



T.C.

**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE
ELEKTRİKSEL İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR
FREKANS VE SICAKLIK ARALIĞINDA İNCELENMESİ**

NALAN BARAZ

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. İBRAHİM YÜCEDAĞ**

DÜZCE, 2018

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Al/(ZnS- PVA)/p-Si (MPS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE
ELEKTRİKSEL İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR
FREKANS VE SICAKLIK ARALIĞINDA İNCELENMESİ

Nalan BARAZ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Perihan DURMUŞ

Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Muharrem GÖKÇEN

Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mert Yıldırım

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 05/01/2018

BEYAN

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

05 Ocak 2018

Nalan BARAZ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımından dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ'a en içten dileklerle teşekkür ederim. Tez izleme jürisinde olup bana Gazi Üniversitesindeki laboratuvarların bütün imkânlarını sunan ve tecrübesi ile yol gösterici olan çok değerli hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez izleme jürisinde olan Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Mustafa ERTAY'a katkıları için teşekkür ederim.

Bu çalışmada incelenen Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının hazırlanmasında bizden yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Yashar AZİZİAN KALANDARAGH hocama teşekkür ederim. Deneyler esnasında emeği geçen arkadaşlarım Gülçin ERSÖZ DEMİR ve Ahmet DEMİR'e, çalışma arkadaşım Sevinç UZ CINGILLIOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu çalışmada ve hayatımın her anında yardımlarını, desteklerini ve dualarını esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2016.07.02.511 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

5 Ocak 2018

Nalan BARAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	IX
RESİM LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER.....	XII
ÖZET.....	XIV
ABSTRACT.....	XIV
EXTENDED ABSTRACT.....	1
1. GİRİŞ.....	4
2. TEMEL KAVRAMLAR.....	8
2.1. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR.....	8
2.1.1. İdeal Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	8
2.1.2. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri.....	9
2.1.3. İdeal Metal-Yarıiletken Kontak için Schottky-Mott Teorisi.....	10
2.2. METAL-YALITKAN/POLİMER-YARIİLETKEN (MIS/MPS) YAPILAR.....	14
2.2.1. İdeal MIS/MPS Yapısında C-V ve G/ω-V Karakteristikleri.....	14
2.2.1.1. Birikim.....	18
2.2.1.2. Tüketim.....	18
2.2.1.3. Tersinim.....	20
2.2.2. MIS Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar.....	21
2.2.2.1. Hareketli İyonik Yükler.....	22
2.2.2.2. İyonlaşmış Tuzaklar.....	22
2.2.2.3. Sabit Yüzey Yükleri.....	22
2.2.2.4. Arayüzey Durumları.....	23
2.2.3. Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi.....	25

3. DİELEKTRİKLER.....	30
3.1. DİELEKTRİK MALZEMELERE DURGUN ELEKTRİK ALAN ETKİSİ	30
3.2. DİELEKTRİKSİZ VE DİELEKTRİKLİ KONDANSATÖR.....	31
3.3. DİELEKTRİK KUTUPLANMA.....	33
3.3.1. Kutuplanma Yükleri.....	35
3.3.2. Kutuplanma Mekanizmaları	38
3.3.2.1. <i>Elektronik Kutuplanma</i>	<i>39</i>
3.3.2.2. <i>İyonik Kutuplanma.....</i>	<i>40</i>
3.3.2.3. <i>Yönelimli Kutuplanma</i>	<i>41</i>
3.3.2.4. <i>Arayüzey-Uzay Yük Kutuplanması.....</i>	<i>41</i>
3.3.3. Dielektriklerde Elektrik Alan ve Dielektrik Kayıp	42
4. DENEYSEL YÖNTEM	45
4.1. POLİVİNİL ALKOLÜN (PVA) TEMEL ÖZELLİKLERİ	45
4.2. SOL-JEL YÖNTEMİ	46
4.3. OMİK VE DOĞRULTUCU KONTAĞIN OLUŞMASI.....	48
4.4. AL/(ZNS-PVA)/P-SI YAPISININ HAZIRLANMASI.....	50
4.5. DENEYSEL ÖLÇÜMLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZLARI	51
4.5.1. Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçüm Sistemi	51
4.5.2. Janis vpf-475 kriyostat ve Lake Shore Model 321 Sıcaklık Kontrol Sistemi	52
4.6. AL/(ZNS-PVA)/P-SI (MPS) YAPISININ DENEYSEL ÖLÇÜMÜ	54
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	55
5.1. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON	55
5.1.1. Frekansa Bağlı Elektriksel Karakterizasyon	55
5.1.2. Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyon.....	60
5.2. DİELEKTRİK KARAKTERİZASYON	63
5.2.1. Frekansa Bağlı Dielektrik Karakterizasyon.....	63
5.2.2. Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Karakterizasyon.....	68
6. SONUÇ	78
7. KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. a) Metal ile n-tipi yarıiletken sıkı kontak edilmeden önceki enerji bant diyagramı b) Sıkı kontak edildikten sonra ki dengeye ulaşmış halinin enerji bant diyagramı.....	10
Şekil 2.2. a) Doğru ön gerilimleme altında metal-n-tipi yarıiletkenin Schottky kontak b) Ters ön gerilimleme altında metal-n-tipi yarıiletkenin Schottky kontak.....	13
Şekil 2.3. Bir MIS/MPS yapının şematik gösterimi.	14
Şekil 2.4. a) n-tipi yarıiletken b) p-tipi yarıiletken için ideal MIS/MPS yapının enerji bant diyagramı.....	15
Şekil 2.5. Bir MIS/ MPS yapının eşdeğer devresi.	16
Şekil 2.6. İdeal MIS/MPS yapısının üç değişik davranıştaki eşdeğer devresi: a) Birikim b) Tüketim, c) Tersinim.	17
Şekil 2.7. İdeal MIS/MPS yapının enerji-bant durumu: a) Birikim b) Tüketim c) Tersinim.	19
Şekil 2.8. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	21
Şekil 2.9. MIS/MPS yapıları için elektronik eşdeğer devresi a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.....	24
Şekil 2.10. MIS/MPS yapılarda arayüzey durumların ve seri direnç etkilerini içeren eşdeğer devre.....	26
Şekil 2.11. MIS/MPS yapının eşdeğer devresi.	28
Şekil 3.1. Elektrik alan uygulanmayan ve elektrik alan uygulandığı durumdaki çekirdek ve elektron bulutu dağılımlarının şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.2. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.	31
Şekil 3.3. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.	32
Şekil 3.4. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri.....	35
Şekil 3.5. Dielektrik malzeme üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu ve elektrik alanların şematik gösterimi.	36
Şekil 3.6. Harici bir elektrik alan uygulandığı zamanki ve uygulanmadığı zamanki kutuplanma mekanizmaları.	39
Şekil 3.7. Dielektrikli kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akım (I_R) arasındaki ilişki.....	44
Şekil 4.1. Vinil alkolün kimyasal yapısı.	45
Şekil 4.2. Polivinil alkolün kimyasal yapısı.	46
Şekil 4.3. Sol-jel kaplama tekniği ile elde edilen malzeme türleri.	47
Şekil 4.4. Hidroliz reaksiyonu.	47
Şekil 4.5. Yoğunlaştırma reaksiyonu.....	48
Şekil 4.6. Polimerizasyon reaksiyonu.....	48
Şekil 4.7. Omik ve doğrultucu kontak yapımında kullanılan vakum buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.8. a) Omik kontak ve b) doğrultucu kontakların oluşturulmasında kullanılan bakır maskeler.	49

Şekil 4.9. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının şematik gösterimi.....	51
Şekil 4.10. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısı için kullanılan deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi.	54
Şekil 5.1. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 300 K'de ve farklı frekanslarda a) Kapasite-Voltaj (C-V) b) İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) eğrileri.	56
Şekil 5.2. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 300 K'de ve farklı frekanslarda R _s -V eğrisi..	58
Şekil 5.3. Oda sıcaklığında Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için Hill-Coleman yönteminden elde edilen N _{ss} 'in enerji dağılımı profili.....	59
Şekil 5.4. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 500 kHz'de ve farklı sıcaklıklarda a) Kapasite-Voltaj (C-V) b) İletkenlik-Voltaj (G/ω-V) eğrileri.....	61
Şekil 5.5. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 500 kHz'de ve farklı sıcaklık değerlerinde R _s -V eğrisi	63
Şekil 5.6. (devam) Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda a) dielektrik sabiti (ε') ve b) dielektrik kayıp (ε'') voltaja bağlı eğrileri.	65
Şekil 5.7. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığındaki kayıp açısı (tanδ)'nin farklı frekanslarda voltaja bağlı eğrileri.	65
Şekil 5.8. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda a) elektrik modülün gerçek kısmı (M') ve b) elektrik modülün sanal kısmı (M'')'nin voltaja bağlı eğrileri.	66
Şekil 5.9. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliğinin (σ _{ac})'nin farklı frekanslarda voltaja bağlı eğrileri	68
Şekil 5.10. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının a) sıcaklığa b) voltaja bağlı ε' eğrileri.	69
Şekil 5.11. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının a) sıcaklığa b) voltaja bağlı ε'' eğrileri.	70
Şekil 5.12. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için tanδ'nin a) sıcaklık b) gerilime bağlı eğrileri.	72
Şekil 5.13. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için M' 'nün a) sıcaklık b) gerilime bağlı eğrileri.	73
Şekil 5.14. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için M'''nün a) sıcaklık b) gerilime bağlı eğrileri.	74
Şekil 5.15. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının elektriksel iletkenliğinin (σ _{ac}) 500kHz'de çeşitli sıcaklıklarda (140K-340K) voltaja bağlı eğrileri.....	75
Şekil 5.16. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için ac elektriksel iletkenliğin Arrhenius çizimi.	76

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontakların oluşumu.....	10
Çizelge 5.1. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda bileşik sabiti (σ_0) ve aktivasyon enerjisinin (E_a) farklı voltajlardaki değerleri.	77



RESİM LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Resim 4.1. HP 4192A LF Empedans analizörü.	52
Resim 4.2. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi, Janis vpf-475 kriyostat.	53

KISALTMALAR

ac	Alternatif Akım
C-V	Kapasitans-Gerilim
dc	Doğru Akım
G/ω -V	İletkenlik-Gerilim
LED	Işık Yayan Diyot
MESFET	Metal-Yarıiletken Alan Etkili Transistör
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MS	Metal-Yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken
p-Si	p-tipi Silisyum
PVA	Polivinil Alkol
SBD	Schottky Engel Diyot
TE	Termiyonik Emisyon Teorisi

SİMGELER

A	Alan
A_{ox}	Yalıtkan tabakanın alanı
Å	Angström
Al	Alüminyum
°C	Sıcaklık birimi santigrat
C	Kapasitans
C_o	Dielektriksiz yapının kapasitansı
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans
C_c	Düzeltilmiş kapasitans
C_{sc}	Uzay yükü kapasitans
eV	Elektronvolt
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_a	Aktivasyon enerjisi
F	Kapasitans birimi Farad
G	İletkenlik
G_m	Ölçülen iletkenlik değeri
G_c	Düzeltilmiş iletkenlik değeri
Hz	Frekans birimi Hertz
I_F	Ters ön gerilimleme altında akım
I_R	Doğru ön gerilimleme altında akım
k	Boltzman sabiti
K	Kelvin cinsinden sıcaklık birimi
M'	Elektrik modülünün reel kısmı
M''	Elektrik modülünün sanal kısmı
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Kısa devre direnci
Si	Silisyum
T	Kelvin cinsinden sıcaklık
$\tan\delta$	Kayıp açısı
V	Yapı üzerine düşen gerilim
V_F	Doğru Beslem gerilimi
V_R	Ters Beslem Gerilimi
ZnS	Çinko Sülfür
Φ_B	Schottky engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır besleme engel yüksekliği
ϵ_i	Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti

ϵ_0	Serbest uzayın dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabitinin reel kısmı
ϵ''	Dielektrik sabitinin sanal kısmı
σ_{ac}	ac iletkenlik
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu



ÖZET

Al/(PVA-ZnS)/p-Si (MPS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL İLE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN GENİŞ BİR FREKANS VE SICAKLIK ARALIĞINDA İNCELENMESİ

Nalan BARAZ

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ

Ocak 2018, 87 sayfa

Bu çalışmada Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapılar hazırlandı ve bu yapıların hem temel elektrik hem de temel dielektrik parametreleri geniş bir sıcaklık (140-340 K) ve frekans (10 kHz-5 MHz) aralığında detaylıca incelendi. Bu temel parametrelerin hesaplanmasında, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçüm verileri kullanıldı. Elde edilen deneysel sonuçlar, bu parametrelerin sıcaklık, frekans ve voltaja oldukça bağlı olduğunu gösterdi. Hem C hem de G/ω değerlerinin artan sıcaklıkla artarken, artan frekansla azaldığı gözlemlendi. Bu parametrelerdeki değişim özellikle (ZnS-PVA)/p-Si arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarının (N_{ss}) yoğunluğuna ve onların yaşama ömrüne (τ), polarizasyona, arayüzey polimer tabakasının ve yapının seri direncine (R_s) atfedildi. Ancak N_{ss} değerleri ve polarizasyon özellikle tüketim bölgesinde baskınken R_s ile arayüzey tabakanın birikim bölgesinde baskın olduğu görüldü. Sıcaklığa bağlı olarak alınan C/G-V ölçüm değerleri R_s değerinin azalan sıcaklıkla arttığını ortaya koymuştur. Hem N_{ss} hem de R_s değerlerinin voltaja bağlı değişim profilleri, sırasıyla Hill-Colleman ve Nicollian-Brews metotları kullanılarak elde edildi ve her iki parametrelerin de artan frekans ve sıcaklıkla azaldığı gözlemlendi. Bu azalma; düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyalini rahatlıkla takip edebilmesi ve düşük sıcaklıklarda ise yeterince serbest elektrik yüklerinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları (ϵ' , ϵ''), elektrik modülün reel ve sanal kısımları (M' , M''), kayıp açısı ($\tan\delta$) ve elektrik iletkenlik (σ) değerleri benzer şekilde C ve G/ω değerleri kullanılarak hem frekans hem de sıcaklığa bağlı olarak detaylıca incelendi. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri artan frekans ile azalırken artan sıcaklıkla arttığı, M' , M'' ve σ_{ac} değerlerinin ise bu durumlarda azaldığı görüldü. Bu durum; dışardan uygulanan dc gerilim, frekans ve sıcaklık etkileri altında arayüzey yüklerin yeniden yapılanıp-düzenlenmesine atfedildi. Elde edilen dielektrik sabitinin 10 kHz'de bile 1'den büyük çıkması, Al ile p-Si arayüzeyinde büyütülen (ZnS-PVA) polimer arayüzey tabakanın geleneksel yalıtkan SiO_2 yerine başarı ile kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapılar, Arayüzey durumları ve polarizasyon etkileri, Elektrik ve dielektrik özelliklerin frekans ve sıcaklıkla değişimi.



ABSTRACT

THE FABRICATION OF Al/(PVA-ZnS)/p-Si (MPS) STRUCTURES AND INVESTIGATING THEIR ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES IN A WIDE RANGE OF FREQUENCY AND TEMPERATURE

Nalan BARAZ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electric-Electronic and Computer Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ

January 2018, 87 pages

In this study, Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) structures were prepared and main electrical and dielectric parameters of these structures were examined in detail in a wide temperature (140-340 K) and frequency (10 kHz-5 MHz) range. Capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ω -V) measurements were used to calculate the main electrical and dielectric parameters. Experimental results confirmed that these parameters are strongly dependent on temperature, frequency and voltage. Both C and G/ω increase with increasing temperature but decrease with increasing frequency. The change in these parameters was mainly attributed to the density of the interface states (N_{ss}) localized in the (ZnS-PVA)/p-Si interface and their lifetime (τ), polarization, interfacial polymer layer and structure resistance (R_s). However, it was seen that the N_{ss} values and polarization are predominant in the interface layer accumulation region, especially with R_s being dominant in the depletion region. Measurements taken depending on the temperature showed that C/G-V values increased only with decreasing temperature of R_s . Voltage-dependent profiles of N_{ss} and R_s were obtained using the Hill-Coleman and Nicollian-Brews methods, respectively, and both parameters decrease with increasing frequency and temperature. This decrease is due to the fact that interface conditions can easily follow the ac signal at low frequencies and there are not enough electric charges at low temperatures. The real and imaginary parts (ϵ' , ϵ'') of the complex dielectric constant, the real and imaginary parts (M' , M'') of electric modulus, the loss tangent ($\tan\delta$) and the electrical conductivity (σ) values of the structure are similarly calculated using C and G/ω depending on both frequency and temperature. ϵ' , ϵ'' and $\tan\delta$ values increased with decreasing frequency and increasing temperature whereas M' , M'' and σ_{ac} decreased with increasing on both frequency and temperature. This situation was attributed to the restructuring-reordering of the interface states under the effects of externally applied dc voltage, frequency and temperature. The resulting dielectric constant of greater than 1 at 10 kHz indicates that the (ZnS-PVA) polymer interface layer grown at Al interface with p-Si interface can successfully replace the classical insulating SiO_2 layer.

Keywords: Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) constructions, Change of electrical and dielectric properties with frequency and temperature, Interfacial states and polarization effects.



EXTENDED ABSTRACT

THE FABRICATION OF Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) STRUCTURES AND INVESTIGATING THEIR ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES IN A WIDE RANGE OF FREQUENCY AND TEMPERATURE

Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electric-Electronic
and Computer Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim YÜCEDAĞ

January 2018, 87 pages

1. INTRODUCTION

In recent years electronic and opto-electronic applications have begun to use non-doped or doped polymers, especially because they are both easy to prepare and cheap and flexible, replacing insulator interface plates such as SiO₂ and SnO₂ traditionally used between metal and semiconductor. However, as polymers or organics exhibit low-conductivity, conductivity is increased by doping metals or other materials at appropriate proportions. The aim here is to store more charge or energy in the structure by producing a polymer with high dielectric constant. Recent studies have also shown that particularly high dielectric materials grown between metal and semiconductors improve the performance of prepared electronic devices by reducing interface states and series resistance. For this purpose, in this study, it was aimed to passivate many unwanted surface states by adding ZnS into PVA.

2. MATERIAL AND METHODS

In this study, firstly B-doped (p-Si) wafer with (100) orientation, ~300 µm thickness and 1-10 Ω cm resistivity was cleaned in the various chemical solution and then dried with

dry nitrogen gas (N_2). Secondly, p-Si wafer was transferred into the deposition chamber than the high purity (99.999 %) of Al with a thickness of ~ 1500 Å was thermally evaporated from the tungsten filament onto the whole back side of the p-Si wafer at about 10^{-6} Torr in an oil high vacuum metal evaporation system. In order to get a good or low resistivity ohmic contact, the p-Si wafer was annealed at 500 °C. Immediately, the prepared ZnS-doped polyvinyl alcohol (PVA) solution was grown on the upper surface p-Si by using sol-gel method. Finally, the high purity Al dots with 1 mm diameter or area ($=7.85 \times 10^{-3}$ cm²) and ~ 1500 Å thickness were deposited on the front of ZnS-doped nanocomposite PVA in the same high vacuum system. In this way, the fabrication of Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) type structures was completed.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The capacitance/conductance-voltage (C/G-V) measurements of the fabricated Al/(ZnS-PVA)/p-Si structures were performed in a wide range of frequency (10 kHz-5 MHz), temperature (140-340 K) and voltage (± 4 V). Experimental results confirmed that electric and dielectric parameters are strong functions of frequency and voltage and they are especially influenced from series resistance (R_s), surface states (N_{ss}) and polarization processes. The voltage dependent R_s and N_{ss} versus V plots are obtained from the Nicollian & Brews and Hill-Coleman method, respectively, and it was found that they decrease with increasing frequency almost exponentially. The values of ϵ' , ϵ'' , M' , M'' , loss tangent ($\tan\delta$) and σ_{ac} were also obtained using C and G/ ω data as function of applied bias voltage and they also showed dependence on frequency and temperature. The change in the ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$, M' , M'' and σ_{ac} is a result of restructuring and reordering of charges at the (ZnS-PVA)/p-Si interface under an external electric field or voltage and interface polarization.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

The frequency, temperature and voltage dependence electrical and dielectric properties of the fabricated Al/(ZnS-PVA)/p-Si structures have been investigated in detail by using the C/G-V-f measurements. These measurements were carried out in the frequency and voltage ranges of 10 kHz-5 MHz and (± 4 V) by 50 mV steps, respectively. The main

electric and dielectric parameters of this structure were clearly found a strong function of frequency and voltage and they are especially influenced from the existence of R_s , N_{ss} and polarization processes. The voltage dependent values of R_s and N_{ss} were obtained using the Nicollian & Brews and Hill-Coleman methods, respectively, and they decrease with increasing frequency almost as exponentially. In addition, the values of real and imaginary part of the dielectric constants (ϵ' and ϵ'') and electric modulus (M' and M''), loss tangent ($\tan\delta$), and ac electrical conductivity (σ_{ac}) were obtained using C and G/ω data as function of applied bias voltage and it was found that they are strong functions of frequency. The change in these parameters become more effective at low frequencies and especially in the depletion and accumulation regions. While the values of ϵ' , ϵ'' , and $\tan\delta$ increase with increasing frequency, M' and σ_{ac} decrease. Moreover, ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$ and σ_{ac} increase with applied bias voltage, whereas M' decreases with increasing applied bias voltage. The observed peak in the M'' - V plot in the accumulation regions was attributed a special distribution of N_{ss} at (ZnS-PVA)/p-Si interface. Briefly, compared with the literature, the dielectric values of Al/(ZnS-PVA)/p-Si structures with PVA interfacial layer are very higher compared to those of other structures with pure PVA and/or PVA with other dopants/mixtures. The results indicate that the Al/(ZnS-PVA)/p-Si structures can be used as an efficient alternative for applications instead of traditional MIS or MOS type structures.

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler teknolojik aygıtların temelini oluşturmaktadır. Günümüzde nanometre boyutlarına kadar uzanan küçüklükte üretilen elektronik cihazlarda yarıiletken teknolojisi kullanılmaktadır. İlk kullanılan pratik yarıiletken devre elemanlarından birisi metal/yarıiletken (MS) yapılar ve bu konudaki detaylı çalışmalarından dolayı W. Schottky'ye atfedilen Schottky diyotlardır [1]. MS yapıların arayüzey özelliklerinin bilinmesi, devre elemanlarının üretiminde oldukça önemlidir ve teknolojideki yaygın kullanım alanları nedeni ile araştırma konusu olarak son zamanların ilgi odağı olmuştur [2]–[5]. MS doğrultucularla ilgili ilk sistemli araştırma, 1874 yılında Braun'un bakır ve demir sülfat gibi metal kontaklarla yarıiletken arasındaki elektriksel iletkenliğin antisimetrik yapısını bulmasına dayanır [6]. O dönemlerde doğrultma mekanizması bilinmemesine rağmen bu şekilde elde edilen kontaklar dedektör gibi birçok farklı cihazlarda kullanılmıştır. 1906 yılında Pickard silisyumu kullanarak nokta kontak dedektörler için bir patent geliştirmiştir [7]. 1930 yılında Schottky ve Spence, enerji engelinden taşıyıcıların difüzyonu üzerine kurulmuş doğrultma teorisini geliştirmiştir [8]. 1932 yılında Wilson, metal-yarıiletken diyotlar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirmiş ve doğrultma için ters polariteyi açıklamaya çalışmıştır [9]. 1940'lı yıllarda Bethe, Schottky diyot çalışmalarına termiyonik emisyon teorisi (TE) ile önemli bir katkı sağladı ve Schottky difüzyon teorisini geliştirdi [10]. Daha sonraları Crowell ve Sze bu iki teoriyi birleştirerek ideal Schottky diyotlarda akım iletim mekanizmasını termiyonik difüzyon emisyon teorisi olarak sundular [11]. 1947'de Bardeen, kovalent yarıiletkenlerin yüzeyinde Fermi seviyesi üzerinde yer alan yüzey hallerinin varlığını ifade etti ve bu nedenle engel yüksekliğinin sabitleştiği fikrini ortaya attı [9], [12], [13]. Bu durum, birçok pratik uygulamada doğrultucuların engel yüksekliğinin, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonu farklarından tam olarak tayin edilemeyeceğini göstermektedir. 1960'lı yıllar metal-yarıiletken kontaklar üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapıldı. Bu yıllarda düzlemsel Schottky diyotlarının yapımı birkaç önemli uygulamaya sebep oldu. 1964'de Biard, Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek, Schottky engel kapılı metal-yarıiletken alan etkili transistör (MESFET) yapmayı başardı [14].

Schottky kontaklar, eklem alanı üzerinde daha düzgün kontak potansiyeli ve akım dağılımı elde etmek için yarıiletken yüzeyine belirli alanlarda metal buharlaştırılarak oluşturulan düzlemsel yapılardır [2]. Bu yapıların daha çok kullanılmasının sebebi düşük seri direnç, yüksek güç kapasitesi ve daha düşük sinyale (gürültü) sahip olmalarıdır. Ayrıca, MS yapılarda yeniden birleşim ve üretim olmayacağından akımda bir azalma meydana gelmez ve verim yüksek olmaktadır. Fakat bu yapılarında yüzey elemanı olduklarından, yüzey kirliliğine karşı duyarlı olmaları gibi dezavantajları da vardır. Ayrıca, MS yapılar yüksek sıcaklıklarda yapılan işlemlere karşı dayanıksızdır. Başka bir deyişle, yüksek sıcaklık, diyotun elektriksel özelliklerini azaltabilir [15]–[18]. Orta sıcaklıklarda tavlama işlemi, omik kontakın direncini azaltırken MS yapıların doğrultma özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle dış etkenlere karşı yapının dayanıklılığını ve buna bağlı elektriksel iletkenliğini artırmak ve genel performansını iyileştirmek için MS yapılara çeşitli ara yüzeyler eklenerek metal-oksit-yarıiletken (MOS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ya da metal-polimer-yarıiletken (MPS) gibi yapılar elde edilmektedir [2]–[4], [19]–[24].

Son zamanlarda elektronik ve opto-elektronik uygulamalarda metal ile yarıiletken arasına geleneksel olarak kullanılan SiO_2 ve SnO_2 gibi yalıtkan arayüzey tabakları yerine özellikle hem yapımı kolay ve ucuz hem de esnek olmaları nedeniyle katkısız veya katkılı polimerler kullanılmaya başlanmıştır. Ancak polimerler düşük iletkenlikli oldukları için uygun oranlarda metal veya diğer malzemeler katkılanarak iletkenliği artırılmıştır. Burada amaç daha yüksek dielektrik sabitli bir polimer üreterek yapıda daha fazla yük veya enerji depolamaktır. Ayrıca son zamanlarda yapılan çalışmalar, metal ile yarıiletkenler arasına büyütülen özellikle yüksek dielektrikli malzemelerin hazırlanan elektronik aygıtların performansını arayüzey durumlarını ve seri direnci azaltmak suretiyle iyileştirdiği gözlenmiştir. Bu amaçla bu çalışmada da PVA içerisine ZnS katkılanarak birçok istenmeyen yüzey durumunun pasifize edilmesi amaçlanmıştır [19], [23], [25], [26].

Elektronik cihazların büyük çoğunluğunda kullanılan ve başlıca devre elemanlarından biri olan MS yapılar aynı zamanda güneş pilleri, alçak gerilim devreleri, karıştırıcı olarak mikrodalga alıcıları, hızlı anahtarlama (switching) sensörleri, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler), gibi farklı alanlarda karşımıza çıkmaktadır [21], [27]–[29].

Günümüzde ilgi çekici elektronik ve opto-elektronik uygulamalardan birisi de organik yarıiletkenlere dayalı aygıtlardır. Bu malzeme grubu organik iletken polimerlerin (elektronik aygıtlarda aktif bileşen olarak rol oynayan) keşfi ile birlikte büyük önem kazanmıştır. Son yıllarda, polimerik malzemeler geniş akademik çalışmaların sonucunda hem akademik çalışmalar hem de endüstriyel araştırma alanlarında dikkatleri üzerine çekmiştir. Organik iletken polimer malzemeler; esnek olmaları, özel uygulamalara göre malzemelerin özelliklerinin istenildiği gibi ayarlanabilmesi, ucuz teknoloji ile üretilebilmeleri sayesinde düşük maliyetli olmaları, kolay üretim süreçlerine sahip olmaları, üretim süreçlerinin çevreye zarar vermemesi gibi önemli özelliklerinden dolayı elektronik ve opto-elektronik cihaz üretiminde geniş kullanım alanlarına sahiptirler [30]–[32]. Bu malzemeler ışık yayan diyot (LED), ışık yayan organik diyot (organik ince film tabakalı LED (OLED)), Schottky engel diyot (SBD), güneş pili vb. aygıtların üretiminde elektriksel, optik ve dielektrik özelliklerinin yeterliliği nedeniyle kullanılmaktadır [23].

Genellikle organik / polimerik malzemeler MS yapıda ara yüzey tabakası olarak kullanılırlar. Optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı Schottky diyotlarının çalışma alanında çok uygundur. MPS yapıların elektriksel karakteristiklerinin davranışları MIS ya da MOS tipi yapıların çalışma prensiplerine benzer özellikler göstermektedir. Bu malzemeler belirli kapasitans ve iletkenliğe sahiptir. Aygıt üretim sürecinde polianilin (PANI), polivinil alkol (PVA), polipirol (PPy), polivinil klorür (PVC) ve politiyofen vb. [31], [33]–[35] gibi polimerik malzemeler kullanılabilir. Bu polimer malzemeler cihaz üretim teknolojisi bakımından incelendiğinde PVA'nın niteliklerinin birçok avantaja sahip olduğu görülebilir. PVA, çevreci kararlılık, düşük maliyetli malzemelerle elde edilme, basit imalat teknikleri ve cihaz uygulamaları için uygun kimyasal özellikler gibi birçok özellik ile tercih edilir olmuştur [11], [14]. PVA'nın iletkenliği normalde zayıftır fakat PVA'daki bu iletkenlik, hidroksil grupları ve Ni, Zn, Bi ve Co gibi katkı metalleri arasındaki hidrojen bağlanması yoluyla polimer zincirleri arasındaki yüksek fiziksel etkileşimlere bağlı olarak ortaya çıkar [33].

MS, MIS veya MPS gibi yapıların hazırlanmasında metal olarak genellikle altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metaller yüksek saflıkta kullanılırken yarıiletken olarak, daha ucuz ve kararlı olmasından dolayı genelde silisyum (Si) tercih edilir. Bu yapıların hazırlanma aşamasında dikkat edilecek husus metalin iş fonksiyonudur.

Doğrultucu kontak yapılırken kullanılan yarıiletkenin n-tipi ya da p-tipi olmasına bakılarak uygun iş fonksiyonuna sahip metal seçilmelidir. Bu yapılarda performansı artırmak ve ara yüzey yük geçişlerini düzenlemek için metal ile yarıiletken arasına konulacak tabaka seçimi çok önemlidir. Bu arayüzey tabakalarını seçerken yüzeyi pasifize edecek, sızıntı akımını en aza indirecek, kontrol edilebilir akım-iletim mekanizması gerçekleştirecek ve doğrultucu özelliğe yaklaşacak yüksek dielektrik sabitli malzemelerin seçimine dikkat edilir [37].

Bu çalışmada Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının üretim aşamaları gerçekleştirildi ve bu yapının hem temel elektrik hem de temel dielektrik parametreleri geniş bir sıcaklık (140-340 K) ve frekans (10 kHz-5 MHz) aralığında detaylıca incelendi. Bu temel parametrelerin hesaplanmasında, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri kullanıldı. Elde edilen deneysel sonuçlar, bu parametrelerin sıcaklık, frekans ve voltaja oldukça bağlı olduğunu gösterdi. Hem C hem de G/w değerlerinin artan sıcaklıkla artarken, frekans ile azaldığı gözlemlendi. Bu parametrelerdeki değişim özellikle (ZnS-PVA)/p-Si arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumların (N_{ss}) yoğunluğuna ve onların yaşama ömrüne (τ), polarizasyona, arayüzey polimer tabakasının ve yapının seri direncine (R_s) atfedildi. Ancak N_{ss} değerleri ve polarizasyon özellikle tüketim bölgesinde baskınken R_s ile arayüzey tabakanın birikim bölgesinde baskın olduğu görüldü. Sıcaklığa bağlı olarak alınan C/G-V ölçüm değerleri R_s değerinin azalan sıcaklıkla arttığını ortaya koymuştur. Hem N_{ss} hem de R_s değerlerinin voltaja bağlı değerleri, sırasıyla Hill-Coleman ve Nicollian-Brews metotları kullanılarak elde edildi ve her iki parametrenin de artan frekans ve sıcaklıkla azaldığı gözlemlendi. Bu azalma; düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyalini rahatlıkla takip edebilmesi ve düşük sıcaklıklarda ise yeterince elektrik yüklerinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Hem kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları (ϵ' , ϵ'') hem de elektrik modülün (M' , M''), kayıp açısı ($\tan\delta$) ve elektrik iletkenlik (σ) değerleri benzer şekilde C ve G/ω değerleri kullanılarak hem frekans hem de sıcaklığa bağlı olarak detaylıca incelendi. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri artan frekans ve sıcaklıkla artarken, M' , M'' ve σ_{ac} değerlerinin azaldığı görüldü. Bu durum; dışardan uygulanan dc gerilim, frekans ve sıcaklık etkileri altında arayüzey yüklerin yeniden yapılanıp-düzenlenmesine atfedildi. Elde edilen dielektrik sabitinin 10 kHz de bile 1'den büyük çıkması, Al ile p-Si arayüzeyinde büyütülen (ZnS-PVA) polimer arayüzey tabakanın klasik yalıtkan SiO_2 yerine başarı ile kullanabileceğini göstermektedir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

2.1.1. İdeal Metal-Yarıiletken Kontaklar

Kontak iki yüzeyin birbiri ile en az dirence sahip olacağı şekilde temas ettirilmesi şeklinde düşünülebilir. İdeal kontak bu direncin sıfır olma durumudur. Kontak maddelerinin yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olmaları kontakın idealliği ile doğrudan ilişkilidir. Schottky diyotların karakteristiklerinin anlaşılması ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılması için kristale uygun kontakların uygulanması gerekir. Bir yarıiletkenin metal malzeme arasındaki kontakta yarı iletken ile metal arasında yük geçişi olur. Bu yük geçişi metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder.

İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren dolu olan en yüksek enerji seviyesi Fermi enerji seviyesi (E_F) olarak adlandırılır. Saf yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi iletim bandı ile valans bandının tam ortasından itibaren ölçülürken n-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi iletim bandından itibaren, p tipinde ise valans bandından itibaren ölçülür.

Bir metal bir yarıiletken ile sıkı kontak edildikten sonra metal/yarıiletken arayüzeyinde yük geçişi sebebi ile bir potansiyel engel yüksekliği meydana gelir. Bu potansiyel engel yüksekliği elektrik alan içinde yüklü parçacıklar elektrostatik potansiyellerine göre hareket etmeleri sebebi ile oluşmuş olur. Bir çekim alanındaki kütleli parçacıklar sistemin kütle merkezine doğru hareket ederler. Bir konsantrasyon gradyentinde bulunan parçacıklar yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru difüzyonla hareket ederler. Bu durumlarda baskın olan kimyasal potansiyel sırasıyla sistemin elektriksel, gravitasyonel ve entropi enerjilerinden kaynaklanır. Toplam kimyasal potansiyele enerjinin veya entropinin bir şekli olarak bakılabilir. Bir parçacığın kimyasal potansiyeli bilinirse, parçacığın hareketi kolayca tasvir edilebilir.

Herhangi iki sistemin etkileşmesine izin verildiği zaman, daima sistemlerin kimyasal

potansiyellerini eşitleyecek şekilde bu iki sistemde madde veya enerji değiş tokuşu olacaktır. Gerçekte denge iki sistem arasında kimyasal potansiyellerin eşit olduğu durum olarak tanımlanır. Bir katıdaki Fermi enerjisi, en düşük enerjili serbest elektronun veya en yüksek enerjili serbest holün kimyasal potansiyelinin bir ölçüsünü verir [38]–[40].

2.1.2. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri

Metal yarıiletken kontaklar doğrultucu ve omik olmak üzere iki türdedir. Metal ve yarıiletken kontağının omik ya da doğrultucu olmasını metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ile yarı iletkenin p ya da n tipi olması belirler.

İş fonksiyonu bir elektronun Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkması veya serbest hale gelmesi için gerekli olan minimum enerji miktarıdır.

ϕ_m metalin iş fonksiyonu, ϕ_s de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\phi_m > \phi_s$ durumunda doğrultucu kontak oluşur. Doğrultucu kontakta temas bölgesinde bir potansiyel engel yüksekliği oluşur ve bu potansiyel engeli yapıya uygulanan gerilimin kutuplarına bağlı olarak akımın tek yönlü geçmesini sağlar. Metal-yarıiletken kontakta iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (holler ve elektronlar) metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale doğru daha kolay iletiliyorsa bu tür davranışa doğrultma denir. Doğrultma diyot performansını önemli ölçüde etkileyen bir faktördür ve doğrultma oranı diyotun tam ilettime geçtiği voltaj değerinde doğru ön-gerilim altındaki akımın (I_F), ters ön-gerilim altındaki akıma (I_R) oranı ile belirlenir. İdeal diyotlarda doğrultma oranı (I_F / I_R) yaklaşık olarak 10^8 - 10^{10} civarındadır.

$\phi_s > \phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşur. Bir metal ile yarıiletkenin kontak haline getirilmesi durumunda taşıyıcıların bir maddeden diğerine her iki yönde kolayca geçebildiği kontaklar “omik kontak” olarak adlandırılır. Omik kontaktaki akım-gerilim ilişkisi ohm yasasına uygundur. Omik kontakta metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşmadığı için taşıyıcılar metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale kolaylıkla geçerler [28], [41], [42].

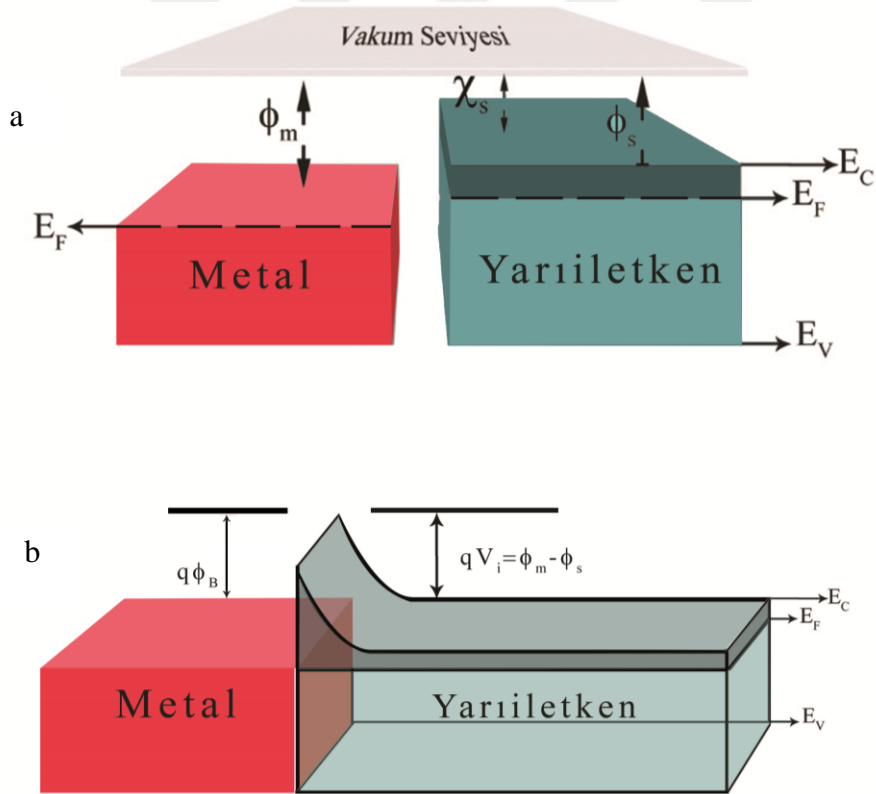
Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\phi_m > \phi_s$ durumunda omik kontak ve $\phi_s > \phi_m$ durumunda da doğrultucu kontak oluşur. Çizelge 2.1’de iş fonksiyonlarının omik ve doğrultucu kontak için nasıl değiştii açık şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaktların oluşumu.

	Omik kontak	Doğrultucu kontak
n-tipi yarıiletken	$\phi_s > \phi_m$	$\phi_m > \phi_s$
p-tipi yarıiletken	$\phi_m > \phi_s$	$\phi_s > \phi_m$

2.1.3. İdeal Metal-Yarıiletken Kontak için Schottky-Mott Teorisi

Metal-yarıiletken (MS) kontaklarda, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey bölgesinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky, eklemde oluşan bu potansiyelin, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ise Mott açıklamıştır. Schottky-Mott teorisine göre, metal-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engel yüksekliği oluşur [1], [9]. Bu bölge hareketli yüklerden arınmıştır ve yüksek dirence sahiptir.



Şekil 2.1. a) Metal ile n-tipi yarıiletken sıkı kontak edilmeden önceki enerji bant diyagramı b) Sıkı kontak edildikten sonraki dengeye ulaşılmış halinin enerji bant diyagramı.

Şekil 2.1’de iş fonksiyonu ϕ_m olan metal ile iş fonksiyonu ϕ_s olan n-tipi bir yarıiletkenin, $\phi_s < \phi_m$ durumundaki (doğrultucu kontak) Schottky-Mott teorisine göre engel oluşum süreci gösterilmektedir. Vakum seviyesi olarak, metalin dışında bir bölgede bulunan hareketsiz bir elektronun enerji seviyesi referans alınmıştır. Daha önce söz edildiği gibi metalin iş fonksiyonu bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine getirmek için gerekli olan enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu da buna benzerdir ancak yarıiletkenin Fermi seviyesi yarıiletkendeki katkı atomlarının (alıcı ve verici atomlar) yoğunluğuna göre değişkenlik göstermektedir. Bu durumda yarıiletkenin iş fonksiyonu da değişken bir parametre olmaktadır. Şekil 2.1 a’da birbiri ile temas etmeyen metal ve yarı iletkenin enerji bant diyagramı gösterilmektedir.

Elektron yakınlığı iletim bant kenarı (E_c) ve vakum seviyesi arasındaki enerji farkını temsil eder. χ_s ile gösterilen elektron yakınlığı yarıiletkende katkı atomları konsantrasyonundan bağımsız önemli bir niceliktir ve ϕ_m ve ϕ_s ile χ_s birimleri genellikle elektronvolt (eV) cinsinden verilir.

Yarıiletkenin iletkenlik bandında bulunan ya da uyarılmış olan elektronlar metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahiptir. Bu nedenle metal ile n-tipi yarıiletken arasındaki sıkı kontak durumunda, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar yarıiletkenden metale doğru elektron akışı gerçekleşmektedir. Bu akış nedeniyle, yarıiletkenin metal sınırındaki serbest elektron yoğunluğu azalacaktır ve azalan elektron konsantrasyonu sebebi ile yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kayacaktır. Bu kaymadan dolayı E_c ve E_F seviyeleri arasındaki enerji farkı artar ve metal yarıiletken kontak termal dengede durumuna ulaşınca E_F ’nin sabit kalmasından dolayı iletim bandı E_c Şekil 2.1 b’de görüldüğü gibi yukarı doğru bükülecektir [1], [3].

Yarıiletkenin vakum seviyesi ve yarıiletkenin elektron yakınlığı χ_s kontak ile değişmediğinden aynı şekilde yukarı doğru bükülürler. Yarıiletkenden metale geçen yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar arkalarında pozitif yüklü verici (donör) iyonları bırakırlar. Pozitif yüklü iyonlaşmış vericiler, yarıiletkende bir W_D kalınlığına kadar yayılırlar. Bu geçişler sonucunda; yarıiletkenin metale bakan ön yüzeyinde ince bir pozitif yük tabakası ve metalin yarıiletkene bakan yüzeyinde ise ince bir negatif yük tabakası oluşur. Metal sınırındaki yarıiletken bölgesi hareketli elektronlardan tükenmiş/arındırılmış olur ve böylece, ara yüzeyin yarıiletken kısmında bir pozitif yük bölgesi (pozitif uzay yük bölgesi) oluşur. Bu iki yük tabakasının toplam genişliği ise

tüketim tabakası olarak adlandırılır. Bu yük düzenlemeleri sonucunda, yarıiletken metaline doğru doğal bir elektrik alan oluşur [43]–[46].

Termal denge durumunda, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanmış olur ve bant bükülme miktarı (qV_i), metal ile yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir.

$$qV_i = \phi_m - \phi_s \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de qV_i yarıiletken metaline gidecek olan elektronun sahip olması gereken enerji yani yarıiletken tarafındaki engel yüksekliğidir. Potansiyel engelinin metal tarafındaki yüksekliği ise,

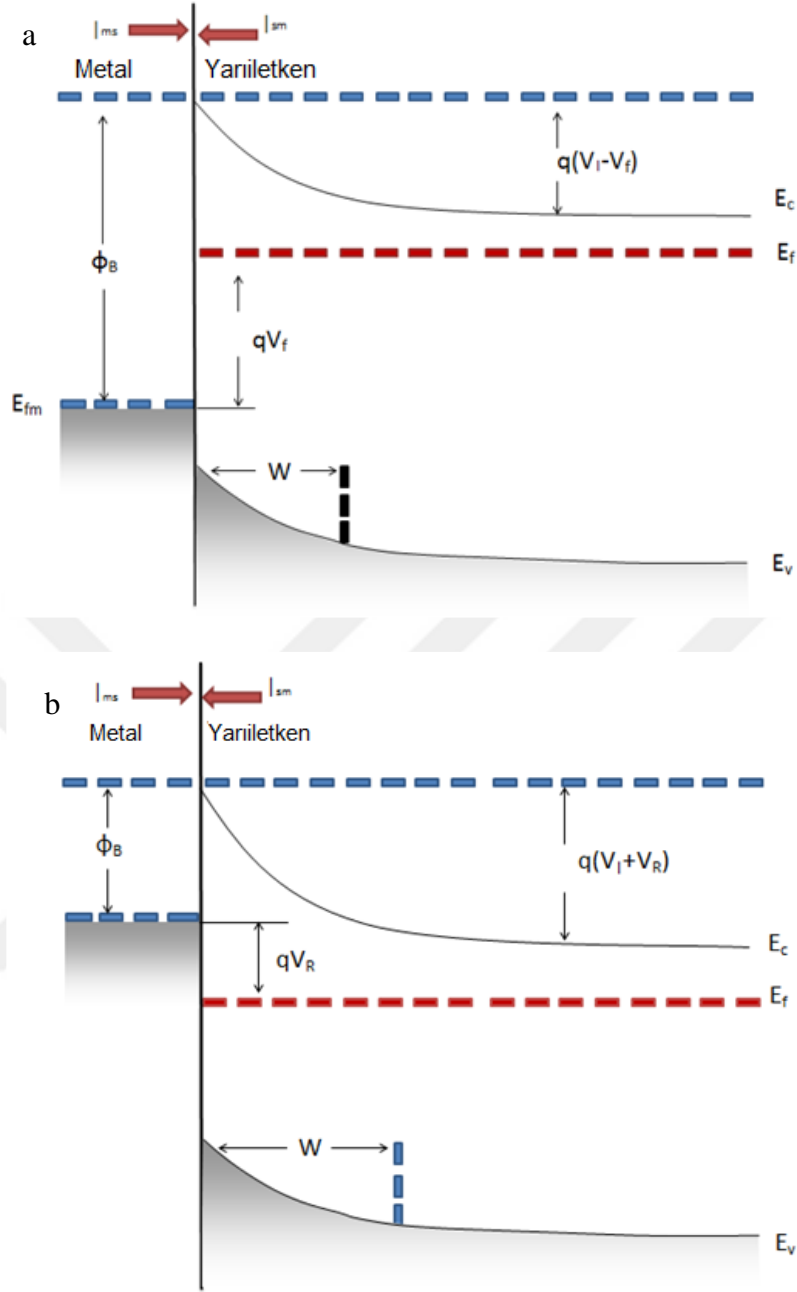
$$\phi_B = \phi_m - \chi_s \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir.

$$\phi_s = \phi_n + \chi_s \text{ ve } \phi_m = qV_i + \phi_s \text{ olduğundan}$$

$$\phi_B = qV_i + \phi_n \quad (2.3)$$

olur. Burada $\phi_n = E_c - E_f$ dir, ancak E_c referans olarak sıfır alınırsa $\phi_n = E_f$ olur. Bu konunun temellerini oluşturan Alman fizikçi W. Schottky'ye atfen, bu engel tabakası Schottky engeli olarak adlandırılmıştır. Denklem (2.1) hem Schottky hem de Mott tarafından verilmiştir [1], [2]. Termal uyarılma ile kazandıkları enerji sayesinde metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronlar potansiyel engelini aşabilecek büyüklüğe ulaştığında, karşılıklı engeli aşan elektronlar eşit ve zıt yönlerde I_0 sızıntı akımına sebebiyet verirler ve toplam akım sıfır olur. Devrede sürekli bir yük akışını sağlamak için metal yarıiletken kontağı doğru veya ters olarak ön-gerilimlemek gerekir.

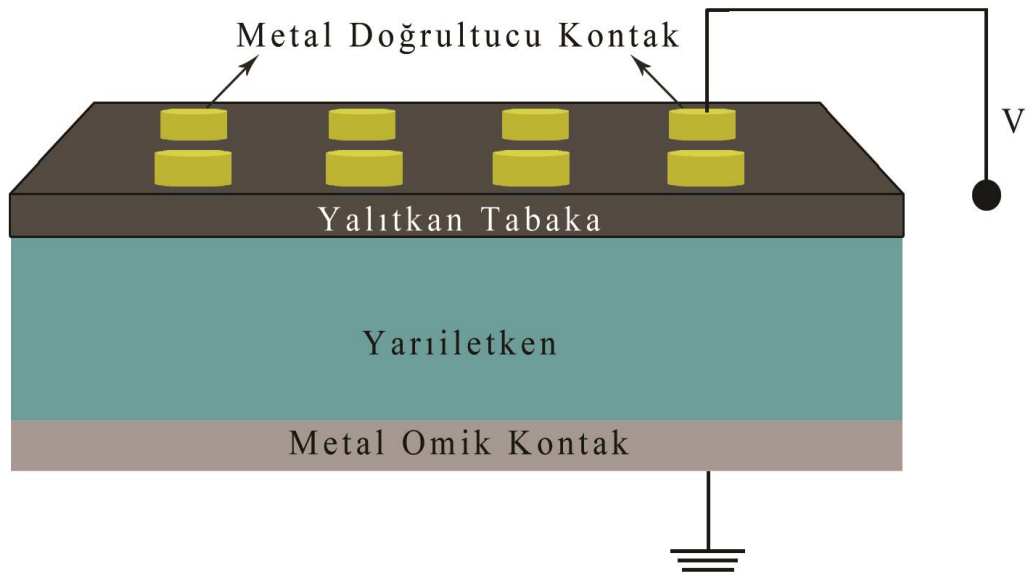


Şekil 2.2. a) Doğru ön gerilimleme altında metal-n-tipi yarıiletkenin Schottky kontak b) Ters ön gerilimleme altında metal-n-tipi yarıiletkenin Schottky kontak [43].

Yarıiletkene bir (-V) voltajı uygulanırsa metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel değişmez ve bundan dolayı yarıiletkenden metale karşılık gelen akım da değişmeyecektir. Fakat uygulanan gerilim yarıiletken tarafında, Şekil 2.2 a'da gösterildiği gibi, iletkenlik bandının eV kadar yükselmesine sebep olacaktır. Bunun neticesi olarak yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır.

2.2. METAL-YALITKAN/POLİMER-YARIİLETKEN (MIS/MPS) YAPILAR

MS yapı arasına konulan herhangi bir yarıiletken veya organik malzeme yapıyı MIS ya da MPS yapıya çevirir. Bazen kendiliğinden oluşan bazen kasıtlı yerleştirilen bu arayüzey tabaka hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Metal-yarıiletken yapılar hem arayüzey tabakaya hem de bir seri dirence sahip ise yapı üzerine uygulanan voltaj; bu arayüzey tabaka, yapının seri direnci ve diyot tarafından bölüşülecektir. Bu nedenle MIS/MPS yapılarda akım-iletimi MS yapılardan oldukça farklı olacaktır.



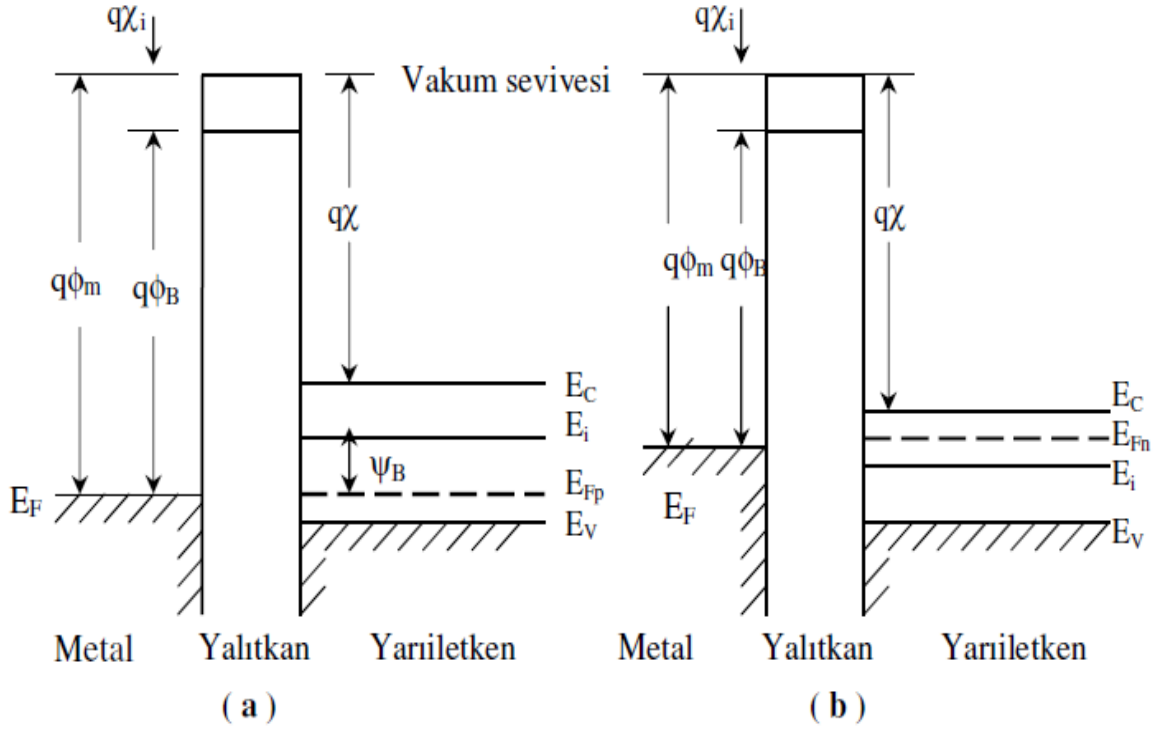
Şekil 2.3. Bir MIS/MPS yapının şematik gösterimi.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi bir MIS yapı genellikle Silisyum üzerine silisyum bir alt tabaka, bu alt tabakaya kontak yapılmış bir arka omik kontak ve bir yalıtkan/polimer tabaka üzerinde yer alan bir metal doğrultucu kontakta oluşur.

2.2.1. İdeal MIS/MPS Yapısında C-V ve G/ω-V Karakteristikleri

V=0 durumunda, ideal bir MIS/MPS yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.4'te verilmiştir. İdeal MIS/MPS olarak tanımlanan yapının, seri direnç ve ara yüzey durumları ihmal edilecek kadar küçük ve kısa devre direncinin ise MΩ'lar mertebesinde olması gerekir.

Bu tür yapılarda diyot sıfır ön-gerilimde iletme geçerken ters yönde hemen hemen hiç akım geçirmez ve idealite faktörü 1'dir [2]–[4].



Şekil 2.4. a) n-tipi yarıiletken b) p-tipi yarıiletken için ideal MIS/MPS yapının enerji bant diyagramı.

İdeal bir MIS/MPS yapıda şu özelliklerin olması beklenir.

- Yapıya uygulanan bir gerilim olmadığı zaman metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasındaki fark sıfırdır.

$$\text{n-tipi için} \quad \phi_{ms} = \phi_m - \phi_s = \phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{p-tipi için} \quad \phi_{ms} = \phi_m - \phi_s = \phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad (2.5)$$

E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve ψ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.

- Doğru ön gerilimleme altında yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.
- Metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan veya organik tabakanın bant genişliği büyük olduğu için ideal bir dielektrik gibi davranır. Yalıtkan

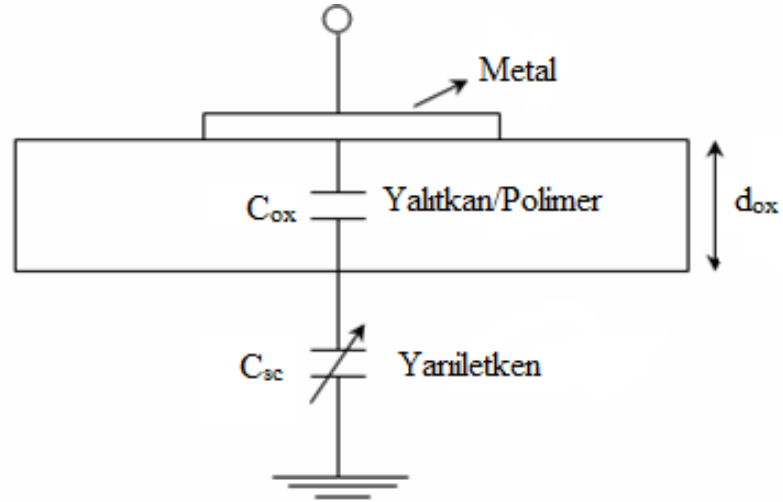
içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Aynı zamanda yalıtkan yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve arayüzey yükleri de bulunmaz.

- Yalıtkanın bant aralığı o kadar büyüktür ki yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür

Sistemdeki toplam yük, kondansatördeki yüklere benzetilerek Denklem (2.6)'daki gibi verilebilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük, $qN_A W$ ise W genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş alıcı katkı atomlarının sayısıdır. Q_s yarıiletkendeki toplam yük, Q_m metal yüzeyindeki toplam yük ve Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür.

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_n + qN_A W = Q_s \\ Q_m - Q_{sc} &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

MIS/MPS kontaklar paralel plakalı kondansatörler gibidir. Çünkü metal ile yarıiletken arasındaki bir yalıtkan/polimer tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans C (MIS/MPS kapasitansı) oluşur. Bu kapasitans ara yüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS/MPS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bir MIS/ MPS yapının eşdeğer devresi.

Bir MIS/MPS yapının kapasitansı (C), yalıtkan/polimer tabakanın kapasitansı (C_{ox}) ve uzay yükü kapasitansı (C_{sc}) aşağıda verilen (2.7) denklemleri ile verilir.

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A_{ox}$$

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \quad (2.7)$$

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} A_{ox}$$

Burada A_{ox} metal ile yarıiletken arasında kalan yalıtkan tabakanın alanı, dolayısıyla MIS doğrultucu kontağın alanıdır.

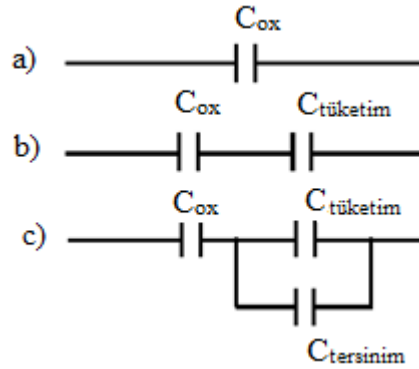
Buna göre Şekil 2.5'teki devrenin toplam eşdeğer kapasitansı Denklem (2.8)'deki gibi bulunur.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.8)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti ve d_{ox} ise ara yüzey tabakanın kalınlığıdır [1]–[5].

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi ideal bir MIS yapısında üç eşdeğer devre söz konusudur. Bu sistemler birikim (accumulation), tüketim (depletion) ve tersinim (inversion) adını alır.



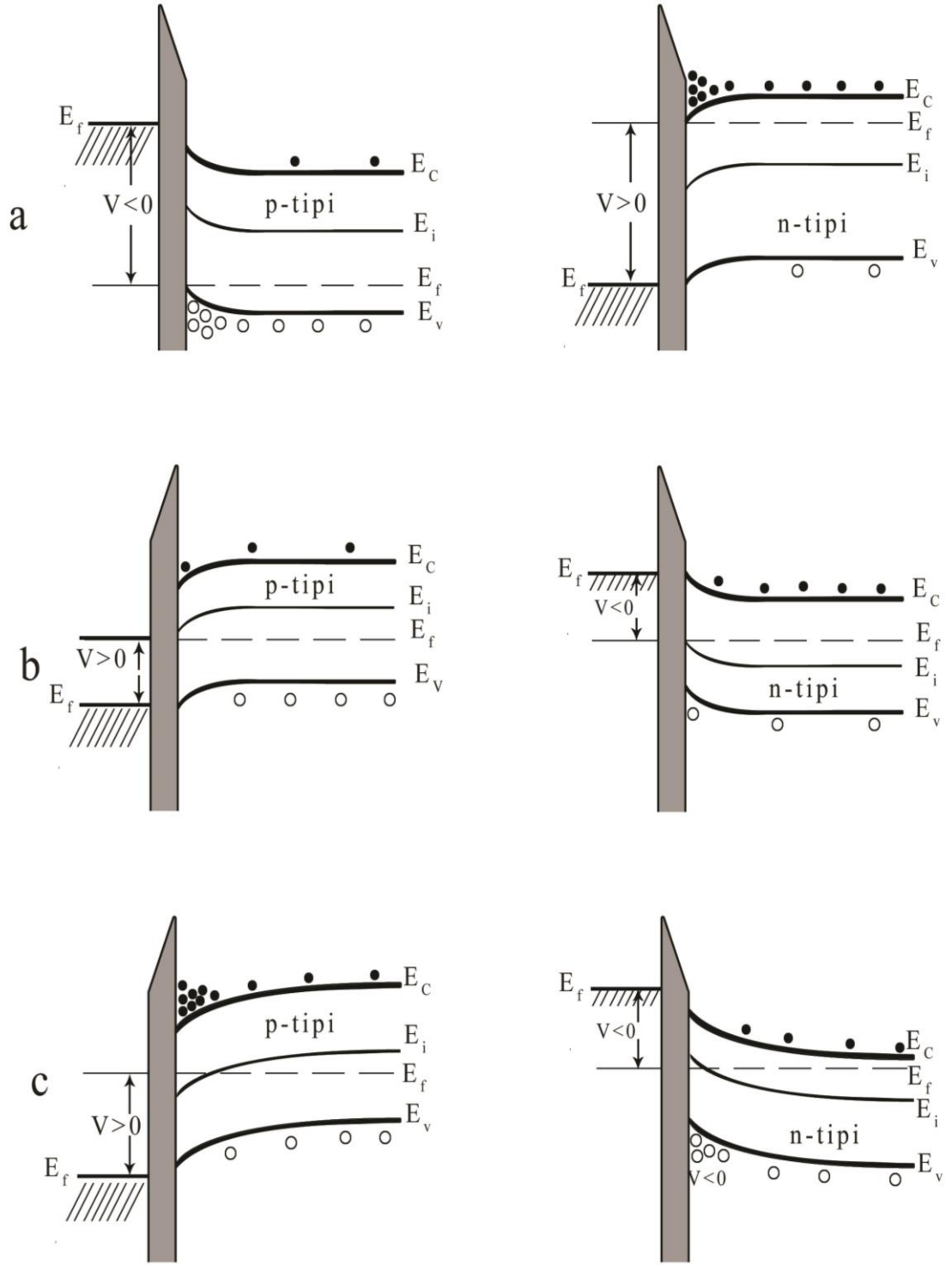
Şekil 2.6. İdeal MIS/MPS yapısının üç değişik davranıştaki eşdeğer devresi: a) Birikim b) Tüketim, c) Tersinim.

2.2.1.1. Birikim

İdeal bir MIS/MPS yapısının metal yüzeyine pozitif bir gerilim ($V_G > 0$) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan n-tipi yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronları yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir. Eğer yapı MIS yapıdaki yarıiletken tabaka p-tipi ise metal üzerine negatif bir gerilim ($V_G < 0$) uygulandığında çoğunluk yük taşıyıcısı olan boşlukları yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir. İdeal bir MIS/MPS yapıdaki Fermi enerji seviyesi denge durumunda yük akışı olmadığı için yarıiletkeninde sabit kalmaktadır. Taşıyıcı yoğunluğu enerji farkına (n-tipi ise $(E_c - E_F)$, p-tipi ise $(E_F - E_v)$) üstel olarak bağlı olduğu için bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı yüklerin yığılmasına sebep olur (Şekil 2.7). n-tipi için değerlik bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak aşağı büküldüğü, p- tipi için ise iletkenlik bandının aynı sebeple yukarı doğru büküldüğü bu duruma çoğunluk yük taşıyıcılarının ara yüzeyde birikmelerinden dolayı "birikim" adı verilir [2], [4], [5].

2.2.1.2. Tüketim

n-tipi yarıiletkenle oluşturulmuş ideal bir MIS/MPS yapısının metal yüzeyine negatif bir gerilim ($V_G < 0$) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı yalıtkan/polimer içerisinde oluşan elektrik alan yarıiletken ara yüzeyindeki elektronları yüzeyden uzaklaştırır. MIS/MPS yapıdaki yarıiletken tabaka p-tipi olduğunda az miktarda bir pozitif gerilim ($V_G > 0$) metal üzerine uygulandığında yalıtkan/polimer içinde oluşan elektrik alan arayüzeydeki boşlukları yüzeyden itemeye başlar. Bu süreç sonunda yarıiletkenin iç kısımlarında azalıp yüzeyine doğru biriken boşluklar nedeni ile bant seviyelerinde aşağı doğru bir bükülme gözlemlenir. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya baslar. p-tipi yarıiletken kullanıldığı durumun tersi olarak n-tipi yarıiletkene sahip yapılarda yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu azalıp, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğu artmaya başlar ve bantlar yukarı doğru bükülür. Değerlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, holler toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen W_D genişliğinde bir bölgede, yoğunluk taşıyıcılarının azaldığı bir tüketim bölgesi oluşur. Bu bölgeye tüketim bölgesi meydana gelen duruma da "tüketim" olayı denir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. İdeal MIS/MPS yapının enerji-bant durumu: a) Birikim b) Tüketim
c) Tersinim.

Uygulanan gerilim arttığında, tüketim tabakası yük dengesi için çok sayıda verici iyon sağlamak için genişler. Tüketim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki Denklem (2.10) ile hesaplanabilir [2].

$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.10)$$

Bu bölgede MIS/MPS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekans altında gerilim değeri ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikme görülür. Bu durum da C-V eğrisinin C_{min} 'un altına düşmesine neden olur. Bu dengesiz bir durumdur ve derin tüketim olarak tanımlanır.

2.2.1.3. Tersinim

İdeal bir n-tipi MIS/MPS yapısının metal yüzeyine çok büyük bir negatif bir gerilim uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı zaman bantlar daha fazla yukarı doğru bükülürler ve E_i öz durumdaki enerji seviyesi, Fermi enerji seviyesinin (E_F) üzerine çıkar. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan boşluklar artmaya başlar ve bunun sonucunda boşlukların yoğunluğu elektronların yoğunluğundan daha fazla olur. Bu durumda n-tipi yarıiletken yüzeyi p-tipi yarıiletken gibi davranır. Eğer p-tipi MIS/MPS yapısının metal yüzeyine çok büyük bir pozitif gerilim uygulanırsa bantlar aşağı doğru bükülür. Öz durumdaki enerji seviyesi (E_i), Fermi enerji seviyesinin (E_F) altına geçer. Azınlık taşıyıcılar olan elektronlar bu aşamada yarıiletken yüzeyinde artmaya başlar ve elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan büyük olduğu görülür. Bu durumda ise p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranış sergiler. Bu olay, yarıiletken yüzeyindeki yüklerin işaret değiştirmesinden dolayı “tersinim” olarak adlandırılır. Şekil 2.7 c’de enerji bant yapısı görülmektedir.

Bu durumda MIS/MPS kapasitesini tespit etmede elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin ac sinyalini takip edebilme yeteneği belirleyici bir unsurdur. Elektron yoğunluğu ac sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasite artan gerilimle yalıtkan kapasite değerine ulaşır. Ara frekanslarda ac sinyalini daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasite C_{min} 'da kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık

taşıyıcıların yeniden-birleşim hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'un altında değerler almasına sebep olur [2], [3].

2.2.2. MIS Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar

İdeal yapılarda hiçbir zaman için yalıtkanın kendi içerisinde ve yalıtkan ile yarıiletkenin birleşim arayüzeyinde elektron ya da boşluk şeklinde hareketli yükler olduğu düşünülmez. Gerçek bir MIS yapıda ise yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyinin tamamen elektriksel olarak nötr olduğu hiçbir zaman söylenemez. Bir yapısı için ara yüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığı, bu yapının ölçülen ideal elektriksel özelliklerini etkileyen faktörlerin en önemlileridir.

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi gerçek MIS yapısında arayüzey yükleri, oksit tabakalar, yalıtkan ve arayüzeyde iyonlaşmış tuzaklar gibi oluşumlar nedeni ile ideal yapıdan sapmalar olmaktadır [28].



Şekil 2.8. İdeal olmayan MIS yapıda arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.

2.2.2.1. Hareketli İyonik Yükler

Metal yarıiletken ya da yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde genellikle hareketli iyonlar bulunur. Genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonları yapılarda gözlenen hareketli iyonlardır [22]. Bunlardan H^+ ve H_3O^+ oda sıcaklığında geri kalanlar da $100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de hareketlikleri gözlenir. Bu hareketli iyonların varlığı MIS yapılarının hazırlanması esnasında kullanılan malzemelerdeki safsızlıklar kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar gibi nedenlere dayanmaktadır. Bu yükler uygulanan elektrik alanda altında hareket ederler ve yapının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar [3], [47], [48].

2.2.2.2. İyonlaşmış Tuzaklar

Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yapabilen bu tuzaklar kimyasal yapı bozuklukları sebebiyle meydana gelmişlerdir ve yalıtkan tabaka içinde bulunurlar. Bir yalıtkan tabakada elektron-hol çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve hollerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve hol tuzakları daha sonradan tavlama ile kaldırılabilir. Oksitte tuzaklanmış yük, yalıtkan doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmezler. İyonlaşmış tuzaklar kapasitans-voltaj (C-V) eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklar meydana gelir. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir.

2.2.2.3. Sabit Yüzey Yükleri

Arayüzeyde bulunan ve yasak enerji bölgesi dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit yüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit yüzey yükü veya oksit yükü denir. Sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönelimine bağlıdır. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuş yükler gibi görülebilir. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için, ideal C-V eğrisine göre, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru C-V eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri, C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri sebep olurlar. Büyük pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar yalıtkan-

yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Büyük negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal-yalıtkan arayüzeyine çekilir ve C-V eğrisini değiştirmez.

2.2.2.4. Arayüzey Durumları

Shockley, Tamm gibi bilim adamları tarafından araştırılan arayüzey durumları, bir kristalin ara yüzeyinde kesikli periyodik örgü yapılarının varlığından dolayı yasaklanmış bant aralığı içinde oluştuğu gözlenen durumlardır [49]. Buna göre arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Arayüzey durumları, alıcı (akseptör) veya verici (donör) tipte olabilirler ve iletim bandı ve Değerlik bandıyla yük alışverişi yapabilirler. Bu alışveriş sonucu meydana gelen yük değişimi MIS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS eğrisini değiştirir. ac sinyal uygulandığında C-V eğrilerinde frekansa bağıllık vardır. İdeal durumda C-V eğrileri frekansa bağıllık göstermez. Tüketim bölgesine bir ac sinyal uygulandığında, yakalama ve emisyon işlemleri meydana gelir ve çoğunluk taşıyıcı bandı oluşur [11].

Arayüzey durumlarında bulunan yükü yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve yalıtkan kalınlığından etkilenmez. Arayüzey durumları, uzay yükü kapasitesine ek bir kapasite ve direnç etkisi oluştururlar. Birim enerji başına arayüzey yükü olarak tanımlanan arayüzey durum yoğunluğu şu şekilde verilir:

$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)'de E enerji olup $E = q\psi_s$ ile verilir. E'nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Denklem (2.11) tekrar düzenlenirse durum yoğunluğu şu şekli alır:

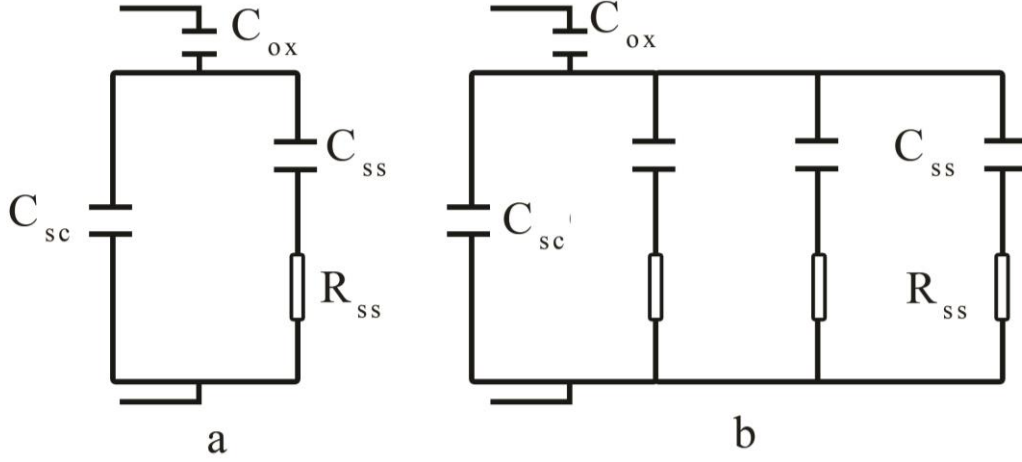
$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} = \frac{dQ_{ss}}{d\psi_s} \frac{d\psi_s}{dE} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{ss}}{d\psi_s} \quad (2.12)$$

Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez.

Devredeki arayüzey kapasitesi ise şu şekilde verilir:

$$C_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} A_{ox} \quad (2.13)$$

Arayüzey durumları uzay yükü kapasitesine paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptıklarından temel eşdeğer devre Şekil 2.9'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.9. MIS/MPS yapıları için elektronik eşdeğer devresi a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.

a) *Kapasite*: Bir arayüzey duruma, arayüzeyde izin verilen başka bir durumun eklenmesiyle meydana gelir. Bu yüzden durum başına temel yükün bir kapasitesi eklenir. Bu kapasite uygulanan gerilimin keskin bir pikidir. Fermi seviyesi arayüzey durum seviyesini aştığı için pik gerilim için görülür.

b) *İletim*: Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından bu durum bir zaman gecikmesi ile birleştirilebilir. Bu zaman gecikmesi arayüzey durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolum boşalım zamanıdır ve $t = 1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir.

c) *Arayüzey potansiyeli*: Yukarıda ifade edilen kapasite ve iletim ac etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir de dc etkisine de sebep olur. Arayüzey durumlarında depo edilmiş yük, arayüzey elektrik alanını değiştirir. Arayüzey durumları mevcut olunca arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla

gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite-gerilimin zorunlu genişlemesi (stretch out) olarak gözükür ve Denklem (2.14)'te verilmiştir.

$$C_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} A_{ox} \quad (2.14)$$

2.2.3. Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi

Yukarıda belirtildiği gibi bir MIS/MPS yapısında, arayüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığından dolayı MIS/MPS yapı ideal durumdan sapacaktır. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom, bir bozunma veya fabrikasyon sırasında yapıya bulaşan çok sayıdaki organik kirlere dolayısıyla metal ile yarıiletken arayüzeyi yakınında yasak enerji bandında lokalize olmuş çok sayıda izinli enerji seviyeleri oluşur ve bunlar diyotun performansını olumsuz yönde etkiler. Arayüzey durum yoğunluğu için teorik tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu (10^{15} cm^{-2}) mertebesinde olabileceğini öngörmüştür fakat deneysel sonuçlar bu değerin sadece 10^{11} - 10^{12} cm^{-2} mertebesinde olduğunu göstermektedir [2].

Arayüzey durumları kendi aralarında yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları daha çok arayüzeyin metal kısmında bulunurlar. Yalıtkan içerisinde durgun yükler içeren bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan etkisi altında yalıtkan içerisinde taşınmaya yatkın hareketli iyonlar tarafından meydana gelen arayüzey durumlarına yavaş arayüzey durumları denir. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile neredeyse giderilebilir ve MIS/MPS kapasitesini etkiledikleri söylenemez.

Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alana durumlar ise hızlı arayüzey durumlarıdır ve yasak enerji bant aralığının orta seviyelerine yakın enerjilere sahiptirler. Dolayısıyla bant bükülmesi yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya Değerlik bandı ile ani yük alışverişi yaparlar. Arayüzeyde, yasak enerji aralığı dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit arayüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit arayüzey yükü veya oksit yükü denir.

Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletken-oksit arayüzeyinde, yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede yarıiletkenin iletkenlik veya Değerlik bandı ile ani yük alışverişi yapabildiklerinden dolayı bu arayüzey durumlarına yüzey rekombinasyon (yeniden birleştirme) merkezleri de denir.

Alıcı ve verici arayüzey durumlarının dağılım fonksiyonu $f(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile verilir.

Alıcı arayüzey tuzaklar için:

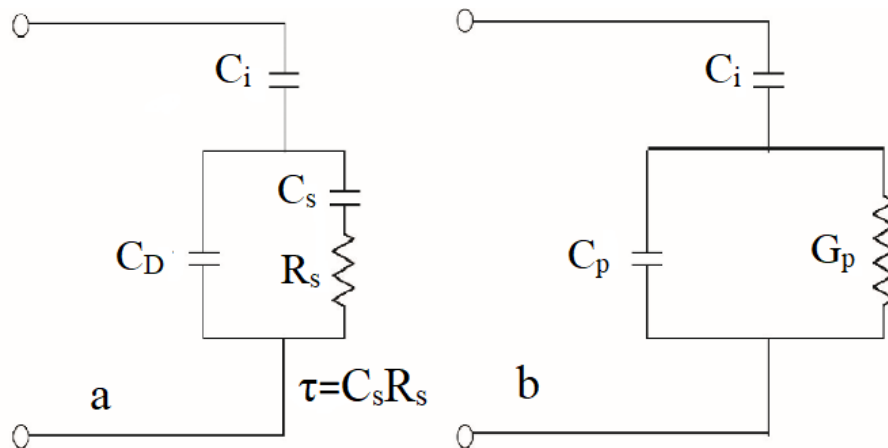
$$f(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.15)$$

Verici arayüzey tuzaklar için:

$$f(E_t) = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.16)$$

Denklem (2.16)'da E_t , arayüzey tuzak enerjisi, E_F Fermi enerjisi ve g ise termal durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için 4'tür [46].

Arayüzey durumlarının etkisini içeren bir eşdeğer devre Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. MIS/MPS yapılarında arayüzey durumların ve seri direnç etkilerini içeren eşdeğer devre.

Burada C_i ve C_D sırası ile arayüzey tabakanın (yalıtkan veya polimer) kapasitans ve yarıiletken tüketim tabaka kapasitanslarıdır. $C_s R_s$ çarpanı ise arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanır ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını etkiler.

Şekil 2.10 a'nın paralel kolu, Şekil 2.10 b'deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_p ve ona paralel bağlı frekans bağımlı iletkenlik G_p şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}} = G_p + j\omega C_p \quad (2.17)$$

şekindedir. Burada iletkenlik G_p ve kapasitans C_p şu şekildedir:

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.18)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.19)$$

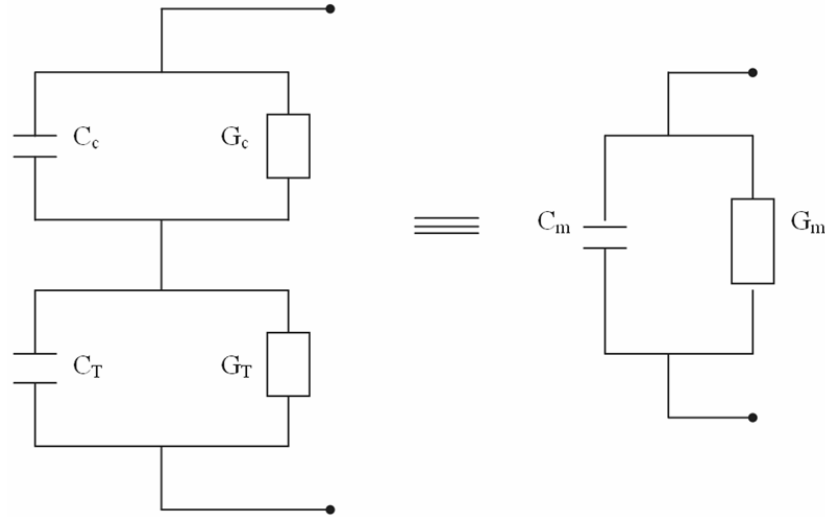
Toplam empedans Z ise Denklem (2.20) gibidir.

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j \left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.20)$$

Burada toplam admittans ise şöyle yazılır:

$$Y_{top} = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p} \right) + j\omega \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p} \right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.21)$$

Eğer diyot bir seri dirence sahipse, ölçülen iletkenlik G_m ve kapasitans C_m diyotun gerçek değerleri değildir [28], [41]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.11'deki gibi temsil edilebilir.



Şekil 2.11. MIS/MPS yapının eşdeğer devresi.

Böyle bir durumda yapının gerçek G_m ve C_m değerlerini elde etmek için empedans ifadesi Denklem (2.22)'deki gibi ifade edilebilir.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad (2.22)$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m}$$

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

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1} \quad (2.23)$$

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

Denklem (2.23)'ün paydası eşleniği ile çarpılır, $G_T = 1/R_s$ alınır ve C_T değeri ihmal edilirse düzeltilmiş iletkenlik için Denklem (2.24) elde edilir.

Burada seri direnç R_s , Şekil 2.11'deki devrenin empedansı Z 'nin reel kısmı olup, yüksek frekansta ve kuvvetli birikimdeki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir [4].

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R} \quad (2.24)$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.25)$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.26)$$

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.27)$$

Denklem (2.23)'ün düzenlenmiş şeklinin sanal kısmı ise Denklem (2.28)'deki gibi düzeltilmiş kapasitans değerini verir.

Denklem (2.24) ve Denklem (2.27) yeniden düzenlenirse;

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.28)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.29)$$

elde edilir. Burada a şu şekildedir:

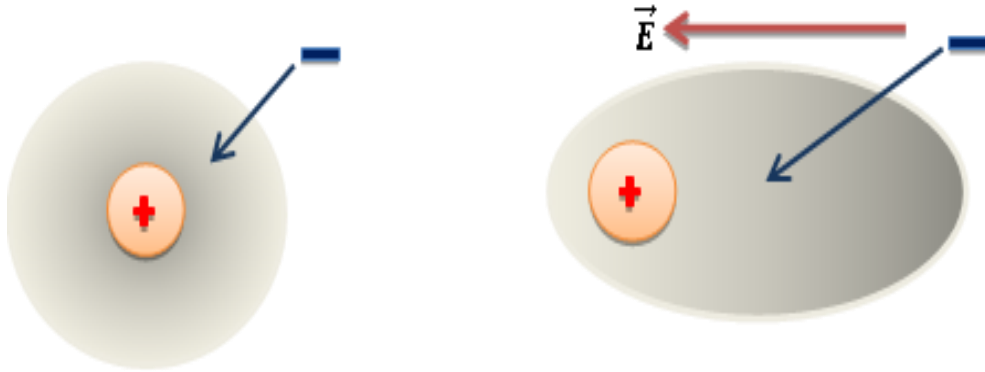
$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (2.30)$$

C_m ve G_m ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. $R_s = 0$ durumunda $C_c = C_m$ ve $G_c = G_m$ olur.

3. DİELEKTRİKLER

3.1. DİELEKTRİK MALZEMELERE DURGUN ELEKTRİK ALAN ETKİSİ

İdeal dielektrikler, bir dış elektrik alan altında iletkenliği sağlayacak kadar serbest yük içermedikleri için yalıtkan olan malzemelerdir. Dielektriklerde hemen hemen tüm yükler belirli atom ya da moleküllere bağlı olduğu görülür. Bu sebeple hareketleri molekül içerisinde kısıtlıdır. Bununla birlikte bir harici durgun elektrik alan uygulandığında, negatif ve pozitif yükler iletkenlerdeki gibi malzemenin yüzeyine doğru hareket etmezler. Elektrik alan içerisine konulan bir dielektrik maddenin yaptığı tek hareket, pozitif ve negatif yüklerin zıt yönlerde küçük yer değiştirmeler yapmasıdır. Şekil 3.1’de elektrik alan uygulanmayan ve elektrik alan uygulandığı durumdaki çekirdek ve elektron bulutu dağılımlarının şematik olarak gösterilmiştir. Çok küçük yer değiştirmelerin olduğu dielektriklere kutuplaşmış dielektrikler denir.



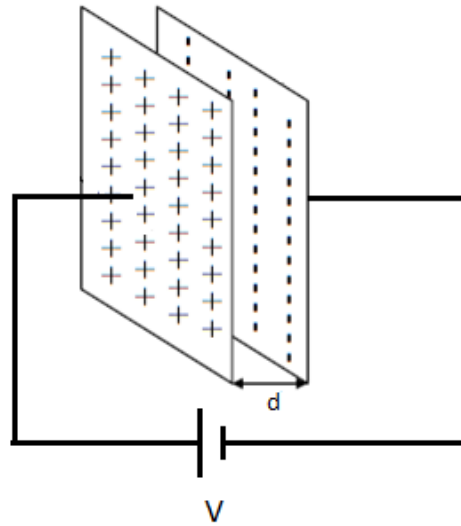
Şekil 3.1. Elektrik alan uygulanmayan ve elektrik alan uygulandığı durumdaki çekirdek ve elektron bulutu dağılımlarının şematik gösterimi.

Zıt yönlerde kutuplaşan dielektrikteki yükler dipolleri ve dolayısıyla dipol momentlerini oluşturur. Dielektrik malzemeye elektrik enerjisi depolama özelliğini malzemenin dış bir elektrik alanla etkileşimde olma durumu sağlar. Dış elektrik alanın etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski denge konumlarına dönerler. Bu durumda net dipol moment yine sıfır olur. Dielektrik maddeler genel olarak net bir dipol momente sahiptir.

Bu durumlarda uygulanan harici elektrik alan hem bu tür kutuplu maddelerde pozitif ve negatif yükleri denge konumundan saptırır hem de var olan sürekli dipolleri de kendi doğrultusunda yönelim almaya zorlar.

3.2. DİELEKTRİKSİZ VE DİELEKTRİKLİ KONDANSATÖR

Aralarında d uzaklığı bulunan, A yüzey alanına sahip paralel plakalı bir kondansatörün şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.

Bu plakalara bir doğru gerilim uygulanırsa, plakalar yüklenmeye başlar. Plakalardan birinin $+Q$, diğerinin de $-Q$ yüküyle yüklendiği kabul edilirse, plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E = \sigma_0 / \epsilon_0 \quad (3.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada ϵ_0 boşluğun elektriksel geçirgenlik sabitidir ($\epsilon_0=8,85*10^{-12}$ F/m). Bu nicelik, boş uzaydaki belli bir kapalı yüzeyin içindeki toplam elektrik yükünün bu yüzeyden geçen elektrik akısına oranına eşittir [50]. σ_0 ise her bir plaka üzerinde birim yüzey alanı başına düşen yük miktarı olup, yüzey yük yoğunluğu adını alır. Bu durumda, aralarında d uzaklığı bulunan paralel plakalar arasında oluşan potansiyel farkı

$$V = E.d \quad (3.2)$$

ifadesi ile verilir.

Buna göre her plakanın sahip olduğu toplam yük olmak üzere paralel plakalı kondansatörün sığası,

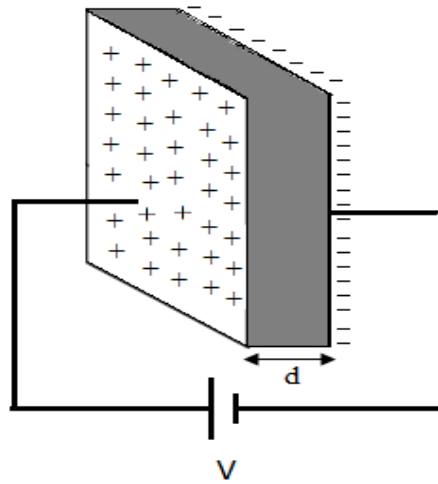
$$C_o = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 A / d \quad (3.3)$$

ile ifade edilir. Ayrıca yüzey yük yoğunluğu, plakalar arasındaki bölgede elektrik yer değiştirme kaynağı olarak düşünülebilir. Buna göre elektrik akı yoğunluğu;

$$D = \sigma = \epsilon_0 E \quad (3.4)$$

ile ifade edilir [51]. Paralel plakalı kondansatörün plakaları arasındaki boşluğa dielektrik bir madde konulduğu durumda, kondansatörün sığası ϵ çarpanı kadar artar. Bu ϵ çarpanına dielektrik sabiti (geçirgenlik) denir ve maddenin elektrik alanla etkileşmesini tanımlar. Bu sabit, her zaman boşluğun geçirgenliği (ϵ_0) cinsinden ifade edilir ve daima 1'den büyük bir sayıdır.

Şekil 3.3'te içinde dielektrik madde bulunan paralel plakalı bir kondansatörün şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.

Bir dielektrik madde yokken ve herhangi bir güç kaynağına bağlı değilken paralel plakalı kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 ve elektrik alanı E_0 olsun. Plakalar arasına dielektrik bir madde konulduğunda V potansiyel farkı ve E elektrik alanı, dielektrik madde konulmadığı durumdakine göre $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır;

$$V = V_0 / \epsilon' \quad (3.5)$$

$$E = E_0 / \epsilon' \quad (3.6)$$

Kondansatör üzerindeki Q_0 yükü değişmediğinden dolayı, sığanın değeri ise ϵ' çarpanı kadar artmaktadır, yani

$$C = Q_0 / V = \frac{\epsilon' Q_0}{V_0} = \epsilon' C_0 \quad (3.7)$$

olur. O halde plakalar arasındaki bölge tam olarak dielektrik madde ile dolduğu zaman paralel plakalı kondansatörün sığası,

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (3.8)$$

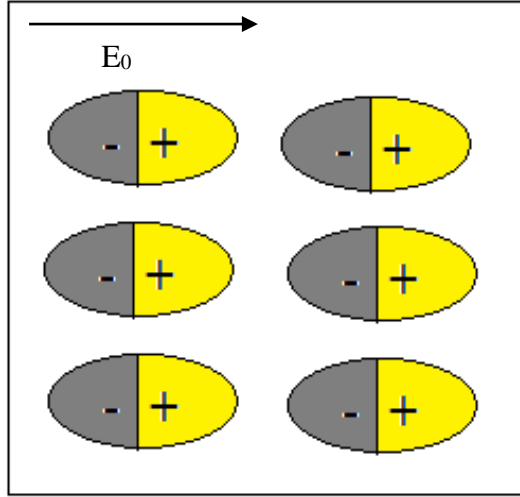
şeklinde yazılır.

3.3. DİELEKTRİK KUTUPLANMA

Dielektrik malzemelerin en önemli özelliklerinden birinin Faraday'ında söylediği gibi bir dış elektrik alanın etkisinde kalarak kutuplanabilme yeteneğine sahip olduklarıdır. Yani bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik (yalıtkan) yerleştirildiği zaman potansiyelin azalması, elektrik alan şiddetinin ($E=V/d$) azalmasına ve bu nedenle birim yüzeydeki net yükün azalma şu durumu ortaya çıkar. Bu da ancak, dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yüklerin meydana gelmesiyle mümkündür. Bir iletken elektrik alan içine yerleştirildiğinde alan tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisi altında serbest yükler yer değiştirir.

Elektrostatik denge kurulduğunda etkiyle meydana gelen yüklerin elektrik alanı bütün noktalarda dış alanı nötrleştirir ve iletken içinde elektrik alan sıfır olur [52].

Dielektrik malzeme bir dış elektrik alan içine konulduğu zaman, malzeme nötr atomlar veya kutupsuz moleküllerden oluşmuşsa, elektrik alanın etkisiyle pozitif ve negatif yük merkezleri birbirlerinden bir miktar uzaklaşarak küçük bir dipol momenti kazanır. Herhangi bir hacim elemanında bir yük fazlalığı yoktur. Dielektrik malzeme bütün olarak elektriksel bakımdan nötr olduğuna göre, kondansatör plakalarına temas eden yüzeylerde meydana gelen pozitif ve negatif kutuplanma yükleri eşit olmalıdır. Bazı dielektriklerin molekülleri daimî dipol içerirler. Polar denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz yani yükler birbirinden çok az miktarda ayrılırlar. N_2O ve H_2O moleküllerinin her ikisinde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alırlar; bu moleküller polardır. Polar olmayan bir molekülde ise pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi ile elektronların ağırlık merkezi normal olarak çakışır. H_2 , N_2 , O_2 gibi simetrik moleküller polar değildir. Bir dielektrik elektrik alan içine yerleştirildiği zaman, bir yük hareketi olmamakla beraber, elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük (atomik) dipolar haline geçerler ve dielektrik kutuplanır. Bu yüzeylerde meydana gelen yükler son derece ince bir tabaka içindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır ve buldukları moleküle bağlıdır. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Madde, kutuplu moleküllerden oluşmuşsa, her bir kalıcı dipol momenti, alan yönünde yönelim almaya zorlanır. Malzeme ister kutuplu ister kutupsuz moleküllerden oluşsun, dış elektrik alan uygulandığında alan yönünde çok sayıda küçük dipoller oluşur. Bu dipoller pozitif ve negatif uçlar arasında uzun zincirler oluşturur. Pozitif yük negatif plaka üzerinde, negatif yük de pozitif plaka üzerinde bir miktar yükü nötrleştirir.

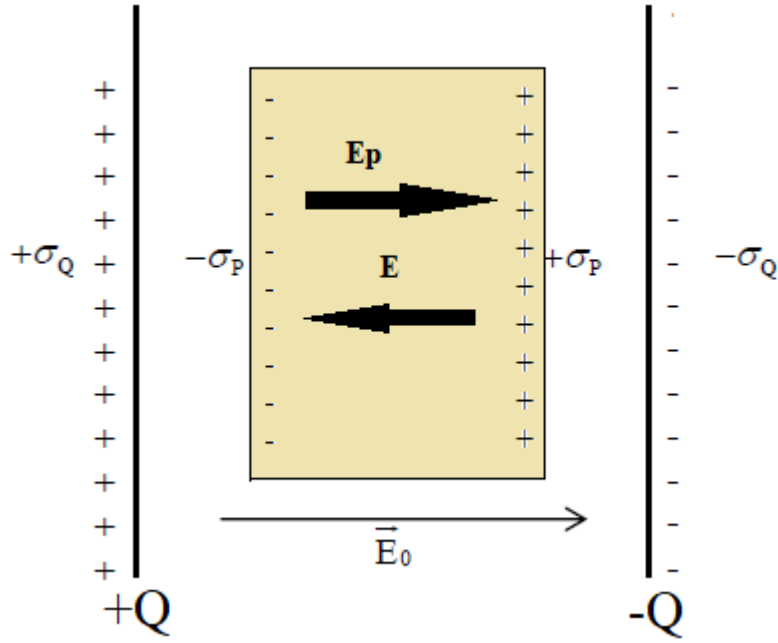


Şekil 3.4. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri.

Bir dış alanın etkisi altında buldukları zaman P dipol momentleri Şekil (3.4)'teki gibi alana paralel olacak şekilde yönelirler [50].

3.3.1. Kutuplanma Yükleri

Dielektriğin plakalara temas eden yüzeylerinde meydana gelen kutuplanma yükleri (yüzey yükleri) nedeniyle plakalar üzerindeki serbest yüklerden ileri gelen alana ters yönde bir elektrik alan meydana gelir (Şekil 3.4). Düzgün bir elektrik alan içindeki bir dielektrik malzemede, moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Elektrik alanın etkisiyle, negatif yükler malzemenin sol yüzeyinde, pozitif yükler ise sağ yüzeyinde birikmişlerdir.



Şekil 3.5. Dielektrik malzeme üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu ve elektrik alanların şematik gösterimi.

Paralel plakalı kondansatörde dielektrik madde bulunmadığı durumdaki elektrik alan şiddeti E_0 ile, kutuplanmış dielektriğin oluşturduğu elektrik alan şiddeti de E_p ile gösterilirse, kondansatörde meydana gelen bileşke alan Denklem (3.9)'de verildiği gibi bunların vektörel toplamına eşit olur;

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (3.9)$$

Malzemeyi kutuplaştıran alanı ile kutuplu yüklerden kaynaklanan alanı zıt yönlü olduğundan, bu ifade skaler formda;

$$E = E_0 - E_p \quad (3.10)$$

şeklindedir. E_p alanı kutuplanmaya karşı koyan alandır. Bileşke alan ise daima E_0 ile aynı yöndedir. Kondansatörün plakaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ_Q , dielektrik malzemenin plakalara temas eden yüzeylerinde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu σ_P ise, etkin yük yoğunluğu $(\sigma_Q - \sigma_P)$ olur. σ_Q serbest yük yoğunluğu, E_0 elektrik alanına ve σ_P kutuplanma yük yoğunluğu ise E_p elektrik alanına,

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.11)$$

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.12)$$

şeklinde bağlı olur. Bu nedenle dielektrik içindeki alan yani bileşke alan

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılır. Paralel levhalar arasında dielektrik madde varken, levhalar arasındaki potansiyel farkı, elektrik alan ve sistemin kapasitansı şu denklemlerle verilir;

$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (3.14)$$

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0} \quad (3.15)$$

$$C = \epsilon' C_0 \quad (3.16)$$

Burada C_0 , E_0 ve V_0 , dielektrik yokken kondansatörün kapasitesi, elektrik alanı ve potansiyel farkıdır. Dielektrikli paralel plakaların kapasitansı, $C_0 = \epsilon_0 A/d$ eşitliği yerine konularak

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (3.17)$$

olarak elde edilir. Denklem (3.15), Denklem (3.13)'de yerine konulursa

$$\frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.18)$$

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'} \right) \quad (3.19)$$

elde edilir.

$E_0 > E_p$ olduğundan, dielektrik üzerindeki σ_p kutuplanma yük yoğunluğu, kondansatörün plakaları üzerindeki σ serbest yük yoğunluğundan küçüktür ($\sigma_p < \sigma$). Hiçbir dielektrik yoksa $\epsilon' = 1$ ve $\sigma_p = 0$ olur. Buna karşın, dielektrik yerine bir iletken yerleştirilirse $E = 0$ olur, o zaman Denklem (3.10)'dan $E_0 = E_p$ elde edilir.

Bu durumda, iletken üzerinde kutuplanan yük, plakalar üzerindeki yükle eşit ve zıt işaretli olacak, dolayısıyla iletkendeki net alan sıfır olacaktır [31], [34].

Dielektriğin her noktasında kutuplanma P , bileşke elektrik alanı E ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. Bu özellik lineer ve homojen izotropik dielektrikler için,

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (3.20)$$

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

$$\chi = (\epsilon' - 1) \quad (3.21)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Kutuplanma etkisi, dielektrik yüzeyde bulunan yüklerin iletkende olduğu gibi serbestçe hareket edemeyip, yer değiştirmesi ile anlaşılır [9]. Polarize dielektrikler için, D elektrik yer değiştirme veya elektrik akı yoğunluğu, dielektrik içindeki E alanı ile orantılıdır. D elektrik yer değiştirme

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (3.22)$$

ifadesiyle verilir. Denklem (3.20) ve Denklem (3.21) yerine konulursa,

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi) E = \epsilon_0 \epsilon' E \quad (3.23)$$

olarak elde edilir [28], [52].

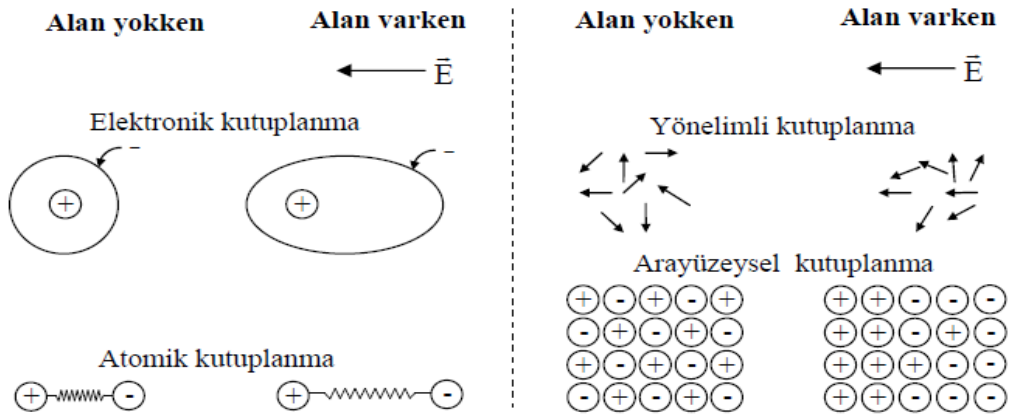
3.3.2. Kutuplanma Mekanizmaları

Dielektrik malzemelerdeki kutuplanmalar; elektronik, iyonik, dipolar (yönelimli) ve arayüzeysel kutuplanmalardır. Kutuplanma mekanizmalarından ilk ikisi (elektronik ve iyonik) diğerlerine göre daha hızlı gerçekleşir.

Bu nedenle, zaman skalasına bağlı olarak, hızlı kutuplanmalar ani bir kutuplanma (P_0) olarak kabul edilebilir. Sonsuz miktardaki elektrik enerjisi bir dielektrikte (kapasitörde) depolanamayacağı için, görece uzun zamanlarda kutuplanma, şeklinde sonlu olmak zorundadır [37].

Elektronik ve atomik kutuplanmalar, uygulanan elektrik alan tarafından indüklenir ve atom ya da moleküllerdeki elektronların yer değişimlerinden kaynaklanır.

Yönelimli kutuplanma, ilk kez Debye tarafından çalışılan klasik kutuplanma tipidir ve kalıcı dipol momentlere sahip olan polar malzemelerde meydana gelir. Dipolleri yok edecek geri çağırıcı kuvvetler yoktur ama ısısal çalkantının rastgele etkisi vardır. Arayüzeysel kutuplanma ise heterojen malzemelerde meydana gelir ve bu kutuplanmanın durulma zamanı yönelimli kutuplanmanınkinden daha uzundur [53].



Şekil 3.6. Harici bir elektrik alan uygulandığı zamanki ve uygulanmadığı zamanki kutuplanma mekanizmaları.

3.3.2.1. Elektronik Kutuplanma

Elektrik alanın uygulanmasıyla bütün atomlar ve iyonlarda ortaya çıkar ve tüm dielektriklerde diğer tür kutuplanmalar olmazsa dahi gözlenebilir. Nötr bir atom, merkezde pozitif çekirdek ve çekirdeği çevreleyen elektron bulutlarından oluşur. Bu durumda atomdaki yük merkezleri artık çakışık olmaz ve indüklenmiş dipol momentler oluşur. Bu şekilde meydana gelen kutuplanma türüne, elektronik kutuplanma denir. Elektronun kütlesi oldukça küçük olduğundan uygulanan dış elektrik alanla kısa bir süre içinde oluşur (10^{-15} s).

İyonik yapılmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ($n^2=\epsilon$). Buna Maxwell ilişkisi denilmektedir. Bunun fiziksel içeriği şöyle açıklanabilir: Elektromanyetik dalganın elektrik vektörü madde içindeki yüklere, başlangıçtaki konumlarını değiştirecek kuvvet uygular ve sonuçta bir çift-kutup oluşacaktır. Ağır iyonlar elektromanyetik alanı kızıl ötesi bölgeye kadar izleyebildiklerinden görünür bölgede kutuplanmaya çok az katkıda bulunurlar. Hâlbuki elektronlar bu bölgede de yanıt verebilirler ve elektronik kutuplanmayı oluştururlar. Sürekli yön değiştiren bu çift-kutuplar uyarıldığı frekansın aynıyla ışırılar. Bu yüklerin varlığı ve elektromanyetik alan ile etkileşimi herhangi bir enerji kaybına neden olmaz, yalnızca geçişini geciktirir. Bu materyal, elektromanyetik dalganın hızını azaltarak, kendi içindeki dalganın hızının boşluktakine oranı biçiminde bilinen kırılma indisine sahip olur. Optiksel kırılma indisinin elektronik kutuplanmadan türediğı görülür. Daha büyük kutuplanma daha fazla geciktirici davranışa neden olacağından bu da kırılma indisinin büyümesi demektir. Bu, manyetik olmayan materyaller için elektromanyetik teörinin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin (ϵ) değeri “1” olacak ve gecikme olmayacağından $n=1$ olur.

3.3.2.2. İyonik Kutuplanma

Uygulanan bir elektrik alanının altında birbirine yakın olan pozitif ve negatif iyonların yayılması ile meydana gelir. Farklı tipteki molekülleri oluşturan atomlar olduğu zaman, elektron bulutları güçlü bağları olan atomlara doğru dış merkezli olarak yer değiştireceğı için, bunların elektronları normal olarak küresel olmayacaktır. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler edinirler ve bu net yüklerde etkili olan bir dış alan, atomların denge konumlarını değiştirmek için onları yönlendirir. Bu yüklü atom ya da atom gruplarının birbirlerine göre yer değiştirmesi ile indüklenmiş dipol momentin ikinci bir tipi oluşur. Bu tür dipoller, atomik kutuplanma ile ilgilidir. Rezonans tipik olarak kırmızı ötesi veya ona yakın frekans bölgesinde meydana gelir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir tip etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelecektir. Bu, dielektriğın iyonik kutuplanmasıdır. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma içinde oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13} - 10^{-12} s). Bu kutuplanmanın varlığında Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağlı dielektrik katsayısı her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük

olacaktır.

3.3.2.3. Yönelimli Kutuplanma

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift-kutup momentleri içeren, polar maddeler diye adlandırılan dielektriklerde oluşur. Bazı dielektriklerde kuadropol (dört kutuplu), oktopol (sekiz kutuplu) vb. çok kutuplular da bulunabilir. Fakat bunların kutuplanmaya katkısı oldukça azdır. Böyle elektrik momentlerine (çift-kutuplara) dış elektrik alan bir tork uygulayarak kendisiyle aynı yönetime zorlayacaktır ve sonuçta yönelimli kutuplanma ortaya çıkacaktır. Yönelimli kutuplanmada sıcaklık etkileri de göz önüne alınmalıdır. Yönelim kutuplanmasında çift-kutup momentli moleküllerin alan uygulanmadan önceki durumuna yeniden geçmesi için moleküllerin büyüklükleri ve ortamın viskozları ile doğru orantılı olan bir zamana ihtiyaç vardır.

Bu üç kutuplanmada dielektrik içinde yerel olarak bağlı yüklerle oluşmaktadır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü; her ikisinde de yüklerin dönmeyip birbirlerinden uzaklaşmalarıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirlere. Düşük frekanslarda her üç kutuplanma da oluşur. Frekans arttıkça önce kalıcı, sonra iyonik ve en sonunda da elektronik çift-kutuplar ki, son ikisi etkileşmeli çift-kutuplar olup, dış alanın değişmesini izleyemez duruma gelirler ve statik dielektrik sabiti ϵ_r "1" değerine ulaşır [50].

3.3.2.4. Arayüzey-Uzay Yük Kutuplanması

Yukarıdaki kutuplanma modellerinin hepsi tüm yüklerin bağlı olduğu yani iletkenliğin sıfır olduğu durumlar için tanımlanır. Özellikle polimer katkılı dielektrik malzemelerde yüklerin bir kısmı maddenin içinde hareket etmekte serbesttir. Bu serbestliğin derecesi maddeye bağlıdır. Elektronik, iyonik ve çift-kutup yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, malzemenin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelme etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü veya arayüzey kutuplanması diğerlerinden farklı olarak hareketli yüklerden oluşur. Diğerlerinde atom ve moleküller; kendilerini, çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde ise uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Arayüzey kutuplanmasında ise malzemenin hacmindeki uzay yüklerinin veya dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikmesine sebep olan büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır.

Polikristal malzemelerde birleşme yüzeylerinde serbest yükler birikebilir, bu da kristalin arayüzey kutuplanmasını doğurur. Bu birikmiş yükler, elektrotlardaki görüntü yükleri etkiler ve diğer kutuplanmalara olumlu etkide bulunurlar. Arayüzey kutuplanması üzerine temel düşünce; kristaller arası ayırıcı arayüzeylerle bağlantılıdır. Bu arayüzeyler, serbest yüklerin bir kristalden diğerine hareketini engelleyici rol oynarlar. Yani kristalleri birbirinden izole ederler. Bu engeller, herhangi bir hava katmanından veya yüzey katmanının bir yalıtkan ile kaplanmasından kaynaklanabilir. Bu konuda çalışanlardan bir kısmı arayüzey kutuplanmasının nedeninin, tek bir kristaldeki kusurlar (boşluklar, safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde boşluk yüklerinin birikimi olduğunu söylemişlerdir [28], [42], [54]. Bu kutuplanma, malzemenin içinde herhangi bir şekilde yerleşmiş uzay yüklerinin elektrotlar üzerindeki görüntü yükleri etkilemesinin bir sonucudur. Bu kutuplanma mekanizması, düşük ve orta düzey frekanslardaki dielektrik yapıların tasarımında büyük rol oynamaktadır [54].

3.3.3. Dielektriklerde Elektrik Alan ve Dielektrik Kayıp

Dielektriklerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülür. Bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile özdeşleştirilir. Araları bir dielektrik madde ile doldurulmuş paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ölçüm tekniği ile karakterize edilebilir. Admittans, bir malzeme ya da devrenin, akımın geçişine ne kadar kolaylık göstereceğinin bir ölçüsüdür. Admittans, empedansın tersidir ($Y=1/Z$).

$$Y = G + i\omega C \quad (3.24)$$

ile ifade edilir. G iletkenlik, ω sürücü geriliminin açısal frekansı, C ise toplam kapasitedir. Bu ifade

$$Y = G + i\omega(C_0 \epsilon^*) \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir. C_0 kondansatörün dielektrik madde yok iken sahip olduğu kapasite, ϵ^* ise dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik sabitidir [37].

Bağıl dielektrik sabiti,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (3.26)$$

şeklinde verilmektedir.

Buna göre admittans

$$Y = G + i\omega C_0 (\varepsilon' - i\varepsilon'') = (G + \omega\varepsilon'' C_0) + i\omega C_0 \varepsilon' \quad (3.27)$$

Empedans da admittansın tersi olduğuna göre

$$Z = \frac{1}{i\omega C + G} = \frac{1}{i\omega C_0 \varepsilon^* + G} \quad (3.28)$$

şeklinde yazılır. Empedans denkleminde bağıl dielektrik sabiti yerine yazılırsa;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (3.29)$$

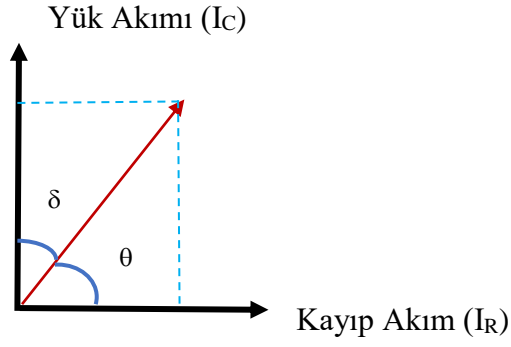
$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (3.30)$$

elde edilir.

Dielektrik maddenin elektriksel davranışı bir paralel RC devresi ile izah edilebilir. İdeal bir kondansatör, ac sinyal uygulandığında kondansatörden geçen akım üzerinde oluşan potansiyelden 90° ileridedir. Fakat paralel plakalar arasına bir dielektrik malzeme konulduğunda, sistemde dielektrik içindeki kutuplanmadan kaynaklanan kayıptan ötürü bu faz farkı 90° dereceden daha küçük değerlere iner. Bir kondansatöre ac gerilim ($V(t)=V_0 \cos \omega t$) uygulandığında, kondansatördeki toplam akım,

$$I = I_c + I_R = (i\omega C + G)V \quad (3.31)$$

Burada I_R ; ac gerilim ile aynı fazda olan kayıp akımını, I_c ; ac gerilim ile farklı fazda olan yük akımını ve G ise dielektrik maddenin iletkenliğidir.



Şekil 3.7. Dielektrikli kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akım (I_R) arasındaki ilişki.

Şekil 3.7’de görülen δ terimi, numune üzerindeki ac uyarıcı gerilim etkisiyle, bir dielektrik maddenin periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yer değiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan\delta$ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarı biçiminde dielektrik tanjant yada kayıp açısı olarak ifade edilir. Dielektrik maddenin iletkenliği arttıkça kayıp akımı artacağından kayıp açısı büyüyecektir. Kayıp açısı, ölçüm esnasında kayıp akımının yük akımına oranı olarak elde edilir. Denklem (3.32)’deki gibi elde edilir.

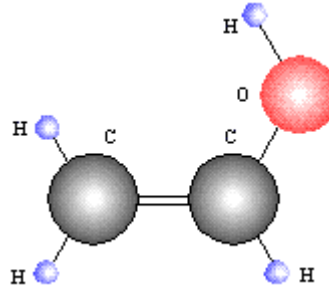
$$\tan \delta = \frac{|I_R|}{|I_C|} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (3.32)$$

4. DENEYSEL YÖNTEM

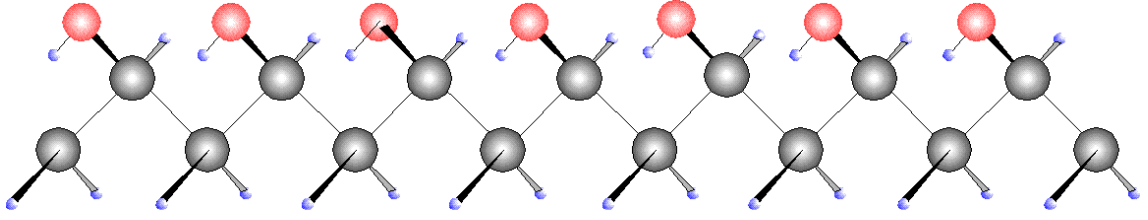
4.1. POLİVİNİL ALKOLÜN (PVA) TEMEL ÖZELLİKLERİ

Polivinil alkol (PVA) suda çözünür bir polimerdir. Bir polivinil esterinin (polivinil asetat) hidroliziyle hazırlanır. Sentetik reçinelerin içinde en geniş hacimli çözücülere oldukça dayanıklı olan film, tüp ve lif olarak şekillendirilebilen, beyazımsı sert bir polihidroksi polimerdir. PVA'nın, hidrofilliği ve kolay işlenebilir olması, elektrolif çekim yöntemi ile elde edilmiş nanolifler içerisinde en yaygın kullanılan bir organik yapı olmasını sağlamıştır [55], [56].

PVA, yan grup olarak hidroksil grubu takılı olan oldukça basit kimyasal yapıya sahip bir polimerdir. Hidroliz derecesi veya bir başka deyişle polimerdeki asetat grubu içeriği, kimyasal özelliği, çözünürlüğü ve PVA'nın kristallenebilirliği üzerine önemli bir etki oluşturur. Özgül ağırlığı 1,19-1,31 g/cm³ arasındadır. Erime noktası 200 °C'dir [57], [58].



Şekil 4.1. Vinil alkolün kimyasal yapısı.



Şekil 4.2. Polivinil alkolün kimyasal yapısı.

PVA mükemmel kimyasal ve fiziksel dayanıklılığa sahiptir. Çok iyi bir yapıştırıcıdır ve diğer polimerlere göre iyi bir çözücüdür. Bu yüzden endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sulu yapıştırıcıların bileşiminde, vinil asetallerin üretiminde, televizyon tüplerinde fosforesans pigmentlerin ve boyaların bağlayıcısı olarak ve polarizlenme merceklerinde kullanılır. PVA en çok tekstil sanayinde, yapıştırıcı olarak, emülsiyon polimerizasyonlarında koruyucu kolloid olarak kullanılır. Ayrıca çimento üretiminde, suda çözünebilir ambalaj üretiminde de azımsanamayacak kadar fazla kullanılır [59].

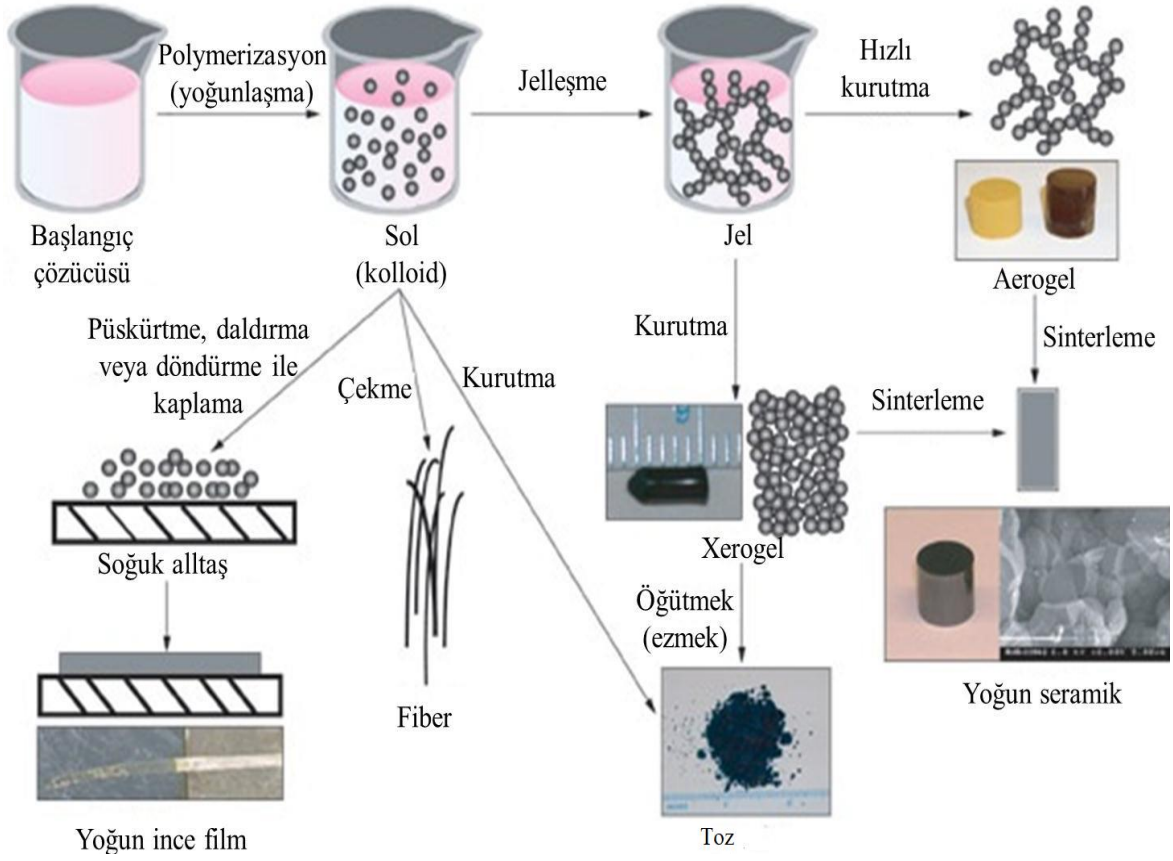
4.2. SOL-JEL YÖNTEMİ

Sol-jel kavramını açıklamak gerekirse; sol, katı malzemenin sıvı süspansiyonu içindeki haline verilen isimdir. Katı maddeler, sıvılar içinde dağılmış olarak dururlarsa bu sisteme sol denir. Moleküller arası Van der Waals ve elektriksel itme kuvvetlerinin etkisi yerçekimi kuvvetine göre daha fazla olduğu için solü meydana getiren malzemeler dibe çökmez. İşte bu molekül çözelti içinde genişleyerek büyük bir boyuta ulaşırsa bu maddeye jel denir. Katı yapının devamlılığı, jelle elastik bir özellik kazandırır.

Sol-jel yöntemi, ilk olarak, rastlantı sonucu 1846 yılında keşfedilmiştir. Ebelmen tarafından hazırlanan bu karışım o dönemlerde fizikçiler tarafından yeterli ilgiyi görmemiştir. 1939 yılında SiO₂ ile film hazırlanabileceğini ortaya koyan Geffcken, önemli bir adım atmıştır. 1953 yılından sonra sol-jel yöntemi yaygınlaşmıştır [60].

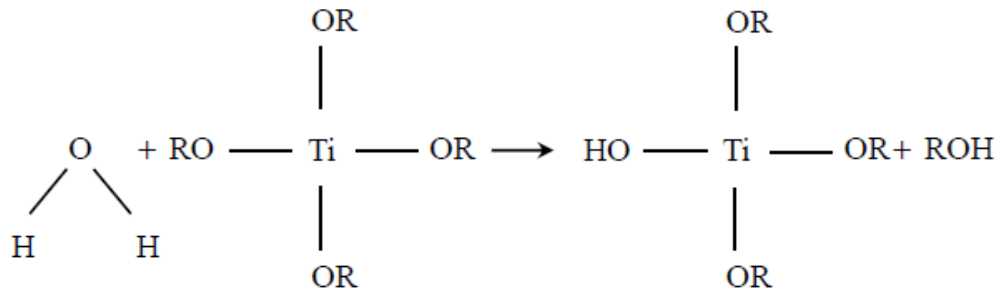
Sol-jel yönteminin birçok avantajı vardır. Bu yöntemde kullanılan alet ve malzemeler çok basittir. Bu yöntemle kaplanarak elde edilmiş filmlerin kalınlığı yüzeyin her yerinde aynıdır ve saf bir kaplama elde edilir. Enerji tasarrufu sağlar, hazırlanan ortamla etkileşimde bulunmaz ve her türlü geometrik şekle sahip malzemeler üzerine bu yöntemle kaplama yapılabilir. Ancak bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da

bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; malzemenin maliyeti fazladır ve kaplama sırasında malzeme kaybı fazla olur. Ayrıca kullanılan kimyasallar sağlığa zararlı olabilir [61].



Şekil 4.3. Sol-jel kaplama tekniği ile elde edilen malzeme türleri [60].

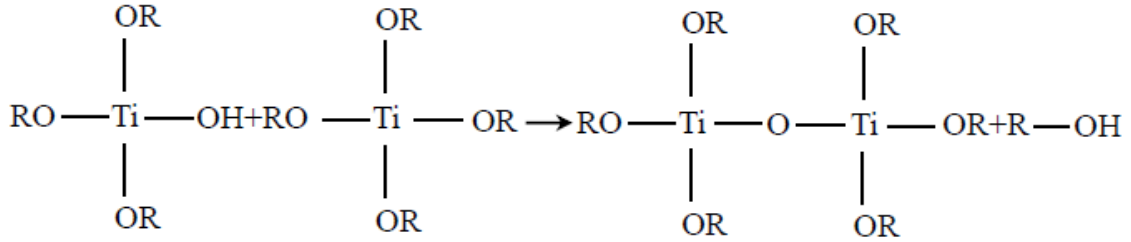
Sol-jel iki tür tepkime sonucunda oluşur. Bunlardan birincisi, hidroliz reaksiyonudur.



Şekil 4.4. Hidroliz reaksiyonu.

Şekil 4.4'te hidroliz reaksiyonunun genel ifadesi verilmiştir. ROH alkol grubu bileşigidir. H₂O ve katalizör durumuna göre OR grupları OH olana kadar reaksiyon devam eder.

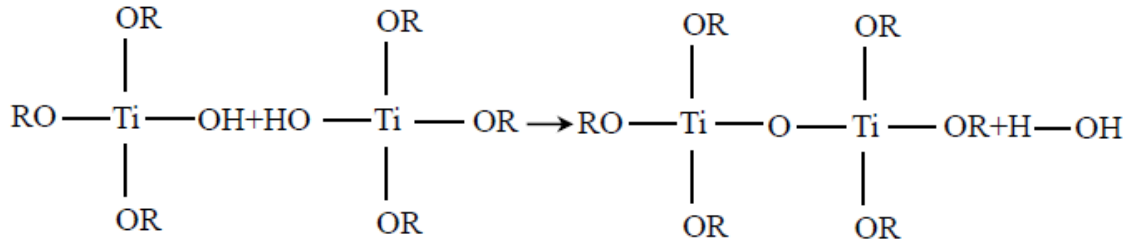
Açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, hidroliz çözülmüş olan Ti kationundan bir veya birkaç tane su molekülü tarafından protonların uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Hidroliz reaksiyonları metal tuz solüsyonlarının pH'ı değiştirilerek veya alkoksit solüsyonlarına su eklenmek suretiyle sonlandırılabilir.



Şekil 4.5. Yoğunlaştırma reaksiyonu.

İkinci reaksiyon türü ise Şekil 4.5'de gösterilen yoğunlaştırma reaksiyonudur. İlk reaksiyonda hidrolize uğramış olan iki malzeme, oksijen köprüsü ile bağlanırlar.

Eğer bileşenlerden biri hidrolize uğramışsa

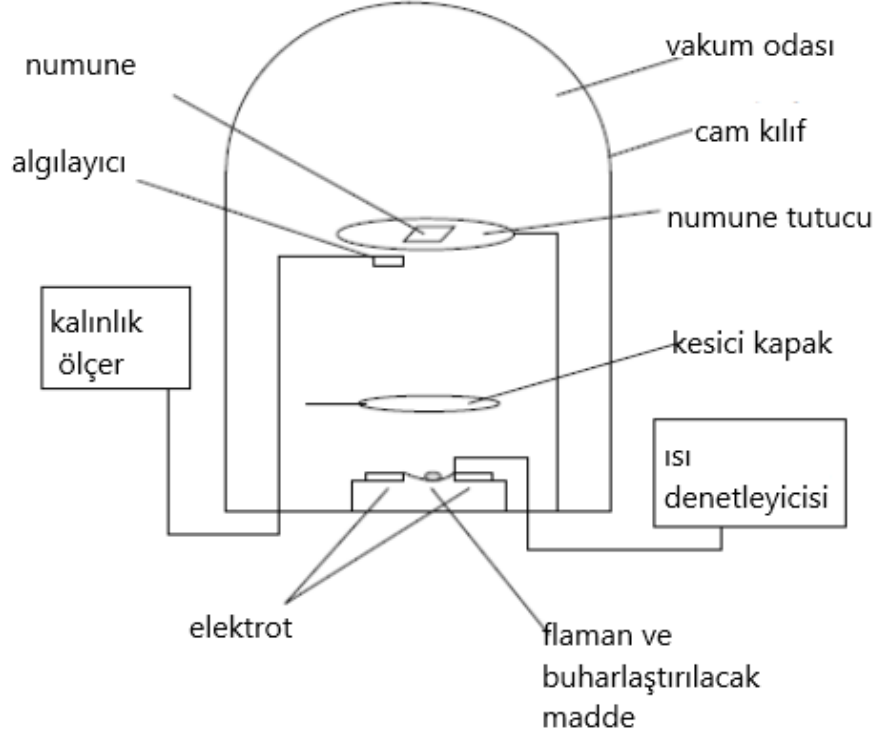


Şekil 4.6. Polimerizasyon reaksiyonu.

Şekil 4.6 biçimindeki reaksiyonlar gerçekleşir. Bu durumda reaksiyon ürünleri hidrolize uğrar. Bu ürünler tekrar birleşerek yoğunlaştırma reaksiyonunu gerçekleştirirler. Yoğunlaştırma reaksiyonuyla büyük silikon bazlı moleküller elde edilebilir. Bu olaya polimerizasyon denir [62].

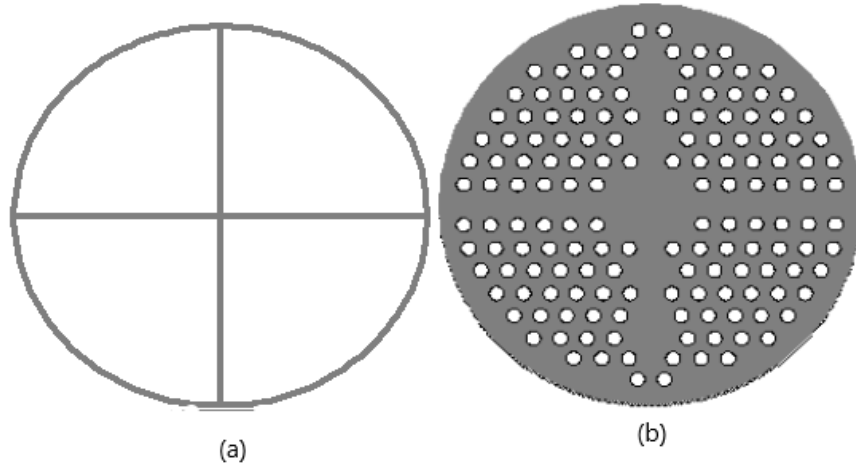
4.3. OMİK VE DOĞRULTUCU KONTAĞIN OLUŞMASI

Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapılar hazırlanırken omik ve doğrultucu kontakın oluşturulması için yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı ve bu sistemin şematik gösterimi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Omik ve doğrultucu kontak yapımında kullanılan vakum buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.

p-Si yarıiletken yaprakların arka yüzeyine omik kontak ve ön yüzeylerine doğrultucu kontaklar oluşturmak için kullanılan 1 mm kalınlık ve 2 inch (5,08 cm) çaplı bakır (Cu) maskeler sırasıyla Şekil 4.8 a ve b’de verilmiştir.



Şekil 4.8. a) Omik kontak ve b) doğrultucu kontakların oluşturulmasında kullanılan bakır maskeler.

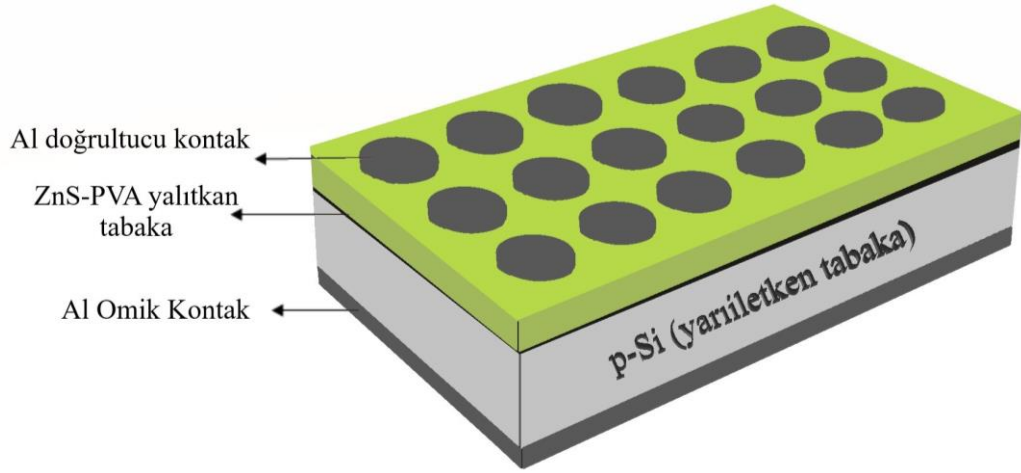
Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında kullanılan bakır maskeler ve flaman (tungsten) ultrasonik banyoda kimyasal olarak iyice temizlenip durulandıktan sonra kuru nitrojen (N₂) gazı ile kurulandı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken, mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirilerek hemen vakum ortamına alındı. Fanus hemen kapatılarak vakum 10⁻⁶ Torr değerine kadar düşürüldü. Omik kontak oluşturmak için, önce yüksek vakumlu (~10⁻⁶ Torr) metal buharlaştırma sisteminde yarıiletken yaprakların arka yüzeyine, üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile ~2000 Å kalınlığında Al (~%99,995 saflıkta) buharlaştırıldı. Omik kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan Al, vakum ortamında 500 °C'de yaklaşık 3 dakika süreyle tavlanarak Al'nin silisyum içerisine çöktürülmesi sağlandı.

4.4. Al/(ZnS-PVA)/p-Si YAPISININ HAZIRLANMASI

Çinko sülfür (ZnS) nano yapıyı sentezlemek için çinko asetat ((CH₃CO₂)₂Zn.2H₂O), polivinil alkol (PVA) ve sodyum sülfür (Na₂S.9H₂O) kimyasalları kullanıldı. 0,2 M (CH₃CO₂)₂Zn.2H₂O solüsyonu 0,87g ve 20 ml'lik kat kat damıtılmış suda, başka bir kaptaki ise 0,48 g Na₂S.9H₂O solüsyonu 20 ml distile su (0,1 M) içerisinde çözündürülerek hazırlandı. Çinko asetat çözeltisi daha sonra sodyum sülfür çözeltisine eklendi, mikrodalgaya yerleştirildi ve çözelti, mikrodalga ışınlama ile 5 dakika (600 W) ısıtıldı. Çözeltiye bir PVA konsantrasyonu (%5) ilave edildi ve ilavenin etkisi karakterize edildi. Hazırlanan süspansiyon, çökelti elde etmek için santrifüje tabi tutuldu ve reaksiyona girmeyen reaktifleri çıkarmak için iki kez damıtılmış su ve etanol kullanılarak dört kez yıkandı ve 80 °C'de bir fırında 3 saat kurutuldu.

Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) tipi yapılar (100) yönlendirme, ≈300 µm kalınlık ve 1-10 Ω cm özdirenç ile p tipi tekli Si tabaka üzerinde üretilmiştir. p-Si tabaka 10 dakika boyunca 55 °C sıcaklıkta asetonda temizlendi, sonra metanol içine daldırıldı ve deiyonize su içinde durulandı. Temizleme adımından sonra, p-Si tabakası, 70 °C'lik bir H₂O, NH₄OH ve H₂O₂ çözeltisi (65:13:13 v/v) içinde aşındırıldı ve deiyonize su içinde durulandı. Son olarak p-Si tabakası kuru azot gazı (N₂) ile kurutuldu. İyi veya düşük özdirenç omik teması elde etmek için p-Si tabaka 500 °C'de tavlandı. Ardından, numunenin iyi bir omik temas davranışına sahip olup olmadığını görmek için test edildi. Bundan sonra, hazırlanmış ZnS katkılı PVA nanokompozit yapısı, sol-jel yöntemi

kullanılarak p-Si tabakanın ön yüzüne çöktürüldü. Son olarak, aynı yüksek vakum sisteminde ZnS katkılı nanokompozit PVA'nın üzerine 1 mm çapında (alan = $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) ve $\geq 1500 \text{ \AA}$ kalınlığındaki Al noktaları doğrultucu kontak için oluşturuldu. Bu şekilde, Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) tipi yapıların imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 4.9. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının şematik gösterimi.

4.5. DENEYSEL ÖLÇÜMLERDE KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZLARI

4.5.1. Kapasitans-Voltaj ve İletkenlik-Voltaj Ölçüm Sistemi

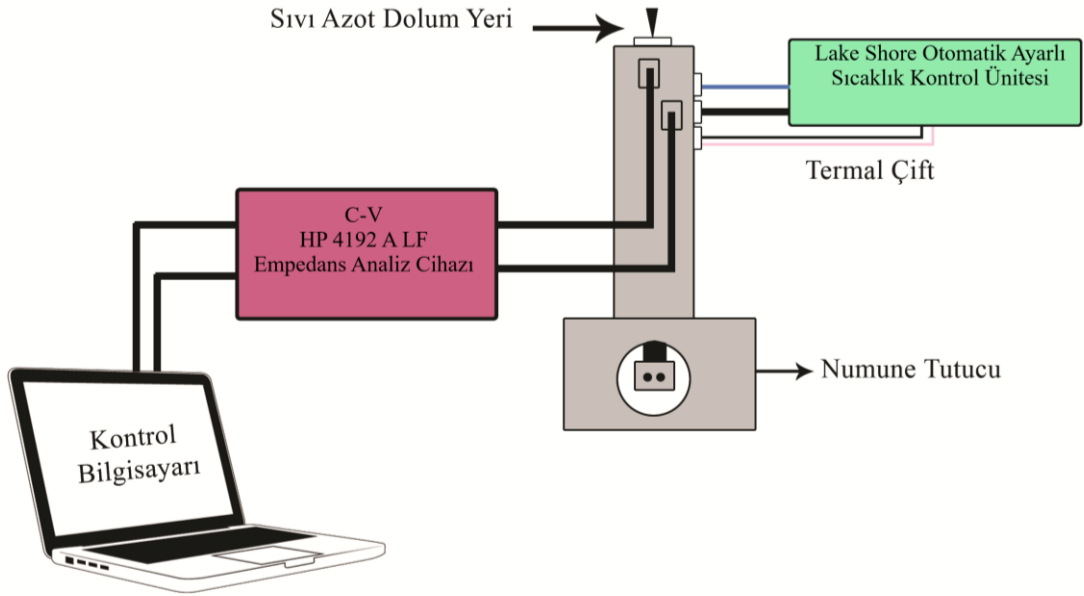
Kapasitans-voltaj ölçümlerini almak için Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizörü (5 Hz-13 MHz) kullanıldı (Resim 4.1). HP 4192 LF empedans analizörünün frekans ölçümleri sınırları 5 Hz-13 MHz olup, osilatör genlik aralığı 5 mV-1 V arasındadır. Doğru akım, ileri ve ters besleme özelliğine sahip cihaz $\pm 35 \text{ V}$ arasında sığa (C), iletkenlik (G) ve yük (Q) gibi temel birçok elektriksel parametrenin ölçülebilmesi mümkündür. Aynı anda empedans, admitans, kapasitans, indüktans ölçülebilmekle birlikte, aralarındaki faz değerlerini ve kalite faktörlerini de ölçülebilmektedir. $\pm 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 arayüzü veri yoluna sahip olup test point yazılımı yardımı ile bilgisayar ile kontrol edilebilir.



Resim 4.2. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi, Janis vpf-475 kriyostat.

4.6. AL/(ZNS-PVA)/P-Sİ (MPS) YAPISININ DENEYSEL ÖLÇÜMÜ

Hazırlanan Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapıların elektriksel ölçümlerini gerçekleştirmek için, önce gümüş iletken pasta yardımıyla kriyostatın tutucusu büyüklüğünde ve yaklaşık 1 mm kalınlıkta hazırlanan bakır tutucular üzerine ve üst elektrotlardan kontaklar alınarak kapasitans-voltaj ölçümlerini almak için Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörüne bağlantısı sağlandı. Bu yapıların dielektrik özellikleri, elektrik modülü ve elektrik iletkenlik (σ) değerleri oda sıcaklığında ve 10 kHz-5 MHz frekans aralığında gerçekleştirilen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ ω -V) ölçümleri sayesinde elde edildi. Daha sonra ön doğrultucu kontaklarda gümüş kaplı ince Cu teller kullanılarak yine gümüş pasta yardımıyla üst elektrotlardan kontaklar alınarak kriyostat tutucu üzerine monte edildi. Lake Shore sıcaklık kontrol analizörü yardımıyla sıcaklık değeri 140 K-340 K aralığında değiştirilerek Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapıların kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ ω -V) ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak elde edildi. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısı için kullanılan deneysel ölçüm sistemi Şekil 4.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



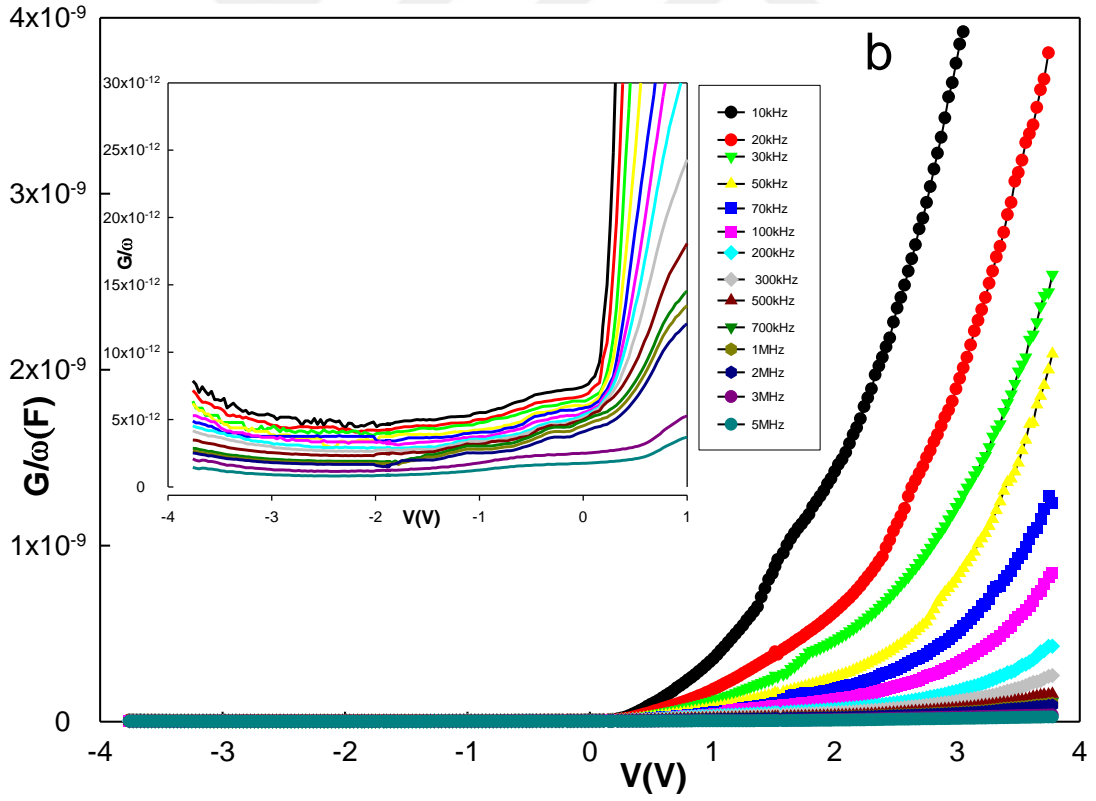
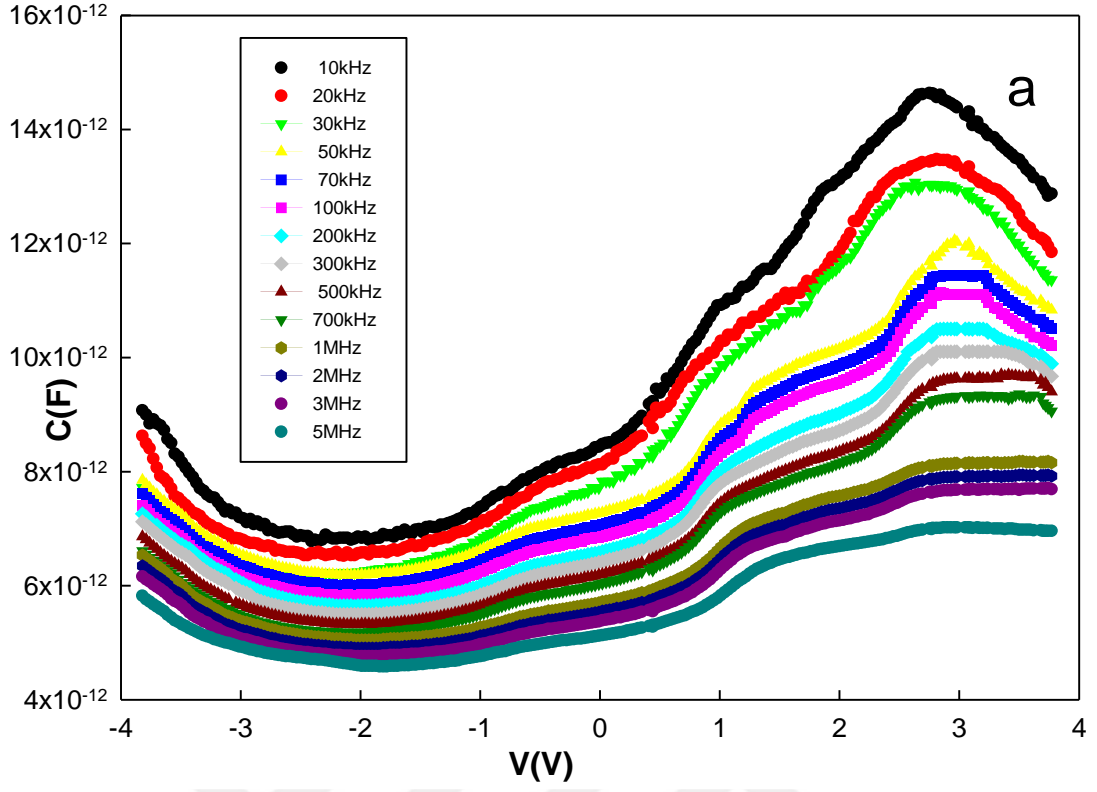
Şekil 4.10. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısı için kullanılan deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON

5.1.1. Frekansa Bağlı Elektriksel Karakterizasyon

Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında alınan kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri 10 kHz-5 MHz'lik frekans aralığında ve ± 4 V voltaj aralığında gerçekleştirildi. Ölçüm sonucu elde edilen eğriler Şekil 5.1 a ve b'de gösterilmiştir. C-V ve G/ω -V eğrilerinde metal-yalıtkan/oksit/yarıiletken (MIS veya MOS) yapılarıdakine benzer şekilde birikim tükenim ve tersinim bölgeleri açıkça görülmektedir [63]. Deneysel C-V ve G/ω -V ölçüm sonuçları kullanılarak MPS yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplandı. Elektriksel özelliklerden arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s) gibi temel parametreler frekansa bağlı olarak hesaplandı. Kapasite ve iletkenlik değerlerinin arayüzey veya dipol polarizasyonları, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve seri direncin (R_s) varlığına bağlı olarak frekans ve ön gerilimin kuvvetli bir fonksiyonu olduğu Şekil 5.1'den anlaşılmaktadır. Arayüzey veya dipol polarizasyonu ve N_{ss} düşük frekanslarda oldukça etkindir. Bunun nedeni arayüzeydeki yüklerin düşük frekanslarda elde edilen C-V veya G/ω -V ölçümleri için periyot değeri ($T=1/2\pi f$), tuzaklardaki taşıyıcıların yaşam süresinden büyük olmasıdır. Bu nedenle çok küçük frekanslarda ($f < 50$ Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyali kolaylıkla takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda ($f > 1$ MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyali takip edemez [27], [45], [64], [65]. Buna ek olarak, düşük frekanslarda, dipollerin etrafını dolanmaya yetecek kadar zamanı vardır. 3-4 V aralığında C'nin değeri azalırken, yapının indüktif davranışı nedeniyle G/ω değeri artar [23], [33]. Bu bölgede C'nin azalması ve G/ω 'nın artması şeklindeki bu davranış N_{ss} ve R_s 'nin varlığına bağlı olarak yapının indüktif davranışına atıf yapılabilir. Başka bir deyişle, birikim bölgesindeki voltaj arttıkça C'nin değeri azalırken, G/ω değeri artar. Öte yandan, tükenim bölgesinde verilen bir voltaj değeri için kapasitans, N_{ss} ve ara yüzey polimer tabakasının varlığına bağlı olarak azalan frekansla birlikte artar.



Şekil 5.1. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 300 K'de ve farklı frekanslarda a) Kapasite-Voltaj ($C-V$) b) İletkenlik-Voltaj ($G/\omega-V$) eğrileri.

R_s , MPS yapılarında çok önemli bir parametredir ve gerilim özelliklerine karşı C ve G/ω 'nın ideal davranışını etkiler. R_s 'nin reel değeri, çoğunlukla Nicollian ve Brews yöntemini kullanarak güçlü birikim bölgesinde ölçülen C_m ve G_m değerlerinden elde edilebilir [5]. MIS yapısının gerçek seri direnci yüksek frekansta ($f > 1$ MHz) çizilen C-V ve G/ω -V eğrilerinin kuvvetli birikim bölgesindeki kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerleri kullanılarak hesaplanabilir [2]. Seri direnci belirlemek için, dc gerilim -4 V değerinden +4 V değerine kadar 50 mV adımlarla değiştirilerek tersinim bölgesinden birikim bölgesine kadar C-V ve G/ω -V eğrileri farklı frekanslar için elde edildi. Paralel RC devresini kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli birikim altındaki eşdeğer devrenin toplam admittans (Y_m), verilir.

$$Y_m = \frac{1}{Z_m} = G_m + j\omega C_m \quad (5.1)$$

Admittans gerçel ve sanal kısımları karşılaştırarak, R_s değeri aşağıdaki şekilde elde edilebilir [2], [66].

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (5.2)$$

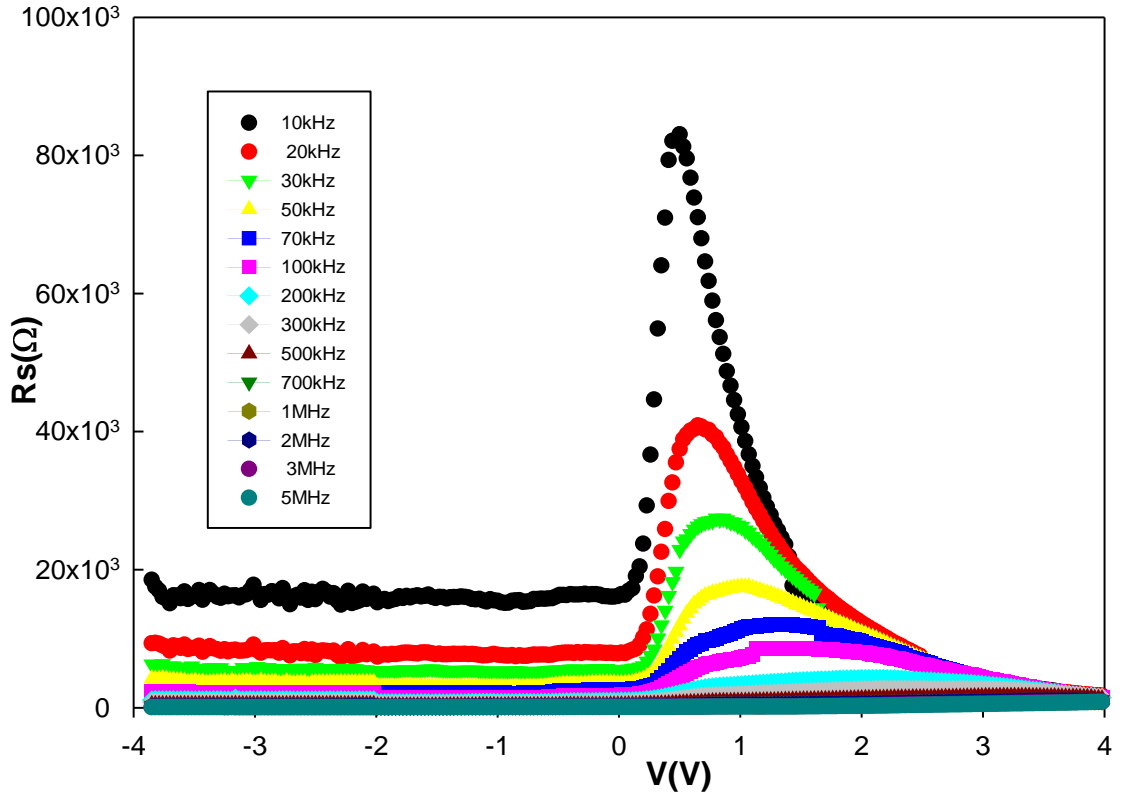
Burada C_m ve G_m kuvvetli birikim bölgesindeki ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerlerini temsil eder. Kuvvetli birikim bölgesindeki kapasitans (C_m) ile R_s ve yalıtkan tabakanın kapasitans (C_{ox}) arasındaki ilişki,

$$C_m = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 + C_{ox}^2)} \quad (5.3)$$

eşitliği ile verilir. Denklem (5.2) ve Denklem (5.3) kullanılarak C_{ox} değeri aşağıdaki gibi elde edilir:

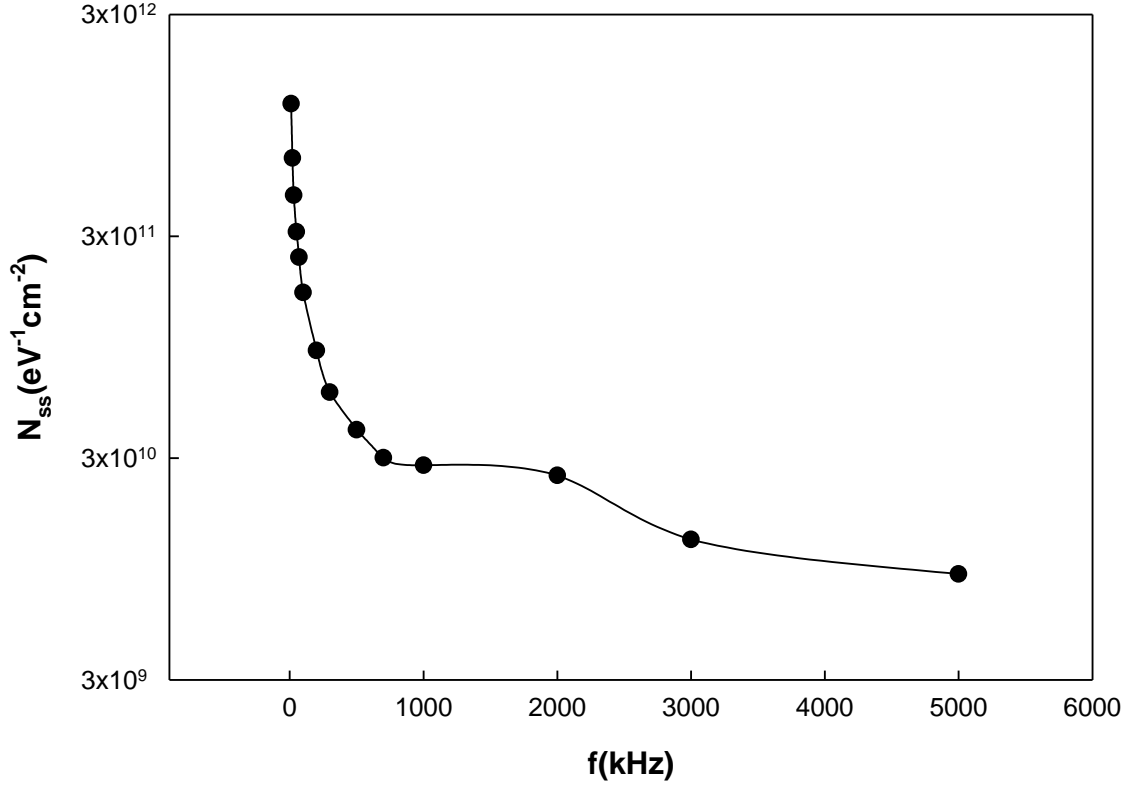
$$C_{ox} = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (5.4)$$

Burada $\epsilon_i = 3,8\epsilon_0$ [31] ve $\epsilon_0 (= 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm) sırasıyla yalıtkan arayüzey tabaka ve boşluğun geçirgenlik sabitleridir.



Şekil 5.2. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 300 K’de ve farklı frekanslarda R_s -V eğrisi.

Şekil 5.2’deki R_s -V grafiğinde, N_{ss} ’in varlığına bağlı olarak ileri doğru beslemede bir pik verdiği ve yüksek frekanslarda kaybolduğu görülmektedir. N_{ss} yüksek frekanslarda ac sinyalini takip edemez. Bu pikin büyüklüğü, frekans değerleri azaldıkça ve uygulanan ön gerilim negatife doğru kaydıkça N_{ss} ’in yeniden yapılandırılması ve yeniden düzenlenmesi nedeniyle artar. Şekil 5.2’den de net bir şekilde görülmektedir ki; seri direnç hem frekansa hem de voltaja kuvvetlice bağlıdır ve bölgeden bölgeye değişmektedir R_s değerinin kuvvetli birikim bölgesi veya pozitif gerilimler için frekanstan neredeyse bağımsız olduğu ise açıktır.



Şekil 5.3. Oda sıcaklığında Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için Hill-Coleman yönteminden elde edilen N_{ss} 'in enerji dağılımı profili.

Bir diğer önemli parametre ise N_{ss} 'dir. N_{ss} 'in frekansa bağlı profili Şekil 5.3'te verildi. Si bant aralığında Si/ZnS-PVA arasına yerleşmiş arayüzey durumları (N_{ss}), Şekil 5.1 a ve b'de farklı frekanslar için çizilen C-V ve G/ω -V eğrilerinden faydalanılarak Hill-Coleman metodu ile elde edildi. Bu metotta yapılan hesaplamalar her frekans değeri için yapılabildiği için her frekans değeri için bağıl bir durum yoğunluğu elde edilebilir. Eğer frekans yeterince yüksekse, arayüzey durumları bu yüksek frekansı takip edemeyeceğinden yoğunluk düşük çıkacaktır. Uygulanan uyarma frekansı yeterince düşükse, bu durumda arayüzey durumlarının çok büyük bir yoğunluğunun bu frekansı takip edebileceği varsayımdan arayüzeydeki tüm durumların yoğunlukları hesaplanmış olur. Düşük frekanslarda hem kapasitans hem de iletkenlik değerlerinde ilave bir katkıya sahip olan arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) Hill-Coleman metodundan aşağıdaki eşitlikle elde edilebilir [12], [66]–[68].

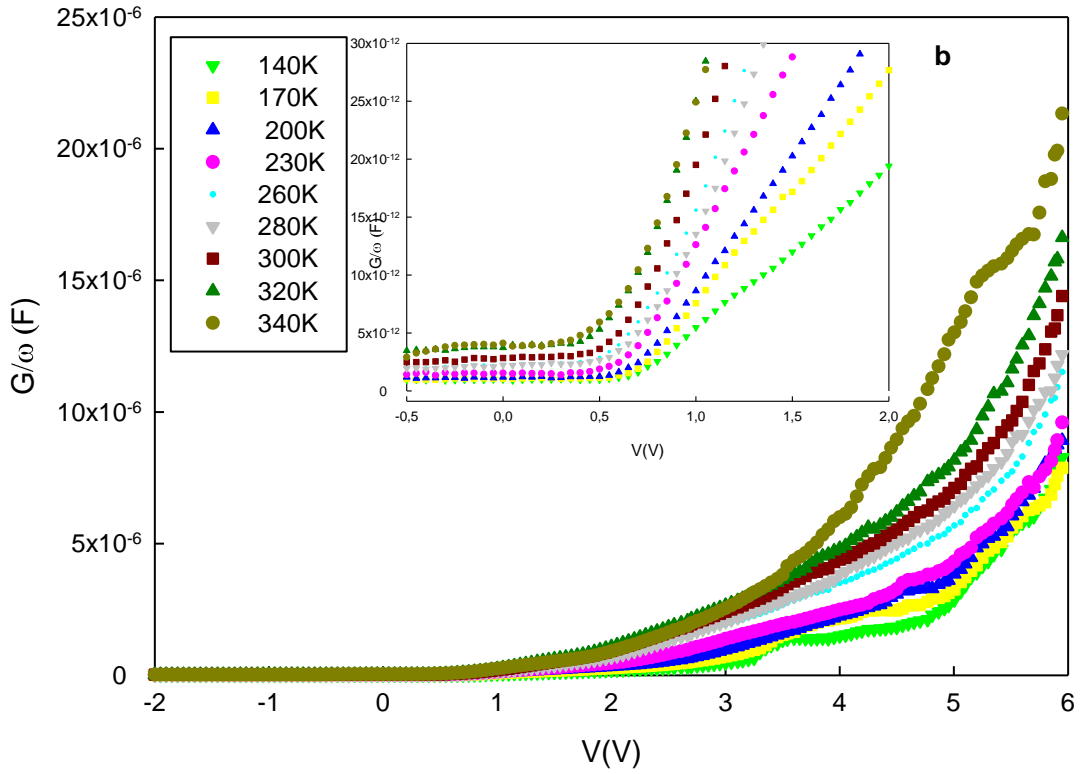
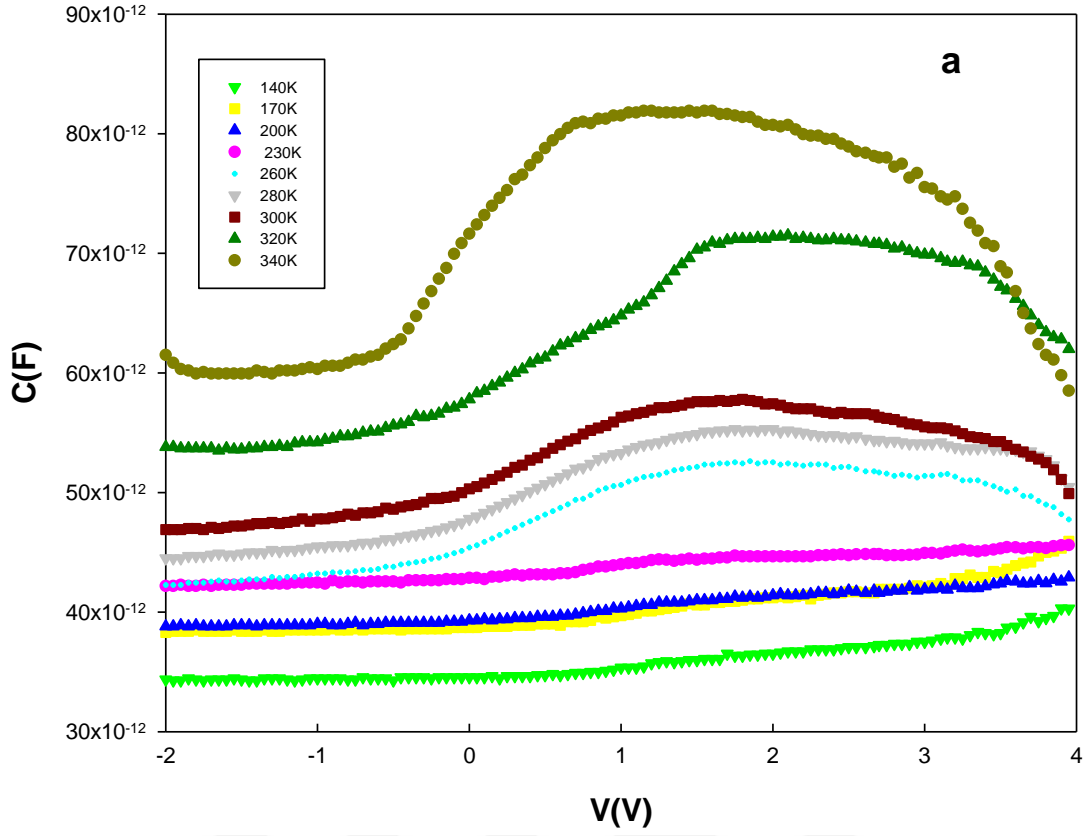
$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \left[1 + \frac{G_m / \omega}{\left(\frac{G_m / \omega}{C_{ox}} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_{ox}} \right)^2} \right] \quad (5.5)$$

Burada A, yapının doğrultucu kontak alanı, ω açısal frekans(= $2\pi f$), G_m/ω ise ölçülen kapasitansın pik değerine karşılık gelen iletkenlik ve C_{ox} ise yalıtkan tabakanın kapasitansdır. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, N_{ss} değeri artan frekansla neredeyse katlanarak azalmaktadır. Düşük frekanslarda diyot kapasitansında net bir artış gözlemlenmiştir, ancak yüksek frekanslarda kapasitans neredeyse frekanstan bağımsızdır.

Düşük frekanslarda kapasitans değerindeki artış, arayüzey durum yoğunluğunun frekans üzerine güçlü bağımlılığından kaynaklanmaktadır [36]. Düşük frekanslarda N_{ss} 'in yüksek değerleri, ac sinyali takip eden Si ile dengede olan N_{ss} 'den kaynaklanan yüksek kapasitansa atfedildi.

5.1.2. Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyon

MPS, MIS veya MOS tipi yapılar gibi yarıiletken aygıtların yalnızca bir sıcaklık ve gerilimde veya dar aralıktaki C-V ve G/ ω -V ölçümleri, bu yapıların elektriksel ve dielektrik özellikleri hakkında detaylı bilgi veremez. Bu nedenle bu çalışmada Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı 500 kHz frekansta ve 140 K-340 K gibi geniş bir sıcaklık aralığında incelenmiştir

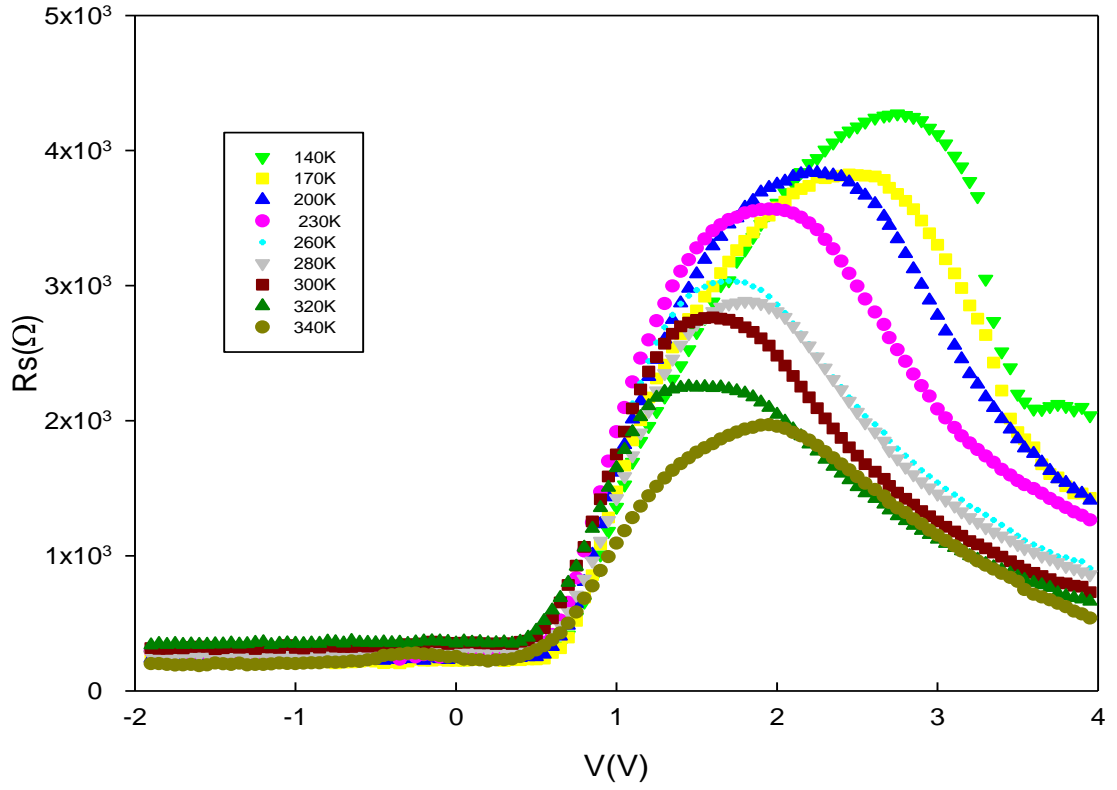


Şekil 5.4. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 500 kHz’de ve farklı sıcaklıklarda a) Kapasite-Voltaj (C-V) b) İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) eğrileri.

Şekil 5.4’de geniş sıcaklık aralığında çizilen C-V ve G/ω-V eğrileri görülmektedir. Bu çalışmada ölçümler 500 kHz’de alınmıştır çünkü daha yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz), arayüzey durumlarından kapasitans ve iletkenliğe gelen katkı minimum seviyede olup ihmal edilebilir. Bu durumda yüksek frekanslarda N_{ss} 'in etkisi azalacağından C ve G değerlerinin ölçülmesine herhangi bir katkı sağlanamaz. R_s değeri ise C-V ve G/ω-V eğrilerinde özellikle birikim bölgesi üzerinde etkilidir [15], [20], [69], [70].

Şekil 5.4 a ve b’de gösterildiği gibi hem C-V hem de G/ω-V karakteristikleri birikim, tükenim ve tersinim bölgelerini içermektedir. Ölçülen tüm aralıkta artan sıcaklık ile C ve G /ω değerlerinin arttığı açıktır.

R_s 'nin MPS yapılar üzerinde önemli bir parametre olması dolayısıyla sıcaklık ve voltajın bir fonksiyonu olarak hesaplanması oldukça önemlidir. Frekansa bağlı elektriksel karakterizasyon incelemesinde verilen denklem (5.2) ile R_s 'nin gerilime bağlı olarak nasıl hesaplanacağı verilmiştir. Şekil 5.5’de ise R_s 'nin farklı sıcaklık değerlerinde nasıl değiştiği verilmiştir. Şekil 5.5’de R_s -V grafiklerinde her bir sıcaklık için bir pik verir ve pik konumu artan sıcaklık ile negatif ön gerilim bölgesi yönünde değişir. Yükselen sıcaklık değerleriyle birlikte pik değeri azalır; bu da tuzak yüklerinin yüksek sıcaklıklarda tuzaklardan kaçmak için daha az enerjiye ihtiyaç duyduğunu gösterir. R_s 'nin reel değeri, Nicollian ve Brews'e göre yeterli yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) güçlü birikim bölgesine karşılık gelmektedir [5], [23], [33], [35], [71], [72].



Şekil 5.5. Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapısının 500 kHz’de ve farklı sıcaklık değerlerinde R_s -V eğrisi.

5.2. DİELEKTRİK KARAKTERİZASYON

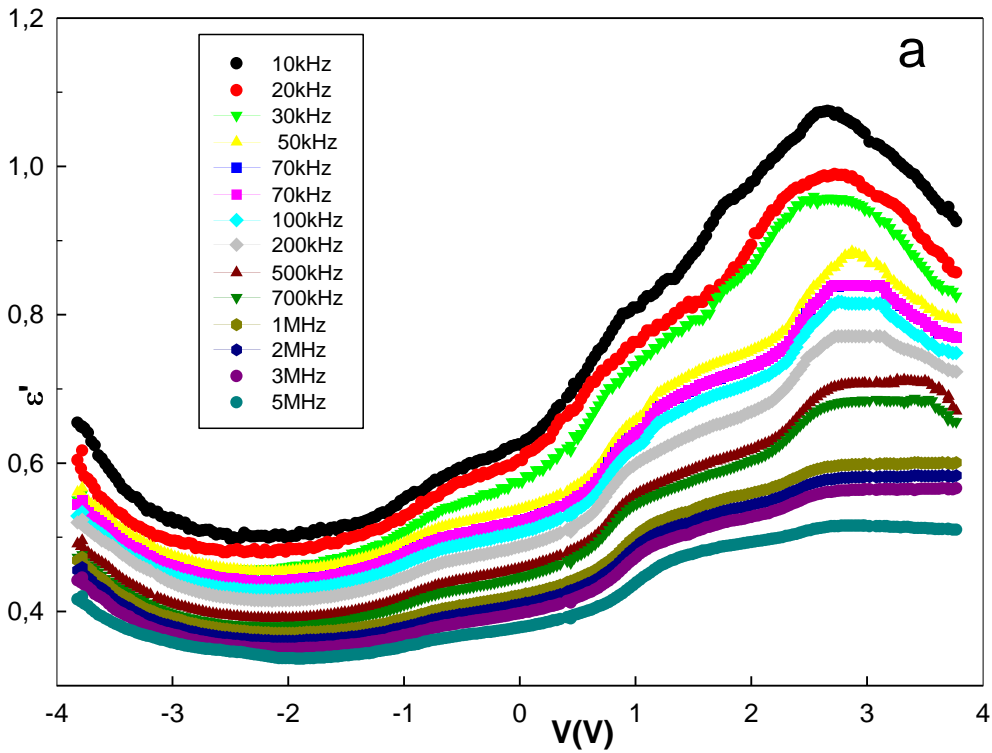
5.2.1. Frekansa Bağlı Dielektrik Karakterizasyon

Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının dielektrik sabiti (ϵ') dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), reel ve sanal elektrik modülü (M' ve M'') ve ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) gibi ana dielektrik parametreleri ölçülen C ve G verileri kullanılarak araştırılmıştır. Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') Denklem (5.6) ile elde edilebilir.

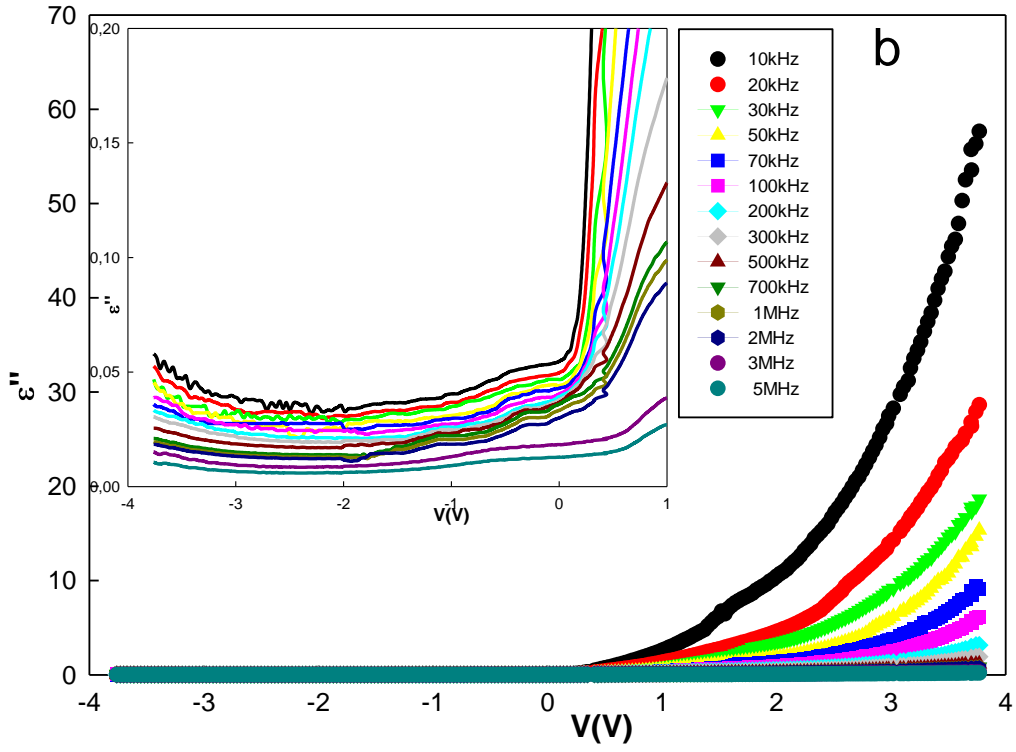
$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{C_m d}{A\epsilon_0} - j \left(\frac{G_m d}{\omega A\epsilon_0} \right) \quad (5.6)$$

Denklem (5.6) ifadesinde j -1’in karekökü olup sanal bir sayıdır. Ölçülen Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının kapasitans ve iletkenliği C_m ve G_m , doğrultucu temas alanı A, arayüzey ZnS-PVA tabakasının kalınlığı d, boş uzayın dielektrik sabiti ϵ_0 ($= 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm) olarak verilmiştir.

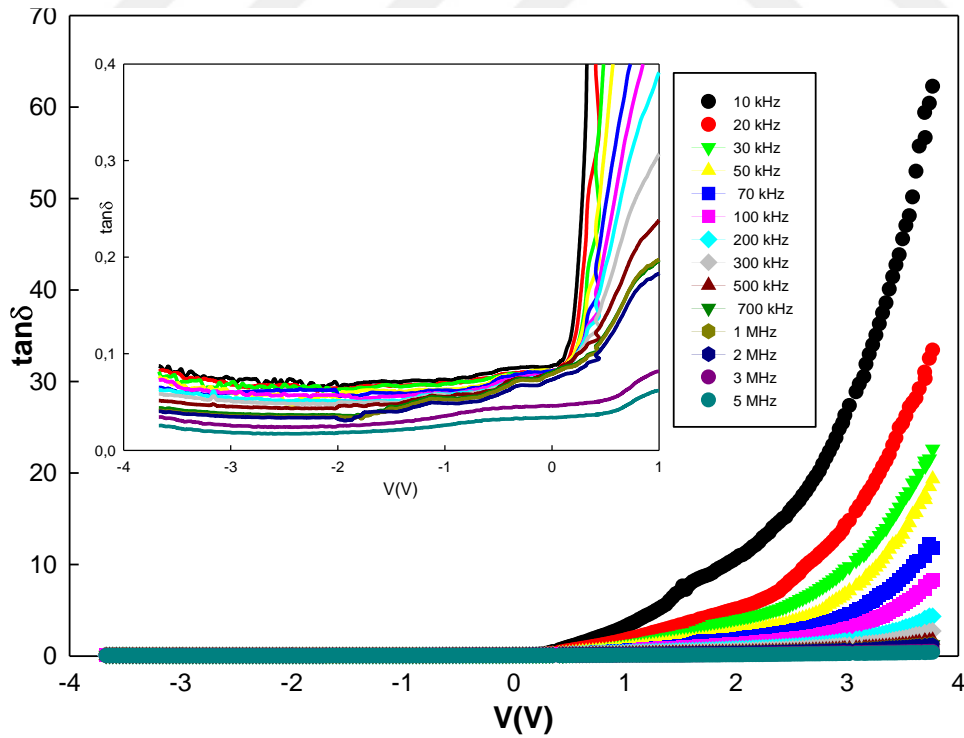
Şekil 5.6 a ve b'de, ϵ' ve ϵ'' nün geniş bir frekans aralığında (10kHz-5MHz) voltaja bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Deneysel sonuçlar vasıtasıyla ϵ' ve ϵ'' değerlerinin, özellikle tükenim ve birikim bölgelerinde gerilim ve frekansın kuvvetli bir fonksiyonu olduğu ortaya konmuştur. Bu bölgelerde ϵ' ve ϵ'' değerleri artan frekansla azalır ve tersinim bölgesinde neredeyse sabit kalırlar. Bu ölçümler yeterince yüksek frekansta ($f \geq 0,5$ MHz) yapıldığında, tuzaklardaki veya arayüzey durumlarındaki yüklerin taşıyıcı ömrü (τ) periyot süresinden ($T = 1 / 2\pi f$) çok daha fazla hale gelir ve bu yüzden bu yükler harici bir ac sinyali takip edemez hale gelirler. Sonuç olarak, ϵ' ve ϵ'' dağılımı, düşük frekanslarda oldukça yüksektir ve Maxwell-Wagner ve alan yük polarizasyonlarına atıf yapılabilir [34], [73], [74].



Şekil 5.6. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda a) dielektrik sabiti (ϵ') ve b) dielektrik kayıp (ϵ'') voltaja bağlı eğrileri.



Şekil 5.6. (devam). Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda a) dielektrik sabiti (ϵ') ve b) dielektrik kayıp (ϵ'') voltaja bağlı eğrileri.

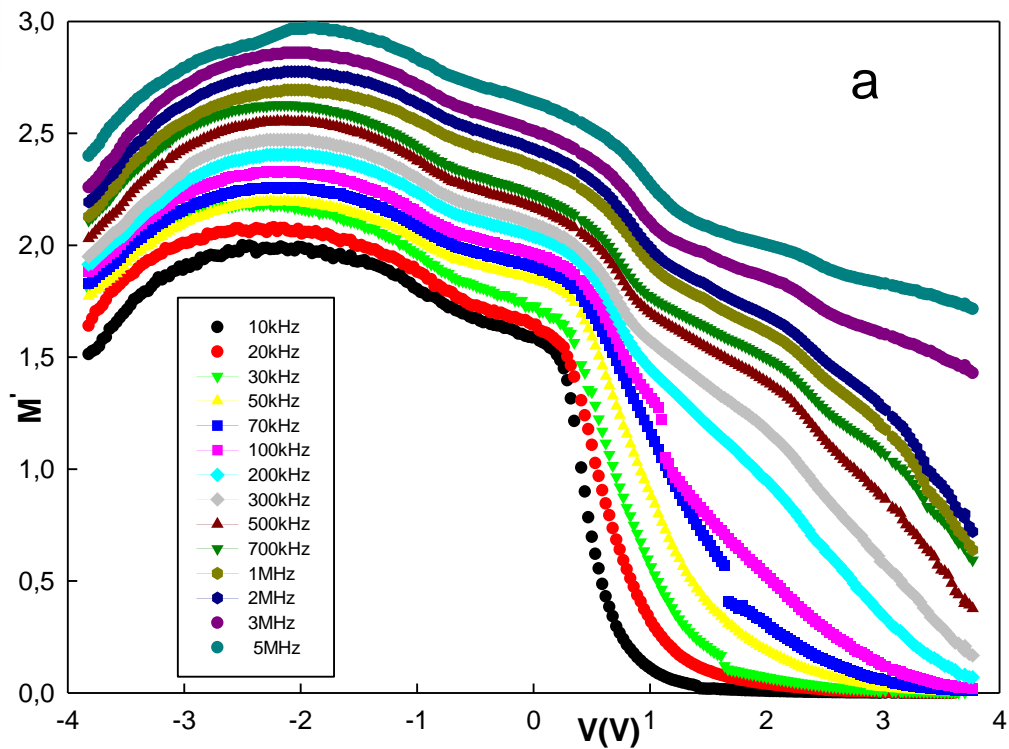


Şekil 5.7. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığındaki kayıp açısı ($\tan\delta$)'nın farklı frekanslarda voltaja bağlı eğrileri.

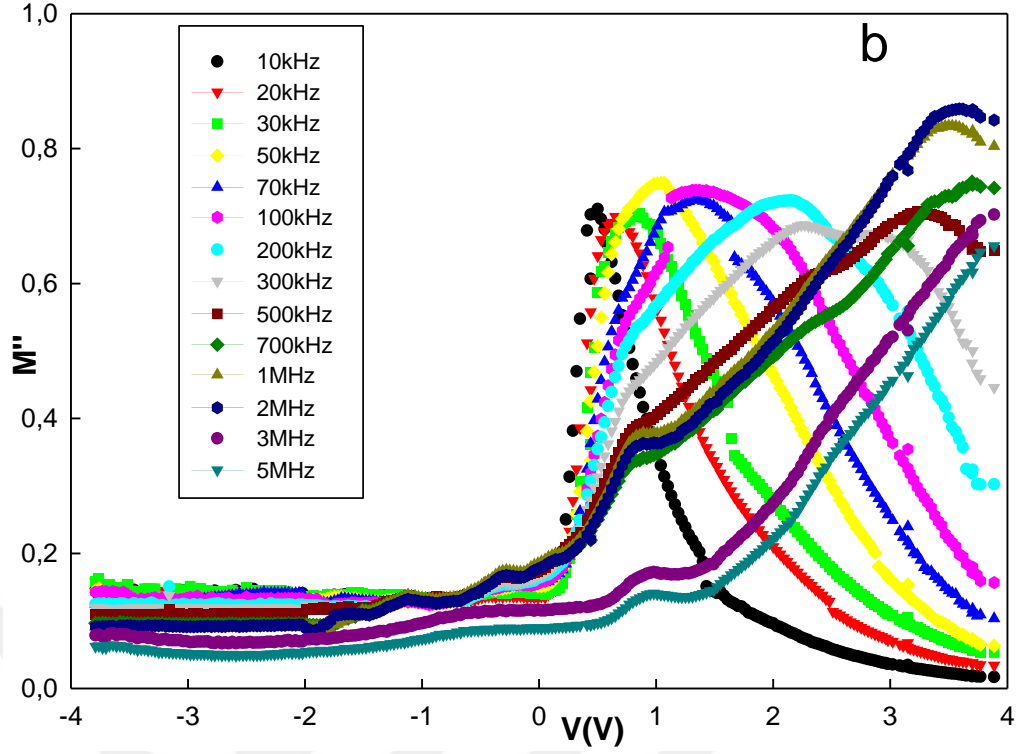
Dielektrik kayıp tanjantın değeri Denklem (5.7) ile bulunabilir. Bu eşitlikten de görüldüğü gibi $\tan\delta$ 'nın değeri ε' değerinin ε'' 'ne oranı şeklinde bulunur.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5.7)$$

Şekil 5.7'de $\tan\delta$ 10 kHz-5 MHz aralığındaki frekanslarda voltaja bağlı olarak çizilmiştir. Şekil 5.7'de $\tan\delta$ 'nın değeri artan frekanslarla birlikte azaldığı ve bununla birlikte tersinim bölgesinde (negatif ön gerilim voltajı altında) sabit kaldığı görülmektedir. Elektriksel iletkenlikteki (σ_{ac}) artış, girdap akımında artışa neden olur ve bu da kayıp açısı enerjisinin artmasını sağlar [75].



Şekil 5.8. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda a) elektrik modülün gerçek kısmı (M') ve b) elektrik modülün sanal kısmı (M'')'nın voltaja bağlı eğrileri.

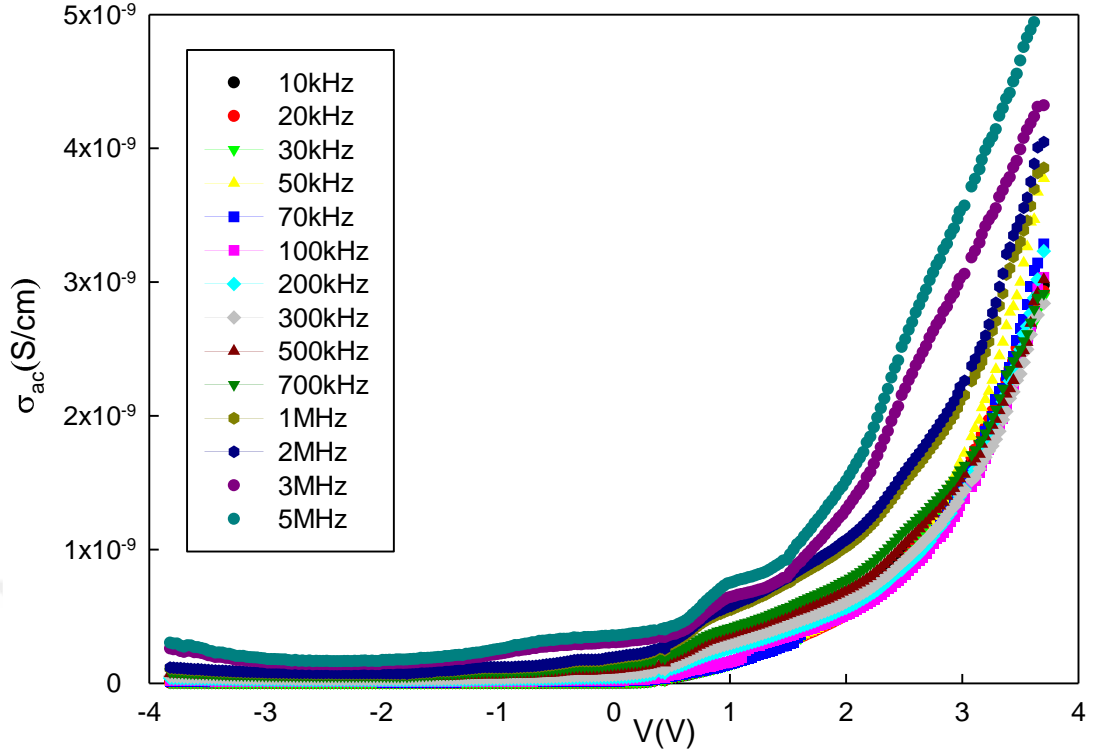


Şekil 5.8. (devam). Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığında ve farklı frekanslarda a) elektrik modülün gerçek kısmı (M') ve b) elektrik modülün sanal kısmı (M'')'nın voltaja bağlı eğrileri.

Elektrik modülü (M^*)'nün gerçek (M') ve sanal (M'') kısmı dielektrik sabitinin gerçek ve sanal değerlerinin (ϵ' ve ϵ'') yardımıyla Denklem (5.8)'deki gibi hesaplanabilir.

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (5.8)$$

Şekil 5.8 a ve b, 10 kHz-5 MHz frekans aralığında Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının M' ve M'' eğrilerinin voltaja bağlı değerlerini göstermektedir. Şekil 5.8 a ve b'de görüldüğü gibi, M' ve M'' değerleri frekans ve voltajın kuvvetli bir fonksiyonu olarak bulunmuştur. M' ve M'' değerleri gevşeme işlemi nedeniyle $M_\infty \approx 1/\epsilon_\infty$ değerine karşılık gelen maksimum sabit değere ulaşır. M' değerinin frekans ve voltaj arttıkça azaldığı bununla beraber M'' değerinin de her frekans için bir pik verdiği açıkça görülmektedir. Frekans spektrumuna karşı M'' pik frekansının altındaki frekans bölgesi, yük taşıyıcılarının uzun mesafeli olarak hareket halindeki aralığını belirler [74].



Şekil 5.9. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliğinin (σ_{ac})'nin farklı frekanslarda voltaja bağlı eğrileri.

Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) Denklem (5.9)'daki gibi elde edilmiştir ve farklı frekanslarda voltaja bağlı olarak Şekil 5.9'daki grafiği çizilmiştir.

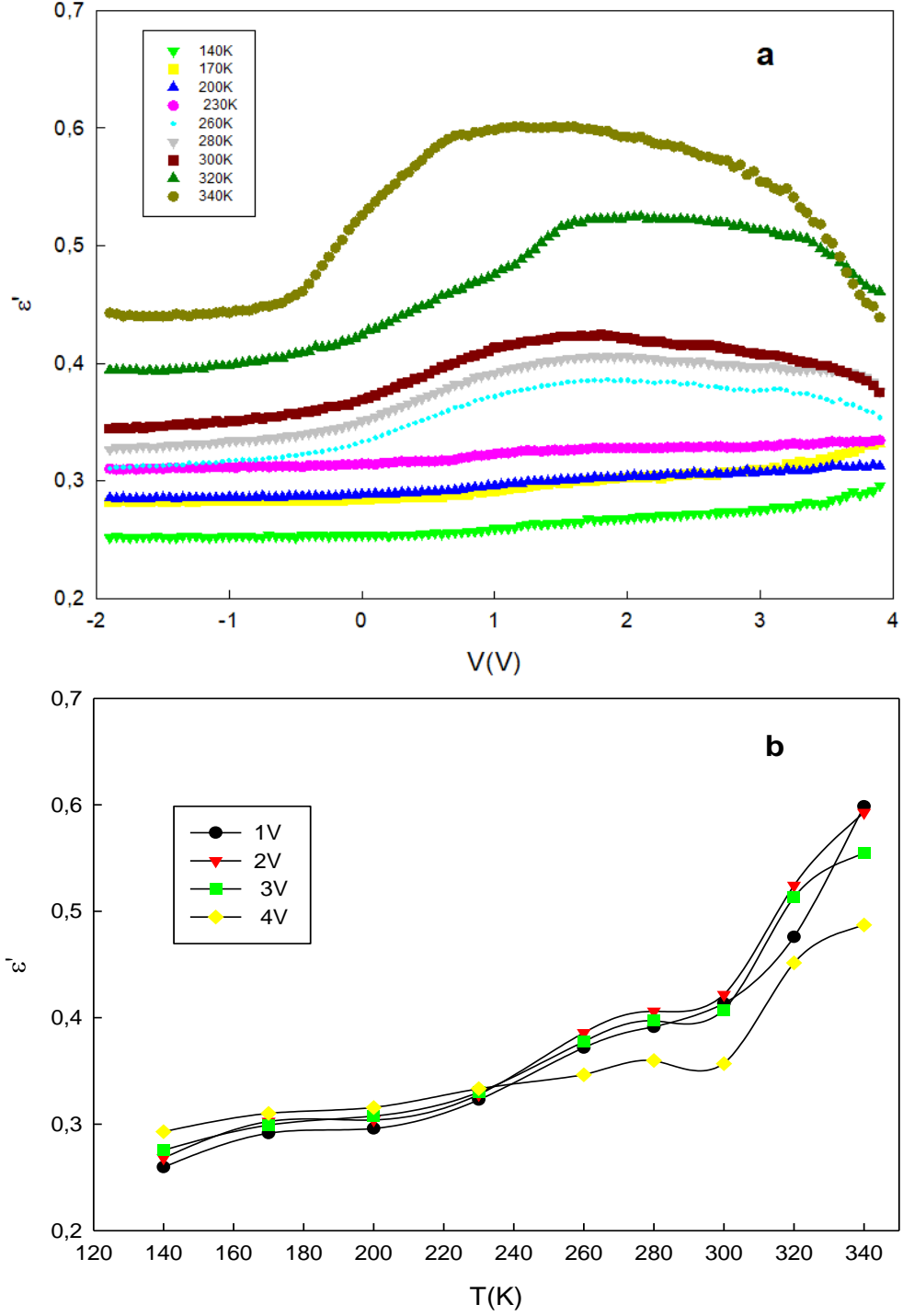
$$\sigma_{ac} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \quad (5.9)$$

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi σ_{ac} değeri frekans arttıkça polarizasyonun azalması ve gerilim ile frekansın artması nedeniyle artar [34], [76], [77].

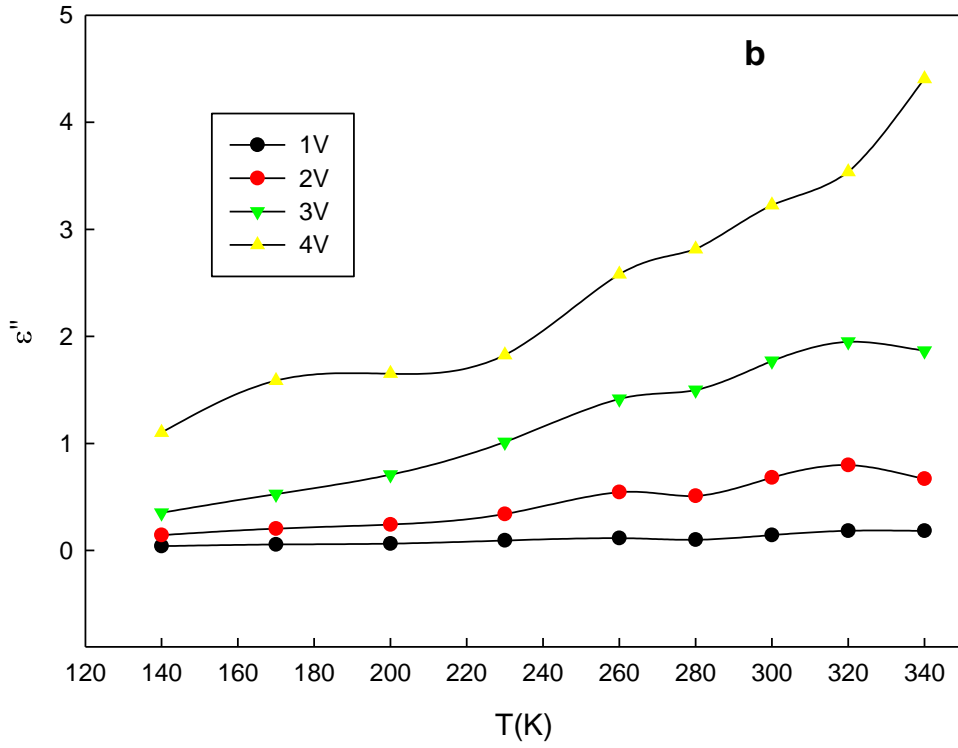
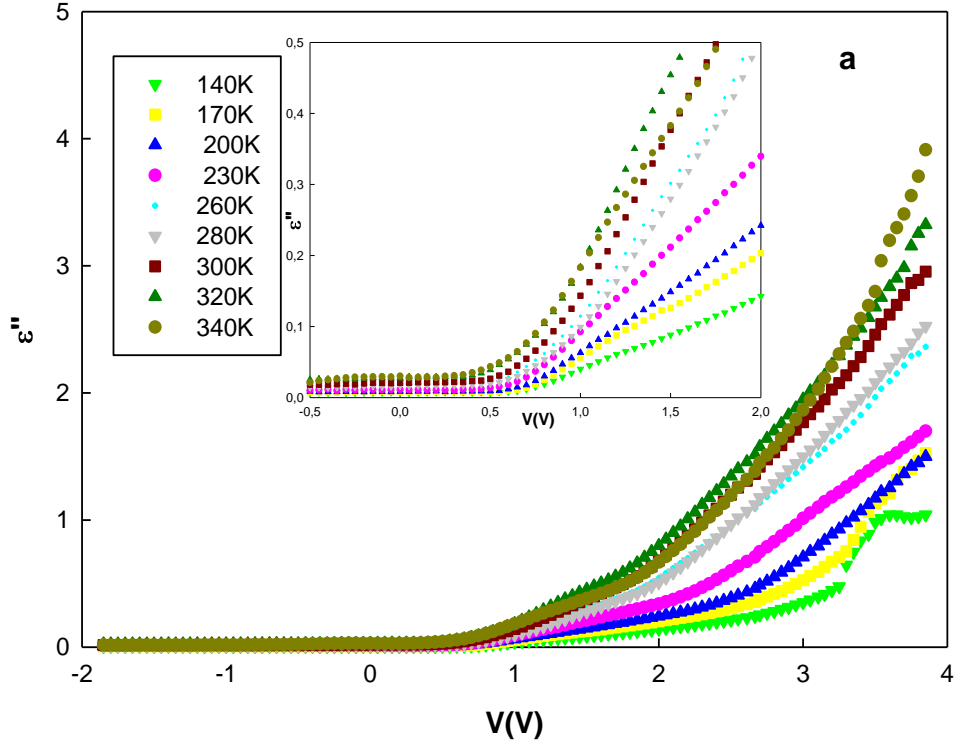
5.2.2. Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Karakterizasyon

Ara yüzey izolatörü veya polimer tabakası bulunmayan MS yapısının ya da bulunan MPS yapısının hem elektriksel özelliklerinin hem de dielektrik özelliklerinin sıcaklığa ve voltaja bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının temel dielektrik parametreleri olan, $\tan\delta$, M' , M'' ve σ_{ac} , geniş sıcaklık ve voltaj aralığında ölçülen C ve G verileri kullanılarak belirlenmiştir.

Ölçümler 500 kHz'lik frekans değerinde 140 K-340 K gibi geniş bir sıcaklık aralığında ve -2 V ile +4 V gerilim aralığında incelenmiştir. Kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti formülü elektriksel ve dielektrik özellikleri tanımlamak için kullanılmaktadır. ϵ^* dielektrik geçirgenlik sabiti formülü admittans ölçümlerinden hesaplanabilir.



Şekil 5.10. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının a) sıcaklığa b) voltaja bağlı ϵ' eğrileri.

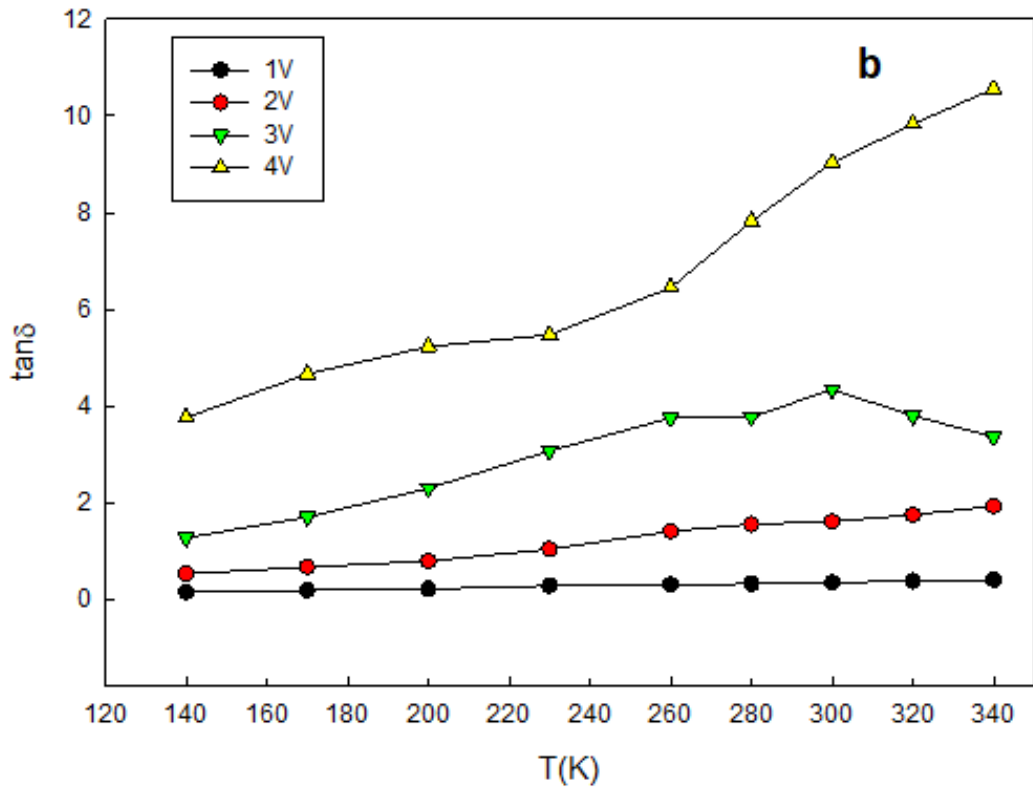
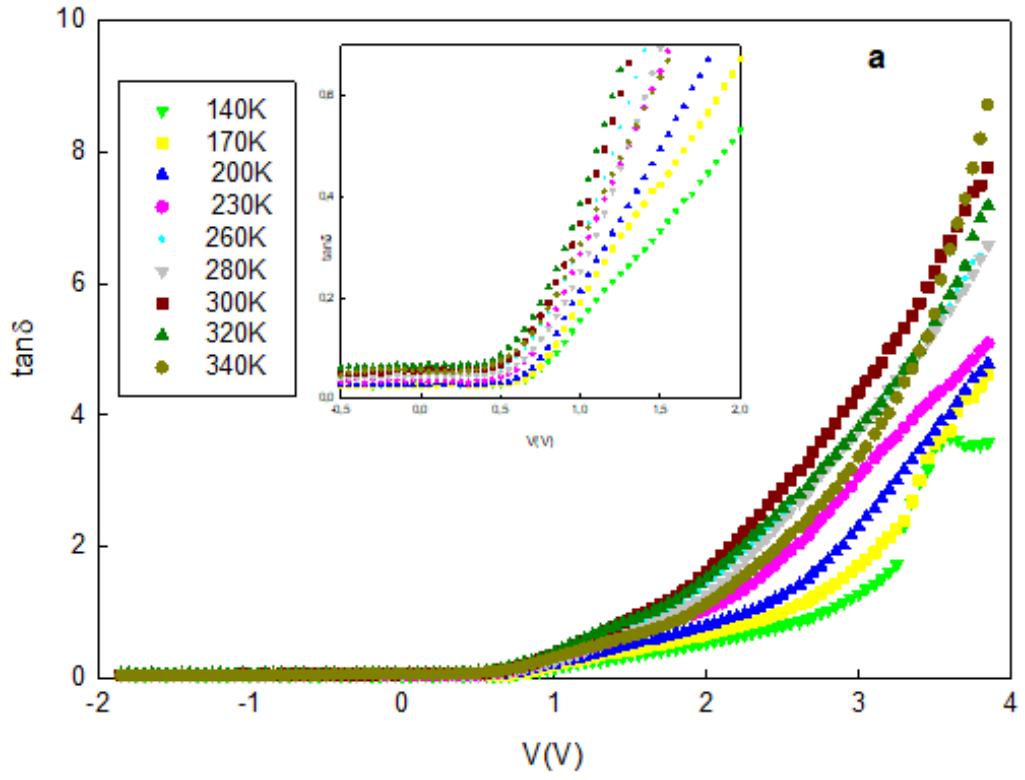


Şekil 5.11. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının a) sıcaklığa b) voltaja bağlı ϵ'' eğrileri.

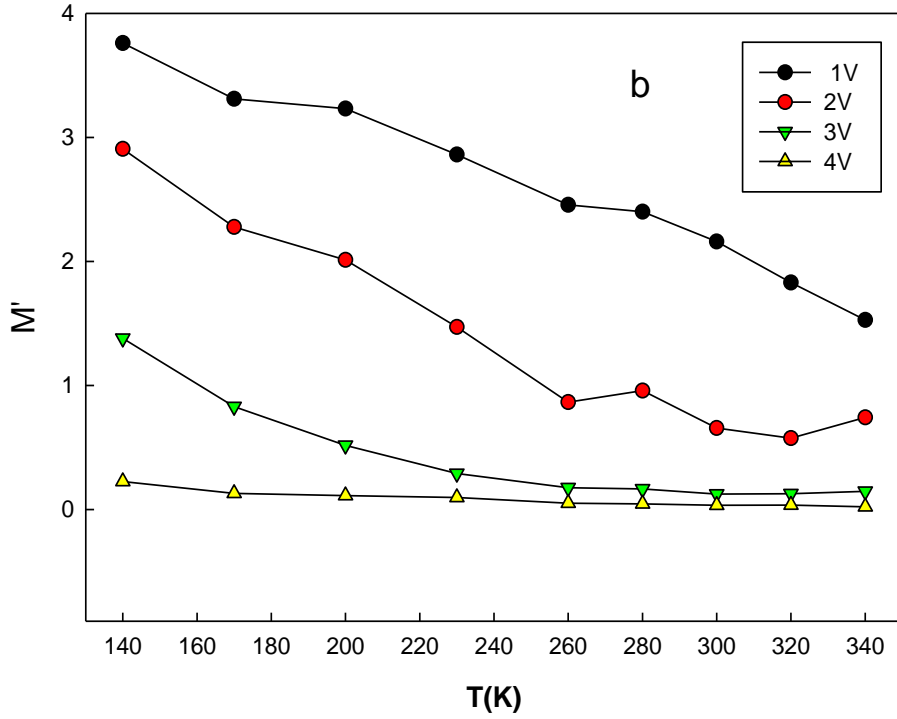
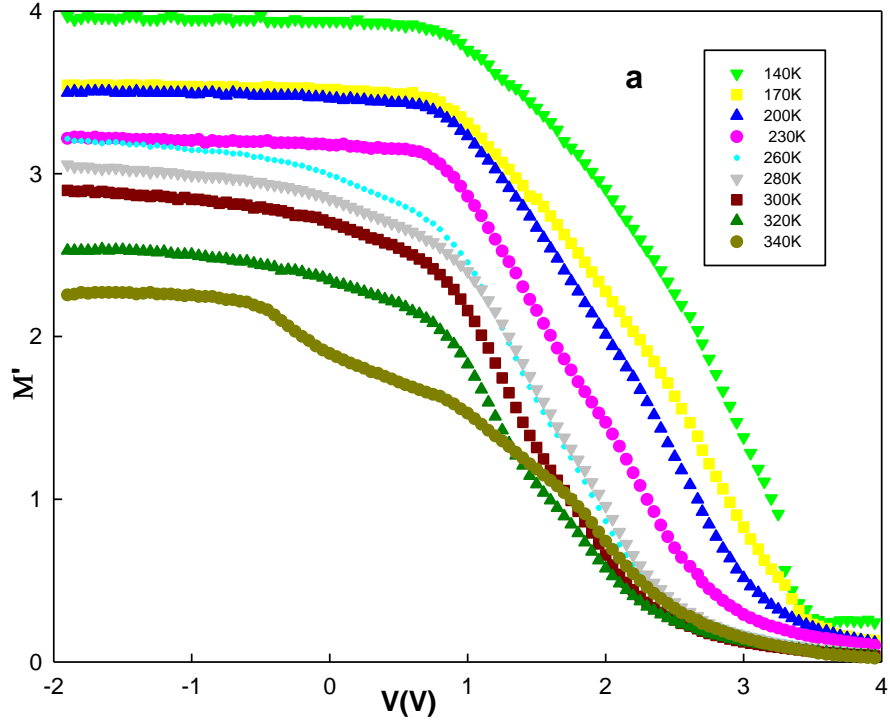
Şekil 5.10 a'dan görüleceği üzere ϵ' artan sıcaklıkla belirgin şekilde artarken, artan gerilim voltajına zayıfça bağlıdır. Bu voltaj bağımlılığı yüksek sıcaklıklarda artarken düşük sıcaklıklarda daha da zayıflamaktadır. Dielektrik sabitinin (ϵ') büyük değerleri, yüksek sıcaklıklarda gözlenmektedir.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de gösterildiği gibi, özellikle elektrik alan ve sıcaklık altında yeniden düzenleme ve yeniden yapılanmaya bağlı olarak ϵ' ve ϵ'' değerleri tüketim ve birikim bölgelerinde sıcaklık arttıkça artmaktadır. Sıcaklık katı yapının gevşemesine neden olduğu için artış oranı, dipol yöneliminde bir artışa ve dolayısıyla ϵ' 'de artışa bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Başka bir deyişle ifade etmek gerekirse; dar bant aralıklı yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları tuzaklanmış olup, harekette serbest değildirler. Bu durum bir arayüzey potansiyeline sebep olur. Sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artar ve böylece daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşur. Bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olur. Hem ϵ' hem de ϵ'' değerlerinin 500 kHz'de sıcaklık ve voltajın kuvvetli bir fonksiyonu olduğu açıkça görülmektedir. Güçlü birikim bölgesinde C'nin değeri azalırken, G'nin değeri artar. Bu tür C ve G davranışlarına, indüktif davranış denir. Başka bir deyişle, C'nin minimum değeri, her sıcaklık için G'ye karşılık gelir.

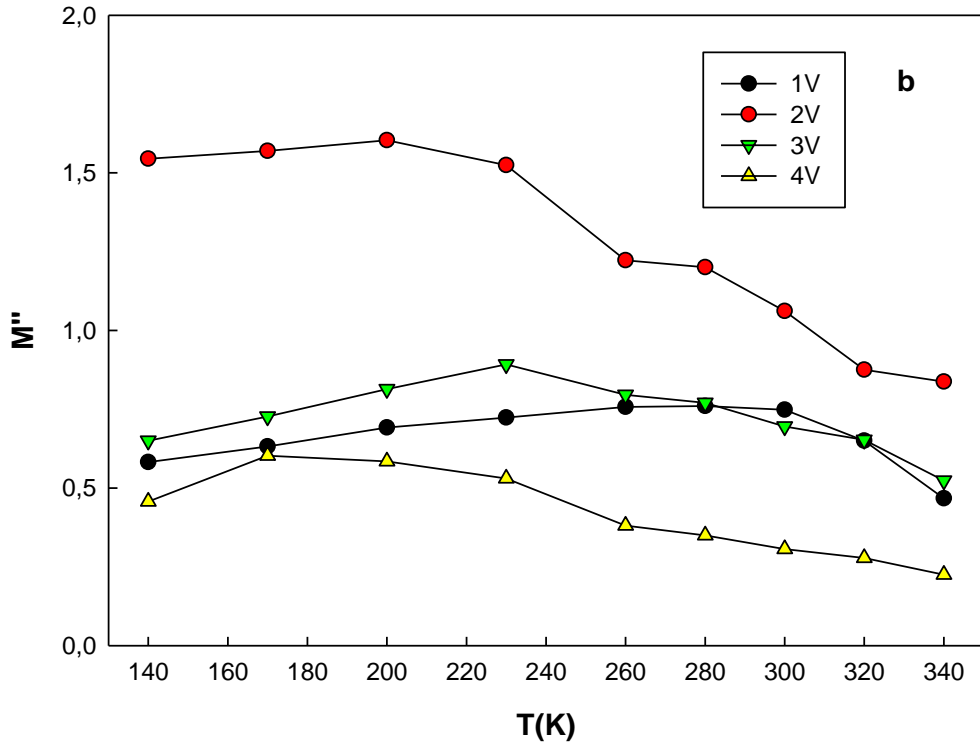
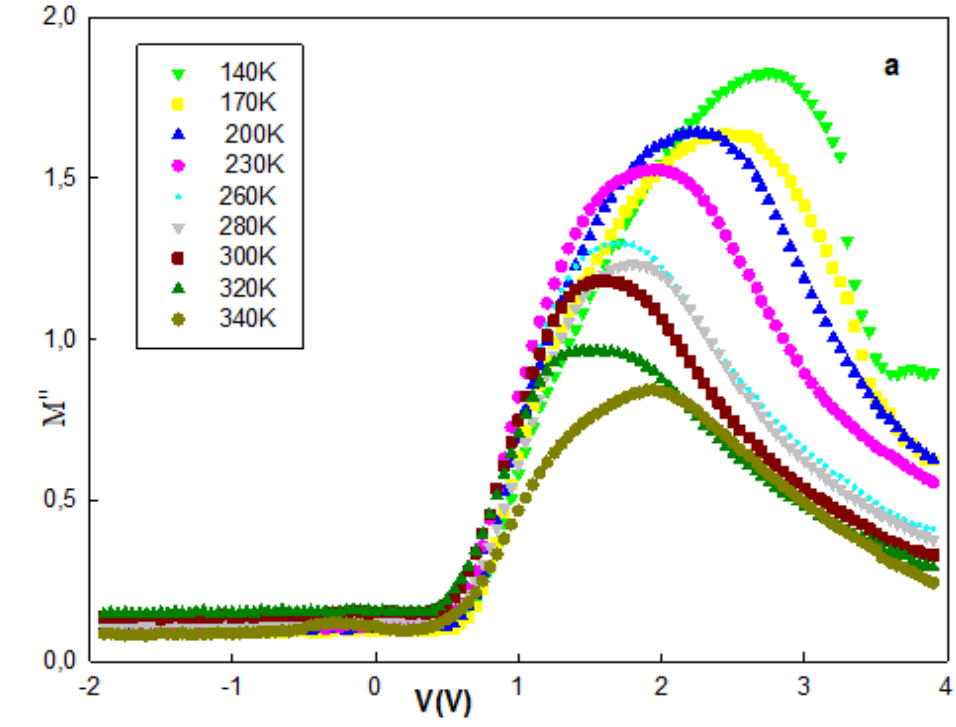
$\tan\delta$ 'nın gerilim ve sıcaklığa bağlı grafiği Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.12 a ve b 'de görüldüğü gibi, $\tan\delta$ 'nın değeri artan sıcaklık ile azalır ve tersinim bölgesi (negatif ön gerilim voltajı) sabit kalır. Elektrik iletkenliğinde (σ_{ac}) artış, girdap akımında artışa neden olur ve bu da kayıp tanjant enerjisini artırır [18], [24], [78], [79].



Şekil 5.12. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için $\tan \delta$ 'nın a) sıcaklık b) gerilime bağlı eğrileri.

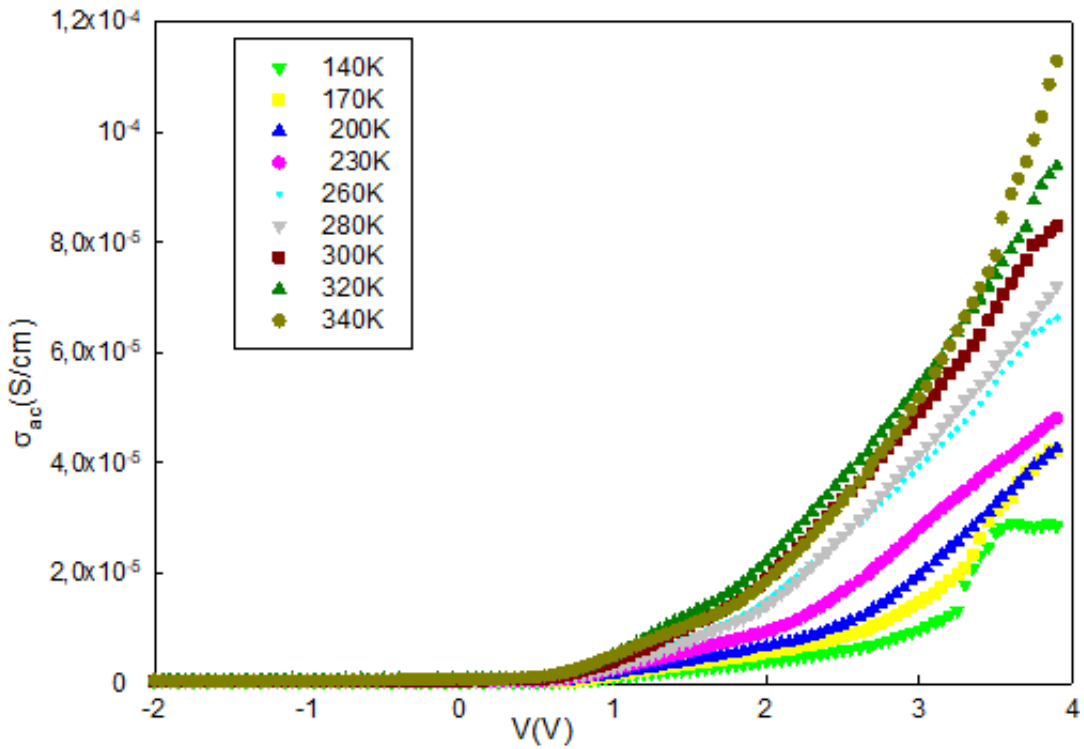


Şekil 5.13. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için M' 'nün a) sıcaklık b) gerilime bağlı eğrileri.



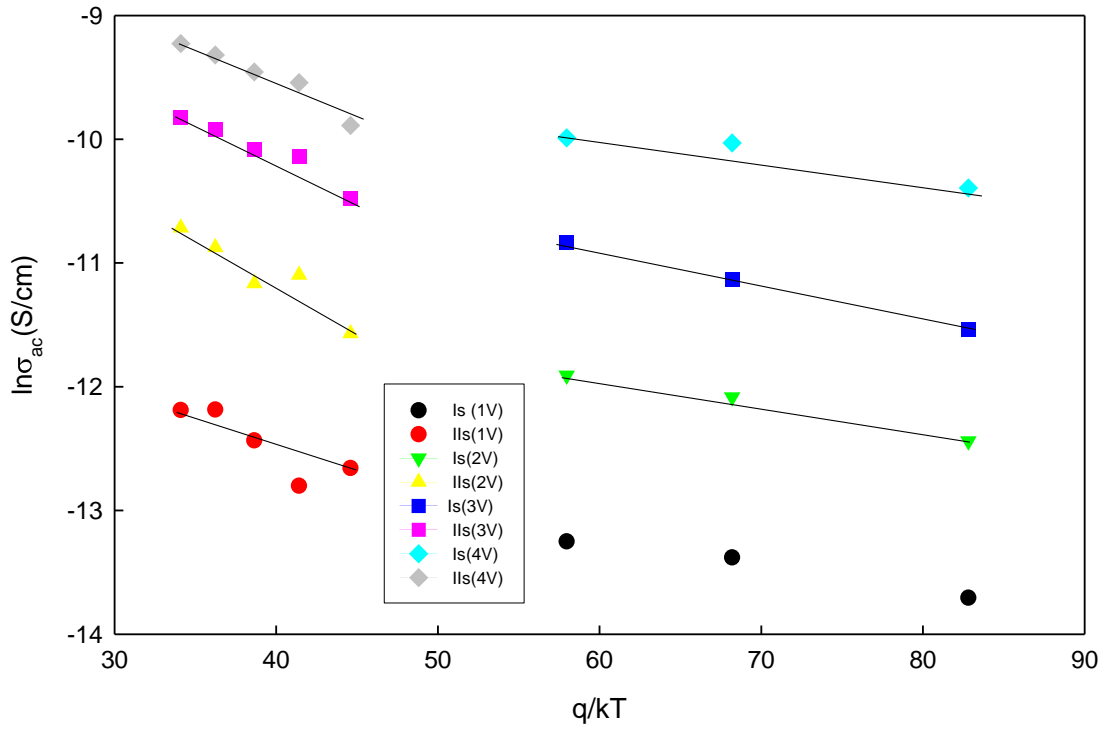
Şekil 5.14. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için M'' 'nin a) sıcaklık b) gerilime bağlı eğrileri.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te M' ve M'' değerlerinin sıcaklık ve voltaja bağlı eğrileri çizilmiştir ve şekillerden görüldüğü üzere M' ve M'' değerlerinin sıcaklık ve voltajın güçlü bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. M' ve M'' değerlerinin her ikisi de artan sıcaklıkla azalırken gerilime karşı davranışları birbirinden farklıdır. M' ve M'' değerleri gevşeme süreci nedeniyle $M_{\infty} \approx 1/\epsilon_{\infty}$ değerine karşılık gelen maksimum sabit değere ulaşır. M' değerinin sıcaklık ve voltaj arttıkça azaldığı açıkken, M'' değeri her sıcaklık için farklı gerilim değerinde bir pik verdiği görülmektedir. Pik frekansının altında kalan sıcaklık bölgesine karşı frekans spektrumu taşıyıcı yüklerin uzun mesafede mobil olduğu aralığı belirler [17], [25], [80].



Şekil 5.15. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının elektriksel iletkenliğinin (σ_{ac}) 500kHz'de çeşitli sıcaklıklarda (140K-340K) voltaja bağlı eğrileri.

Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısının elektriksel iletkenliğinin Şekil 5.15'de 140K-340K aralığında voltaja bağlı nasıl değiştiği verilmiştir. σ_{ac} değerinin artan sıcaklık ile arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıktaki elektriksel iletkenlikteki artışlar yapıya ait safsızlıklar veya dislokasyonlardan kaynaklanmaktadır



Şekil 5.16. Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için ac elektriksel iletkenliğin Arrhenius çizimi.

Toplam iletkenlik ve mutlak sıcaklığın tersi arasındaki ilişki Denklem (5.10)'daki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{ac} = \sigma_0 \exp\left(\frac{-qE_a}{kT}\right) \quad (5.10)$$

Burada σ_0 bileşik sabiti, k Boltzmann sabitini ve E_a aktivasyon enerjisini gösterir. 140–340 K aralığında elde edilen ac iletkenlik verilerin sıcaklıkla değişim grafiğinden yararlanılarak ve Denklem (5.10) kullanılarak Şekil 5.16 çizilmiştir. Şekil 5.16, 500 kHz'de ac iletkenliğin Arrhenius grafiğidir ve bu grafikten görüldüğü üzere Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) yapısı için $\ln(\sigma_{ac})$ - q/kT çizimi farklı eğimli iki ayrı doğrusal bölgeye sahiptir. Bu bölgelerin oluşumu, düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerine karşılık gelen iki farklı iletim mekanizmasının varlığını doğrulamıştır.

Çizelge 5.1. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda bileşik sabiti (σ_0) ve aktivasyon enerjisinin (E_a) farklı voltajlardaki değerleri.

Gerilim (V)	Düşük Sıcaklıklar		Yüksek Sıcaklıklar	
	σ_0 (S/cm)	E_a (meV)	σ_0 (S/cm)	E_a (meV)
1	$2,30 \cdot 10^{-5}$	49,9	$1,28 \cdot 10^{-4}$	16,9
2	$1,05 \cdot 10^{-4}$	39,6	$1,00 \cdot 10^{-4}$	28,1
3	$2,17 \cdot 10^{-4}$	46,3	$2,39 \cdot 10^{-5}$	21,6
4	$6,32 \cdot 10^{-4}$	45,0	$5,28 \cdot 10^{-4}$	18,6

Birikim bölgesindeki çeşitli uygulanan gerilimler için σ_0 ve E_a 'nın elde değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. E_a değerinin, taşıyıcı yüklerin oluşması ve hareket edebilmesi için gerekli olan enerjilerin toplamından fazla olması gerekir [15], [78], [81], [82]. Yapılan hesaplamalarda bunun her gerilim değeri için yeterli yüksek olduğu açıktır.



6. SONUÇ

Bu çalışmanın ilk aşamasında, Al/p-Si (MS) tipi yapılarda Al ile p-Si arasında organik bir malzemenin büyütülmesiyle MS yapıda performansın yükselip yükselemeyeceğini test etmek amacıyla hem Al/p-Si (MS) hem de Al/ZnS-PVA)/p-Si (MPS) tipi yapılar hazırlandı. Bu tür yapılarda kullanılan yarıiletkenlerin n-tipi ya da p-tipi olması, yarıiletkenin yüzey özellikleri, M/S arayüzeyinde oluşan engelin biçimi ve homojenliği, yapının seri direnci (R_s) ile yarıiletkenin yasak enerji aralığında gerek numune hazırlama ve gerekse de laboratuvar ortamındaki organik kirliliklerden dolayı oluşan çok sayıdaki arayüzey durumlarının da yarıiletken aygıtların performansını oldukça etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, Al ile p-Si arasına geleneksel bir yalıtkan silisyum dioksit (SiO_2) arayüzey tabakası yerine organik arayüzey tabakası olan ZnS-PVA kullanıldı. Çünkü diğer bilinen bazı polimerik malzemeler arasında polivinil alkol (PVA) suda çözülebilen bir yarı kristal materyal olup OH- gruplarının aralarındaki hidrojen bağlarından dolayı çok önemli uygulama alanlarına sahip oldukları bilinmektedir. PVA zayıf bir iletkenliğe sahiptir fakat iletkenliği, polimer matris içine uygun oranlarda metal katkılanarak artırılabilir. Bu çalışmada, yarıiletken olarak da bilinen diğer yarıiletkenlere göre (GaAs, GaN ve SiC), daha ucuz ve kararlı olan p-Si yarıiletken kullanıldı.

Üretilen Al/(ZnS-PVA)/p-Si yapılarının frekans, sıcaklık ve voltaj bağımlılığı elektriksel ve dielektrik özellikleri C/G-V-f ve C/G-V-T ölçümleri kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Geniş bir sıcaklık (140 K-340 K) ve frekans (10 kHz-5 MHz) aralığında incelenen yapının hem temel elektrik ve dielektrik parametreleri elde edilmiş hem frekans sıcaklık ve voltajın kuvvetli bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Nicollian & Brews ve Hill-Coleman yöntemlerinden elde edilen R_s ve N_{ss} değerlerinin artan frekansla hemen hemen katlanarak azaldığı görülmüştür. Buna ek olarak, dielektrik sabitinin (ϵ' ve ϵ'') ve elektrik modülünün (M' ve M'') gerçek ve sanal kısımları, kayıp açısı ($\tan\delta$) ve ac elektrik iletkenliği (σ_{ac}) gibi temel dielektrik parametreleri de C ve G/ ω verileri kullanılarak elde edilmiştir. Hazırlanan MS ve MPS yapıların C-V ve G/ ω -V ölçümlerinden elde edilen N_{ss} ve R_s değerlerinin azaldığı, dielektrik sabitinin de

artmakta olduğu gözlemlendi. Bu deneysel sonuçlar, Al ile p-Si arasına sol-jel büyütülen ZnS-PVA arayüzey tabakanın MS yapı performansını önemli ölçüde artırdığı tespit edildi. Kapasite ve iletkenlik değerlerinin arayüzey veya dipol polarizasyonları, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve seri direncin (R_s) varlığına bağlı olarak frekans ve ön gerilimin kuvvetli bir fonksiyonu olduğu Şekil 5.1'den anlaşılmaktadır. Arayüzey veya dipol polarizasyonu ve N_{ss} düşük frekanslarda oldukça etkindir. Bunun nedeni arayüzeydeki yüklerin düşük frekanslarda elde edilen C-V veya G/ω -V ölçümleri için periyot değeri ($T=1/2\pi f$), tuzaklardaki taşıyıcıların yaşam süresinden büyük olmasıdır. Bu nedenle çok küçük frekanslarda ($f < 50$ Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyali kolaylıkla takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda ($f > 1$ MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyali takip edemez [11], [40], [64], [76], [83].

Özellikle elektrik alan ve sıcaklık altında yeniden düzenleme ve yeniden yapılanmaya bağlı olarak ϵ' ve ϵ'' değerleri tüketim ve birikim bölgelerinde sıcaklık arttıkça artmaktadır. Sıcaklık katı yapının gevşemesine neden olduğu için artış oranı, dipol yöneliminde bir artışa ve dolayısıyla ϵ' 'de artışa bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Başka bir deyişle ifade etmek gerekirse; dar bant aralıklı yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları tuzaklanmış olup, harekette serbest değildirler. Bu durum bir arayüzey potansiyeline sebep olur. Sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artar ve böylece daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşur. Bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olur. Hem ϵ' hem de ϵ'' değerlerinin 500 kHz'de sıcaklık ve voltajın kuvvetli bir fonksiyonu olduğu açıkça görülmektedir. Güçlü birikim bölgesinde C'nin değeri azalırken, G'nin değeri artar. Bu tür C ve G davranışlarına, indüktif davranış denir. Başka bir deyişle, C'nin minimum değeri, her sıcaklık için G'ye karşılık gelir.

ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri artan frekans ve sıcaklıkla artarken, M' , M'' ve σ_{ac} azaldığı görüldü. Bu durum; dışardan uygulanan dc gerilim, frekans ve sıcaklık etkileri altında arayüzey yüklerin yeniden yapılanıp-düzenlenmesine atfedildi. Elde edilen dielektrik sabitinin 10 kHz'de bile 1'den büyük çıkması, Al ile p-Si arayüzeyinde büyütülen (ZnS-PVA) polimer arayüzey tabakanın klasik yalıtkan SiO_2 yerine başarı ile kullanabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve tecrübeler ışığında, ileride bu veya benzeri konularda çalışacak araştırmacılara yardımcı olmak amacıyla, bir takım tavsiye ve öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Hazırlanan MS, MIS veya MPS yapıların elektriksel ve dielektrik özelliklerin geniş bir sıcaklık, frekans ve voltaj aralığında incelenmesi, bunların hem iletim mekanizmaları hem de metal ile yarıiletken arasında oluşan engel hakkında doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi açısından son derece önemlidir.
- Bu yapıların performansını artırmak için özellikle düşük direnci bir omik kontak sağlanması ve metal ile yarıiletken arasında büyütülen arayüzey tabakanın son derece homojen ve yüksek dielektrikli olmasına dikkat edilmelidir. Bu yüzden örnek hazırlama şartları ve tekrarlanabilirlik son derece önemlidir.
- Bu yapıların eklem bölgesindeki yarıiletkenin yasak enerji aralığında oluşabilecek çok sayıda istenmeyen arayüzey durumlarını azaltmak için tüm fabrikasyon işlemlerinin son derece dikkatli, temiz ortamda ve çok düşük basınçlarda yapılması da oldukça önem kazanmaktadır.
- Tüm elektriksel ve dielektrik ölçümlerin mümkünse dış etkilerden izole edilmiş ve vakumlanmış bir kriyostat içinde gerçekleştirilmesi gürültü ve ölçüm hatalarının azaltılması açısından çok önemlidir. Bu şartlar, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır.
- Metal ile yarıiletken arasına büyütülen yalıtkan, polimer ve polimer ya da metal katkı polimerler tabakaların farklı kalınlıklarda ve katkı oranlarında seçilerek en iyi performans şartlarının belirlenmesi açısından çok önemlidir.
- MIS ve MPS tipi arayüzey tabakalı yarıiletken aygıtlar hazırlanırken onların arayüzey tabakasız olan MS tipleri de hazırlanarak performansın ne ölçüde etkilendiğini belirlemek daha iyi yeni örneklerin hazırlanabilmesi açısından çok önemlidir.
- Çok amaçlı disiplinler arası çalışmaların yapılması, bu tür yapıların geliştirilmesi ve maliyetlerinin de azaltılması, çalışmaların hızlanması ve kolaylaştırması açısından önemlidir.
- Deneysel çalışmalarda gözlenen mevcut/bilinen teorilerden sapmalar üzerine ısrarla gidilmeli ve bunların kaynağı ayrıntılı olarak araştırılmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- [1] B. L. Sharma, "Physics of Schottky Barrier Junctions," *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications*, New York, USA:Springer, 1954, pp. 1-56.
- [2] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3th ed. Central Laboratory San Jose, California, USA: John Wiley&Sons, 2007.
- [3] H. C. Card and E. H. Rhoderick, "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 4, no 10, pp. 319, 1971.
- [4] D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, 3th ed., Univercity of New Mexico, United States: McGraw-Hill, 2003.
- [5] E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, New York, United States:Wiley, 1982.
- [6] F. Braun, "On the current conduction through metal sulphides (in German)," *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 153, no. 556, 1874.
- [7] G. W. Pickard, "Means for receiving intelligence communicated by electric waves," United States of Patent Office, 836 531, August 30, 1906.
- [8] E. Schottky, W.Spenke, *Wiss. Veroff.Siemens-Werken*, vol. 18, no. 225, 1939.
- [9] A. H. Wilson, "The theory of electronic semi-conductors", *Proceedings of Royal Society. A Mathematics and. Physical Engineering Science*, vol. 133, no 822, pp. 458–491, 1931.
- [10] H. A. Bethe, "Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers," Massachusetts, Radiation Laboratory, United States, Rep.43-12, 1942.
- [11] C. Crowell and S. M. Sze, "Current transport in metal-semiconductor barriers," *Solid-State Electronics*, vol. 9, pp. 1035–1048, 1966.
- [12] J. Bardeen, "Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact", *Physical Review Letters*, vol. 71, no 10, pp. 717–727, 1947.
- [13] H. F. Mander, "Semiconductor devices: physics and technology," *Microelectronics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 44, 1982.
- [14] J. Biard, "Unitary Semiconductor High Speed Switching Device Utilizing a Barrier Diode," Texas Instruments, 3463975, August 26, 1964.

- [15] H. Tecimer, A. Türüt, H. Uslu, Ş. Altındal, and İ. Uslu, “Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped)PVA/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs),” *Sensors Actuators A Physical*, vol. 199, pp. 194–201, 2013.
- [16] S. Demirezen and Ş. Altındal, “On the temperature dependent profile of interface states and series resistance characteristics in (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN heterostructures,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 405, no. 4, pp. 1130–1138, 2010.
- [17] S. Alialy, Ş. Altındal, E. E. Tanrıku, and D. E. Yıldız, “Analysis of temperature dependent current-conduction mechanisms in Au/TiO₂/n-4H-SiC (metal/insulator/semiconductor) type Schottky barrier diodes,” *Journal of Applied Physics*, vol. 116, no. 8, 2014.
- [18] T. Tunç, İ. Uslu, İ. Dökme, Ş. Altındal, and H. Uslu, “Frequency and temperature dependence of dielectric properties of Au / Polyvinyl Alcohol (Co , Ni-Doped) / n-Si schottky diodes,” *International Journal of Polymeric Materials*, c. 59, no.2012, pp. 739–756, 2010.
- [19] M. Sharma and S. K. Tripathi, “Frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/Al₂O₃/PVA:n-ZnSe Schottky barrier diodes,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 41, pp. 155–161, 2016.
- [20] İ. Dökme, Ş. Altındal, T. Tunç, and İ. Uslu, “Temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni,Zn-doped)/n-Si Schottky diodes,” *Microelectronics Reliability*, vol. 50, no. 1, pp. 39–44, 2010.
- [21] İ. Yücedağ, A. Kaya, H. Tecimer, and Ş. Altındal, “Processing temperature and voltage dependences of dielectric properties and ac electrical conductivity in Au / PVC þ TCNQ / p-Si structures,” *Materials Science in Semiconductor*, vol. 28, pp. 37–42, 2014.
- [22] İ. Yücedağ, A. Kaya, Ş. Altındal, and İ. Uslu, “Electrical and dielectric properties and intersection behavior of G/ω-V plots for Al/Co-PVA/p-Si (MPS) structures at temperatures below room temperature,” *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 65, no. 12, pp. 2082–2089, 2014.
- [23] N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalanderagh, G. Ersöz, İ. Orak, Ş. Altındal, B. Akbari, and H. Akbari, “Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10–200 kHz,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 46, no 7, pp. 4276–4286, 2017.
- [24] M. Gökçen and T. Tunç, “Enhancement of dielectric characteristics of polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer in Au/PVA/n-Si structures by Bi₂O₃disperse,” *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 10, pp. E64–E69, 2013.
- [25] K. Ozga, et al. “ZnS/PVA nanocomposites for nonlinear optical applications,” *Physica. E. Low-Dimensional System Nanostructures*, vol. 81, pp. 281–289, 2016.

- [26] L. Vafayi and S. Gharibe, "Investigation of in vitro drug release from porous hollow silica nanospheres prepared of ZnS-SiO core-shell," *Bioinorganic Chemistry and Applications*, Article ID 541030, 2013.
- [27] Ş. Altındal, İ. Yücedağ, and A. Tataroğlu, "Analysis of surface states and series resistance in Au/n-Si Schottky diodes with insulator layer using current-voltage and admittance-voltage characteristics," *Vacuum*, vol. 84, no. 3, pp. 363–368, 2009.
- [28] İ. Yücedağ, "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [29] N. Baraz, İ. Yücedağ, A. Demir, G. Ersöz, Ş. Altındal, and M. Kandaz, "Controlling the electrical characteristics of Au/n-Si structure with and without (biphenyl-CoPc) and (OHSubs-ZnPc) interfacial layers at room temperature," *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 28, no. 8, pp. 952–957, 2017.
- [30] E.Söylemez, "Polivinil alkol-polietilenimin (PVA-PEI) kompozit nanoliflerin elektrospınleme yöntemi ile üretimi, karakterizasyonu ve çeşitli kullanım alanlarına uygulanması," Yüksek lisans tezi, Kimya Bölümü, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye, 2016.
- [31] N. B. Ukah, J. Granstrom, R. R. Sanganna Gari, G. M. King, and S. Guha, "Low-operating voltage and stable organic field-effect transistors with poly (methyl methacrylate) gate dielectric solution deposited from a high dipole moment solvent," *Applied Physics Letter*, vol. 99, no. 24, 2011.
- [32] İ. Taşçıoğlu, Ö. Tüzün Özmen, H. M. Şağban, E. Yağlıoğlu, and Ş. Altındal, "Frequency dependent electrical and dielectric properties of Au/P3HT:PCBM:F4-TCNQ/n-Si schottky barrier diode," *Journal of Electronics Material*, vol. 46, no. 4, 2017.
- [33] N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalandaragh and Ş. Altındal, "Determining electrical and dielectric parameters of dependence as function of frequencies in Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) structures," *Journal of Material Science Material Electronics*, vol. 28, no 2, pp. 1315–1321, 2017.
- [34] İ. Yücedağ, A. Kaya, Ş. Altındal, and İ. Uslu, "Frequency and voltage-dependent electrical and dielectric properties of Al/Co-doped PVA/p-Si structures at room temperature," *China Physics B*, vol. 23, no. 4, pp. 47304, 2014.
- [35] S. A. Yerişkin, M. Balbaşı, and A. Tataroğlu, "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*, vol. 133, no. 33, 2016.
- [36] M. Sharma and S. K. Tripathi, "Analysis of interface states and series resistance for Al/PVA: N-CdS nanocomposite metal-semiconductor and metal-insulator-semiconductor diode structures," *Applied Physics A.*, vol. 113, no 2, pp. 491-499, 2013.

- [37] A. K. Jonscher, "Dielectric relaxation in solids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 14, 1999.
- [38] A. Rockett, *The materials science of semiconductors*, Urbana, USA: Springer, 2008,.
- [39] F. E. C. Çatır, "Ag/n-InP/In, Au/n-InP/In ve Cd/n-InP/In Schottky diyotların akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümlerinden elde edilen karakteristik parametreler üzerine numune sıcaklığının ve termal tavlamanın etkileri," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2009.
- [40] J. H. Werner and H. H. Güttler, "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts," *Journal of Physics*, vol. 69, no. 3, pp. 1522–1533, 1991.
- [41] H. Uslu, "Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si schottky engel diyotlarının hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin aydınlatma şiddetine bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [42] M. Gökçen, "Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [43] U. Aydemir, "Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) yapıların hazırlanması, ve temel elektriksel özelliklerinin ışık altında incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [44] İ. Taşcıoğlu, "Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) schottky engel diyodun elektriksel özelliklerinin sıcaklık ve radyasyona bağlı incelenmesi," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [45] T. Tunç and M. Gökçen, "Preparation and electrical characterization of Au/n-Si (110) structure with PVA–nickel acetate composite film interfacial layer," *Journal of Composite Materials*, vol. 46, no. 22, pp. 2843–2850, 2012.
- [46] Ş. Altındal, "Al-SiO_x-pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri," Doktora tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1993.
- [47] R. T. Tung, "Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory," *Physical Review B*, vol. 45, no. 23, pp. 13509–13523, 1992.
- [48] Ş. Altındal, İ. Dökme, M. M. Bülbül, N. Yalçın, and T. Serin, "The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range," *Microelectronic Engineering*, vol. 83, no.3, pp. 499–505, 2006.
- [49] H. Uslu, İ. Dökme, M. Afandiyeva, and Ş. Altındal, "Illumination effect on I-V, C-V and G/w-V characteristics of Al-TiW-Pd 2Si/n-Si structures at room temperature," *Surface and Interface Analysis*, vol. 42, no. 6–7, pp. 807–811, 2010.

- [50] B. Taraev, *Physics of Dielectric Materials*, Moscow, Russian: Mir Publishers, 1975.
- [51] H. Frochlich, *Theory of Dielectrics*, 2th ed., Oxford, USA: Oxford University Press, 1987
- [52] M. Oral, *Elektrostatik.*, İzmir, Türkiye: Ege Ün. Matbaası, 1983.
- [53] D. Abdullah, “Montmorillonitçe zengin bentonitlerde sıcaklık, basınç ve parçacık büyüklüğünün dielektrik özelliklere ve aktivasyon enerjilerine etkisi,” Doktora tezi, Fizik Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2011.
- [54] K. F. Albertin and I. Pereyra, “Correlation of PECVD SiOxNy dielectric layer structural properties and Si/SiOxNy/Al capacitors interface electrical properties,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 352, no. 9–20, pp. 1438–1443, 2006.
- [55] J. S. Lee, et al. “Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning,” *Journal of Applied Polymer Science.*, vol. 93, no. 4, pp. 1638–1646, 2004.
- [56] A. Koski, K. Yim, and S. Shivkumar, “Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning,” *Material Letters*, vol. 58, no. 3–4, pp. 493–497, 2004.
- [57] F. L. Marten, *Vinly Alcohol Polymers*, New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [58] A. Ünlü, “Sulu poli(vinil alkol) ve poli(N-vinil pirolidon) çözeltilerinden, potasyum klorür iletkenliğinin, iç (lokal) viskozitenin ve assosiyasyonun incelenmesi,” Doktora tezi, Kimya Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1987.
- [59] C. R. Martins, G. Ruggeri, and M. A. De Paoli, “Synthesis in pilot plant scale and physical properties of sulfonated polystyrene,” *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 14, no. 5, pp. 797–802, 2003.
- [60] C. Brinker and G. Scherer, “Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing,” *Advanced Materials*, vol. 3, no. 10. pp. 912, 1990.
- [61] O. Pakma, “Metal/Tio2/C-Si/Metal yapılarında yüzey şartlarının elektriksel belirtkenleri üzerindeki etkisi,” Doktora tezi, Fizik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [62] C. P. Alain, *Introduction to Sol-Gel Processing*, Boston, USA: Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [63] A. Tataroğlu ve Ş. Altındal, “The interface states analysis of the MIS structure as a function of frequency,” *Microelectronics Engineering*, vol. 85, no. 3, pp. 542–547, 2008.
- [64] S. A. Yerişkin, M. Balbaşı, and İ. Orak, “Frequency dependent electrical characteristics and origin of anomalous capacitance–voltage (C–V) peak in

- Au/(graphene-doped PVA)/n-Si capacitors,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.*, vol. 28, no. 11, pp. 7819–7826, 2017.
- [65] Ş. Asar, T. Asar, and Ş. Altındal, “Dielectric spectroscopy studies and ac electrical conductivity on (AuZn)/TiO₂/p-GaAs (110) MIS structures,” *Philosophical Magazine*, vol. 95, pp. 2885–2898, 2015.
- [66] W. A. Hill and C. C. Coleman, “A single-frequency approximation for interface-state density determination,” *Solid State Electroics*, vol. 23, no. 9, pp. 987–993, 1980.
- [67] İ. Yücedağ, “On the density distribution profiles of interface states in Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures abstract,” *e-Journal New World Science Academia*, vol. 4, pp. 519–526, 2009.
- [68] Ş. Altındal, H. Kanbur, İ. Yücedağ, and A. Tataroğlu, “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*, vol. 85, no. 7, pp. 1495–1501, 2008.
- [69] Ş. Altındal, S. Yerişkin, M. Balbaşı, and S. Demirezen, “Temperature and voltage dependence of barrier height and ideality factor in Au/0.07 graphene-doped PVA/n-Si structures,” *Indian Journal of Physics*, vol. 91, no. 4, pp. 421–430, 2017.
- [70] İ. Yücedağ, A. Kaya, H. Tecimer, and Ş. Altındal, “Temperature and voltage dependences of dielectric properties and ac electrical conductivity in Au/PVC+TCNQ/p-Si structures,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 28, pp. 37–42, 2014.
- [71] İ. Yücedağ, A. Kaya, Ş. Altındal, ve I. Uslu, “Frequency and voltage-dependent electrical and dielectric properties of Al/Co-doped PVA/p-Si structures at room temperature,” *Chinese Physics B*, vol. 23, no. 4, 2014.
- [72] İ. Yücedağ, “On the anomalous peak at low and moderate frequency C-V curves of Al/SiO₂/p-Si structure at the forward bias region,” *Optoelectronics Advanced Materials Rapid Commun*, vol. 3, no. 6, pp. 612–615, 2009.
- [73] A. Kaya, S. Alialy, S. Demirezen, M. Balbaşı, S. A. Yerişkin, and A. Aytimur, “The investigation of dielectric properties and ac conductivity of Au/GO-doped PrBaCoO nanoceramic/n-Si capacitors using impedance spectroscopy method,” *Ceramics International*, vol. 42, no. 2, pp. 3322–3329, 2016.
- [74] S. Demirezen, A. Kaya, S. A. Yerişkin, M. Balbaşı, and İ. Uslu, “Frequency and voltage dependent profile of dielectric properties, electric modulus and ac electrical conductivity in the PrBaCoO nanofiber capacitors,” *Results Physics*, vol. 6, pp. 180–185, 2016.
- [75] A. Chelkowski, *Dielectric Physics*, Amsterdam ,Holland: Elsevier, 1980.

- [76] M. Ershov, H. C. Liu, L. Li, M. Buchanan, Z. R. Wasilewski, and A. K. Jonscher, "Negative capacitance effect in semiconductor devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 10, pp. 2196–2206, 1998.
- [77] H. Tecimer, H. Uslu, Z. A. Alahmed, F. Yakuphanoglu, and Ş. Altındal, "On the frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/PTCDA/P-Si (MPS) type Schottky barrier diodes (SBDs)," *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp. 25–30, 2014.
- [78] S. Awan and R. . Gould, "Conductivity and dielectric properties of silicon nitride thin films prepared by RF magnetron sputtering using nitrogen gas," *Thin Solid Films*, vol. 423, no. 2, pp. 267–272, 2003.
- [79] Ç. Bilkan, Y. Azizian-Kalandaragh, Ş. Altındal, and R. Shokrani-Havigh, "Frequency and voltage dependence dielectric properties, ac electrical conductivity and electric modulus profiles in Al/Co3O4-PVA/p-Si structures," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 500, pp. 154–160, 2016.
- [80] S. Demirezen, Z. Sönmez, U. Aydemir, and S. Altındal, "Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V and G/ω-V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature," *Current Applied Physics*, vol. 12, no. 1, pp. 266–272, 2012.
- [81] S. Demirezen, E.Özavcı, and Ş. Altındal, "The effect of frequency and temperature on capacitance/conductance-voltage (C/G-V) characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs)," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 23, no. 1, pp. 1–6, 2014.
- [82] R. Sinha, S. Basu, and A. K. Meikap, "Investigation of dielectric and electrical behavior of Mn doped YCrO3 nanoparticles synthesized by the sol gel method," *Physica E Low-Dimensional System Nanostructures*, vol. 69, pp. 47–55, 2015.
- [83] J. J. S. Reddy, et al. "Electrical Properties and the role of inhomogeneities at the Polyvinyl Alcohol/n-InP schottky barrier interface," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 131, no. 1, pp. 1–5, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nalan BARAZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.02.1987 Sivas
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : nalanbaraz@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Doktora	Fizik Bölümü	Marmara Üniversitesi	Ders aşamasında bıraktı
Y. Lisans	Fizik Bölümü	Cumhuriyet Üniversitesi	2012
Lisans	Fizik Bölümü	Cumhuriyet Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Sivas Selçuk Anadolu Lisesi	2004

YAYINLAR

1. N. Baraz, İ. Yücedağ, A. Demir, G. Ersöz, Ş. Altındal, and M. Kandaz, “Controlling the electrical characteristics of Au/n-Si structure with and without (biphenyl-CoPc) and (OHSubs-ZnPc) interfacial layers at room temperature,” *Polymers for Advanced Technologies*, c. 28, vol. 8, pp. 952–957, 2017.
2. A. Demir, İ. Yücedağ, G. Ersöz, N. Baraz, Ş. Altındal, M. Kandaz “A Comparative Study on the Main Electrical Parameters of Au/n-Si, Au/Biphenyl-CuPc/n-Si/ and Au/Biphenylsubs-CoPc/n-Si/ Type Schottky Barrier Diodes” / *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, vol.11, pp.620-625, 2016.
3. N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalandaragh, G. Ersöz, İ. Orak, Ş. Altındal B.Akbari and H. Akbari “Electric and Dielectric Properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) Structures in the Frequency Range of 10–200 kHz,” *Journal of Electronic Materials* vol.46, pp. 4276–4286, 2017.
4. N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalandaragh, and Ş. Altındal “Determining electrical and dielectric parameters of dependence as function of frequencies in Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) structures,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 28, pp. 1315–1321, 2017.
5. N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalandaragh, Ş. Altındal “Determining Electrical and Dielectric Parameters of Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) Structures in Wide Range of Temperature and Voltage” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, In press.
6. N. Baraz, P. Başer, S. Elagöz “Hydrogenic impurity states in zinc-blende $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ in cylindrical quantum well wires under hydrostatic pressure” *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, vol.44, pp. 356-360 2011.

BİLDİRİLER

1. P. Başer, S. Elagöz, N. Baraz “ $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ Silindirik Kuantum Telinde Eksiton Bağlanma Enerjisinin Dış Manyetik Alana, Hidrostatik Basınca, Sıcaklığa Ve Tel Yarıçapına Bağlı Olarak Hesaplanması” Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi’nde sunuldu, İstanbul, 2013.
2. P. Başer, S. Elagöz, N. Baraz “Çinko Sülfür Yapıdaki $GaN/Ga_{1-x}In_xN$ Silindirik Kuantum Telindeki Hidrojenik Safsızlık Taban Durum Bağlanma Enerjisinin Sıcaklığın Ve Bariyer Yüksekliğinin Değişimine Bağlılığı” Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi’nde sunuldu, İstanbul, 2013.
3. N. Baraz, İ. Yücedağ, A. Demir, G. Ersöz, Ş. Altındal, M. Kandaz “Controlling the electrical characteristics of Au/n-Si structure with and without (biphenyl-CoPc) and (OHSubs-ZnPc) interfacial layers at room temperature” presented at International Organic Electronic Material Technologies Conference, Elazığ, 2015.
4. A. Demir, İ. Yücedağ, G. Ersöz, N. Baraz, Ş. Altındal, M. Kandaz “A Comparative Study on the Main Electrical Parameters of Au/n-Si, Au/Biphenyl-CuPc/n-Si/ and Au/Biphenylsubs-CoPc/n-Si/ Type Schottky Barrier Diodes” International presented at International Organic Electronic Material Technologies Conference, Elazığ, 2015.
5. N. Baraz, İ. Yücedağ, Y. Azizian-Kalendaragh, Ş. Altındal “Determining electrical and dielectric parameters of dependence as function of frequencies in Al/(ZnS-PVA)/p-Si (MPS) structures” presented at International Organic Electronic Material Technologies Conference, Çanakkale, 2016.

PROJELER

1. “GaN/InxGa1-xN Kuantum Telinde Verici Safsızlık Enerji Düzeyleri” Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) F-344,2011 Araştırmacı.
2. “Yalıtkan ve Polimer Arayüzeyli Schottky Diyotların Hazırlanması, Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Geniş Bir Sıcaklık ve Frekansa Aralığında İncelenmesi” Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DÜBAP) 2013.07.02.204,2015 Araştırmacı.
3. “Organik Arayüzeyli Yarı İletken Yapıların (MPS) Hazırlanması ile Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Geniş Bir Sıcaklığa Bağlı Olarak İncelenmesi” Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (DÜBAP) 2016.07.02.511 Araştırmacı.