirler. Düşük frekanslarda durum yoğunlukları ve yüzey yükleri AC sinyaline ayak uydurabilmektedirler. Bu sebepten, C ve G'nin ölçülen değerlerinde ilave kapasitans ve ilave admitans değeri katmaktadır. C^{-2} -V-f grafiklerinin ekseni kesen noktası grafiklerden de görüldüğü gibi frekansın artışı ile artmaktadır.

Frekansa göre V_0 , N_D , E_F , E_m , W_d , V_D , c_2 , n , $\Delta\Phi_B$, Φ_B ve $\Phi_{B(C-V)}$, R_s değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Frekansa göre deneysel olarak elde edilen V_0 , N_D , E_F , E_m , W_d , V_D , c_2 , n , $\Delta\Phi_B$, Φ_B , $\Phi_{B(C-V)}$ ve R_s değerleri değerleri.

f (kHz)	V_0 (V)	N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	E_m (V/cm)	W_d (μm)	V_D (eV)	$\Delta\Phi_B$ (meV)	Φ_B (eV)	c_2	n	$\Phi_{B(C-V)}$ (eV)	R_s (at 3V) (Ω)
1	0.486	1.689×10^{15}	0.248	15861.46	0.629	0.512	13.910	0.745	0.784	1.276	0.640	3340.71
2	0.541	1.566×10^{15}	0.250	16116.64	0.687	0.567	14.021	0.802	0.727	1.376	0.654	3360.06
3	0.580	1.518×10^{15}	0.250	16429.32	0.722	0.606	14.157	0.842	0.704	1.420	0.670	3186.82
4	0.595	1.460×10^{15}	0.251	16324.73	0.745	0.621	14.112	0.858	0.678	1.476	0.666	3244.84
5	0.609	1.418×10^{15}	0.252	16272.63	0.765	0.635	14.089	0.873	0.658	1.520	0.664	2951.15
7	0.645	1.378×10^{15}	0.253	16496.73	0.797	0.671	14.186	0.908	0.639	1.564	0.676	3054.42
10	0.686	1.340×10^{15}	0.254	16774.91	0.833	0.711	14.305	0.950	0.622	1.609	0.690	2932.39
20	0.761	1.253×10^{15}	0.255	17097.96	0.906	0.787	14.442	1.027	0.582	1.720	0.709	2192.61
30	0.800	1.214×10^{15}	0.256	17251.23	0.942	0.826	14.506	1.067	0.563	1.775	0.717	1670.46
40	0.819	1.170×10^{15}	0.257	17139.43	0.971	0.845	14.459	1.087	0.543	1.842	0.712	1300.40
50	0.852	1.149×10^{15}	0.258	17323.26	0.999	0.878	14.537	1.120	0.533	1.875	0.722	1076.86
700	0.874	1.110×10^{15}	0.258	17244.19	1.029	0.900	14.504	1.143	0.515	1.942	0.719	792.46
100	0.902	1.056×10^{15}	0.260	17083.28	1.071	0.928	14.436	1.172	0.490	2.041	0.712	548.66
200	0.955	9.712×10^{14}	0.262	16858.61	1.148	0.981	14.340	1.228	0.451	2.219	0.703	290.28
300	0.976	9.294×10^{14}	0.263	16672.62	1.186	1.002	14.261	1.250	0.431	2.319	0.695	214.05
400	0.995	9.119×10^{14}	0.264	16677.21	1.209	1.021	14.263	1.270	0.423	2.363	0.695	170.18
500	1.000	8.951×10^{14}	0.264	16561.71	1.223	1.026	14.214	1.275	0.415	2.407	0.690	151.34
700	1.014	8.910×10^{14}	0.264	16636.99	1.234	1.040	14.246	1.289	0.413	2.419	0.694	132.78
1000	1.056	9.119×10^{14}	0.264	17180.93	1.245	1.082	14.477	1.330	0.423	2.363	0.721	113.45
2000	1.097	8.557×10^{14}	0.265	16959.34	1.309	1.123	14.383	1.373	0.397	2.518	0.711	99.39
3000	1.100	8.127×10^{14}	0.267	16554.46	1.345	1.126	14.211	1.408	0.377	2.652	0.692	92.67
4000	1.156	7.770×10^{14}	0.268	16589.91	1.409	1.182	14.226	1.434	0.361	2.774	0.695	89.22
5000	1.157	7.275×10^{14}	0.269	16062.13	1.457	1.183	13.998	1.438	0.338	2.962	0.671	86.95



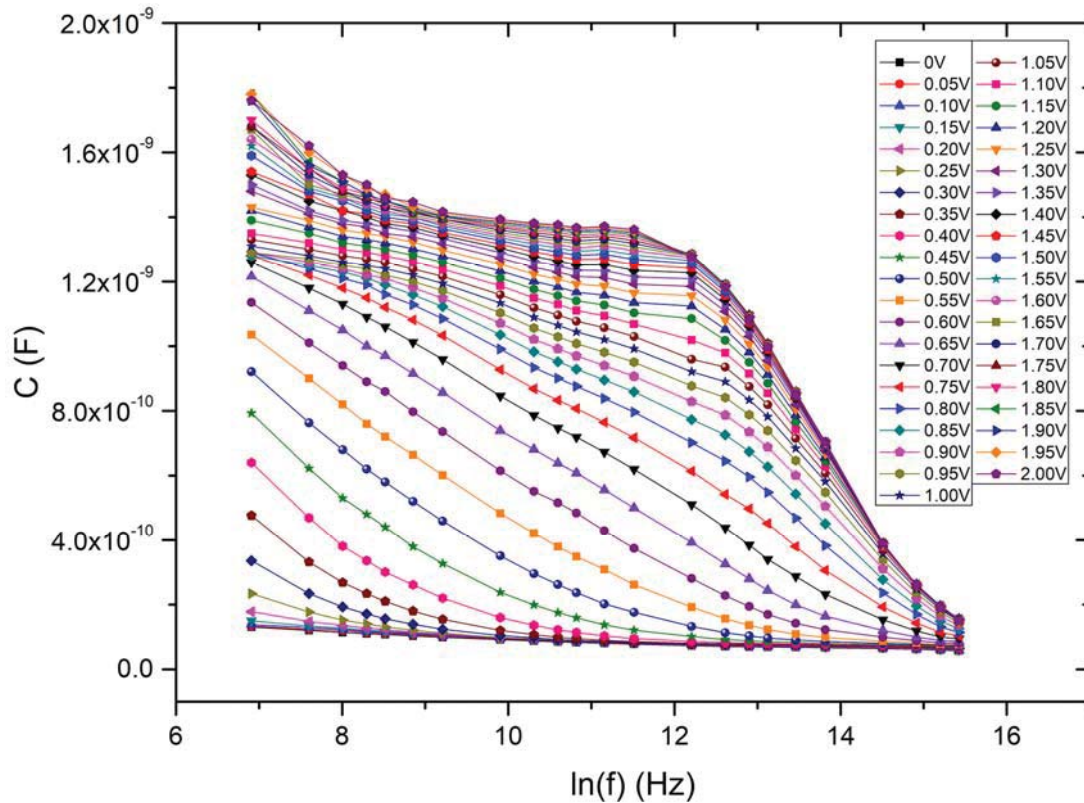
Şekil 4.7. Frekansa bağlı ($\ln(f)$) N_D ve Φ_B davranışı.

N_{ss} 'in yalıtkan/polimer ara katman ile yarıiletken arasında bulunmasından dolayı, MIS/MPS türü yapılar ideal durumdan sapma davranışları sergiler. Yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki bu tuzaklar/durumlar, yarıiletken yüzeyindeki kristal örgü yapısındaki bozukluklardan ve boş bağlar sebebiyle oluşmaktadır [44,93-98]. Tuzaklar/durumlar'daki yükler yapıların C-V ve G-V karakteristiği üzerinde bir hayli etkindir. Bu karakteristiklerde yükler, AC sinyale farklı farklı tepki vermektedirler.

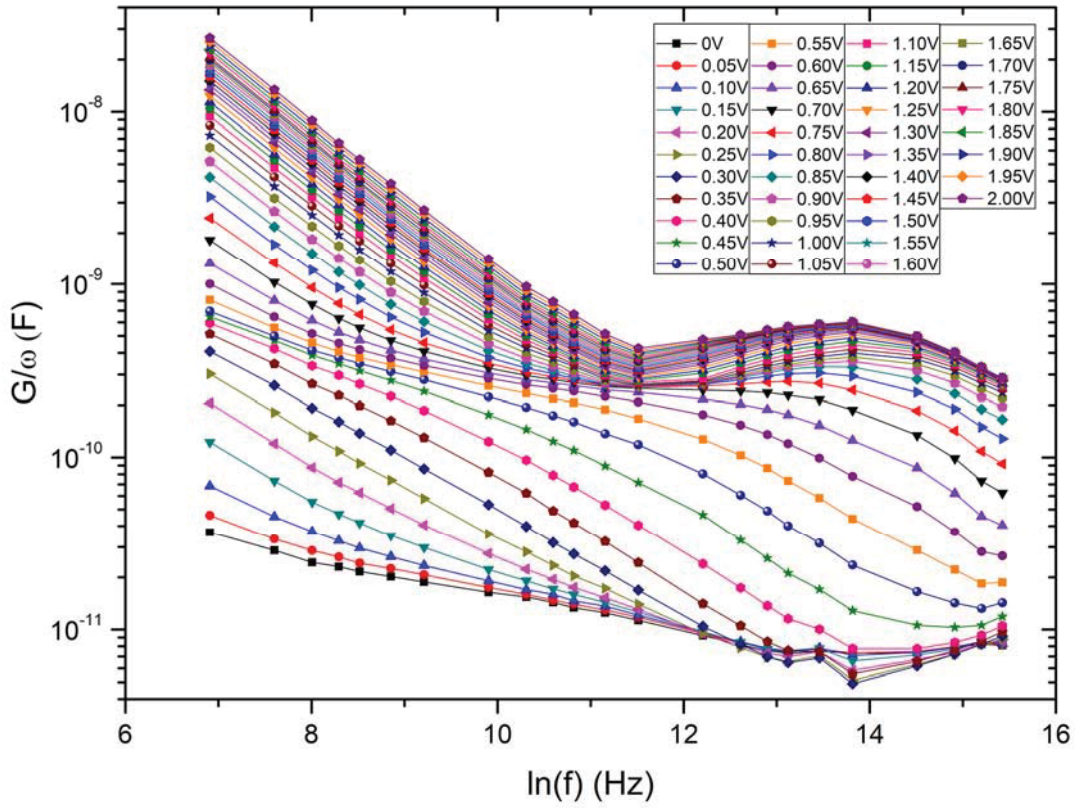
N_{ss} 'in dağılımını belirlemek üzere yüksek-düşük kapasitans, admitans/kondüktans ve Hill-Coleman yöntemleri gibi birçok yöntem bulunmaktadır [24,35,36]. Bunların arasında en uygun yöntem ise Nicollian ve Brews tarafından sunulan admitans metodudur [24,35]. Bu yöntem farklı voltajlarda bir dizi C-f ve G/ ω -f verisi gerektirmektedir. Yapılan C-V-f and G/ ω -V-f ölçümleri yeniden düzenlenerek bir dizi C-ln(f) ve G/ ω -ln(f) grafiği elde edilmiştir. Bu grafikler sırasıyla Şekil. 4.8. ve Şekil 4.9'da verilmiştir.

Tüm bu sonuçlar, yalıtkan/polimer ara yüzey katmanlı veya katmansız MS yapılarının fabrikasyon sürecinde yarıiletken ve metal ara yüzeyinde yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı içinde bir sürü ara yüzey durumu (N_{ss}) ve kaymaların ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Bunlar genellikle boş bağlar, örgü kaymaları, verici ve alıcı atom katkılarlarından kaynaklanmaktadır. N_{ss} ve kutuplanma etkisi (1) örnek fabrikasyonu ve (2) ölçümlerin yeterince yüksek frekansta gerçekleştirilmesi ile bertaraf edilebilir. Yüksek

frekanslarda bu etkiler ihmal edilebilir düzeye inmektedir. Çünkü düşük frekanslarda yükler AC sinyale ayak uydurabilmektedirler. Bu da ölçümlerde ilave kapasitans ve kondüktans katkısı getirmektedirler. Fakat yüksek frekanslarda bu durumların C ve G/ω üzerinde kayda değer bir katkısı bulunmamaktadır. Çünkü bunların durulma zamanları/ömür süreleri (τ), yüklerin AC sinyal etkisiyle N_{ss} 'leri doldurup geri boşaltabilmesine müsaade edemeyecek kadar uzundurlar [3-5,8,35]. Bu ara yüzey durumları C/G - V grafikleri üzerinde özellikle tükenme ve tersinim bölgelerinde daha etkindir. Bu nedendendir ki, deneysel olarak ters besleme bölgesinde C^{-2} - V 'den elde edilen N_D , Φ_B ve W_d değerleri Çizelge 4.1'den de takip edilebildiği gibi frekansa bağlı olmaktadır. Çünkü C^{-2} - V grafiklerinde voltaj eksenini kesen noktalar ve eğimler bu ara yüzey durumlarına ve onların ömür sürelerine bağlıdır. N_{ss} 'in yüksek frekanslarda düşmesi voltaj eksenini kesen noktada bir yükselmeye ve aynı zamanda bariyer yüksekliğinin artmasına karşılık gelmektedir. Bu da Eş. 4.7'den kontrol edilebileceği gibi N_D 'nin azalmasına ve W_d 'nin yükselmesine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.8. Farklı voltajlarda C - $\ln(f)$ grafikleri.



Şekil 4.9. Farklı voltajlarda G/ω - $\ln(f)$ grafikleri.

Nicollian ve Brews'e göre paralel kondüktans değerleri aşağıdaki Eş. 4.8 ile hesaplanır [24,35]:

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_m C_i^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_i - C_m)^2} = \frac{q N_{ss}}{2\omega\tau} \ln[1 + (\omega\tau)^2] \quad (4.8)$$

Burada C_m ve G_m belirli bir voltajda ölçülmüş kapasitans ve kondüktans değerleri, ω açısal frekans, τ ara yüzey durumlarının durulma zamanı ve C_i ara yüzey katmanının kapasitansdır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da yer aldığı gibi C ve G/ω değerleri frekansın yükselmesiyle neredeyse tüm besleme gerilimlerinde düşüş göstermektedir. Fakat özellikle düşük frekanslarda C ve G/ω 'deki değişim belirgin bir şekilde yüksektir. Ölçülen C_m ve G_m kullanılarak $\ln(f)$ 'e karşın 0,65-3,00 V aralığında 50 mV adımlarla elde edilen G_p/ω grafikleri Şekil 4.10'da verilmektedir. Her bir voltaj için elde edilen paralel kondüktans grafiklerinde belirgin bir pik bulunmaktadır ve bu pikin konumu yüksek voltajlara gidildikçe yüksek frekans değerlerine doğru konum kayması yaşamaktadırlar. N_{ss} ve τ değerlerini enerjinin birer fonksiyonu olarak elde etmek üzere uygulanan voltaj, enerjiye ($E_c - E_{ss}$) dönüştürülmüştür. " $E_c - E_{ss}$ " değerleri idealite faktörü ($n(V)$) ve bariyer

yüksekliğinin ($\Phi_B(V)$) aşağıda verilen Eş. 4.9 ve Eş. 4.10 gibi olduğunu kabul ederek Au/(NG-PVP)/n-Si yapısına ait I-V verisinden türetilmiştir.

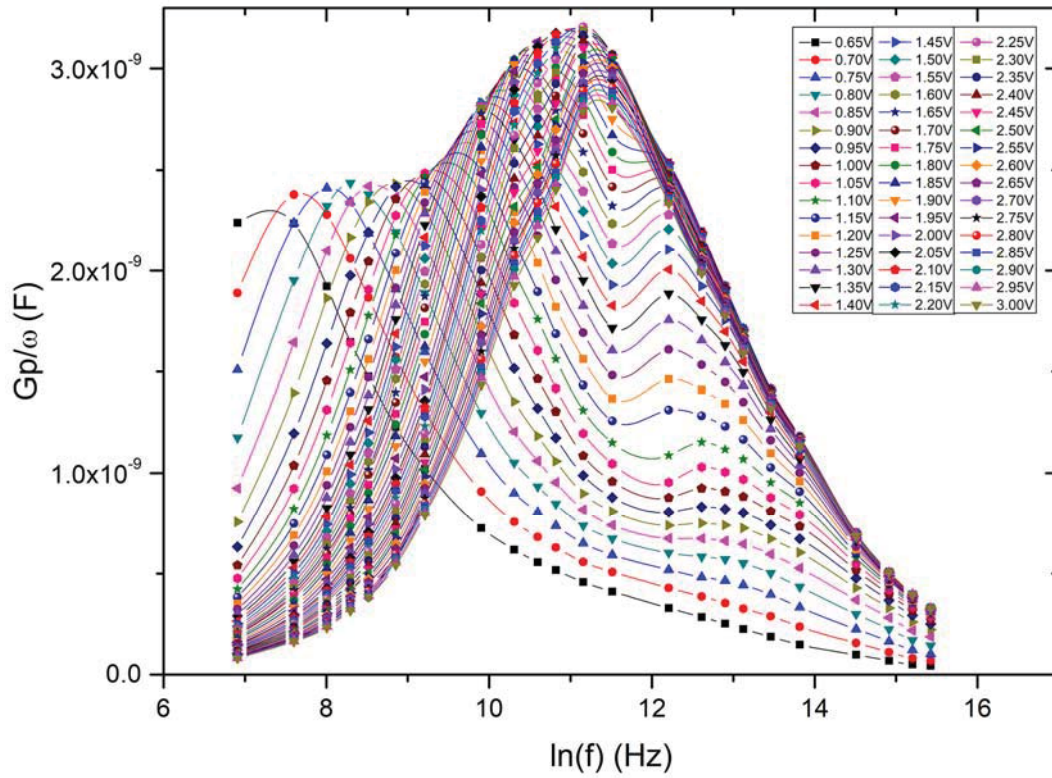
$$n(V) = \frac{qV}{kT \ln(I/I_0)} = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (4.9)$$

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \alpha(V) = \Phi_{B0} + \left[1 - \frac{1}{n(V)} \right] V \quad (4.10)$$

Burada α , bariyer yüksekliğinin voltaja göre türevine ($d\Phi_e/dV$) eşittir ve Eş. 4.10'da sağ tarafta verilmiştir [64]. Bu bariyer yüksekliği ifadesi ile;

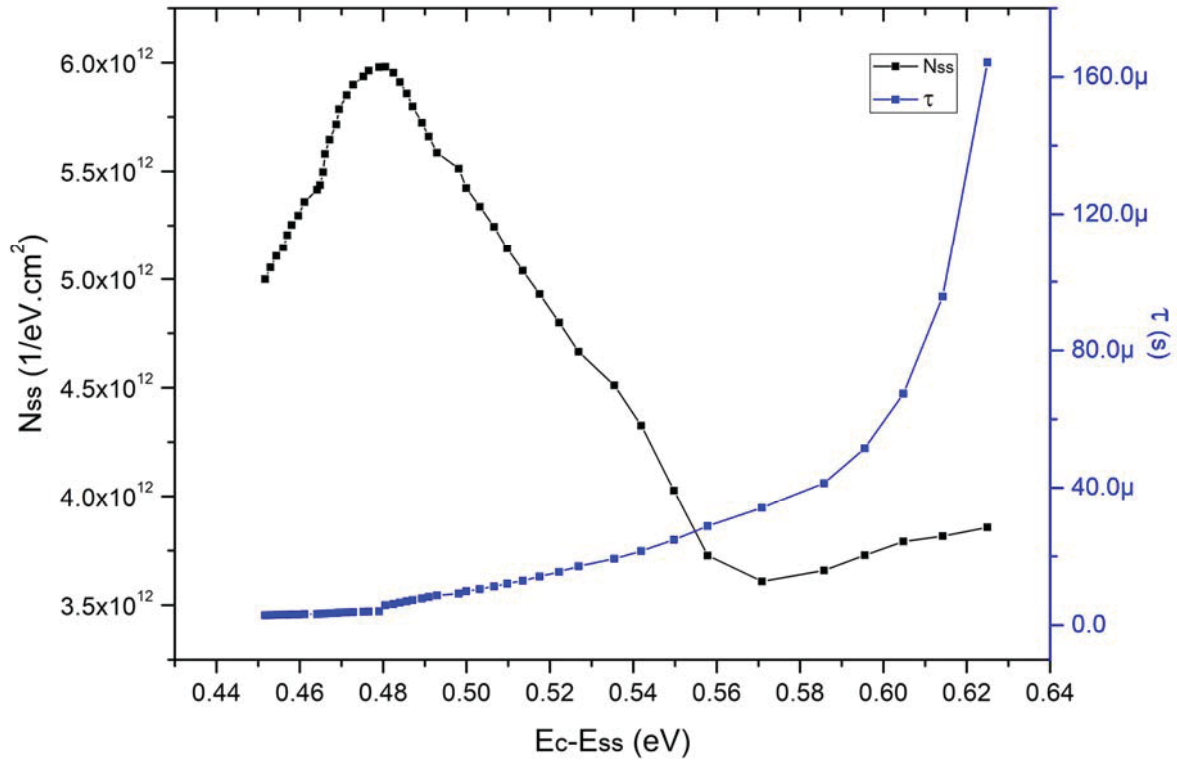
$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.11)$$

değerleri bu şekilde her voltaj değeri için elde edilir. Şekil 4.10'da verilen her bir voltaj için (0,65-3,00V) " $E_c - E_{ss}$ " değerleri elde edilmiştir. Bu, N_{ss} 'in yasak enerji bant aralığı içinde iletkenlik bandından uzaklığının bir ölçütüdür.



Şekil 4.10. Farklı voltaj değerlerinde paralel kondüktans, G_p/ω - $\ln(f)$ eğrileri.

Kondüktans yöntemine göre, $G_p/\omega - \ln(f)$ grafiklerinin pik konum değerinin karşılık geldiği açılal frekans değeri ile durulma zamanları arasında $\omega = 1,98/\tau$ şeklinde bir bağlantı bulunmaktadır. Ek olarak, $N_{ss} = (G_p/\omega)_{max}/0,402qA$ eşitliği kullanılarak durum yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Bu iki bağıntı kullanılarak N_{ss} ve bunların durumla zamanları/ömür süreleri (τ), $G_p/\omega - \ln(f)$ grafiğindeki pik değerlerinden türetilmiştir. N_{ss} 'in " $E_c - E_{ss}$ "ye karşı sırasıyla dağılımlarını ve bu dağılımdaki N_{ss} 'in ömür sürelerinin değişimini Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. İletkenlik bandından uzaklık seviyelerine göre enerji değerlerine ($E_c - E_{ss}$) karşı ara yüzey durumları (N_{ss}) ve bunların durulma zamanları (τ).

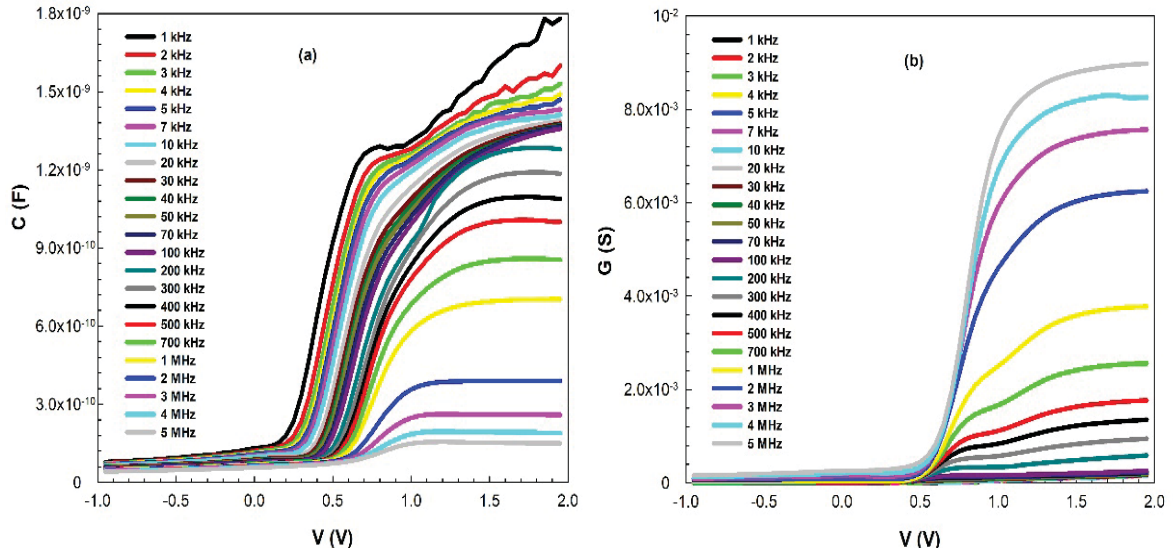
N_{ss} ve τ değerleri 0,452-0,625 eV enerji değeri aralığında sırasıyla $4,999 \times 10^{12}$ - $3,857 \times 10^{12}$ eV⁻¹cm⁻² ve 2,92-164 μ s değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Ek olarak, N_{ss} değerleri 0,48 eV " $E_c - E_{ss}$ " değerinde bir pik göstermektedir. Bunun fiziksel anlamı, iletkenlik bandından 0,48 eV kadar uzaklıktaki enerji değerine sahip ara yüzey durumlarının sayısının diğer değerlere göre daha fazla olduğu olarak tanımlanabilir. " $E_c - E_{ss}$ " iletkenlik bandından enerji olarak uzaklığı vermektedir. N_{ss} 'e ait τ durulma zamanları iletkenlik bandından uzaklaştıkça neredeyse üstel bir şekilde artmaktadır. Bu da iletkenlik bandı ile arasındaki enerji farkının büyümesi ile yük yakalayıp tekrar yayınlama olasılıklarının azalması ile ilişkilendirilebilir. N_{ss} değerleri $\sim 10^{12}$ eV⁻¹cm⁻² mertebesinde

bulunmaktadır. Bu merteye elektronik aygıtlar için oldukça uygun bir düzeydir. Düşük N_{ss} değerleri NG-PVP polimer ara yüzey katmanının pasivasyon etkisinin bir sonucudur. NG-PVP yüzeydeki durumların azaltılmasına, boş bağların doldurulmasına, yük akışının engellenmesine ve bozuklukların giderilmesine katkı sağlamıştır.

4.3. Dielektrik Karakteristiğın İncelenmesi

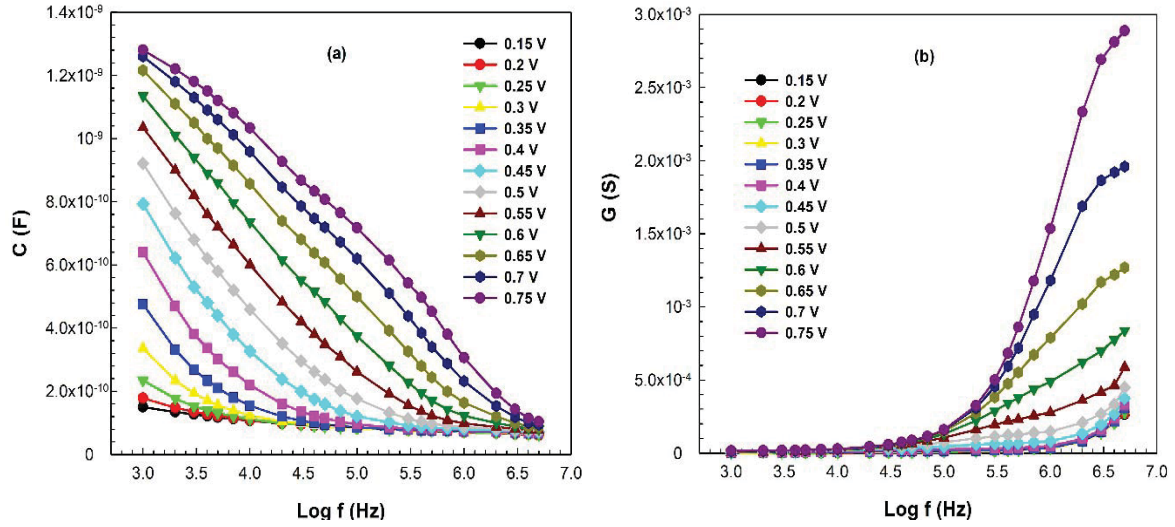
4.3.1. Kapasitans ve kondüktans

Karmaşık admitans ($Y=G_m+j\omega C_m$) ölçümleri C_m ve paralelinde G_m ölçümlerinin birleştirilmesidir. Kapasitans ve kondüktans ölçümleri eş zamanlı iki voltaj kaynağı (AC voltaj sinyali ve DC voltaj) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Au/(Nanografıt-PVP)/n-Si yapısının admitans ölçümleri 1 kHz-5 MHz frekans aralığında -1 V ile +2 V arasında taranan DC voltaj ile yapılmıştır. Değişen frekans ile tersinim, tükenme ve yığılma durumunda elde edilen C-V ve G-V karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Burada gösterildiğı gibi tersinim bölgesinde değişen frekansla C ve G değerleri neredeyse değişmeden kalmaktadır. Tükenme ve yığılma bölgelerinde C değeri frekansın artışıyla düşerken, G değeri yükselmektedir. Düşük frekanslarda, yüksek kapasitans değerleri ara yüzey durumlarından gelen ilave kapasitanstan kaynaklanmaktadır. Açısal frekans $\omega(=2\pi f) \ll 1/\tau$ olduğı zaman, ara yüzey durumları alternatif AC sinyalini takip edebilirler. Fakat $\omega \gg 1/\tau$ olduğı durumda ara yüzey durumları bu kutuplanma değişimine ayak uyduramazlar. Bu sebeple yüksek frekanslarda ara yüzey durumlarından (N_{ss}) kapasitansa bir katkı gelmez [35,95,99-101]. Yani C ve C/ω ’deki yüksek değerler (Nanografıt-PVP)/n-Si ara yüzeyindeki N_{ss} ’in uzaysal dağılımının bir sonucudur.



Şekil 4.12. Farklı frekans değerlerinde voltaja bağlı (a) kapasitans ve (b) kondüktans karakteristikleri.

Ek olarak, uygulanan voltajın admitans-frekans karakteristiği üzerindeki etkiyi gösterebilmek için MPS yapısının farklı pozitif voltajlarda logaritmik frekansa karşı C ve G eğrileri Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.12'de açıkça gösterildiği gibi C ve G voltajın artışıyla genel olarak artmaktadır. Öte yandan, Şekil 4.13'te görüldüğü gibi C frekansın artışıyla azalırken, G yükseliş göstermektedir. C 'nin düşük frekanslardaki maksimum değeri G 'de minimum değere karşılık gelmektedir. Aynı şekilde yüksek frekanslarda C 'deki minimum değeri G 'de maksimum değere karşılık gelmektedir. Bu davranış N_{ss} 'in düşük ve orta frekans değerlerinde tersinim ve tükenme bölgelerinde etkin olduğunu göstermektedir. Bu arada seri direnç yalnızca yüksek frekans değerlerinde yani yığılma bölgesinde geçerli olmaktadır.



Şekil 4.13. Au/(NG-PVP)/n-Si yapısının farklı besleme voltajında frekansa karşı (a) kapasitans ve (b) kondüktansın değişimi.

4.3.2. Dielektrik özellikler

Dielektrikler kapasitör ve transistör gibi elektronik aygıt uygulamalarında kritik bir öneme sahiptir. Dielektrikler aynı zamanda tümleşik devrelerde birçok bileşeni birbirinden elektriksel olarak yalıtımla görevlendirilirler. Uygulanan AC elektrik alanının frekansı elektriksel karakteristiklerde olduğu gibi dielektrik özelliklerde de büyük öneme sahiptir. Bu durum, zamanın ($T=1/2\pi f$) ve ara yüzey durumlarındaki/tuzaklardaki yüklerin durulma/ömür süresi değişiminin bir sonucudur. Dielektrik sabiti, elektrik alan altındaki kutuplanmanın bir ölçütüdür. Elektrik alan dielektrik malzemeler üzerinde bir kutuplanma meydana getirebilir. Karmaşık dielektrik sabiti (ϵ^*) aşağıdaki Eş. 4.12’de ifade edilmektedir [72,102-104].

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4.12)$$

Burada ϵ' ve ϵ'' , karmaşık dielektrik sabitinin sırasıyla gerçel ve sanal bileşenleri, C_m ve G_m sırasıyla ölçülmüş kapasitans ve kondüktans olmakla beraber:

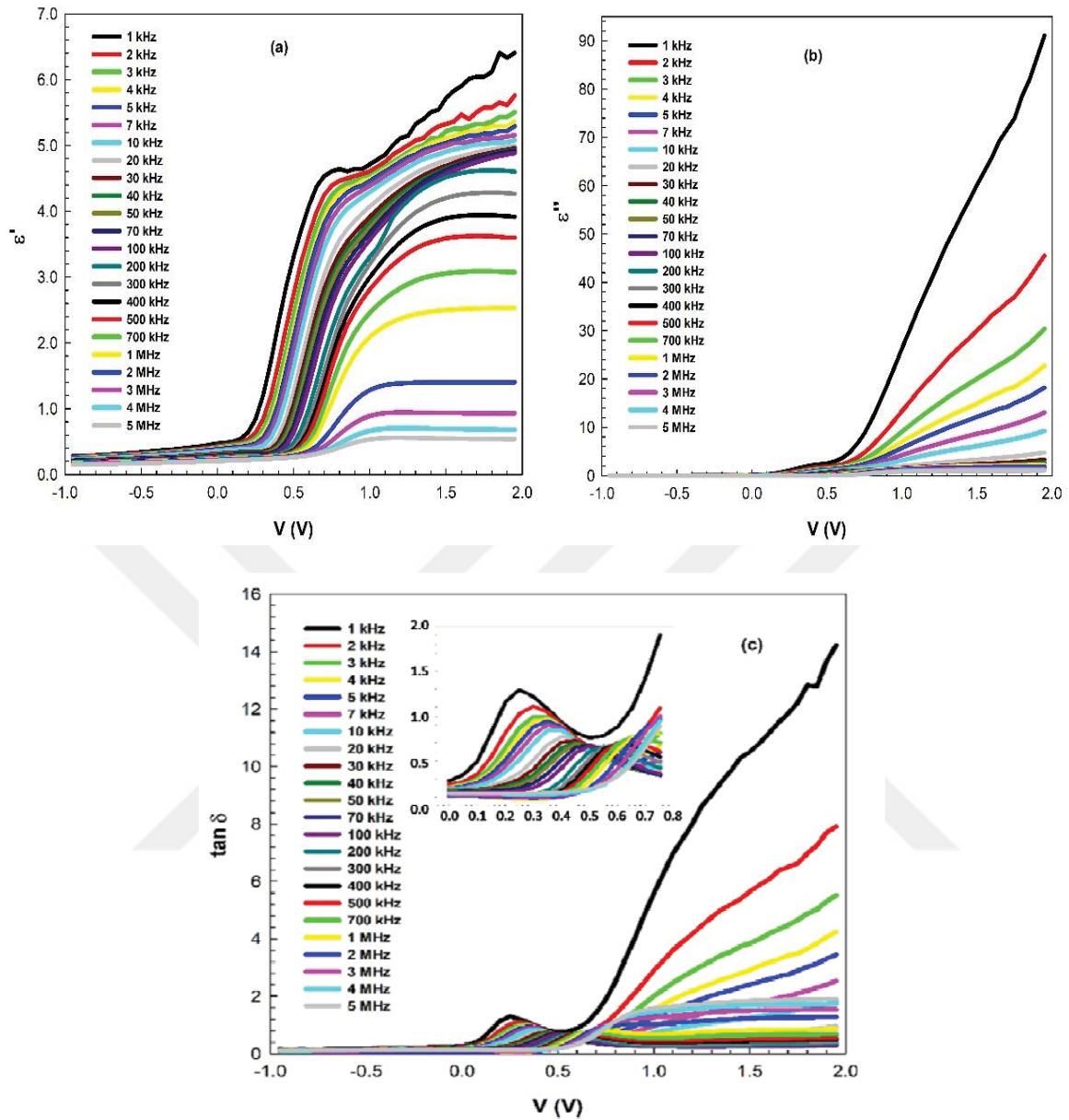
$$\epsilon' = \frac{C_m}{C_0} = \frac{C_m d}{\epsilon_0 A} \quad (4.13)$$

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{\omega C_0} \quad (4.14)$$

ifadeleriyle verilir. C_0 , boş kapasitörün kapasitansıdır. A , MPS aygıtını alanıdır. E_0 ise boş uzay geçirgenliği ($=8,85 \times 10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$) ve d ($=250 \text{ Å}$) polimer film kalınlığıdır. Dielektrik kayıp, AC elektrik alan altında enerjinin ısı olarak kayıp edilen miktarına karşılık gelmektedir. Dielektrik durulma zamanı ($\tau=1/f$) dielektrik kayıp pikine karşılık gelen frekans değerinden elde edilmiştir. Dielektrik kayıp kondüktans ölçümü ve Eş. 4.14 yardımı ile belirlenir. Ayrıca dielektrik kayıp, dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) ile ölçülebilir. Aynı zamanda “ $\tan\delta$ ” dielektrik yitim (kayıp) faktörü olarak da adlandırılır.

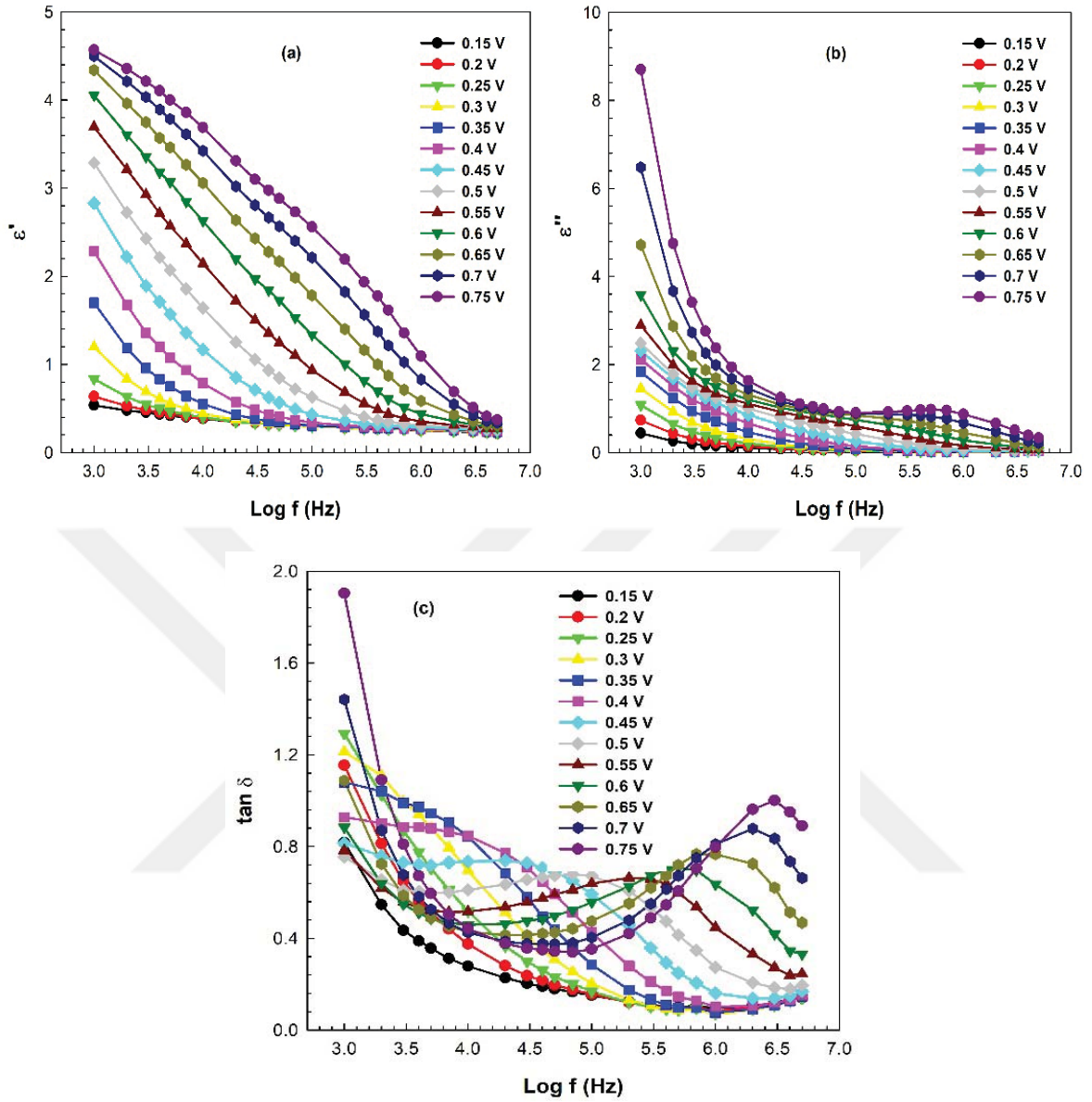
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4.15)$$

Şekil 4.14.(a-c), sırasıyla ε' , ε'' ve $\tan\delta$ 'nın farklı frekanslarda uygulanan DC voltaj ile değişimini göstermektedir. Şekil 4.14.a ve b, ε' ve ε'' 'nin frekansın artışıyla tükenme ve yığılma bölgelerinde düştüğünü göstermektedir. Bu davranışı N_{ss} 'in bir sonucudur. Fakat tersinim bölgesinde, bu değerler frekansla değişmeden kalmaktadır. Düşük frekanslarda dipoller AC elektrik alanın frekansını takip edebilmektedirler. Ama frekans artarken, dipoller dış elektrik alan değişimine ayak uyduramaz ve dielektrik sabit düşer [50,105-109]. Şekil 4.14.c'de olduğu gibi $\tan\delta$ eğrileri bir pik noktası vermektedir. Bu pik ara yüzey durumlarından kaynaklanmaktadır. Frekansın artışıyla birlikte gözlenen pikin şiddeti gittikçe azalır ve ortadan kaybolur. Aynı zamanda pik konumu yüksek pozitif voltaj değerlerine doğru kayar.



Şekil 4.14. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait değişen frekanslarda (a) ϵ' -V, (b) ϵ'' -V ve (c) $\tan \delta$ -V grafikleri.

Şekil 4.15, sırasıyla ϵ' , ϵ'' ve $\tan \delta$ 'nın Şekil 4.14'tekilerin aksine, farklı DC voltaj değerlerinde frekansla değişimini göstermektedir. Şekil 4.15.a ve b'de görüldüğü üzere ϵ' ve ϵ'' değerleri, pozitif voltajın artışı ile yükselirken frekansın artışı ile azalmaktadırlar. Düşük ve orta frekanslarda ϵ' ve ϵ'' 'nün yüksek değerleri, uzay yüklerinin kümelenmesinden gelen uzay yük kutuplanmasına bağlanmaktadır. Elektronik ve iyonik kutuplanma çok yüksek frekanslarda (10^9 - 10^{15} Hz) etkili olabilirken, uzay yük ve dipol kutuplanmaları sadece birkaç MHz gibi düşük frekanslarda etkin olabilmektedir.



Şekil 4.15. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait değişen voltajlarda (a) ϵ' -Logf, (b) ϵ'' -Logf ve (c) $\tan\delta$ -Logf grafikleri.

4.3.3. AC elektriksel iletkenlik:

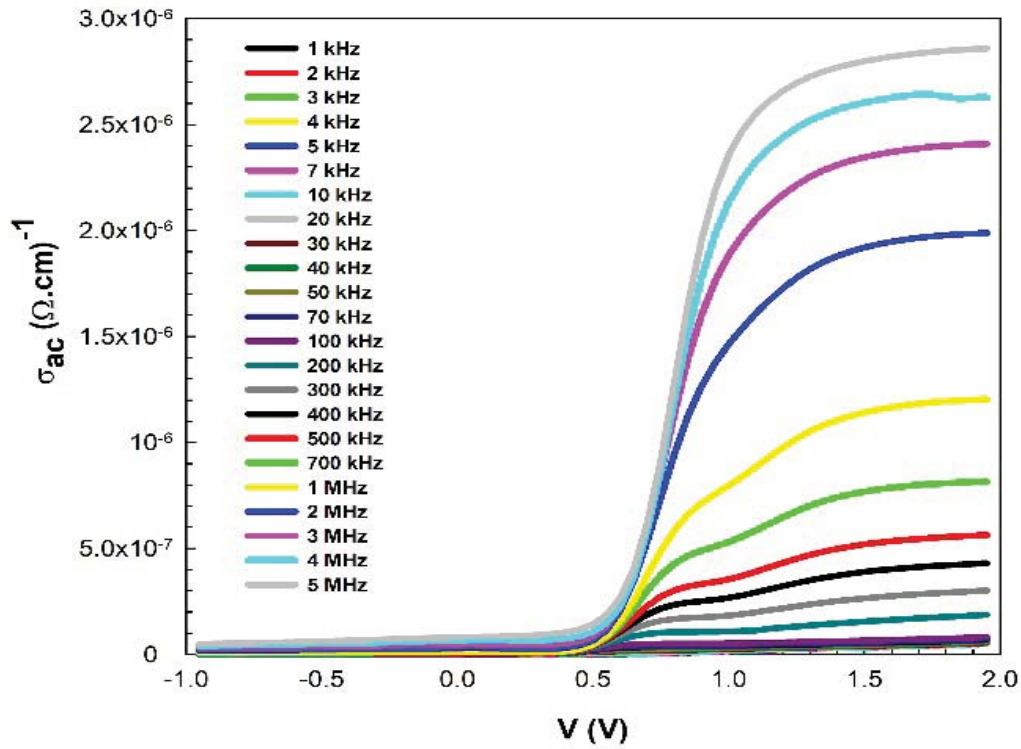
Karmaşık elektriksel iletkenlik (σ^*) aşağıdaki Eş. 4.16 ile ifade edilir:

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' = \omega\epsilon_0\epsilon'' + j\omega\epsilon_0\epsilon' \quad (4.16)$$

Burada σ' ve σ'' karmaşık iletkenliğin sırasıyla gerçel ve sanal bileşenleridir. Aslında σ^* 'nın gerçel kısmı AC elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) olarak tanımlanır. “ σ_{ac} ” dielektrik kaybın (ϵ'') ve frekansın bir fonksiyonudur. Bu yüzden σ_{ac} , ϵ'' cinsinden ölçülür ve aşağıdaki Eş. 4.17 ile verilir [107-114].

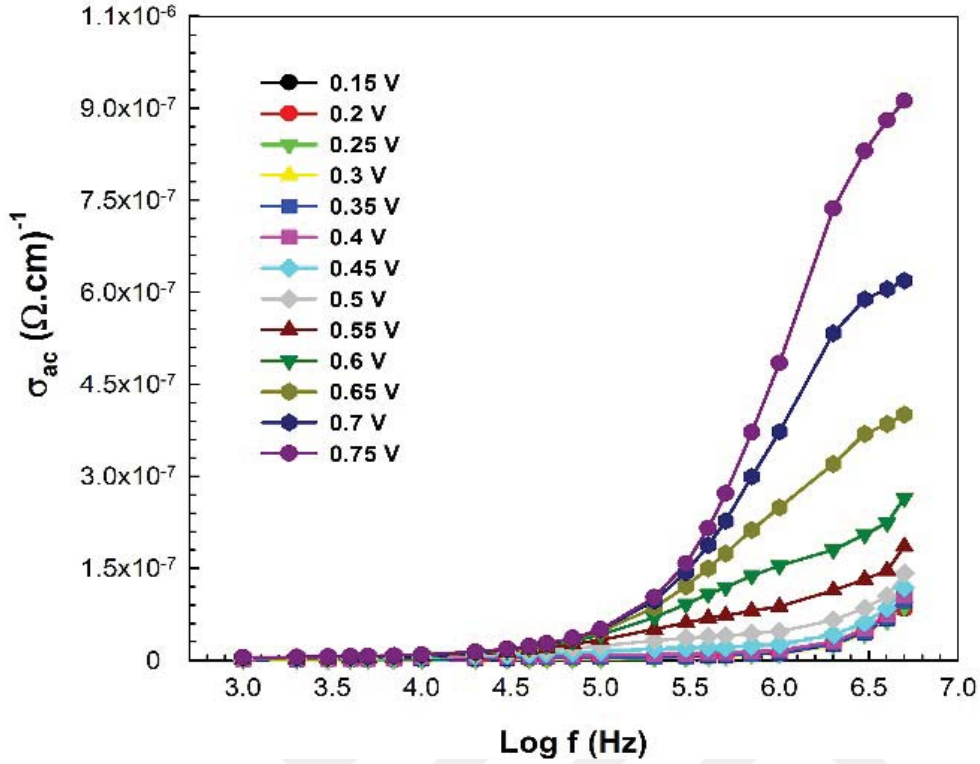
$$\sigma_{ac} = \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega \quad (4.17)$$

Şekil 4.16 AC iletkenliğin (σ_{ac}) farklı frekanslarda voltajla değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi σ_{ac} -V grafikleri G-V grafiklerine benzer şekilde davranış göstermektedirler. Çünkü elektriksel iletkenlik (σ), kondüktans ($G = \sigma A/L$) ile orantılıdır. Frekansın artışıyla σ_{ac} , artan bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Σ_{ac} 'deki artış yük taşıyıcıların hopping (sıçrama) iletkenliği ile açıklanabilir.



Şekil 4.16. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı frekanslarda σ_{ac} -V grafikleri.

Ek olarak, farklı pozitif DC voltajda AC iletkenlikteki frekansa bağlı değişim Şekil 4.17’de verilmiştir. “ σ_{ac} ” değerleri pozitif DC voltajın artışıyla artmaktadır. Düşük frekanslarda (1-50 kHz aralığında) σ_{ac} frekanstan neredeyse bağımsız olmasına rağmen, yüksek frekanslarda ($f > 50$ kHz) frekansa bağlılık göstermektedir. 50 kHz’ten sonra R_s ’in düşmesinden dolayı σ_{ac} değerleri frekansla birlikte üstel bir şekilde artış göstermektedir.



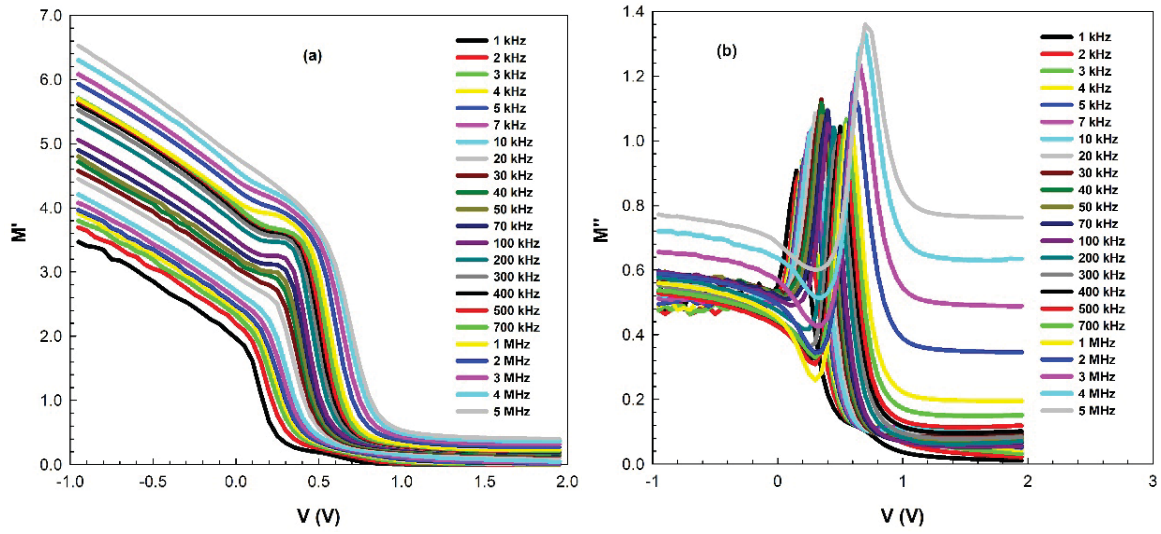
Şekil 4.17. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı voltajlarda σ_{ac} -Log f grafikleri.

4.3.4. Elektrik modülü:

Fiziksel olarak elektrik modülü elektrik alanının dielektrik malzeme içinde durulmasına karşılık gelmektedir. Başka bir deyişle, dielektrik durulma sürecini anlamak için kullanılır. Karmaşık elektrik modülü (M^*) şu şekilde verilir [108-119]:

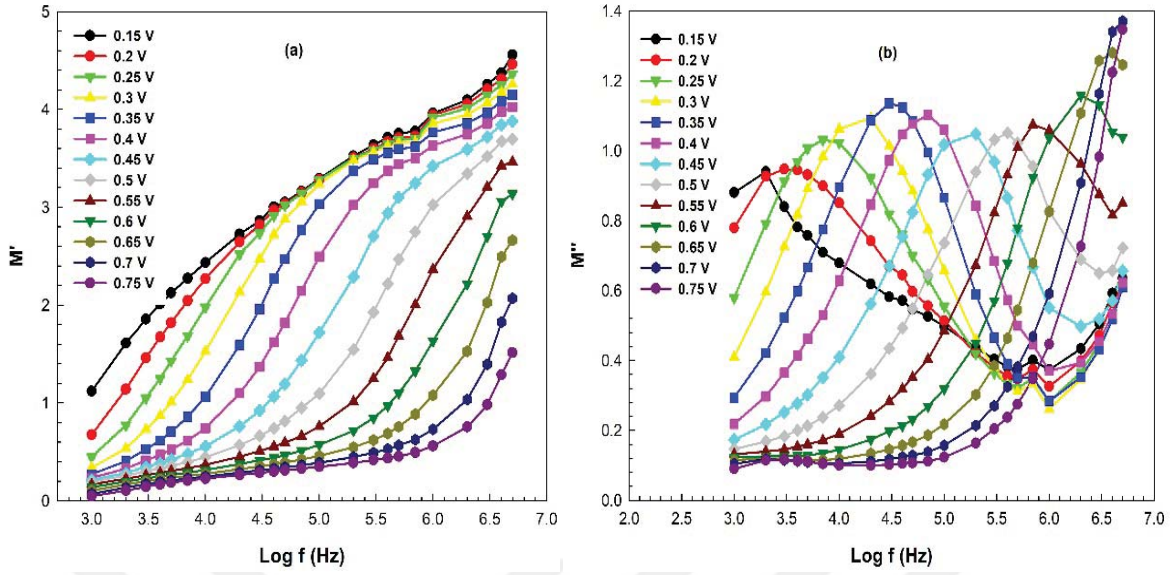
$$M^* = M' + jM'' = \frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (4.18)$$

Burada M' ve M'' karmaşık elektrik modülünün sırasıyla gerçel ve sanal bileşenleridir. Şekil 4.18'de farklı frekanslarda voltajla değişen M' ve M'' grafikleri gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere M' ve M'' değerleri frekansın artışıyla tırmanan bir davranış göstermektedir. Öte yandan, M'' eğrileri ise her biri birer pik oluşturmaktadır. Bu durum ara yüzey durumlarının uzaysal dağılımına bağlanmaktadır.



Şekil 4.18. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı frekanslarda (a) M' -V ve (b) M'' -V eğrileri.

Şekil 4.19.a ve b’de farklı pozitif DC voltaj değerlerinde frekansa karşı sırasıyla M' ve M'' değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.19.a’da gösterildiği gibi M' değerleri kısa erimli taşıyıcı mobilitesinden kaynaklı olarak pozitif voltajın artmasıyla düşüş gösterirken, frekansın artışıyla da artış göstermektedir. Dielektrik durulma süreci için, M'' -Logf grafikleri bir pik vermelidir. Bu durum “ $\omega\tau=1$ ” koşuluyla tanımlanır. Pikin oluştuğu frekans değeri kısa ve uzun erimli yük taşıyıcı mobiliteleri arasındaki geçiş (transition) noktasını göstermektedir. Şekil 4.19.b’de görüldüğü gibi M'' -Logf eğrileri her bir voltaj değerinde bir pik davranışı göstermektedirler. Bu pikler malzeme içinde durulma sürecine karşılık gelmektedir. Ayrıca, durulma frekansı voltajın artışıyla yüksek frekans değerlerine doğru kaymaktadır.



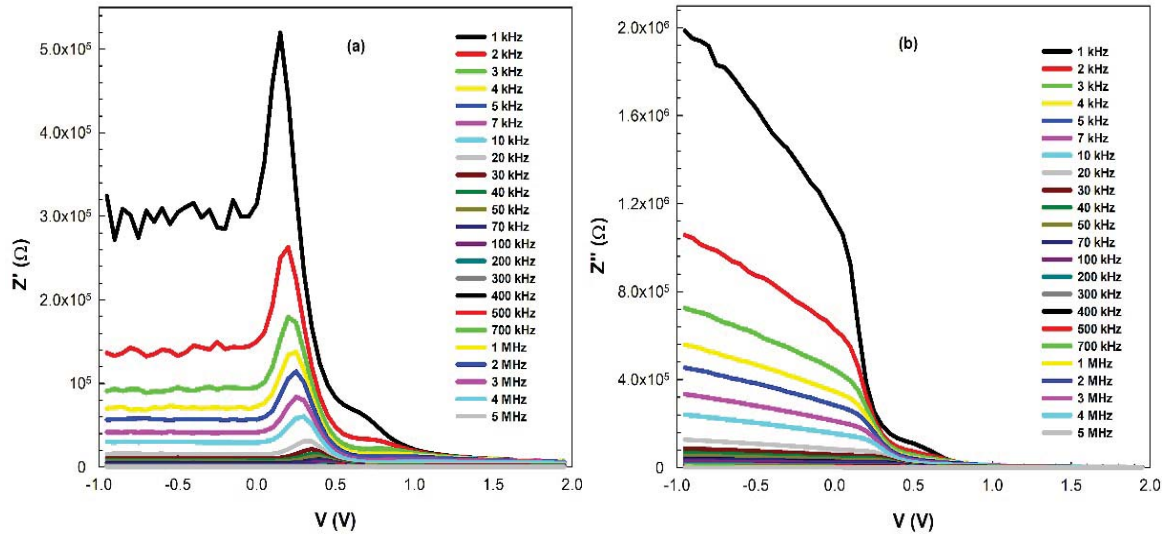
Şekil 4.19. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı voltajlarda (a) M' - $\text{Log } f$ ve (b) M'' - $\text{Log } f$ eğrileri.

4.3.5. Empedans spektroskopisi:

Karmaşık empedans spektroskopisi malzemenin dielektrik davranışını incelemek için kullanılır. Dielektrik malzemenin karmaşık empedansı (Z^*) aşağıdaki eşitlik ile verilir [120-124].

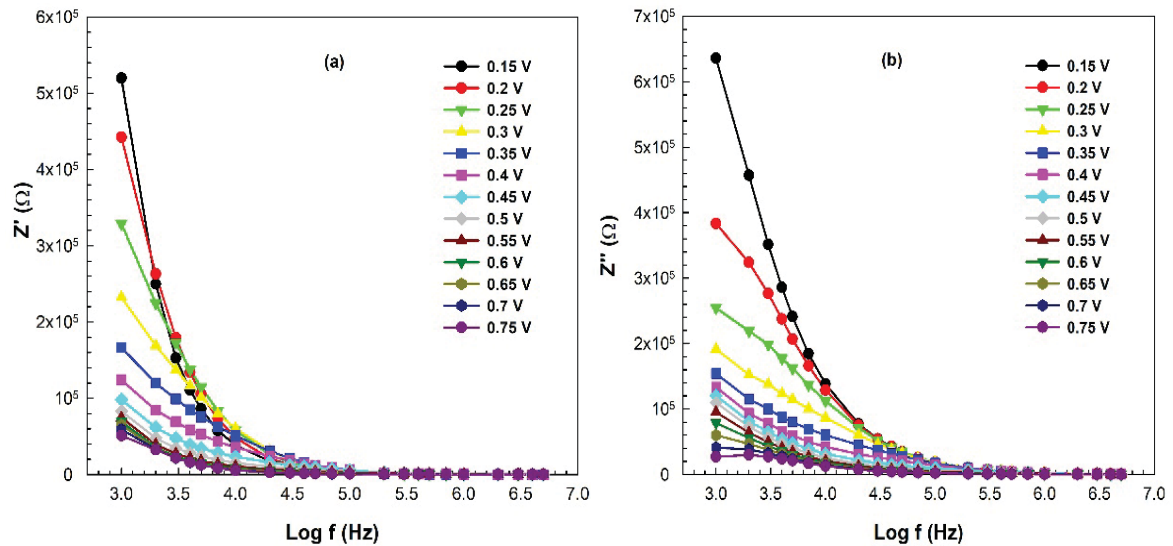
$$Z^* = Z' - jZ'' = \frac{1}{i\omega C_0 \epsilon^*} = \frac{\epsilon''}{\omega C_0 [\epsilon'^2 + \epsilon''^2]} - j \frac{\epsilon'}{\omega C_0 [\epsilon'^2 + \epsilon''^2]} \quad (4.19)$$

Burada Z' ve Z'' karmaşık empedansın sırasıyla gerçel ve sanal bileşenleridir. Şekil 4.20.a ve b Z' ve Z'' değerlerinin farklı frekanslarda voltaja bağlı değişimlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, Z' ve Z'' değerleri frekansın artırılmasıyla düşmektedir. Her bir Z' -V grafikleri 0-0,5 V aralığında sabit yükler ve ara yüzey durumlarından dolayı birer pik vermektedir [35]. Piklerin şiddetinin frekansın artışıyla düştüğü görülmektedir. Öte yandan, pik konumları yüksek pozitif voltaj değerlerine doğru kaymaktadır.



Şekil 4.20. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı frekanslarda (a) Z' -V ve (b) Z'' -V eğrileri.

Şekil 4.21.a ve b'de Z' ve Z'' değerlerinin farklı pozitif DC voltaj değerinde frekansla değişimleri gösterilmiştir. Bu şekillerde gösterildiği üzere Z' ve Z'' , voltajın ve frekansın artışı ile birlikte düşüş göstermektedirler. Frekans yükselirken, elektronların sıçramaları (hopping) artar ve bu şekilde Z' ve Z'' değerleri düşmüş olur. Belirli bir frekanstan sonra Z' ve Z'' değerleri neredeyse sabit kalmaktadırlar. Düşük frekanslardaki Z' ve Z'' 'nin yüksek değerleri uzay yük kutuplanmasından kaynaklanmaktadır.

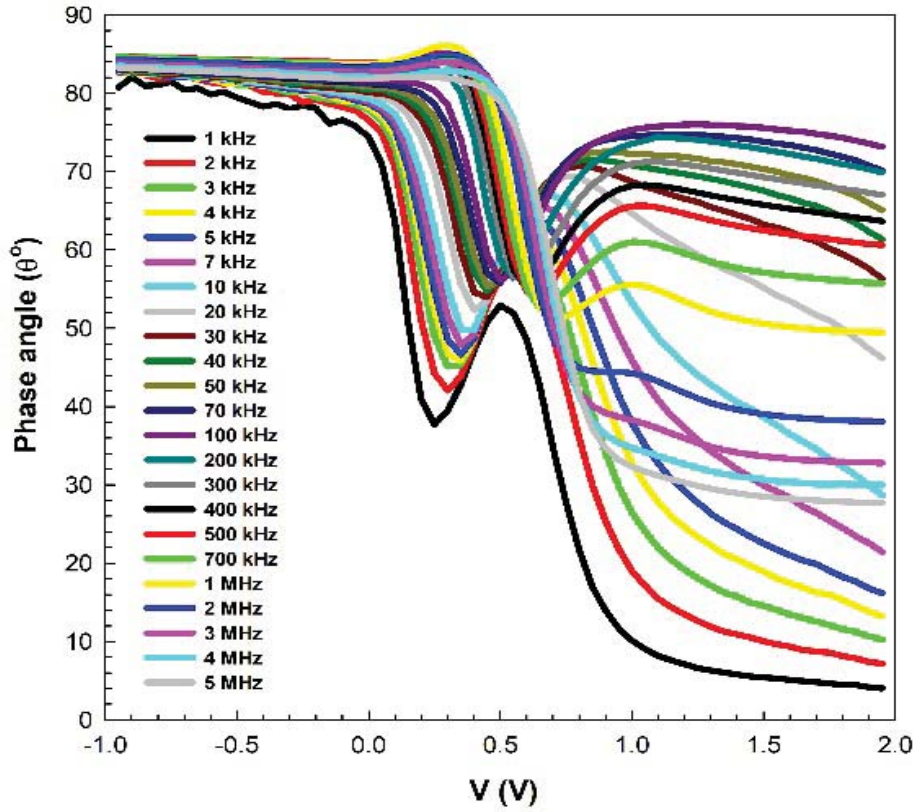


Şekil 4.21. Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısına ait farklı voltajlarda (a) Z' - Logf ve (b) Z'' - Logf eğrileri.

Direnç akımı ve kapasitif akım arasındaki faz açısı (θ) şu şekilde verilir.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (4.20)$$

Şekil 4.22’de farklı frekanslarda faz açısının uygulanan besleme voltajı ile değişimi gösterilmiştir. Negatiif voltaj bölgesinde tüm frekanslarda faz açısı 90° civarında kalmaktadır. Bu, polimer malzemenin saf kapasitif davranış gösterdiği anlamına gelmektedir [16,125-128].



Şekil 4.22. Farklı frekanslarda uygulanan voltaj ile faz açısı (θ)’nın değişimi.

5. SONUÇ

Döndürme yöntemi ile üretilmiş olan nanogرافit-PVP/n-Si yapısının C-V-f ve G/ω-V-f karakteristiği 1 kHz-5 MHz gibi geniş bir frekans ve ±3V voltaj aralığında oda sıcaklığında incelenerek sunulmuştur. C ve G değerlerinin frekans ve uygulanan voltaja özellikle N_{ss} ve R_s sebebiyle sırasıyla tükenme ve yığılma bölgelerinde sıkı bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir. Düşük frekanslardaki yüksek C ve G değerleri ara yüzey durumlarının varlığının ve bunların ara yüzey katmanı-yarıiletken ara yüzeyi arasındaki uzaysal dağılımının bir sonucu olarak görülmektedir. N_D , E_F , E_m , W_d , V_D ve Φ_B gibi elektriksel parametreler frekansın birer fonksiyonu olarak C^{-2} -V-f grafiklerinin eksen kesim noktası ve eğimlerinden hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, W_d ve Φ_B 'nin frekansın artışıyla yükseldiğini; N_D 'nin ise üstel olarak düştüğünü göstermektedir. Frekansa yakından bağlı olan N_D , W_d ve Φ_B 'nin 1 kHz 5 MHz frekans aralığında sırasıyla $1,689 \times 10^{15}$ - $7,275 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 0,629-1,457 μm ve 0,745-1,438 eV değişim gösterdiği belirlenmiştir. R_s değerleri aynı zamanda frekansın fonksiyonu olarak Nicollian-Goetzberger yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Frekansın artışı ile seri direncin neredeyse üstel bir şekilde düştüğü belirlenmiştir. N_{ss} 'in enerjiye bağlı profili ve bunların τ değerleri iletkenlik yöntemi ile hesaplanmıştır. Bunların 0,452-0,625 eV enerji değeri aralığında sırasıyla $4,999 \times 10^{12}$ - $3,857 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve 2,92-164 μs değerleri arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu düşük N_{ss} değerleri elektronik aygıt üretimi için oldukça uygundur ve bu düşük değerler nanogرافit-PVP polimer katmanın yüzey pasivasyonu etkisinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak nanogرافit-PVP polimer katman termal oksitleme gibi yöntemlerle üretilmiş SiO_2 ve SnO_2 gibi yalıtkan/oksit filmler yerine kullanılmaya aday bir malzemedir. Düşük maliyet, düşük moleküler ağırlık, yüksek elektrik alan dayanımı, esneklik ve elektro-eğirme, sol-gel gibi kolay üretim yöntemleri sayesinde nanogرافit-PVP iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

Tez çalışmasında MPS yapının dielektrik özellikler yönünden incelendiği kısımda Au/(NG-PVP)/n-Si MPS yapısının temel dielektrik parametreleri (ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$), elektrik modülünün gerçel ve sanal bileşenlerinin (M' ve M''), DC ve AC iletkenlik (σ) bileşenlerinin ve empedans özellikleri gibi temel dielektrik parametrelerin frekans ve voltaja bağlılığı geniş bir frekans ve voltaj aralığında oda sıcaklığında incelenmiştir. Ayrıca frekansa R_s 'in bağlı profili Nicollian-Brews yöntemi kullanılarak C ve G ölçümlerinden türetilmiştir. R_s 'in dışında tüm bu parametrelerin düşük ve orta frekanslarda

tersinim ve tükenme bölgelerinde frekansa ve voltaja sıkı bir şekilde bağlılığı belirlenmiştir. Bunun sebebi N_{ss} 'in varlığı, bunların durulma zamanları, yüzey ve dipol polarizasyonudur. Fakat R_s değerleri daha çok yüksek frekans değerlerinde yığılma bölgesinde etkilidir. Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel ve sanal (ϵ' ve ϵ'') değerleri frekansın ve uygulanan pozitif voltajın artışıyla düşmektedir. Bunun sebebi tuzaklardaki yüklerin yeniden yapılanması-yeniden düzenlenmesi ve voltaj altındaki kutuplanma etkisi olarak görülmektedir. Yüksek frekanslardaki iletkenliğin artışı ise yük mobilitesindeki artışın bir sonucudur. Yük mobilitesindeki artış aynı zamanda düşük frekanslarda ϵ' ve ϵ'' 'nin artışına sebep olmaktadır. Ayrıca bir tuzaktan diğerine sıçrayan (hopping) taşıyıcılar yüksek frekanslarda iletkenliğin artışına sebep olmaktadırlar. Voltaja ve $\text{Log}f$ 'e karşı çizdirilen M'' ve $\tan\delta$ eğrileri ara katman ve n-Si arasında konumlanmış N_{ss} 'in uzaysal dağılımı ve bunların durulma zamanları, ara yüzey ve dipol kutuplanması kapsamında incelenmiştir. 1 kHz'te bile 6,5 gibi elde edilen yüksek dielektrik sabiti değeri hazırlanan Nanografite-PVP polimerik ara katmanın SiO_2 gibi alışılmış yalıtkan ara yüzey katmanların yerine kullanılabileceğinin kanıtıdır. Ayrıca kolay üretim, düşük maliyet, esneklik, yüksek dielektrik, yüksek mekanik ve dielektrik dayanım ve daha fazla enerji ve yük depolamaya imkân sağlaması bakımından Nanografite-PVP avantajlı bir seçenek olmuştur.

KAYNAKLAR

1. Gökçen, M., Allı, A., (2014). Investigation of electrical and photovoltaic properties of Au/poly(propyleneglycol)-b-polystyrene/n-Si diode at various illumination intensities, *Philosophical Magazine*, 94 (9), 925–932.
2. Bilkan, Ç., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş, Shokrani-Havigh, R., (2016). Frequency and voltage dependence dielectric properties, ac electrical conductivity and electric modulus profiles in Al/Co₃O₄-PVA/p-Si structures, *Physica B: Condensed Matter*, 500, 154–160.
3. Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Y., Ersöz, G., Orak, İ., Altındal, Ş., Akbari, B., Akbari, H., (2017). Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10–200 kHz, *Journal of Electronic Materials*, 46, 4276–4286.
4. Bilkan, Ç., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y., (2017). Investigation of frequency and voltage dependence surface states and series resistance profiles using admittance measurements in Al/p-Si with Co₃O₄-PVA interlayer structures, *Physica B: Condensed Matter*, 515, 28–33.
5. Bilkan, Ç., Badali, Y., Fotouhi-Shablou, S., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş., (2017). On the temperature dependent current transport mechanisms and barrier inhomogeneity in Au/SnO₂-PVA/n-Si Schottky barrier diodes, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 123, 560.
6. Reddy, M.S.P., Sreenu, K., Reddy, V.R., Park, C., (2017). Modified electrical properties and transport mechanism of Ti/p-InP Schottky structure with a polyvinylpyrrolidone (PVP) polymer interlayer, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 28, 4847–4855.
7. Lima, L.P.B., Diniz, J.A., Radtke, C., dos Santos, M.V.P., Doi, I., Fo, J.G., (2013). Influence of Al/TiN/SiO₂ structure on MOS capacitor Schottky diode, and fin field effect transistors devices, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 31, 052202.
8. Yıldız, D.E., Altındal, Ş., Tekeli, Z., Özer, M., (2010). The effects of surface states and series resistance on the performance of Au/SnO₂/n-Si and Al/SnO₂/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes, *Material Science in Semiconductor Processing*, 13, 34–40.
9. Ersöz, G., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Y., Orak, İ., Altındal, Ş., (2016). Investigation of electrical characteristics in Al/CdSPVA/p-Si (MPS) structures using impedance spectroscopy method, *IEEE Transaction on Electron Devices*, 63, 7.
10. Arslan E., Ural S., Altındal, Ş., Özbay, E., (2019). Determination of current transport and trap states density in AlInGa_N/Ga_N heterostructures, *Microelectronic Reliability*, 103, 113517.
11. Tunç, T., Altındal, Ş., Uslu, İ., Dökme, İ., Uslu, H., (2011). Temperature dependent current–voltage (I–V) characteristics of Au/n-Si (111) Schottky barrier diodes with PVA (Ni, Zn-doped) interfacial layer, *Material Science in Semiconductor Processing*, 14, 139–145.

12. Tuğluoğlu, N., Yüksel, Ö. F., Karadeniz, S., Şafak, H., (2013). Frequency dependent interface state properties of a Schottky device based on perylene-monoimide deposited on n-type silicon by spin coating technique, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16, 786–791.
13. Altındal, Ş., Sevgili, Ö., Azizian-Kalandaragh, Y., (2019). The structural and electrical properties of the Au/n-Si (MS) diodes with nanocomposites interlayer (Ag-Doped ZnO/PVP) by using the simple ultrasound-assisted method, *IEEE Transaction on Electron Devices*, 66, 7.
14. Azizian-Kalandaragh, Y., (2010). Impedance spectroscopy (IS) and thermally stimulated discharged current (TSDC) studies on CdSe-PVA nanocomposites prepared by ultrasound-assisted method, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 4, 174–179.
15. Ghosh, P.K., Jana, S., Maity, U.N., Chattopadhyay, K.K., (2006). Effect of particle size and inter-electrode distance on the fieldemission properties of nanocrystalline CdS thin films grown in a polymer matrix by chemical bath deposition. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 35, 178–182.
16. Nezhadesm-Kohardafchahi, S., Farjami-Shayesteh, S., Badali, Y., Altındal, Ş, Jamshidi-Ghozlu, M.A., Azizian-Kalandaragh Y., (2018). Formation of ZnO nanopowders by the simple ultrasound-assisted method: Exploring the dielectric and electric properties of the Au/(ZnO-PVA)/n-Si structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 86, 173–180.
17. Nasir, S., Hussein, M.Z., Zainal, Z., Yusof, N.A., (2018). Carbon-based nanomaterials/allotropes: a glimpse of their synthesis properties and some applications. *Materials*, 11, 295.
18. Randviir, E.P., Brownson, D.A.C., Banks, C.E., (2014). A decade of graphene research: production, applications and outlook. *Materials, Today*, 17, 9.
19. Tiwari, S.K., Kumar, V., Huczko, A., Oraon, R., De Adhikari, A., Nayak, G.C., (2016). Magical allotropes of carbon: prospects and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41, 1-61.
20. Niyogi, S., Bekyarova, E., Itkis, M.E., McWilliams, J.L., Hamon, M.A., Haddon, R.C., (2006). Solution properties of graphite and graphene. *Journal of American Chemical Society*, 128 (24), 7720-7721.
21. Wanga, L., Zhanga, L., Tian, M., (2012). Improved polyvinylpyrrolidone (PVP)/graphite nanocomposites by solution compounding and spray drying. *Polymers for Advanced Technologies*, 23, 652-659.
22. Fim, F.D.C., Guterres, J.M., Basso, N.R.S., Galland, G.B., (2010). Polyethylene/graphite nanocomposites obtained by in situ polymerization. *Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry*, 48, 692–698.

23. Cho, D., Lee, S., Yang, G., Fukushima, H., Drzal, L.T., (2005). Dynamic mechanical and thermal properties of phenylethynyl-terminated polyimide composites reinforced with expanded graphite nanoplatelets. *Macromolecular Materials and Engineering*, 290, 179–187.
24. Nicollian, E.H., Goetzberger, A., (1967). The Si-SiO₂ interface electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon conductance technique. *Bell System Technical Journal*, 46, 1055–1133.
25. Altındal, Ş., Kanbur, H., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., (2008). On the energy distribution of interface states and their relaxation time and capture cross section profiles in Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 85, 1495–1501.
26. Arslan, E., Bütün, S., Şafak, Y., Özbay, E., (2010). Investigation of trap states in AlInN/AlN/GaN heterostructures by frequency-dependent admittance analysis. *Journal of Electronic Materials*, 39, 2681–2686.
27. Gökçen, M., Orhan, E., Taran, S., (2020). Synthesis and characterization of novel benzimidazole cobalt and copper complexes and applying in Au/PVA/n-Si diode. *Physica B: Condensed Matter*, 589, 412217.
28. M. Gökçen, E. Orhan, S. Taran, High photo-responsivity Au/polyvinyl alcohol (PVA)+di[1-(2-ethoxyethyl)-5-nitrobenzimidazole] copper dichloride/n-Si UV photodiode. *Sensors and Actuators A: Physica*, 315, 112335 (2020)
29. Yıldırım, M., Gökçen, M., Tunç, T., Uslu, İ., Altındal, Ş., (2014). Investigation of current-voltage characteristics and current conduction mechanisms in composites of polyvinyl alcohol and bismuth oxide. *Polymer Engineering and Science*, 54 (8), 1811–1816.
30. Sevgili, Ö., Yıldırım, M., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş., (2020). A comparison study regarding Al/p-Si and Al/(carbon nanofiber-PVP)/p-Si diodes: current/impedance-voltage (I/Z-V) characteristics. *Applied Physics A Materials Science and Processing*, 126, 634.
31. Karadas, S., Altındal Yerişkin, S., Balbaşı, M., Azizian-Kalandaragh, Y., (2021). Complex dielectric complex electric modulus and electrical conductivity in Al/(Graphene-PVA)/p-Si (metal-polymersemiconductor) structures. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 148, 109740.
32. Guan, H., Shao, C., Wen, S., Chen, B., Gong, J., Yang, X., (2003). A novel method for preparing Co₃O₄ nanofibers by using electrospun PVA/cobalt acetate composite fibers as precursor. *Material Chemistry and Physics*, 82(3), 1002–1006.
33. Yücedağ, İ., (2009). On the anomalous peak at low and moderate frequency C-V curves of Al/SiO₂/p-Si structure at the forward bias region. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 3(6), 612–615.
34. Khan, N.A., Mumtaz, M., Khurram, A.A., (2008). Frequency dependent dielectric properties of Cu_{0.5}Ti_{0.5}Ba₂Ca₂Cu_{3-y}Zn_yO_{10-δ} superconductors (y=0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5). *Journal of Applied Physics*, 3, 033916.

35. Nicollian, E.H., Brews, J.R., (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, New York: Wiley, 117–129.
36. Hill, W.A., Coleman, C.C., (1980). A single-frequency approximation for interface-state density determination, *Solid-State Electronics*, 23, 987–993.
37. McCrum, N.G., Read, B.E., Williams, G., (1967). *Anelastic and Dielectric Effects in Polymer Solids*, London: Wiley.
38. Gedde, U.W., (1995). *Polymer Physics*, London: Chapman & Hall.
39. Abu Jafar Mazumder, M., Sheardown, H., Al-Ahmed, A., (2019). *Functional Polymers*, Switzerland: Springer.
40. Maier, G., (2001). Low dielectric constant polymers for microelectronics, *Progress in Polymer Science*, 26, 3-65.
41. Lim, L. W. and Aziz, F. and Muhammad, F. F. and Supangat, A. and Sulaiman, K. (2016). Electrical properties of Al/PTB7-Th/n-Si metal-polymer-semiconductor Schottky barrier diode. *Synthetic Metals*, 221, 169-175.
42. Karaoglan, N., Uslu Tecimer, H., Altındal, Ş., Bindal, C., (2019). Dielectric characterization of BSA doped-PANI interlayered metal–semiconductor structures, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 30, 14224-14232.
43. More, S., Dhokne, R., Moharil, S., (2017). Dielectric relaxation and electric modulus of polyvinyl alcohol–Zinc oxide composite films, *Material Research Express*, 4, 055302.
44. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, 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.
45. Chelkowski, A., (1980). *Dielectric Physics*, Amsterdam: Elsevier.
46. Nalwa, H.S., (1999). *Handbook of Low and High Dielectric Constant Materials and their Applications*, London: Academic Press.
47. Kao, K.C., (2004). *Dielectric Phenomena in Solids*, London: Elsevier.
48. Voronova, M., Rubleva, N., Kochkina, N., Afineevskii, A., Zakharov, A., Surov, O., (2018). Preparation and Characterization of Polyvinylpyrrolidone/Cellulose Nanocrystals Composites, *Nanomater*, 8, 1011.
49. Baraker, B.M., Lobo, B., (2017). Analysis of Electrical Measurements on Cadmium Chloride Doped PVA-PVP Blend, *Mapana Journal of Science*, 16, 45-65.
50. Zidan, H.M., El-Ghamaz, N.A., Abdelghany, A.M., Lotfy, A., (2016). Structural and Electrical Properties of PVA/PVP Blend Doped with Methylene Blue Dye, *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 9041-9056.

51. Rawat, A., Singh, P.J., (2016). Effect of temperature on dielectric properties of polyvinylpyrrolidone/polyacrylamide blend films at microwave frequency, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 56, 170-176.
52. Wang, L., Zhang, L., Tian, M., (2012). Improved polyvinylpyrrolidone (PVP)/graphite nanocomposites by solution compounding and spray drying, *Polymers for Advanced Technologies*, 23, 652-659.
53. Geim, A.K., Novoselov, K.S., (2007). The rise of graphene, *Nature Materials*, 6, 183-191.
54. Sadasivuni, K.K., Ponnamm, D., Kim, J., Thomas, S., (2015). *Graphene-Based Polymer Nanocomposites in Electronics*, Switzerland: Springer.
55. Shahenoor Basha, S.K., Vijay Kumar, K., Sunita Sundari, G., Rao, M.C., (2018). Structural and Electrical Properties of Graphene Oxide-Doped PVA/PVP Blend, Nanocomposite Polymer Films, *Advances in Materials Science and Engineering*, 4372365.
56. Kaya, A., Alialy, S., Demirezen, S., Balbaşı, M., Yerişkin, S.A., Aytimur, A., (2016). The investigation of dielectric properties and ac conductivity of Au/GO-doped PrBaCoO nanoceramic/n-Si capacitors using impedance spectroscopy method, *Ceramics International*, 42, 3322-3329.
57. Mansouri, S., Coskun, B., El Mir, L., Al-Sehemi, A.G., Al-Ghamdi, A., Yakuphanoglu, F., (2018). Graphene Oxide/Poly(3-hexylthiophene) Nanocomposite Thin-Film Phototransistor for Logic Circuit Applications, *Journal of Electronic Materials*, 47 2461-2467.
58. Braun, F., (1874). Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle, *Annual Review of Physical Chemistry*, 153, 556.
59. Sze S. M., Ng Kwok, K., (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (Third edition), New Jersey: John Wiley & Sons.
60. Sharma B.L., (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, New York: Plenum Press.
61. Northrop D.C., Rhoderick, E.H., *The Physics of Schottky barriers, in Variable Impedance Devices*, M.J. Howes and D.V. Morgan, (1978). New York: John Wiley and Sons, Chap. 2, 37-73.
62. Rhoderick, E.H., and Williams, R.H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford: Clarendon Press, 257-267.
63. Baxandall, P.J., Colliver, D.J., Fray, A.F., (1971). An instrument for the rapid determination of semiconductor impurity profiles, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 4, 213-221.
64. Card, H.C., Rhoderick, E.H., (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4, 1589-1601.

65. Fröhlich, H., (1949). *Theory of Dielectrics Dielectric Constant and Dielectric Loss*, London: Oxford University Press, 1-30.
66. Symth, C.P., (1955). *Dielectric Behavior and Structure*, New York: McGraw-Hill, 1-3.
67. Tareev, B., (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers, 9-258.
68. Kumar, A., Chand, B.P., (2017). *Ferroelectrics: Principles and Applications*, Wiley, 1-18.
69. Wert, C.A., Thomson, R.M., (1970). *Physics of Solid* (Second Edition), New York: McGraw-Hill, 388-421.
70. Parlaktürk, F., (2007). *Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MFIS) Yapıların Hazırlanması, Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 113.
71. Macedo, P.B., Moynihan, C.T., Bose, R., (1972). Role of Ionic Diffusion in Polarization in Vitreous Ionic Conductors, *Physics and Chemistry of Glasses*, 13, 171-179.
72. Bunget, I., Popescu, M., (1984). *Physics of Solid Dielectrics*. New York: Elsevier.
73. Çetinkaya, H.G., (2015). *Au/(%1 Grafen katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/n-Si Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektrik ile Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 93.
74. Haaf, F., Sanner, A., Straub, F. (1985). Polymers of N-Vinylpyrrolidone: Synthesis, Characterization and Uses, *Polymer Journal*, 17, 143–152.
75. Kutscher, B., (2020). *Dermatologicals (D)*, 4. *Antiseptics and Disinfectants (D08)*, *Anti-Acne Preparations (D10)*, and *Other Dermatological Preparations (D11)*, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH. 1–22.
76. Bühler, V., (2005). *Polyvinylpyrrolidone Excipients for Pharmaceuticals: Povidone, Crospovidone and Copovidone*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 1–254.
77. Ganesan, S., Felo, J., Saldana, M., Kalasinsky, V. F., Lewin-Smith, M. R., Tomashefski Jr, J. F., (2003). Embolized crospovidone (polyN-vinyl-2-pyrrolidone) in the lungs of intravenous drug users. *Modern Pathology*, 16(4), 286–92.
78. S.K., Das, S.K., Saha, A., Das, A.K., Halder, Banerjee, S.N., Chakraborty, M., (2008). A study of comparison of efficacy and safety of talc and povidone iodine for pleurodesis of malignant pleural effusions, *Journal of the Indian Medical Association*. 106(9), 589-592.
79. *Contact Lens Design & Materials: The Evolution of Contact Lens Wetting Agents*, (2009). Contact Lens Spectrum.

80. Liccioli, G., Mori, F., Barni, S., Pucci, N., Novembre, E., (2018). *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 28(4), 253-286.
81. Swei, J., Talbot, J.B., (2006). Development of high-definition aqueous polyvinylpyrrolidone photoresists for cathode ray tubes, *Journal of Applied Polymer Science*, 102(2), 1637–1644.
82. Chen, T., *Dental bleach*, (2001) U.S. Patent 6, 730, 316.
83. Kavakka, J. S.; Kilpeläinen, I.; Heikkinen, S. (2009). General Chromatographic NMR Method in Liquid State for Synthetic Chemistry: Polyvinylpyrrolidone Assisted DOSY Experiments, *Organic Letters*, 11(6), 1349–52.
84. Li, B., Zhang, Y., Fu, L., Yu, T., Zhou, S., Zhang, L., Yin, L., (2018). Surface passivation engineering strategy to fully-inorganic cubic CsPbI₃ perovskites for high-performance solar cells, *Nature*, 8, 9:1076.
85. Shahenoor Basha, S. K., Sunita Sundari, G., Vijay Kumar K., Rao M. C., (2017). Structural and Dielectric Properties of PVP Based Composite Polymer Electrolyte Thin Films, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27, 455–466.
86. Eranna, G., (2014). *Crystal Growth and Evaluation of Silicon for VLSI and ULSI*, London: CRC Press., 253.
87. Bashir, A., Awan, T.I., Tehseen, A., Tahir, M.B., Ijaz, M., (2020). *Chemistry of Nanomaterials: Fundamentals and Applications*, 51-87.
88. Cohen, E., Lightfoot, E.J., (2011). *Coating Processes*, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, New York: John Wiley.
89. Scriven, L. E., (1988). *Physics and Applications of Dip Coating and Spin Coating*, *MRS Proceedings*, Cambridge University Press (CUP), 121: 717.
90. Hall, D.B., Underhill, P., Torkelson, J.M., (1988). Spin Coating of Thin and Ultrathin Polymer Films, *Polymer Engineering and Science*, 38, 12.
91. Xie, K., Fu, Q., Qiao, G.G., Webley, P.A., (2019). Recent progress on fabrication methods of polymeric thin film gas separation membranes for CO₂ capture, *Journal of Membrane Science*, 572, 38–60.
92. Ganash, E.A., Al-Jabarti, G.A., Altuwirqi, R.M., (2020). The synthesis of carbon-based nanomaterials by pulsed laser ablation in water, *Material Research Express*, 7, 015002.
93. Alptekin, S., Tan, S. O., Altındal, Ş., (2019). Determination of Surface States Energy Density Distributions and Relaxation Times for a Metal-Polymer-Semiconductor Structure, *IEEE Transaction on Nanotechnology*, 18, 1196-1199.
94. Eroğlu, A., Yildirim, M., Durmuş, P., Dokme, İ., (2019). Distribution of interface traps in Au/2% GC-doped Ca₃Co₄Ga_{0.001}O_x/n-Si structures, *Journal of Applied Polymer Science*, 48399.

95. Buyukbas-Ulaşan, A., Altındal Yerişkin, S., Tataroğlu, A., Balbaş, M., Azizian-Kalandaragh, Y., (2018). Electrical and impedance properties of MPS structure based on (Cu₂O-CuO-PVA) interfacial layer, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 29, 8234-8243.
96. Türk, Ç. G., Tan, S. O., Altındal, Ş., İnem, B., (2020). Frequency and voltage dependance of barrier height, surface states, and series resistance in Al/Al₂O₃/p-Si structures in wide range frequency and voltage, *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 582, 411979.
97. Nikravan, A., Badali, Y., Altındal, Ş., Uslu, İ., Orak, İ., (2017). On the Frequency and Voltage-Dependent Profiles of the Surface States and Series Resistance of Au/ZnO/n-Si Structures in a Wide Range of Frequency and Voltage, *Journal of Electronic Materials*, 46, 5728–5736.
98. Altındal Yerişkin, S., (2019). The investigation of effects of (Fe₂O₄-PVP) organic-layer, surface states, and series resistance on the electrical characteristics and the sources of them, *Journal of Material Science: Material in Electronics*, 30, 17032–17039.
99. Hatta, H., Miyagawa, Y., Nagase, T., Kobayashi, T., Hamada, T., Murakami, S., Matsukawa K., Naito, H., (2018). Determination of Interface-State Distributions in Polymer-Based Metal-Insulator-Semiconductor Capacitors by Impedance Spectroscopy, *Applied Sciences*, 8, 1493.
100. Acar, F.Z., Buyukbas-Ulusan, A., Tataroglu, A., (2018). Analysis of interface states in Au/ZnO/p-InP (MOS) structure, *Journal of Material Science: Material in Electronics*, 29, 12553-12560.
101. Rajagopal Reddy. V., (2015). Electrical and interfacial properties of Au/n-InP Schottky contacts with nickel phthalocyanine (NiPc) interlayer, *Indian Journal of Physics*, 89, 463-469.
102. Demkov, A.A., Navrotsky, A., (2005). *Materials Fundamentals of Gate Dielectrics*, Netherlands: Springer.
103. Kasap, S., Capper, P., (2006). Springer *Handbook of Electronic and Photonic Materials*, New York: Springer.
104. Raju, G.G., (2017). *Dielectrics in Electric Fields* (Second Edition), Boca Raton: CRC Press.
105. Tripathi, R., Kumar, A., Bharti, C., Sinh, T.P., (2010). Dielectric relaxation of ZnO nanostructure synthesized by soft chemical method, *Current Applied Physics*, 10, 676-681.
106. Yang, L., Chao, X., Yang, Z., Zhao, N., Wei, L., Yang, Z., (2016). Dielectric constant versus voltage and non-Ohmic characteristics of Bi_{2/3}Cu₃Ti₄O₁₂ ceramics prepared by different methods, *Ceramics International*, 42, 2526-2533.

107. Altındal Yeriskin, S., Balbası, M., Tataroglu, A., (2016). Frequency and voltage dependence of dielectric properties, complex electric modulus, and electrical conductivity in Au/7% graphene doped-PVA/n-Si (MPS) structures, *Journal of Applied Polymer Science*, 133, 43827.
108. Buyukbas Uluşan, A., Tataroglu, A., (2018). Frequency-Dependent Dielectric Parameters of Au/TiO₂/n-Si (MIS) Structure, *Silicon*, 10, 2071-2077.
109. Alptekin, S., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., (2019). Dielectric, modulus and conductivity studies of Au/PVP/n-Si (MPS) structure in the wide range of frequency and voltage at room temperature, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 30, 6853-6859.
110. Riande, E., Diaz-Calleja, R., (2004). *Electrical Properties of Polymers*, New York: Marcel Dekker.
111. El-Mallah, H.M., (2012). AC Electrical Conductivity and Dielectric Properties of Perovskite (Pb, Ca)TiO₃ Ceramic, *Acta Physica Polonica A*, 122, 174-179.
112. Dubey, A.K., Singh, P., Singh, S., Kumar, D., Parkash, O., (2011). Charge compensation, electrical and dielectric behavior of lanthanum doped CaCu₃Ti₄O₁₂, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 3899-3906.
113. Coşkun, R., Okutan, M., Öztürk, M., Yalçın, O., (2019). Experimental model to describe the dielectric response of different dye and nanoparticles doped hydrogels for biological cell membranes and biological systems, *Journal of Liquids*, 296, 112072.
114. Ishaq, S., Kanwal, F., Atiq, S., Moussa, M., Azhar, U., Gul, I., Losic, D., (2018). Dielectric and impedance spectroscopic studies of three phase graphene/titania/poly(vinyl alcohol) nanocomposite films, *Results Physics*, 11, 540-548.
115. Ertuğrul, R., Tataroğlu, A., (2012), Influence of Temperature and Frequency on Dielectric Permittivity and ac Conductivity of Au/SnO₂/n-Si (MOS) Structures, *China Physics Letters*, 29, 077304.
116. Chaube, H.A., Rana, V.A., (2014). Dielectric and Electrical Properties of Binary Mixtures of Anisole and 1-Heptanol in the Frequency Range 20 Hz to 2 MHz, *Solid State Phenomena*, 209, 182-185.
117. Subba Reddy, Ch.V., Han, X., Z., Q-Y, Mai, L-Q, Chen, W., (2006). Dielectric spectroscopy studies on (PVP + PVA) polyblend film, *Microelectronic Engineering*, 83, 281-285.
118. Molak, A., Paluch, M., Pawlus, S., Klimontko, J., Ujma, Z., Gruszka, I., (2005). Electric modulus approach to the analysis of electric relaxation in highly conducting (Na_{0.75}Bi_{0.25})(Mn_{0.25}Nb_{0.75})O₃ ceramics, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, 1450-1460.

119. El-Falaky, G.E., Guirguis, O.W., Abd El-Aal, N.S., (2012). A.C. conductivity and relaxation dynamics in zinc-borate glasses, *Progress in Natural Science: Materials International*, 22, 86-93.
120. Coskun, M., Polat, Ö., Coskun, F.M., Durmus, Z., Çağlar, M., Turut, A., (2018). The electrical modulus and other dielectric properties by the impedance spectroscopy of LaCrO_3 and $\text{LaCr}_{0.90}\text{Ir}_{0.10}\text{O}_3$ perovskites, *Royal Society of Chemistry Advances*, 8, 4634-4648.
121. Chauhan, G., Srivastava, R., Tyagi, P., Kumar, A., Srivastava, P.C., Kamalasanan, M.N., (2010). Frequency dependent electrical transport properties of 4,4',4''-tris(N-3-methylphenyl-N-phenylamine)triphenylamine by impedance spectroscopy, *Synthetic Metals*, 160, 1422-1426.
122. A. Mars, H. Essaidi, J. Ouerfelli, (2016). Effect of heat treatment under sulfur atmosphere on physical properties of pyrite (FeS_2) sprayed thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 688, 553-564.
123. Badapanda, T., Harichandan, R.K., Nayak, S.S., Mishra, A., Anwar, S., (2014). Frequency and temperature dependence behaviour of impedance, modulus and conductivity of $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ aurivillius ceramic, *Processing and Application of Ceramics*, 8, 145-153.
124. Sharma, S., Basu, T., Shahee, A., Singh, K., Lalla, N.P., Sampathkumaran, E.V., (2016). Complex dielectric and impedance behavior of magnetoelectric Fe_2TiO_5 , *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 289-294.
125. Ranjan Sahu, K., De, U., (2013). Dielectric Properties of PbNb_2O_6 up to 700°C from Impedance Spectroscopy, *Journal of Materials*, 2013, 702946.
126. Bowen, C.R., Dent, A.C.E., Almond, D.P., Comyn, T.P., (2008). Modelling Power Law Dependencies of Frequency Dependent AC Conductivity and Permittivity of Conductor-Relaxor Composites, *Ferroelectrics*, 370, 166-175.
127. Koltunowicz, T.N., (2015). Inductive type properties of FeCoZr-CaF_2 and FeCoZr-PZT nanocomposites, *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 26, 6450-6457.
128. Badali, Y., Koçyiğit, S., Altındal, Ş., İ. Uslu, (2019). Dielectric properties of $\text{Ag/Ru}_{0.03}\text{-PVA/n-Si}$ structures, *Bulletin of Materials Science*, 42, 225-230.



GAZİ GELECEKTİR...