$Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ (MFIS) YAPILARIN HAZIRLANMASI, ELEKTRİKSEL VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ

Funda PARLAKTÜRK

DOKTORA TEZİ
FİZİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2007
ANKARA

Funda PARLAKTÜRK tarafından hazırlanan $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ (MFIS) YAPILARIN HAZIRLANMASI, ELEKTRİKSEL VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Fizik Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Mehmet PARLAK

Üye : Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Üye : Doç. Dr. Selim ACAR

Üye : Doç. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ

Üye : Yrd. Doç.Dr. M. Mahir BÜLBÜL

Tarih : ..25...../…07…./…2007……

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Funda PARLAKTÜRK

$Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si YAPILARIN HAZIRLANMASI, ELEKTRİKSEL VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Funda PARLAKTÜRK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2007

ÖZET

Metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapının, frekans ve sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) karakteristikleri, seri direnç (R_s) ve yüzey durum (N_{ss}) etkileri dikkate alınarak, sırasıyla 1 kHz-5 MHz frekans ve 80-400 K sıcaklık aralığında incelendi. N_{ss} ve R_s değerlerinin önemli ölçüde frekans ve sıcaklığa bağlı olduğu tespit edildi. R_s ve N_{ss}'e bağlı olarak $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si yapının C-V-f ve G/w-V-f karakteristikleri, özellikle düşük frekanslarda, geniş bir frekans dağılımı göstermektedir, C-V-T ve G/w-V-T grafikleri doğru beslemde R_s ve N_{ss}'e bağlı olarak anormal pikler vermektedir. Bu piklerin pozisyonu yığılma bölgesinden tüketim bölgesine yönelmekte, kapasitans ve iletkenliğin maksimum değerleri artan sıcaklıkla artmaktadır. Ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m/w) değerleri MFIS yapının gerçek kapasitans ve iletkenliğini bulmak için, seri direnç etkisinden dolayı düzeltilmiştir. Her frekans için, R_s-V eğrileri tersinim ve tüketim bölgeleri arasında anormal pikler göstermekte ve pik pozisyonları artan frekansla doğru beslem bölgesine kaymaktadır. C^{-2}-V eğrisinin, geniş bir voltaj bölgesinde doğrusal olması, arayüzey durumlar ve tersinim tabaka yüklerinin, tüketim bölgesinde ac sinyali takip edemediğini göstermektedir. N_{ss} artan frekansla eksponansiyel olarak azalmaktadır. C-V ve G/w-V karakteristikleri yarıiletkenle, yüzey durumlarının dengede olmasına bağlı olarak beklenen

davranışı göstermektedir. MFIS yapı için dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve dielektrik kayıp açı (tanδ) araştırılmış ve C-V ve G/w-V ölçümlerinden hesaplanmıştır. Dielektrik parametreler oldukça yüksek sıcaklıkta ve düşük frekanslarda, frekans ve sıcaklığa hassasiyet göstermektedir. ε' ve ε'' artan frekansla azalırken, artan sıcaklıkla artmaktadır. Arayüzey kutuplanması düşük frekanslarda daha kolay gerçekleşebilmekte ve yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde arayüzey durum yoğunluğu sayısı, MFIS yapının dielektrik özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bilim Kodu :404.05.01
Anahtar Kelimeler :MFIS yapı; Sıcaklık ve frekansa bağlılık; Dielektrik özellikler; Seri direnç; Yüzey durumları
Sayfa Adedi :113
Tez Yöneticisi :Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

THE PREPARATION OF $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si STRUCTURES, INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES BASED ON FREQUENCY AND TEMPERATURE

(Ph. D. Thesis)

Funda PARLAKTÜRK

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

July 2007

ABSTRACT

The frequency and temperature dependent capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/w-V) characteristics of the metal-ferroelectric-insulator-semiconductor (MFIS) structure were investigated by considering series resistance (R_s) and surface state (N_{ss}) effects in the frequency and temperature ranges of 1 kHz-5 MHz and 80-400 K, respectively. The values of N_{ss} and R_s were determined to be strongly dependent on the frequency and temperature. The C-V-f and G/w-V-f characteristics of $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si structure show fairly large frequency dispersion especially at low frequencies, the C-V-T and G/w-V-T plots exhibit anomalous peaks at forward bias due to R_s and N_{ss}. These peak positions shift from accumulation to inversion region and the maximum values of the capacitance and conductance increase with increasing temperature. The measured capacitance (C_m) and conductance (G_m/w) values were corrected for the effect of series resistance to obtain the real capacitance and conductance of MFIS structure. The R_s-V plots exhibit anomalous peaks between inversion and depletion regions at each frequency and peak positions shift towards positive bias with increasing frequency. The C^{-2}-V plot gives a straight line in wide voltage region, indicating that interface states and inversion layer charges cannot follow the ac signal in the depletion region. The N_{ss} decreases exponentially with increasing frequency. The C-V and

G/w-V characteristics show the expected behavior due to N_{ss} in equilibrium with the semiconductor. Dielectric constant (ε'), dielectric loss (ε'') and, dielectric loss tangent (tanδ) were studied for MFIS structure and calculated from C-V and G/w-V measurements. The dielectric parameters were quite sensitive to temperature and frequency at relatively high temperatures and at low frequencies. The ε' and ε'' were decreasing with increasing frequency while increasing with increasing temperature. The interfacial polarization can be more easily occurred at low frequencies, and the number of interface states density between semiconductor/insulator interfaces, consequently, contributes to the improvement of dielectric properties of MFIS structure.

Science Code :404.05.01
Key Words :MFIS structure; Temperature and frequency dependence, Dielectric properties, Series resistance; Surface states
PageNumber :113
Adviser :Assoc.Prof. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve engin tecrübelerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi, danışmanım Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmalarım boyunca manevi desteklerini esirgemeyen babam Abdurrahman Eren ve annem Güler Eren'e gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca sabır gösteren eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……...iv

ABSTRACT……vi

TEŞEKKÜR…….....viii

İÇİNDEKİLER……ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ……...…xii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ……..…….xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR……...xvi

1. GİRİŞ……1

2. GENEL TANIMLAR VE METAL-FERROELEKTRİK-YALITKAN-YARİİLETKEN (MFIS) YAPILARIN TEORİSİ……8

2.1. Tanımlar…….8

2.1.1. Metaller/İletkenler……...8

2.1.2.Ferroelektrik malzemeler ve özellikleri……...8

2.1.3. İletken, yalıtkan ve yarıiletken kavramları……...12

2.2. Silisyum Kristalinin Temel Özellikleri…….....……...16

2.3. MIS ve MFIS Yapılar…….……..19

2.3.1. MIS yapı……19

2.3.2. Gerçek MIS yapısı…….……28

2.3.3. MFIS yapı…….29

2.4. Analiz ve Karakterizasyon Yöntemleri…….……...33

2.4.1. Yapısal analiz……..……..33

2.4.2. Yüzey analizi yöntemleri……..34

Sayfa

2.4.3. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri……...35

2.5. Dielektrikler…….……36

2.5.1. Dielektrik malzemelere statik elektrik alanın etkisi…….....39

2.5.2. Dielektrik kutuplanma ……..……42

2.5.3. Dielektriklerde kutuplanma mekanizmaları…….....48

2.5.4. Dielektriklerde elektrik alan ve dielektrik kayıp……..52

2.5.5. Dielektrik sabitinin hesaplanması…….60

3. DENEYSEL YÖNTEM……..63

3.1. Deneysel Hazırlık……63

3.1.1. MFIS Yapının oluşturulması…….63

3.2. Fiziksel Karakterizasyon Teknikleri……..……..…..……. 65

3.2.1. X-ışınları kırınımı yöntemi (XRD)……...……65

3.2.2. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM)……66

3.3. Elektriksel Karakterizasyon Teknikleri……66

3.3.1. Frekansa bağlı kapasitans voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri……...……....66

3.3.2. Sıcaklığa bağlı kapasitans voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri……...67

4. DENEYSEL SONUÇLAR…….……68

4.1. Yüzey Morfolojisi ve Yapısal Analiz……..68

4.2. Frekans ve Sıcaklığa Bağlı C-V ve G/w-V Ölçümleri……..….....71

4.2.1. Au/Bi4Ti3O12/SiO2/n-Si(MFIS) yapının frekansa bağlı elektriksel karakteristikleri……71

4.2.2. Au/Bi4Ti3O12/SiO2/n-Si(MFIS) yapının sıcaklığa bağlı elektriksel karakteristikleri……..……..85

Sayfa

4.3. Au/Bi4Ti3O12/SiO2/n-Si(MFIS) Yapının Frekans ve Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Özellikleri……..90

4.3.1. Dielektrik özelliklerin frekansa bağlı değişimi…...……...……...91

4.3.2. Dielektrik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimi……....96

5. SONUÇ…….....99

KAYNAKLAR…….……104

ÖZGEÇMİŞ…….…….112

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Elektronikte kullanılan yarıiletkenler ve kullanım yerleri……..15

Çizelge 2.2. Si yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 ^{o}K) bazı özellikleri……...18

Çizelge 2.3. Bazı dielektrik maddelerin özellikleri……37

Çizelge 4.1. MFIS yapının 1 kHz-5 MHz frekans aralığında C-V ve G/w-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel elektriksel parametrelerine ait değerler……...82

Çizelge 4.2. MFIS yapı için 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ters beslem C-V karakteristiklerinden elde edilen çeşitli parametreler……83

Çizelge 4.3. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si (MFIS) yapı için 80-400 K sıcaklık aralığında C-V ve G/w-V karakteristiklerinden elde edilen çeşitli parametreler…..…….88

Çizelge 4.4. MFIS yapı için farklı sıcaklık değerlerinde hesaplanan deneysel N_d, V_d, E_F, $\Delta\Phi_B$, Φ_B(C-V) parametreleri…….....……89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Bizmut içeren tabakalandırılmış pervoksite ferroelekrik bir yapının gösterimi:A-perovskite tabaka, B-birim hücre, C-bizmutoksit tabakası.....11

Şekil 2.2. İletken, yalıtkan ve yarıiletken madde atomlarının şematik gösterimi…....13

Şekil 2.3. (a) Yalıtkan, (b) yarıiletken, (c) iletken madde için enerji band diyagramları…….…….....13

Şekil 2.4. Silisyum atomlarının kristal yapısı ve basit bir kübik kristal yapı……..17

Şekil 2.5. Bir MIS yapının şematik gösterimi……..20

Şekil 2.6. V=0'da ideal bir (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken MIS yapının enerji-bant diyagramı……..21

Şekil 2.7. Bir MIS yapının eşdeğer devresi…….23

Şekil 2.8 V ≠0 durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması. (a) Yığılma (b) Tüketim (c) Tersinim…….……...25

Şekil 2.9. İdeal bir MIS yapının (a) Yığılıma (b) Tükenim (c) Tersinim durumlarında elektronik şeması……..……27

Şekil 2.10. İdeal olmayan bir MIS/MOS yapı için arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması……...28

Şekil 2.11. Metal-Ferroelektrik-Yalıtkan-Yarıiletken yapının şematik gösterimi…...30

Şekil 2.12. Bir MFIS yapı için farklı çalışma bölgeleri için enerji bant diyagramları……32

Şekil 2.13. MFIS yapının elektriksel ölçümlerinin şematik diyagramı……...35

Şekil 2.14. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör……..40

Şekil 2.15. Dielektrikli Kondansatör……...41

Şekil 2.16. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri……...44

Şekil 2.17. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu…….……...45

Şekil 2.18. D'nin zamanla değişim grafiği (E=sabit)…….....54

Şekil 2.19. Elektrik alanın (E) zamanla değişim grafiği (D=sabit)……....55

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.20. Dielektrik sabitinin gerçel (ε') ve sanal (ε") bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi……...……...…….....58

Şekil 2.21. Dielektrikli bir kondansatördeki a.c. akım……....61

Şekil 2.22. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki……..……62

Şekil 3.1. Yapının (a)üst ve (b) alt kontakları oluşturulurken kullanılan bakır maskelerin şematik görünümü……....……...…….64

Şekil 3.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği……..…….64

Şekil 3.3. Oluşturlulan MFIS yapının kesit alanları şematik olarak gösterilmektedir……..…….65

Şekil 3.4. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek……67

Şekil 4.1. Oluşturulan MFIS yapının (a) 300 K'de elde edilen $Bi_4Ti_3O_{12}$ filmlerin X-ışınları kırınım desenleri (b) $Bi_4Ti_3O_{12}$ filminin (AFM) yöntemiyle elde edilen görüntüsü.……69

Şekil 4.2. Oluşturulan MFIS yapının (a) oda sıcaklığında farklı frekanslardaki (b) 100 kHz frekansta farklı sıcaklıklardaki histeriz eğrileri……71

Şekil 4.3. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının oda sıcaklığında, farklı frekanslardaki C-V karakteristikleri……..…….75

Şekil 4.4. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının oda sıcaklığında, farklı frekanslardaki G/w-V karakteristikleri……76

Şekil 4.5. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının 1 MHz frekansta ölçülen ve düzeltilmiş C_c-V eğrileri……...77

Şekil 4.6. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının 1 MHz frekansta ölçülen ve düzeltilmiş G_c/w eğrileri……..78

Şekil 4.7. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslardaki, $1/C^2$-V Karakteristikleri……..…79

Şekil 4.8. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen seri direnç-voltaj (R_s-V) eğrileri….....80

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.9. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si(MFIS) yapının oda sıcaklığında farklı doğru beslem voltajlar için elde edilen seri direnç-frekans (R_s-f) eğrileri…….....81

Şekil 4.10. MFIS yapı için oda sıcaklığında, arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) frekansa bağlı grafiği……..…….84

Şekil. 4.11. MFIS yapının 1 MHz frekansta, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen C-V karakteristikleri…….....…….....85

Şekil 4.12. MFIS yapının 1 MHz frekansta, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen G/w-V karakteristikleri…….....…….....……...86

Şekil 4.13. MFIS yapının 1 MHz frekansta farklı sıcaklıklar için C^{-2}-V grafiği ...…88

Şekil 4.14. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si(MFIS) yapının farklı sıcaklıklar için bariyer hesaplanan yüksekliği değerleri…….....…..……90

Şekil 4.15. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si yapının farklı sıcaklıklar için;
(a) dielektrik sabiti (ε').....93
(b) dielektrik kayıp (ε") ve.....94
(c) kayıp açı (tanδ)'nın frekansa bağlı eğrileri……..94

Şekil 4.16. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n$-Si (MFIS) yapının 100 kHZ ve 500 kHz için

(a) ε', (b) ε".....97
(c) tanδ parametrelerinin sıcaklığa bağlı grafiği.....….....98

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
σ_f	Serbest yüzey yük yoğunluğu
σ_b	Bağlı yüzey yük yoğunluğu
D	Elektrik yerdeğiştirme vektörü
V	Uygulanan gerilim
Ω	Açısal frekans
χ_e	Dielektriğin elektrik iletkenliği
R	Dielektrik dayanıklılık
E	Elektrik alan şiddeti
Q	Elektrik yükü
tanδ	Dielektrik tanjant (Kayıp açı)
$\vec{P}$	Elektrik dipol momenti
Å	Angström
C_{ox}	Oksit kapasitansı
A_{ox}	Oksit tabakasının alanı
d_{ox}	Oksit kalınlığı
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
τ	Arayüzey tuzaklarının ömrü
Ψ_s	Yüzey potansiyeli
ε_o	Boşluğun dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ε_{ox}	Oksit tabakasının dielektrik sabiti
ε'	Dielektrik sabiti
ε''	Dielektrik kayıp

Simgeler	Açıklama
ΔV_{FB}	Düz bant gerilim kayması
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
P	Kutuplanma vektörü
W_D	Tükenim bölgesi kalınlığı
Q_{sc}	Yarıiletkendeki uzay yükü
D_{it}	Arayüzey durum yoğunluğu
R_s	Seri direnç
C	Kapasitans
G	İletkenlik
G_p	Paralel iletkenlik
Z	Empedans
Y	Admittans

Kısaltmalar	Açıklama
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Al/SiO_2/p-Si Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MFIS	Metal-Ferroelektrik-Yalıtkan-Yarıiletken
MFM	Metal-Ferroelektrik-Metal
FET	Alan Etkili Ttanzistör
FeRAM	Ferroelektrik Random Geçişli Hafıza
FeFET	Ferroelektrik Alan Etkili Tranziztör
BTO	$Bi_4Ti_3O_{12}$
C-V	Kapasitans-voltaj
G/ω-V	İletkenlik-voltaj
ac	Alternatif gerilim
dc	Doğru gerilim
HF	Yüksek frekans

Kısaltmalar	**Açıklama**
LF	Düşük frekans
C_{HF}	Yüksek frekans kapasitansı
C_{LF}	Düşük frekans kapasitansı

1. GİRİŞ

Teknolojik ilerleme, çeşitli materyallerin ve bu materyallerden oluşturulan elemanların geliştirilmesiyle yakından ilgilidir. Çağımızın en önemli çalışmalarından birisi, bilgisayar ve fiber optik telekominikasyon sistemlerindeki çeşitli mikroelektronik ve optoelektronik cihazlar için; hesaplama, hafıza depolama ve iletişim gibi uygulamaların çok önemli bileşenleri olan yarıiletkenler ve ferroelektriklerle ilgilidir.

Son onyılda ferroelektrik malzemeler, dikkate değer fiziksel özelliklerinden dolayı yoğun araştırmalara konu olmaktadır. Ferroelektrik ince filmler, ferroelektrik hafızalar ve piezoelektrik aygıtlar gibi, bir çok teknolojik uygulamada önemli yer tutmaktadır. Metal elektrotlar arasında sandviç yapı oluşturacak şekilde konumlandırılan ferroelektrik ince filmler, önemli ölçüde araştırmalara konu olmuş ve FeRAM (ferroelectric random access memories)'larda hafıza ortamı olarak geliştirilmiştir. FeRAM'lar kararlı hafızalar olup, bir güç kaynağı olmadan da bilgiyi saklayabilme özelliğine sahiptir [1]. $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO), FRAM (ferroelectric random access memory)'lar, optik hafızalar, piezoelektrik ve elektro-optik cihazlar için faydalı özelliklerinden dolayı tipik bir ferroelektrik malzemedir [2,3].

Kalıcı ve kararlı katıhal hafızaları bilgi teknolojilerinde önemli bir yere sahiptir. Manyetik ve optik kütle depolama aygıtlarıyla karşılaştırıldığında, daha güçlü oldukları ve daha hızlı data giriş süresine sahip oldukları söylenebilir. Bunun sebebi, hareketli parçalarının olmamasıdır. FET (field effect transistor) hafızaları umut vericidir. Çünkü onlar, hasarsız okuyabilme moduna sahiptirler [4]. Sabit hafızaların bir çeşidi olan ferroelektrik alan etkili tranzistörler (FeFET), alternatifleriyle karşılaştırıldığında bir çok avantaja sahiptir. Hızlı ve hasarsız okuma kabiliyetine sahip olduklarından, bilginin yenilenmesine gerek yoktur ve bugünkü teknoloji ile geliştirilebilir olduğundan, evrensel bir hafıza elemanı olarak kabul görmüştür. FeFET'ler temelde geçit oksit ile silikon yüzeyi arasında ferroelektrik bir tabaka yerleştirilmiş bir MOSFET (metal-oksit-yarıiletken FET)'tir. Geçide bir voltaj

uygulandığında kutuplanma gözlenir. Teknik sebeplerden dolayı silisyum ve ferroelektrik arasında genellikle önlenemeyen başka bir tabaka oluşur.

1950'lerin sonlarında FeFET'lerin ortaya çıkmasıyla beraber, silisyum üzerine farklı ferroelektrik malzemelerin büyütülmesi, MFS (metal-ferroelektrik-yarıiletken) FET yapıyı direk elde etmek için veya bir dielektrik tabakanın eklenmesiyle indirekt olarak MFIS FET yapıyı oluşturmak için ya da hareketli elektronları zayıflatarak MFMIS FET yapıların oluşturulması gibi birçok araştırma gerçekleştirilmiştir [5-8]. En iyi aygıtların 10 yıldan daha az süreyle hafızada tutma özelliğine sahip olması, endüstriyel açıdan araştırmalar için bir gereklilik doğurmuştur. Bahsedilen süre, Si üzerine Al_2O_3 üzerine BLT($Bi_{3.45}La_{0.75}Ti_3O_{12}$) ile oluşturulan MFIS yapı için $1.5x10^6$ s (17 gün) olup, 2004 yılına kadar rapor edilen en yüksek değere sahiptir [8].

FeFET araştırmaları için kronolojik sıralama aşağıda yer almaktadır [9]:

* FeFETlerin ilk örneği oluşturulması (1957),
* CdS üzerine TGS (triglycine sülfate) uygulanması (1963),
* İlk defa Si üzerine $BiTiO_3$ uygulanması (1974),
* SiO_2 arayüzey tabakasını önlemek için, Si üzerine oksijensiz ferroelektrik $BaMgF_4$ ferroelektririğin (MFS) büyütülmesi (1991),
* Si üzerine $LiNbO_3$ (FeFET) uygulanması (1991),
* $BaMgF_4$ kullanarak FeFET aygıtlarla çalışmaların yapılması (1991),
* Daha iyi arayüzeyler elde etmek için, MFMIS yapıların oluşturulması (1995),
* $PbZi_{1-x}TixO_3$ ile MFMIS FET'lerin rapor edilmesi (1995),
* Arayüzey oksit tabaka olarak Y_2O_3, CeO_2, $SrTiO_3$, MgO, SiN ortaya konması (1995-2000),
* Si üzerine başarıyla $SrTiO_3$ büyütülmesi ve içerisinde geçit dielektriği olarak kullanılması (1998-2000),
* $SrBi_2Ta_2O_9$ (SBT) MFMIS FET'lerin ve yüksek k-dielektriklerin rapor edilmesi (1999-2000),
* 1T-2C (1 tranzistör-2 kapasitör) FeFET hücre yapısının ortaya konması (2000),

* Düşük arayüzey durum yoğunluğu ile $BaTiO_3$ ün Si üzerine büyütülmesi (2000),
* MFIS-FET'lerde, aşırı yorulma karakteristiği göstermeyen $(Bi,La)_4Ti_3O_{12}$ (BLT) kullanılması (2001),
* Si üzerine $(Zr,Hf)O_2$ ve üzerine $Pb_3Ge_5O_{11}$ (PGO) büyütülmesi (MFIS) (2002),
* Si üzerine indirekt olarak düşük polarizasyona sahip ferroelektrik Y_2MnO_3 büyütülmesi (MFIS) (2003),
* Al_2O_3 üzerine $1.5x10^6$ s (17 gün) hafıza zamanlı BLT ile MFIS-FET oluşturulması (2004),
* Yttrium oxide buffer tabakası için termal-stres kararlılığının belirlenmesi (MFIS) (2005),
* NiMnGa tabanlı hafıza ferromagnetlerin oluşturulması (2006),
* Bizmut tabanlı MFIS yapıların elektriksel ve dielektrik karakteristiklerinin belirlenmesi (2007).

FeFET'lerle ilgili araştırmaların yaklaşık 50 yıldır devam etmesine rağmen, hala ideal aygıtın bulunması zordur. Belirlenen problemler içerisinde en kayda değer olan, hafıza zamanının azlığıdır. Düşük arayüzey durum yoğunluğunun sağlanması, geçit yığılmaları için üretim teknolojisinin geliştirilmesi, yeni materyallerin kullanılması gibi yapıcı çözümler henüz ortaya atılmıştır.

$Bi_4Ti_3O_{12}$ Auruvillius $Bi_2O_2(A_{n-1}B_nO_{3n+1})$ serilerin n=3 üyesidir ve ferroelektrik tabanlı sabit hafızalar ve elektro-optik aygıtlar için ilgi çekicidir [10]. Oda sıcaklığında BTO, a=5.41 Å, b= 5.45 Å ve c= 32.83 Å örgü sabitleri ile pseudo-orthorombic yapıdadır. BTO formülünün 2 birimini oluşturacak birim hücre uzunluğu 32 Å'dür. $Bi_4Ti_3O_{12}$, Aurivillius ailesi içerisinde tabakalandırılmış yapısı ile yer alan ferroelektrik bir malzemedir [11]. Mükemmel elektriksel ve elektromekanik özelliklerinden dolayı yüksek kaliteli bir materyal olarak anılmaktadır. Bunun yanısıra BTO ince filmleri, bir çok elektronik aygıt içerisinde, uygulamalarda güçlü bir potansiyele sahiptir. $Bi_4Ti_3O_{12}$ filmler, bizmut tabanlı ferroelektrik yapılar içerisinde en basit ve iyi bilineni olup, düşük zorlayıcı alan, yüksek dielektrik sabiti, yüksek Curie sıcaklığı (675 ^oC), yüksek dielektrik kırılma

gücü, düşük dilektrik kayıp ve yüksek anizotropik özelliğe, kendine özgü açma kapama davranışına sahip olduğundan kısmen ilgi çekicidir [12]. Anlık kutuplanmanın büyük bileşeni bizmut tabakalarına paraleldir.

Ferroelektrik malzemelerin fiziksel özelliklerini optimize etmek için, bu malzemelerin mikroyapılarını belirlemek gerekmektedir. Ferroelektrik malzemelerin mikroyapıları elektriksel özelliklerin anlaşılmasında ve ortaya konmasında önemli rol oynamaktadır. Yapısal analiz ve yüzey morfolojisi elde edilen ürünün kalitesini belirleyecek özellikleri ortaya koymaktadır. İnce film yüzey morfolojisi, genellikle, aygıtların performansı açısından çok önemli olan elektriksel veya optik özellikleri belirler [10]. Kontrol sağlamak için, film büyütülürken birikim esnasında ve daha sonra yüzeyi karakterize etmek önemlidir.

Ferroelektrik malzemeler polarizasyon-elektrik alan etkileşiminden dolayı histeriz eğrisine sahiptir. Histeriz eğrisi, ferroelektrik malzemenin hafıza penceresi (memory window) hakkında bilgi verir. Ferroelektrik davranışı araştırmak için en basit yapı kapasitörlerdir. Ferroelektrik (BTO) ince filmler metal elektrotlar arasında sandviç yapı oluşturacak şekilde konumlandırılmış, anlamlı çalışmalar yapılmış ve FeRAM'lar olarak ortaya çıkmıştır [1,12,13]. MFM yapı, ferroelektrik malzeme üzerindeki metal veya iletken metal oksitten oluşur. Yarıiletken teknolojisinde en arzu edilen yapı, metal-oksit yarıiletken (MOS) yapının bir çeşidi olan MFS yapıdır. Oluşturmadaki uyuşmazlıklardan dolayı arzu edilen yapı, MFIS yapıya dönmüştür. BTO/Si arayüzeylerinde SiO_2, SnO_2 ve Si_3N_4 gibi ince bir yalıtkan tabaka kullanarak MFS yapı, MFIS yapı haline getirilmiştir. Bu ultra ince arayüzey yalıtkan tabaka (SiO_2), ferroelektrik film (BTO) ve (Si) örneği arasındaki iç difüzyonu önlemekle kalmaz, aynı zamanda MFIS yapılarda yük geçişlerini düzenler dolayısıyla elektrik alanda azalma olmasını engeller. MFIS yapıdaki ferroelektrik tabaka MOS kapasitöre hafıza fonksiyonu kazandırır [14]. MFIS yapıda bir veya daha fazla yalıtkan ilavesi yarıiletken ve ferroelektrik arasına konulmuştur.

MFIS yapılarda, arayüzey yalıtkan tabaka varlığında, bu aygıtlara kapasitif özellikler eklenir. Yalıtkan tabakanın dielektrik özelliğinden dolayı, elektrik yükü paylaşılır. Bu durum yapının temel elektriksel parametrelerini etkiler. C^{-2}-V grafiğinde doğru beslemde, beklenmeyen büyüklükte kesme voltajı ve ters gerilim bölgesinde doğrusallığın bozulması şeklinde gözlenir. Bir MFIS yapıda, metal ve yarıiletken yalıtkan bir tabakayla ayrılır ve yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde yüzey durumlarının dağılımı süreklidir. MFIS yapıya bir voltaj uygulandığında, arayüzey yalıtkan tabaka, tüketim tabakası ve seri direnç bu voltajı paylaşır. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-oksit-yarıiletken (MOS), metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) ve metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapılarda arayüzey durumlar (N_{ss}) ve seri direnç (R_s), temel elektriksel parametreleri etkileyen önemli parametrelerdir. R_s belirlenmesi için önerilen birkaç metod, içerisinde en önemlisi Nicollian and Goetzberger tarafından geliştirilen iletkenlik tekniğidir [15-18]. Bu teknik ile doğru ve ters beslem C-V-f ve G/w-V-f ölçümleri, MFIS yapının seri direnci ve yüzey durumların dağılımı hakkında önemli bilgiler elde edilir. R_s etkisinden dolayı, MFIS yapının gerçek kapasitansını elde etmek için yüksek frekansta, doğru ve ters beslem kapasitans ve iletkenlik ölçümleri düzeltilmiştir.

Son yıllarda doğru beslem C-V karakteristiklerinde, bazı araştırmalar sonucunda beklenmeyen piklerle karşılaşıldığı rapor edilmiştir. Bu araştırmalar içerisinde en ilgi çekici olanı Chattopadhyay ve Raychaudhuri tarafından sunulmuştur [19]. Vardıkları sonuç, seri direnç varlığında C-V karakteristiklerinde bir pik gözlendiğidir. Gözlenen pikin değeri ve pozisyonu, yüzey durum yoğunluğu, taşıyıcı konsantrasyonu, yapının seri direnci, yalıtkan tabaka kalınlığı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bir metal ile yarıiletken arasında sıkı temas sağlanırsa, termal denge kuruluncaya kadar aralarında taşıyıcı geçişleri olur. Bu kontaklar hakkında bir asırdan fazla bilgi olmasına rağmen araştırmalar devam etmektedir. Son yıllarda yüzey ve arayüzey biliminde uygulanan teknikler, metal ve yarıiletken arasında oluşturulan arayüzeylerin karmaşık bölgeler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu karmaşık bölgelerin fiziksel özellikleri yüzeyin hazırlanma koşullarına bağlıdır. Birçok durumda, bilinmeyen içeriklere sahip yüzeylerde metal kontaklar, arayüzey durumlara sebep olmaktadır [20-22]. Bu

arayüzey durumlar metal-yarıiletken yapıların kararlılık, doğruluk, performans, elektriksel ve mekanik özelliklerine etki edebilmektedir. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıda, arayüzey durumlar, metal-yarıiletken (MS) yapınınkiyle karşılaştırıldığında çok daha azdır. Çünkü, MIS yapıya voltaj uygulandığında arayüzey yalıtkan tabaka, tüketim tabakası ve seri direnç bu uygulanan voltajı paylaşmaktadır. Burdan yola çıkarak çalışmalar MIS yapılar üzerine yoğunlaşmıştır. Daha sonra metal ve yalıtkan tabaka arasına ferroelektrik bir malzeme konularak, metal-ferrolektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapılar oluşturulması, bu şekilde bazı yüzey problemlerinin çözümlenebileceği düşünülmüş ve bu alanda çalışmalar gündeme gelmiştir [21].

Günümüzde, metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken(MIS), metal-oksit-yarıiletken (MOS) veya metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapıların kapasitans-voltaj (C–V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω–V) karakteristikleri, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve yalıtkan tabaka etkisi dikkate alınarak frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmektedir [12,23]. Prensipte MFIS tabanlı kararlı hafıza aygıtlarını geliştirmek, daha çok arzu edilmektedir. Hasarsız okuma kabiliyetine sahip bu yapılar, hem depolama hem de hassasiyet elemanı olarak kullanılmaktadır. MFIS yapılar, ferroelektrik malzeme ile yarıiletken tabakaların arasına, doğal yada yapay bir oksidasyon yöntemi kullanılarak, ince bir yalıtkan tabakanın ilavesiyle oluşturulur [12,24]. Bu yalıtkan tabaka metal ile yarıiletkeni birbirinden izole etmekle kalmaz, aynı zamanda yük geçişlerini düzenler.

Bu tez çalışması, oluşturulan $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ (MFIS) yapının elektriksel ve dielektrik özelliklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada amaçlanan, deneysel olarak, MFIS yapıya ait kapasitans ve iletkenlik karakteristiklerinin, frekans ve sıcaklığa bağlığının, seri direnç ve arayüzey durumların etkisini dikkate alarak belirlenmesidir. R_s ve N_{ss} etkilerini daha iyi gözlemlemek amacıyla, deneysel kapasitans ve iletkenlik ölçümleri hem doğru hem de ters beslemde gerçekleştirilmiştir. Arayüzey durum yoğunluğunun frekans ve sıcaklığa bağlılığı Hill-Coleman yöntemiyle belirlenmiştir

[24]. Öncelikle, filmlerin yapısal özellikleri ve yüzey morfolojisi, sırasıyla X-ışınları kırınımı (XRD) ve Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM) yöntemiyle incelenmiştir. Yapının ferroelektrik özelliğini belirlemek amacıyla farklı frekans ve sıcaklıklarda histeriz eğrisi elde edilmiştir. Daha sonra oluşturulan $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ (MFIS) yapıların hem frekansa hem de sıcaklığa bağlı doğru ve ters beslem kapasitans-voltaj (C-V), iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri geniş bir frekans (1 kHz-5 MHz) ve sıcaklık aralığında (80-400 K) incelenmiştir.

Birinci bölümde ferroelektrik hafıza elemanlarının teknolojik gelişiminden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, bazı tanımlar ile metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapıların elektrik ve dielektrik teorisine değinilmektedir. Üçüncü bölümde, $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ yapıların hazırlanma aşamaları, deneysel ölçüm sistemleri ve kullanılan ölçüm cihazları hakkında bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde, elde edilen deneysel sonuçlarla ait tüm grafik ve çizelgeler verilmektedir. Beşinci bölümde ise, eldeki tüm bulgularla ulaşılan nokta ve sonuçlar yer almaktadır.

2. GENEL TANIMLAR VE METAL-FERROELEKTRİK-YALITKAN-YARIİLETKEN (MFIS) YAPILARIN TEORİSİ

Bu bölümde, bazı tanımlar ile metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFYY) veya orijinal adıyla metal-ferroelectric-insulator-semiconductor (MFIS) yapıların teorisinden bahsedilmektedir. Ferroelektrik malzeme (BTO) ile yarıiletken tabaka (n-Si) arasında büyütülen yalıtkan tabakanın temel fiziksel özellikleri de anlatılmaktadır. Yalıtkan arayüzey tabaka (SiO_2), ferroelektrik malzeme ile yarıiletken arasına doğal ya da termal oksidasyon gibi yöntemlerle oluşturulur. Bu yalıtkan arayüzey tabakasına SiO_2, SnO_2 ve Si_3N_4 örnek verilebilir. MFIS yapıları daha iyi anlayabilmek için kısaca metal, ferroelektrik, yalıtkan ve yarıiletken kavramlarından bahsetmek gerekir.

2.1. Tanımlar

2.1.1. Metaller / İletkenler

Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği gösteren elementler, literatürde *metaller* sınıfı olarak adlandırılır [25]. Metallerin yaygın bir şekilde kullanılmalarının sebebi, istenilen şekle getirilebilme ve diğer metallerle karışımlarının kontrol altında tutularak, mukavemet ve diğer özelliklerinin arttırılabilmesidir.

Yarıiletken aygıtlarda, MS, MIS, MFIS yapılarda omik ve doğrultucu kontaklar oluşturulurken çok saf metaller kullanılır ve yarıiletkenin p veya n tipi olmasına göre Al veya Au gibi uygun metaller seçilir [22]. Bu çalışmada, MFIS yapı oluşturulurken, doğrultucu ve omik kontaklar saf altın (%99,999) kullanılarak elde edilmiştir.

2.1.2. Ferroelektrik malzemeler ve özellikleri

Ferroelektrik malzemeler genellikle yüksek dielektrik sabitine sahiptir ve dielektriksel özellikleri sıcaklık ve elektrik alana bağlıdır. Ferroelektrik malzemeler,

ısı etkisiyle kutuplanabilen piroelektrik malzemelerin bir alt sınıfı olup, dış bir elektrik alan uygulandığında, merkezindeki atomun yönelimine bağlı anlık kutuplanma göstermektedir. Ferroelektrik malzemeler piezoelektrik özellikler gibi pyroelektrik özellikler de göstermektedir [26-27].

Birçok yıldır cihazlarda çeşitlilikle kullanılmalarına rağmen ferroelektrik malzemeler, malzemelerin pyroelektrik veya piezoelektrik gibi diğer özellikleri olmuş ve kullanılmışlardır. Bu durum son birkaç yılda değişmiştir. Ferroelektrik malzemelerin rastgele giriş hafızalarında kullanılmaları ve birçok uygulamada manyetik kor hafızaları ve manyetik balon hafızalarının yerini alması beklenmektedir. Bunun yanında, ferroelektrik malzemeler yüksek dielektrik sabitinden dolayı elektronik endüstrisi için kapasitör üretiminde kullanılabilir ve elektronik ürünlerin daha çok fonksiyonlu olması ve boyutlarının minyatürize edilmesi açısından da yeni bir bakışa sahiptirler. Dahası ferroelektrik malzemeler, potansiyel uygulamalara sahip uydular, yeryüzünde iletişim ve diğer mikrodalga uygulamaları gibi alanlarda kullanılan, çalışma frekansları Si tabanlı cihazlarınkinden daha yüksek bir aralıkta olan tünellenebilir mikrodalga cihazlarının geliştirilmesinde kullanılabilir.

Ferroelektrik ince filmler kullanılarak elektriksel olarak tünellenebilir mikrodalga karmaşık devreleri geliştirilebilir. Bu yüzden ferroelektrik ince filmlerin dielektrik sabiti ve tünelleme etkisini karakterize etmek çok önemlidir. Ferroelektrik malzemelerin kompozit, polikristal seramik, tek kristal tozu ve ince film halinde olmalarına göre, farklı karakterizasyon yöntemleri uygulanmalıdır. Genellikle kompozitler, seramikler ve ferroelektrik kristal tozunun dielektrik özellikleri karakterize edilirken nonrezonant ve rezonant metodlar kullanılır [28]. Çoğunlukla bu tip malzemelerin dielektrik relaksiyonlarına ilgi duyulur ve ferroelektrik ince filmler genellikle planar devre metodları kullanılarak karakterize edilir ve hemen hemen dielektrik relaksiyon ve elektriksel tünellemenin dahil olduğu tüm dielektriksel özelliklerinin belirlenmesi istenir.

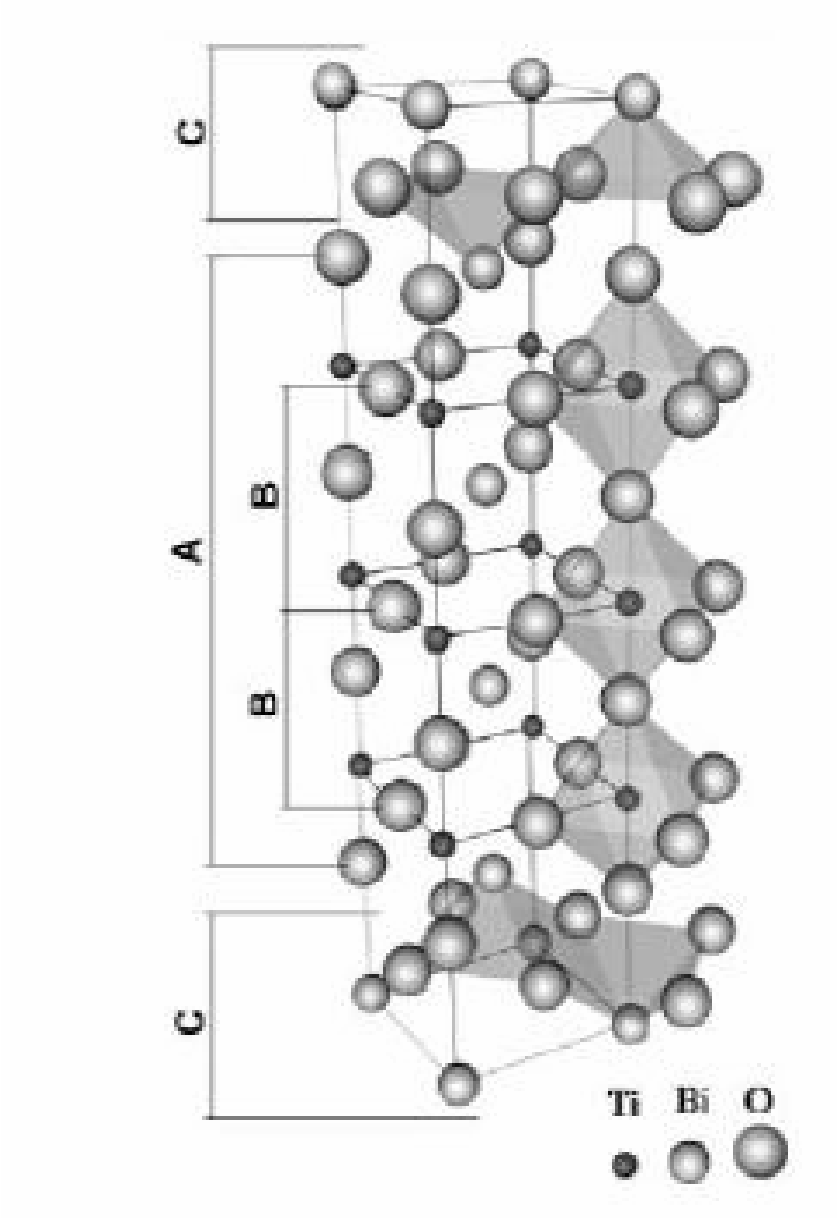
Ferroelektrik malzemelerin karekterizasyonunda dikkate alınması gereken özelliklerden birincisi, bu malzemelerin dielektrik sabitlerinin oldukça yüksek olmasıdır. İkincisi, dc elektrik alanın uygulanma şekilleridir. Üçüncüsü ise, ölçüm sıcaklığının nasıl kontrol edileceğidir.

Ferroelektrik hafıza ile ilgili ilk deneyler, Moll ve Tarui tarafından 1963 yılında Stanford üniversitesinde gerçekleştirilmiştir [28,29]. Uygulamalar için bu hafıza elemanından beklenen, adapte edileceği sistem içerisinde, değişken artış bileşeni olarak yer alması olmuştur. Bu aygıt için temel düşünce bir ferroelektrik malzeme içerisinde hafıza fonksiyonun olması ve ferroelektrik malzemede artık kutuplanma ile bir yarıiletkenin alan etkili iletimini kontrol edebilmesidir. O dönemde, ferroelektrik ince filmlerden daha çok, yarıiletkenlerle ilgili deneyimler mevcut olduğundan, tek kristal ferroelektrik malzemenin, yarıiletkenle kombinasyonu tercih edilmiştir [29].

Son yıllarda ferroelektrik hafıza aygıtları, yeni jenerasyon karmaşık devrelerde, çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliği açısından, oldukça ilgi çekici olmuştur. Ferroelektrik ince filmlerin, metal elektrotlar içerisine sandviç yapı haline getirilmesi konusunda, oldukça kapsamlı çalışmalar yapılmış ve FeRAM'lar olarak ortaya çıkmıştır. Bu filmler ferroelektrik rastgele girişli hafızalarda (FeRAMs), hafıza elemanı olarak geliştirilmiştir. FeRAM'ar kararlı hafızalar olup, bir güç kaynağı kullanmadan, bilgiyi saklayabilme özelliğine sahiptir [30]. FeRAM'arı daha iyi anlamak için, bir metal-ferroelektrik-metal (MFM) tipli kapasitör geliştirilmiştir [13].

Diğer bir ferroelektrik hafıza elemanı, ferroelektrik alan etkili tranzistörler (FeFET)'dir. (FeFET) ve alan etkili tranzistörlerde, metal-ferroelektrik-yarıiletken yapı oluşturmak için, ferroelektrik ince filmleri kullanılır. Böyle bir yapıda yarıiletkenin yüzey potansiyeli, ferroelektrik ince filmlerdeki kutuplanma ile kontrol edilir.

Günümüzde en çok bilinen ferroelektrikler içerisinde, karmaşık oksitlerin ferroelektrik bileşenleri yer almaktadır. Bu sınıf bileşenler içerisinde $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO) yer almaktadır. FeRAM, optik hafıza ve görüntüleme, elektro-optik cihazlar, yüksek sıcaklık piezoelektrik yapı ve kalıcı hafıza için kullanıma aday, tipik bir ferroelektrik malzemedir [30-33].



Şekil 2.1. Bizmut içeren tabakalandırılmış perovskite ferroelekrik bir yapının gösterimi: A- perovskite tabaka, B- birim hücre, C- bizmutoksit tabakası

Şekil 2.1'de bizmut içeren tabakalandırılmış perovskite ferroelekrik bir yapının şematik gösterimi verilmektedir. $Bi_4Ti_3O_{12}$ filmler, bizmut tabanlı ferroelektrikler arasında en basit ve iyi bilinen bileşiklerden biri olup, kendine özgü elektro-optik açma kapama davranışı yüzünden kısmen ilgi çekicidir [34-35]. Araştırmalarda tercih edilmesinin sebebi; c-ekseni bileşeninin küçük olması, anlık kutuplanma kabiliyeti, yüksek dielektrik sabiti, yüksek Curie sıcaklığı (675 ^oC) ve kırılma gücünün yüksek olmasıdır [3]. Bu çalışmada ferroelektrik malzeme olarak, $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO) ince filmi kullanılmıştır.

Ferroelektrik Malzemelerin Sıcaklığa Bağlılık Özelliği

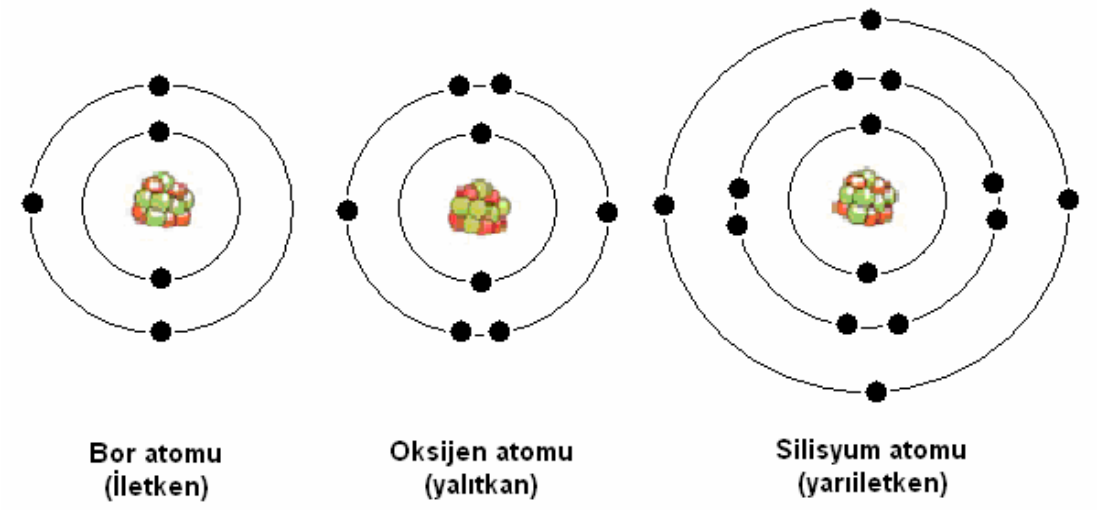
Ferroelektrik malzemelerin önemli bir yönü, birçok özelliğinin sıcaklığa bağlı olmasıdır. Örneğin, ferroelektrik malzemenin histeresis eğrisi, dielektrik sabiti ve kristal yapısı sıcaklıkla değişebilir. Ferroelektrik malzemelerin dielektrik sabiti dış bir dc elektrik alan uygulandığında değişebilir. Dış bir elektrik alandan dolayı dielektrik sabitindeki değişim, tünelleme etkisi olarak tanımlanabilir.

Ferroelektrik bir malzemenin dielektrik kaybı genellikle uygulanan dc elektrik alanına bağlıdır. Genellikle dielektrik kayıp artan dış dc elektrik alanla azalır. Deneysel ölçümler ferroelektrik malzemelere ait kayıp açı tanjantın daha yüksek olması durumunda, daha büyük tünelleme etkisine sahip olduğunu göstermektedir. Elektriksel olarak tünellenebilir mikrodalga yapılarında elektrik devrelerinin performansını önemli ölçüde etkileyen faktör, malzemenin kayıp açı tanjantıdır [28].

2.1.3. İletken, yalıtkan ve yarıiletken kavramları

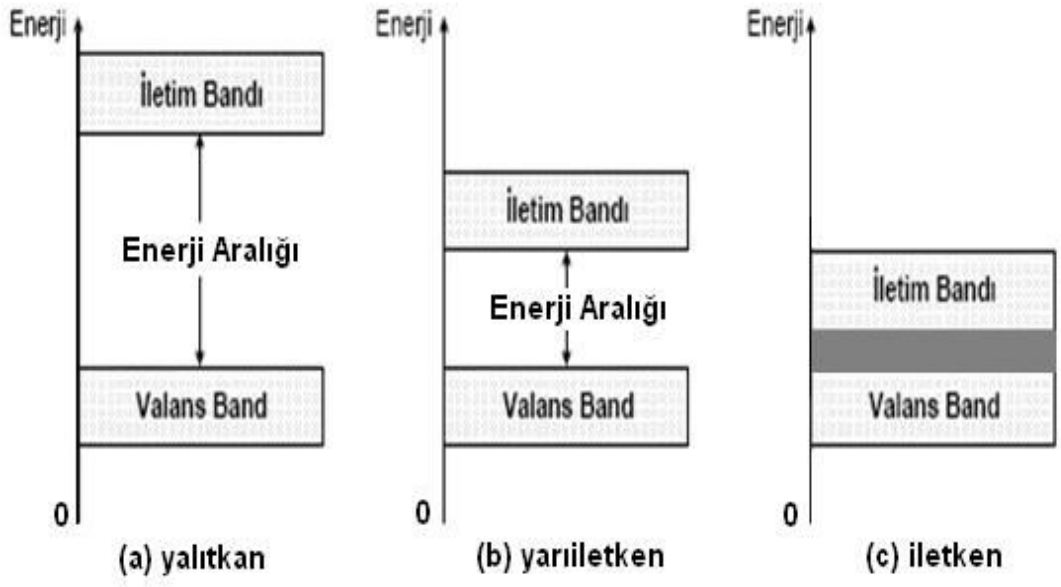
Bir etkime yolu ile atomdan ayrılan elektronların bir devre içerisindeki hareketi, elektrik akımını oluşturur. Elektronların her madde içerisindeki hareketi aynı değildir.

Elektronların hareketine göre maddeler; *İletken*, *Yalıtkan* ve *Yarıiletken* olarak üçe ayrılır. Şekil 2.2'de bu maddelerin atomik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2. İletken, yalıtkan ve yarıiletken madde atomlarının şematik gösterimi

Yalıtkan, yarıiletken, iletken maddelerin enerji band diyagramları Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Yalıtkan, (b) yarıiletken, (c) iletken madde için enerji band diyagramları

İletkenlerin özellikleri

* Elektrik akımını iyi iletirler, iletkenlikleri çok yüksektir.

* Atomların dış yörüngesindeki elektronlar atoma zayıf olarak bağlıdır. Isı, ışık ve elektriksel etki altında kolaylıkla atomdan ayrılırlar.

* İletkenlerin ısı veya elektrik iletkenliği 10^4 - 10^6 Ω/cm aralığında olup, artan sıcaklıkla azalmaktadır. Al ve Au örnek verilebilir.

* İletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı içiçe geçmiş durumdadır.

Yalıtkanların özellikleri

* Elektrik akımını iletmeyen maddelerdir. Yani iletkenlikleri çok düşüktür, Bunlara örnek olarak cam, ergimiş kuartz, mika, kağıt, kauçuk, lastik ve plastik maddeler gösterilebilir. İletkenlikleri $10^{-18} – 10^{-8}$ Ω/cm aralığındadır.
* Yalıtkanlarda valans bandı tamamen dolu iken iletim bandı tamamen boştur.
* Elektronları atomlarına sıkı olarak bağlıdır.
* Yasak enerji aralığı yalıtkanlar için çok geniştir ($E_g \geq 4$ eV)

Yarıiletkenlerin özellikleri

* Direncin sıcaklıkla değişim katsayısı genelde negatifitir.
* Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, katkı maddeleri, sıcaklık, aşırı yük taşıyıcı enjeksiyonu ve optik uyarılmanın fonkisyonu olarak geniş ölçüde değişebilir.
* İletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alırlar. Si, Ge, GaAs örnek olarak verilebilir.
* Yarıiletkenlerde valans bandı tamamen, iletkenlik bandı ise kısmen doludur.
* Mutlak sıcaklıkta (T= 0 ^oK) yalıtkandırlar.
* Ancak ısı, ışık ve magnetik etki altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında bir miktar valans elektronu serbest hale geçer, yani iletkenlik özelliği kazanır. Bu

şekilde iletkenlik özelliği kazanması geçici olup, dış etki kalkınca elektronlar tekrar atomlarına dönerler.

* Tabiatta basit eleman halinde bulunduğu gibi laboratuarda bileşik eleman halinde de elde edilir.

Çizelge 2.1. Elektronikte yararlanılan yarıiletkenler ve kullanılma yerleri

Adı	**Kullanım Yeri**
Germanyum (Ge) (Basit eleman)	Diyot, tranzistör, entegre devre
Silikon (Si) (Basit eleman)	Diyot, tranzistör, entegre devre
Selenyum (Se) (Basit eleman)	Diyot
Bakır oksit (CuO) (Bileşik eleman)	Diyot
Galliyum-arsenik (GaAs) (Bileşik eleman)	Tünel diyot, lazer, fotodiyot, led
Indiyum-fosfor (InP) (Bileşik eleman)	Diyot, tranzistör
Kurşun-sülfat (PbS) (Bileşik eleman)	Güneş pili (Fotosel)

Katkı maddeleriyle iletkenlikleri arttırılan yarıiletkenlerin elektronikte ayrı bir yeri vardır. Bunun nedeni, Çizelge 2.1 'de görüldüğü gibi, elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanılmalarıdır.

Bir yarıiletkenin en önemli ve ayırdedici özelliği, iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olmasıdır [25]. Yani yarıiletkenlerde, iletkenlik artan sıcaklıkla artar, metallerde ise iletkenlik artan sıcaklıkla azalır.

Bir yarıiletken için uygulamalardaki aralığın belirlenmesinde genellikle en önemli parametre, yasak enerji aralığı, başka bir deyişle, değerlik ve iletim bantları arasındaki enerji ayrımıdır ve yarıiletkenler için 0-4 eV aralığındadır.

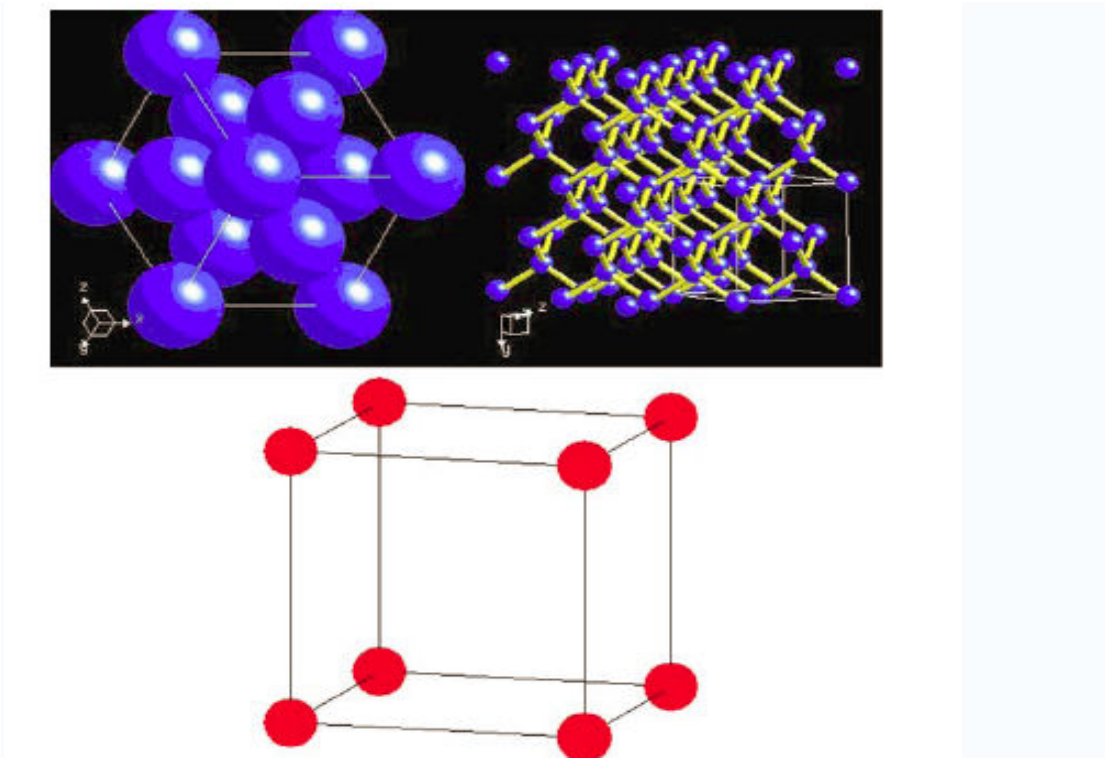
Silisyum dış yörüngede 4 elektron taşır, bir silisyum kristali içindeki bir Si atomunun yerine azot veya fosfor gibi, dış yörüngesinde 5 elektron taşıyan bir madde katılırsa, beş dış kabuk elektronundan dördü ile kovalent bağ meydana gelir. Beşinci elektron ise çok küçük bir enerji (0,04 eV) ile fosfora bağlı kalır. Bu enerjiye ulaştığında, beşinci elektron iletim bandına geçer. Fosforun bu elektronu vermesi sonucu, iletim bandındaki elektron sayısı artar. Yarıiletkende elektron yoğunluğu, hol yoğunluğuna göre daha büyük olduğunda, N tipi yarıiletken oluşur. Bu iş için arsenik ve antimon da kullanılan maddelerdendir.

Eğer katkı maddesi olarak son yörüngede 3 elektron taşıyan bor veya alüminyum kullanılırsa o zaman oluşan madde elektrondan fakirdir ve elektron alır, bu tip yarıiletken maddeye P tipi yarıiletken denir. Burada elektron taşıyıcıları pozitif deşiklerdir. Bu iş için kullanılan maddeler arasında indiyum da mevcuttur. Bu şekilde elde edilen P ve N tipi maddelerin çeşitli şekilde yan yana getirilmesi ile çok değişik yarıiletken devre elemanları yapılabilmektedir.

Yarıiletkenler; elektrik akımının bir değere kadar akmasına izin vermeyen bu değerden sonra sonsuz küçük direnç gösteren maddelerdir. 1950'li yıllarda başlayan mikro-elektronik ile ilgili araştırmalar daha çok temel devre elemanları üzerine yapılmıştır [36].

2.2. Silisyum Kristalinin Temel Özellikleri

Düşük sıcaklıklarda, bir yalıtkan olan silisyum (Si), 20 ^{o}C'de yalıtkanlara göre bir milyon kat daha iletkendir. Ama iletkenliği metallere göre ise 100 milyon kat daha azdır. Katkılama işlemi, son yörüngesinde 3 veya 5 elektron taşıyan bir maddeden az bir miktar ile yukarıda bahsedilen maddelerin karıştırılması sonucu olur. Yarıiletkenli elektronik devre elemanlarında daha çok silisyum kullanılır. Şekil 2.4'te silisyum atomlarının kristal yapısı ve basit bir kübik kristal yapı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Silisyum atomlarının kristal yapısı ve basit bir kübik kristal yapı

Silisyum dioksitin elektrik arkında redüklenmesi ile elde edilen silisyum, saf olmaması nedeniyle silanlı (SiH_4) bir bileşiğe dönüştürülür. Sıvı olan bu bileşik, kademeli distilasyon yöntemi ile ayrılır ve silisyumu içeren kısım kendi başına veya hidrojen atmosferinde ısıtılarak saf silisyuma ulaşılır. Bu yöntemlerle kimyasal saflığa getirilen silisyum yarıiletkeni henüz elektronik eleman yapımı için yeterli saflıkta değildir. Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden yaralanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır [35]. Bu yöntemle saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bundan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülmesi ve içine arzu edilen özdirenci sağlayacak safsızlık (katkı) maddelerinin katkılanması gerekir. Katkılanan safsızlığın cinsi yarıiletkenin tipini belirler ve miktarı (n) ise iletkenlik veya özdirencini ($\rho = 1/\sigma = 1/\mu en$) tayin eder. Silisyum (Si), yeryüzünde en çok bulunan elementlerden bir tanesidir. Silisyumun doğada bol miktarda bulunmasının

yanı sıra, kristal yüzeyinde SiO_2 gibi doğal bir yalıtkan tabakanın kolayca elde edilebilmesi önemini arttırmıştır [26].

Yarıiletken özelliğe sahip oluşu ve doğada çok bulunması, transistor, diyot ve hafızalarda kullanılabilmesinin pratik oluşu, entegre devrelerin ve bilgisayarların silisyum teknolojisi üzerine inşa edilmesini sağlamıştır. Silisyum bilindiği gibi elektronik endüstrisinde en çok kullanılan yarı iletken materyaldir. Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 ^{o}K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 ^{o}K) bazı özellikleri

Özellikleri	
Atom/cm^3	5,0 x 10^{22}
Atom ağırlığı	28,09
Kırılma alanı (V/cm)	3x10^5
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm^3)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu Nc (cm^{-3})	2,8 x 10^{19}
Valans bandındaki durumların yoğunluğu Nv (cm^{-3})	1,04 x 10^{19}
Saf taşıyıcı yoğunluğu n_i (cm^{-3})	1,45 x 10^{10}
Saf özdirenci (Ω.cm)	2,3x10^5
Örgü sabiti (Å)	5,43095
Elektronların etkin kütlesi,m^*/m_o	m_l^* =0,98, m_t^* =0,19
Deşiklerin etkin kütlesi,m^*/m_o	m_{lh}^*=0,16, m_{hh}^* =0,49
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4,05
Yasak enerji aralığı (eV)	1,12
Mobilite (cm^{-2}/V.s)	1500 (elektron için) 450 (deşik için)
Erime sıcaklığı (°C)	1415
Azınlık taşıyıcı yaşam süresi (s)	2,5x10^{-3}
Termal iletkenlik (W/cm-^{o}C)	1,5

2.3. MIS ve MFIS Yapılar

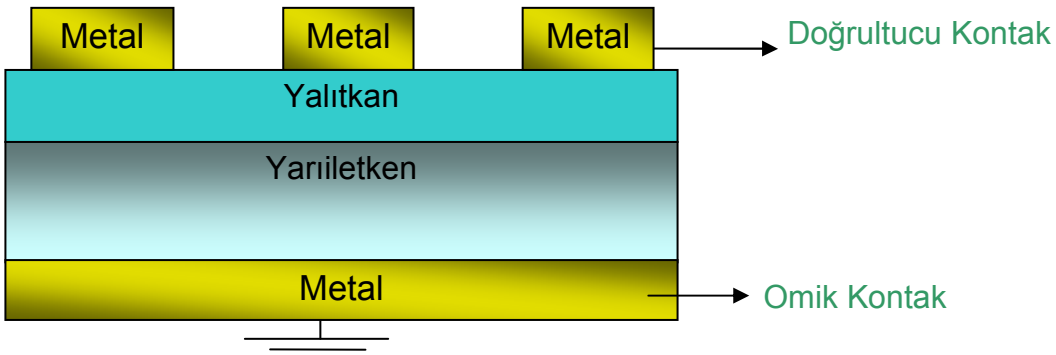
Modern elektronikte en basit yapı olan metal-yarıiletken (MS) kontakların önemli bir yeri vardır. Metal, yariletken ile kontak edildiğinde , termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri (difüzyon) olur. Metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeyleri eşit oluncaya kadar hem metalden yarıiletkene, hem de yarıiletkenden metale yük geçişleri olur. Metal-yarıiletken kontaklar ile ilgili araştırmalar özellikle bu yapıların akım-iletim mekanizmaları fiziğinin daha iyi anlaşılması bakımından artarak devam etmektedir. Metal-yarıiletken kontaklar, hemen hemen bütün yarıiletken elektronik ve optoelektronik cihazların önemli bir kısmını oluşturur. Günümüz teknolojisinde bu yapılarla ilgili çalışmalarda hala son noktaya ulaşılamamış olup [37-39], metal-yarıiletken arayüzeyine, yalıtkan tabaka eklenmesi ile oluşan MIS yapılar ve ferroelektrik-yalıtkan tabaka eklenmesiyle oluşturulan MFIS yapılarla ilgili çalışmalar da önemli araştırmalara konu olmaktadır.

2.3.1. MIS yapı

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar, metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabakaya sahip olduğundan kapasitörlere benzemektedir. Bu yapılar ilk olarak 1959 yılında J.L.Moll tarafından ortaya konulmuştur [29]. Yalıtkan ince filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerinin incelemesinde MIS yapılar yaygın olarak kullanılır [4]. Terman, MIS yapıda, termal yöntemle oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali ve üzerinde alüminyum metal elektrot kullanmıştır. MIS kapasitörün, yalıtkan/silisyum arayüzey durumları araştırmış ve d.c. gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağlılığını ölçmüştür [37]. Deneysel ve teorik kapasitans-voltaj (C-V) değerlerini karşılaştırmış, arayüzey elektron ve deşik tuzaklarının zaman sabitlerini elde etmiştir.

Terman, yüksek frekans C-V ölçümlerinden, arayüzey tuzak yoğunluğunun elde edilebileceğini göstermiştir [37]. Transistörlerde kullanılan metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörlere ait C-V verilerinin ilk detaylı gösterimi ve yarıiletken yüzeyler üzerinde oksit tabakasının büyültülmesi ise Grove, Deal, Snow ve Sah tarafından

literatüre katılmıştır [38]. MIS yapılarda bulunan yalıtkan tabaka kalınlığının 100 Å'dan büyük olması durumunda MIS yapılar, MOS yapı olarak adlandırılır. Yalıtkan tabaka kalınlığı çok ince (~10-40 Å) olduğunda, bu yapılar MIS tipi Schottky diyotu olarak adlandırılır ve elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) gibi deneysel ölçümler kullanılarak elde edilir. Şekil 2.5'te bir MIS yapı şematik olarak verilmiştir.

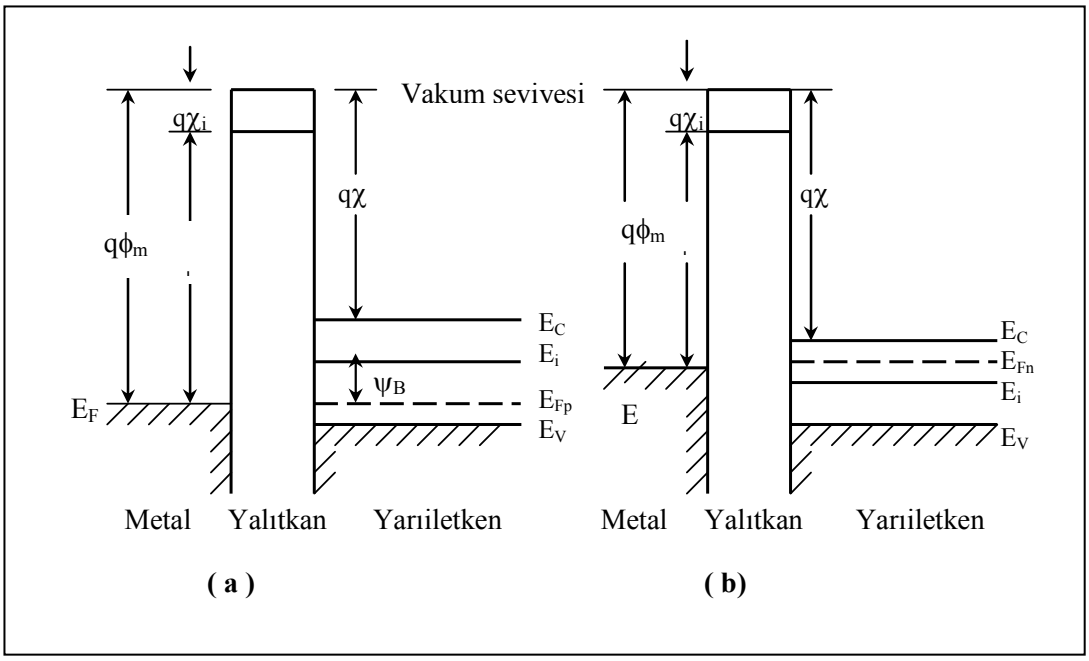


Şekil 2.5. Bir MIS yapının şematik gösterimi

MIS veya MOS yapılarda, elektriksel ve dielektrik parametreler genellikle frekans ve sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümlerinden hesaplanır. Bu yapıların belirgin özellikleri, yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenir. İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında (T=0 K), taban durumu ile en yüksek enerji seviyesi arasındaki fark *Fermi enerjisi* denir. Yarıiletkenlerde *Fermi enerji seviyesi* katkı durumuna göre iletkenlik veya değerlik bandına yakın bir seviyede oluşur. V*akum seviyesi***;** bir metalin dış yörüngesindeki bir elektronun, yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. M*etalin iş fonksiyonu(ϕ_m);* bir elektronu Fermi enerji seviyesinden, vakum seviyesine çıkarmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. *Yarıiletkenin iş fonksiyonu(ϕ_s),* **y**arıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve bu enerji seviyesi, katkı atomlarının yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı değişen bir niceliktir. E*lektron yakınlığı (χ),* vakum seviyesi ile yarıiletkenin iletim

bandı arasındaki bir elektronun enerji farkıdır [22,25]. İdeal MIS yapının şematik gösterimi Şekil 2.6'da p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler için verilmektedir [36].

İdeal MIS yapı



Şekil 2.6. V=0'da ideal bir (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken MIS yapının enerji-bant diyagramı

Burada;

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_B : Metal ve yalıtkan arasındaki potansiyel engel yüksekliği

χ : Yarıiletkenin elektron alınganlığı

χ_i : Yalıtkanın elektron alınganlığı

E_V : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_C : İletkenlik bandı enerji seviyesi

E_i : Saf fermi enerji seviyesi $((E_C - E_V)/2)$

E_F : Fermi enerji seviyesi

ψ_B : Fermi ile saf fermi enerji seviyesi arasındaki farktır [36]. İdeal bir MIS yapıda, gerilim uygulanmadığında ϕ_m ile ϕ_s arasındaki fark sıfırdır ($\phi_{ms}=\phi_m-\phi_s=0$) [41-42]:

$$\phi_{ms} = \phi_m - (\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B) = 0 \qquad \text{(n-tipi)} \qquad (2.1)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - (\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B) = 0 \qquad \text{(p-tipi)} \qquad (2.2)$$

Burada $E_{g;}$ yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve ψ_B; Fermi Enerji seviyesi E_F ile başlangıçtaki enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkı olarak tanımlanmaktadır. Yalıtkan tabaka ideal bir dielektrik malzemedir çünkü enerji bant aralığı çok büyüktür. Yalıtkan tabakada ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde, tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar, arayüzey durumları ve arayüzey yükleri istenmez. Yalıtkanın iletim bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.

Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, uygulanan gerilime bağlı olarak, yığılma gözlenir. İdeal bir MIS yapıda, doğrultucu kontağa bir gerilim uygulandığında, yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir. Yarıiletkendeki serbest yüklerin yoğunluğu, uygulanan gerilime bağlıdır ve metaldekine göre daha azdır. Yarıiletken arayüzeyinde ise bant bükülmesine sebep olan uzay yükleri (Q_{sc}) oluşur. Termal denge durumunda bu yüklerin yoğunluğu, potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Uygulanan V_G gerilimi kısmen yarıiletken/yalıtkan arayüzeyi üzerine düşer. Bu yüzden,

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \qquad (2.3)$$

eşitliği yazılabilir. Burada V_{ox} yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim, ψ_s ise arayüzeydeki bant gerilimidir [40]. Sistemdeki toplam yük, bir kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$Q_m = Q_n + qN_A W = Q_s$$
$$Q_m + Q_{sc} = 0 \qquad (2.4)$$

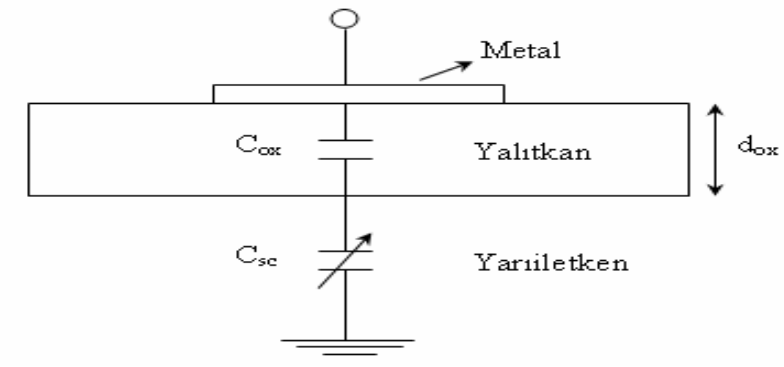
Burada Q_n tersinim bölgesinde birim alandaki elektronların oluşturduğu toplam yük, qN_AW ise W genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alandaki iyonize olmuş alıcı katkı atomlarının sayısıdır. Q_s yarıiletkendeki toplam yük, Q_m metal yüzeyindeki toplam yük ve Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinde biriken yüktür [41-43]. Kondansatörlerin özelliklerini metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyi belirler. Metal/yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Kapasitansın değeri arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı C, yalıtkan tabaka kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir.

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A_{ox} \tag{2.5a}$$

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \tag{2.5b}$$

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} A_{ox} \tag{2.5c}$$

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



Şekil 2.7. Bir MIS yapının eşdeğer devresi

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi MIS yapının eşdeğer kapasitansı, yüzey yük kapasitansı C_{sc} ile yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} in seri bağlanmasına eşdeğerdir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \tag{2.6}$$

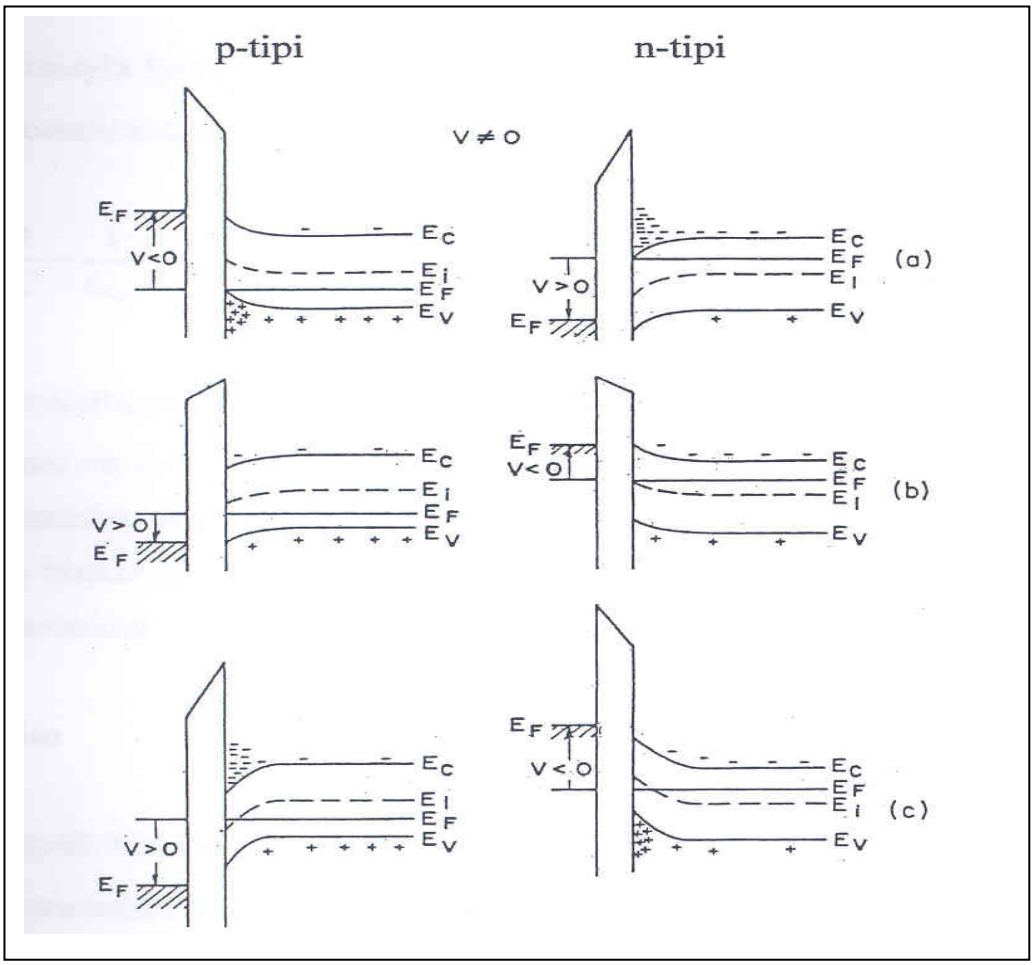
Yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox},

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \tag{2.7}$$

eşitliği ile verilir. Burada ε_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} yalıtkan tabaka kalınlığı olup, uygulanan gerilimden bağımsızdır ve C_{ox} değeri de uygulanan gerilimle değişmez. MIS yapının kapasitansındaki değişim sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitansı ile belirlenir. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen durumları Şekil 2.8'de gösterilen bir p-tipi yarıiletken için tanımlanabilir [40-41, 44].

Yığılma

Metal plakaya bir negatif gerilim ($V_G \langle 0$) uygulandığında, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan deşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru çekecektir (Şekil 2.8 (a)). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına (E_F -E_V) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yığılmasına sebep olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletkenlik bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmelerinden dolayı "yığılma" adı verilir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \to \infty$, dolayısıyla $C \to C_{ox}$ olur.



Şekil 2.8. V ≠0 durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması (a) Yığılma (b) Tüketim (c) Tersinim

Tüketim

Metal plakaya küçük bir pozitif gerilim ($V_G \rangle 0$) uygulandığı zaman, yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki deşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki deşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki deşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen w genişliğinde bir bölgede, deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Deşiklerin azaldığı bu bölgeye tüketim bölgesi, bu olaya "tüketim" olayı denir (Şekil 2.8 (b)).

Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcı durumundaki deşikler arayüzey bölgesinde tükenirler. Uygulanan gerilim arttığında, tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamakla genişler. Tüketim yaygınlaştığı zaman, silisyum gibi yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin beslem tükenimi ve katkı yoğunluğu 0,1-10 μm civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir. Tüketim durumunda uzay yükü yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$Q_{sc} = qwN_a^- = Q_a \tag{2.8}$$

N_a^- ve Q_a sırasıyla iyonlaşmış alıcı yoğunluğu ve birim yüzeydeki alıcı yüküdür. Tüketim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} (\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}}) \tag{2.9}$$

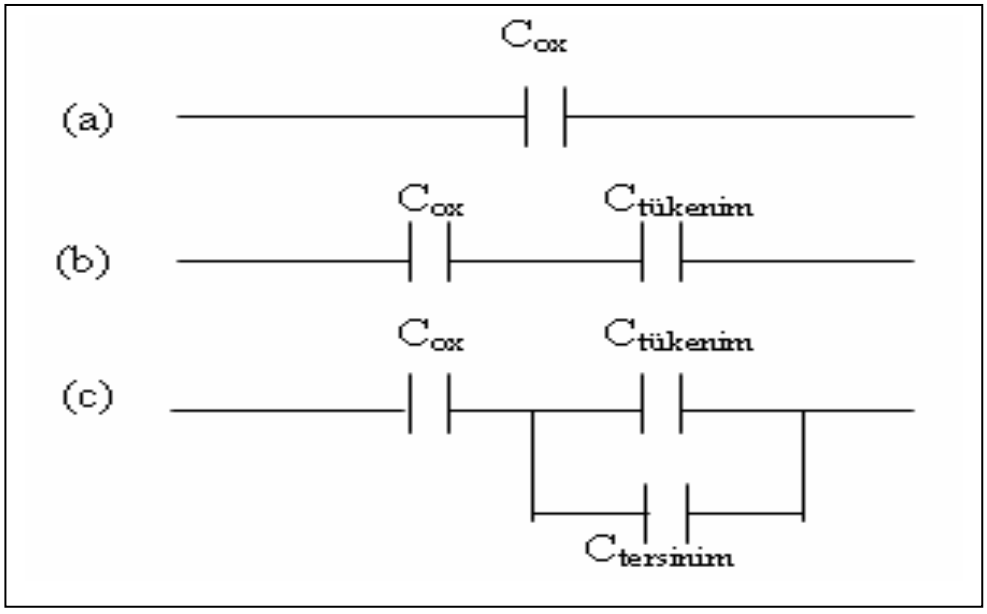
Burada ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir bu da C-V eğrisinin C_{min}'un altına düşmesine sebep olur. Bu dengesiz bir durumdur ve derin tüketim olarak tanımlanır.

Tersinim

Metale daha büyük bir pozitif gerilim($V_G \rangle\rangle 0$) uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru bükülür. Saf durumdaki enerji seviyesi E_i, Fermi enerji seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar. Elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır. Bu durumda oluşan uzay yükü,

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \tag{2.10}$$

eşitliği ile verilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_a birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Şekil 2.8 (c)'de enerji bant şeması gösterilmiştir. Bu durumda MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu a.c. sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasitans artan gerilimle yalıtkan kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda 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 kapasitans $C_{\min}$'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin $C_{\min}$'un altında değerler almasına sebep olur.



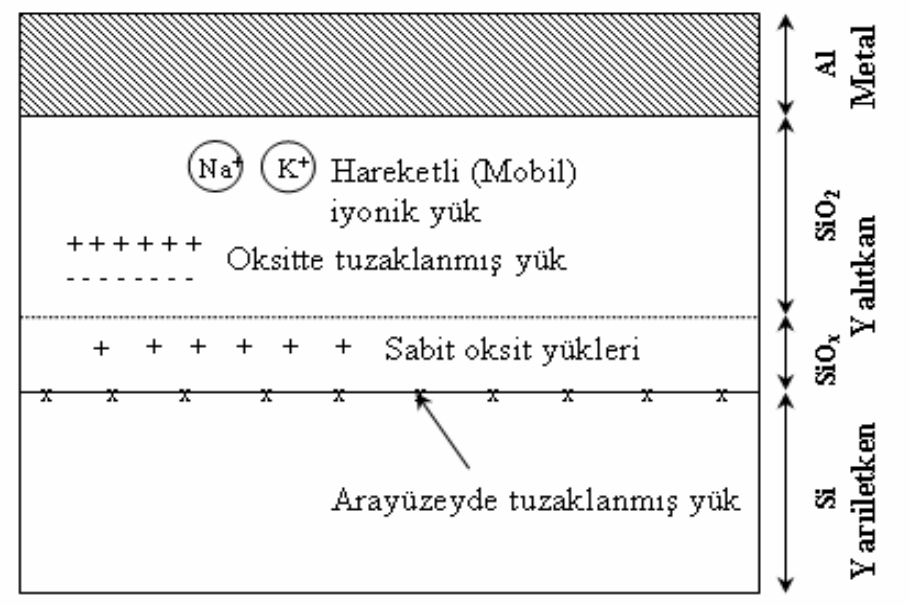
Şekil 2.9. İdeal bir MIS yapının (a) Yığılıma (b) Tükenim (c) Tersinim durumlarında elektronik şeması

İdeal bir durumda yükler yarıiletkende ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde bulunur. Dc gerilim altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez. İdeal bir MIS

yapıda üç yük sistemi için devre şeması Şekil 2.9'daki gibidir [41]. Bu sistemler; yığılım, tükenim ve tersinim adını alır.

2.3.2. Gerçek MIS yapısı

İdeal bir yalıtkanın kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir boşluk yükü veya hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yönteme bağlı olarak ortaya çıkan, hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MIS yapısının özelliklerini değiştirmekte, böylece MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına sebep olmaktadır [30].



Şekil 2.10. İdeal olmayan bir MIS/MOS yapı için arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Bunlar sırayla;

* Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları,

* Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri,
* Yalıtkan içindeki hareketli iyonlar,
* Numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşan tuzaklardır.

Gerçek bir MIS yapısında birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Bu durumların ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 2.10'da gösterilmiştir [41].

MIS yapılarda arayüzey durum yoğunluğu teorisi

Bir MIS yapıda arayüzey tuzaklar ve yalıtkan yüklerinin varlığı ideal MIS karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar. Bir MIS yapılışı sırasında silisyum yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [41,43].

Yüzey durumları yoğunluğu için kuramsal tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani 10^{15} cm^{-2} civarında olup, deneysel sonuçlar bunun sadece $\approx 10^{11}$-10^{13} cm^{-2} mertebesinde olduğunu göstermektedir [41].

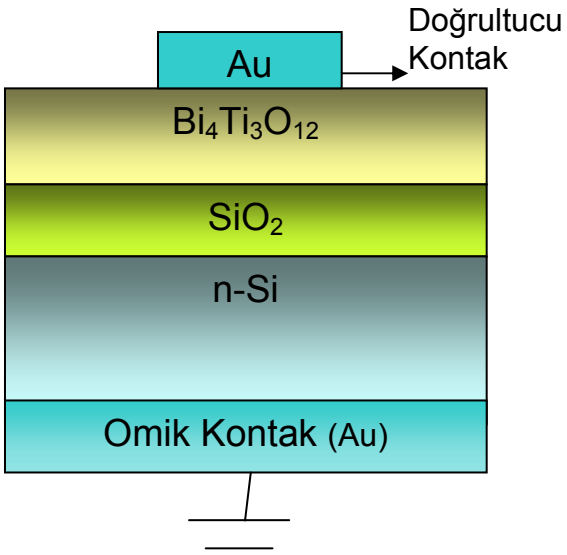
2.3.3. MFIS yapı

Son yıllarda, ferroelektrik hafıza elemanlarına artan bir ilgi gösterilmektedir. Bunun sebebi yeni jenerasyon karmaşık devrelerde uygulanabilirliğidir. Bu devre elemanları potansiyel avantajlara sahiptir:

- kalıcılık
- limitsiz yazma çevirimi
- düşük güç tüketimi

Metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) yapılar hasarsız okuma ve yüksek yoğunluklu hafıza cihazları olarak, teknolojik çalışmalara konu olmuştur [44-45]. Literatürde kabul görmüş MFS yapılar için; Si ve ferroelektrik film arayüzeylerinde, Si tabanlı bileşiklerin oluşması, yüksek yoğunluklu tuzak yüklerin varlığı, Si yarıiletkeni içerisine, elementlerin difüzyonu gibi, birçok problemle karşılaşılmaktadır [46]. Bununla birlikte, iyi arayüzeye sahip ferroelektrik/Si yapıyı hazırlamak, Si ve ferroelektrik malzemenin birbiri içerisine yayılması ve kimyasal reaksiyonlardan dolayı oldukça zordur. Genellikle metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapı tercih edilir. Bu problemleri çözümlemek amacıyla, ferroelektrik film ve Si arasındaki, yalıtkan bir ince film tabakası sonucu oluşacak, metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapıların incelenmesi önerisi ortaya çıkmıştır.

Bir MFIS yapının şematik gösterimi Şekil 2.11'de verilmektedir. Bu yapılar, levhalardan birisinin metal, diğerinin yarıiletken olmasından dolayı paralel plakalı bir kondansatöre benzer. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [47].

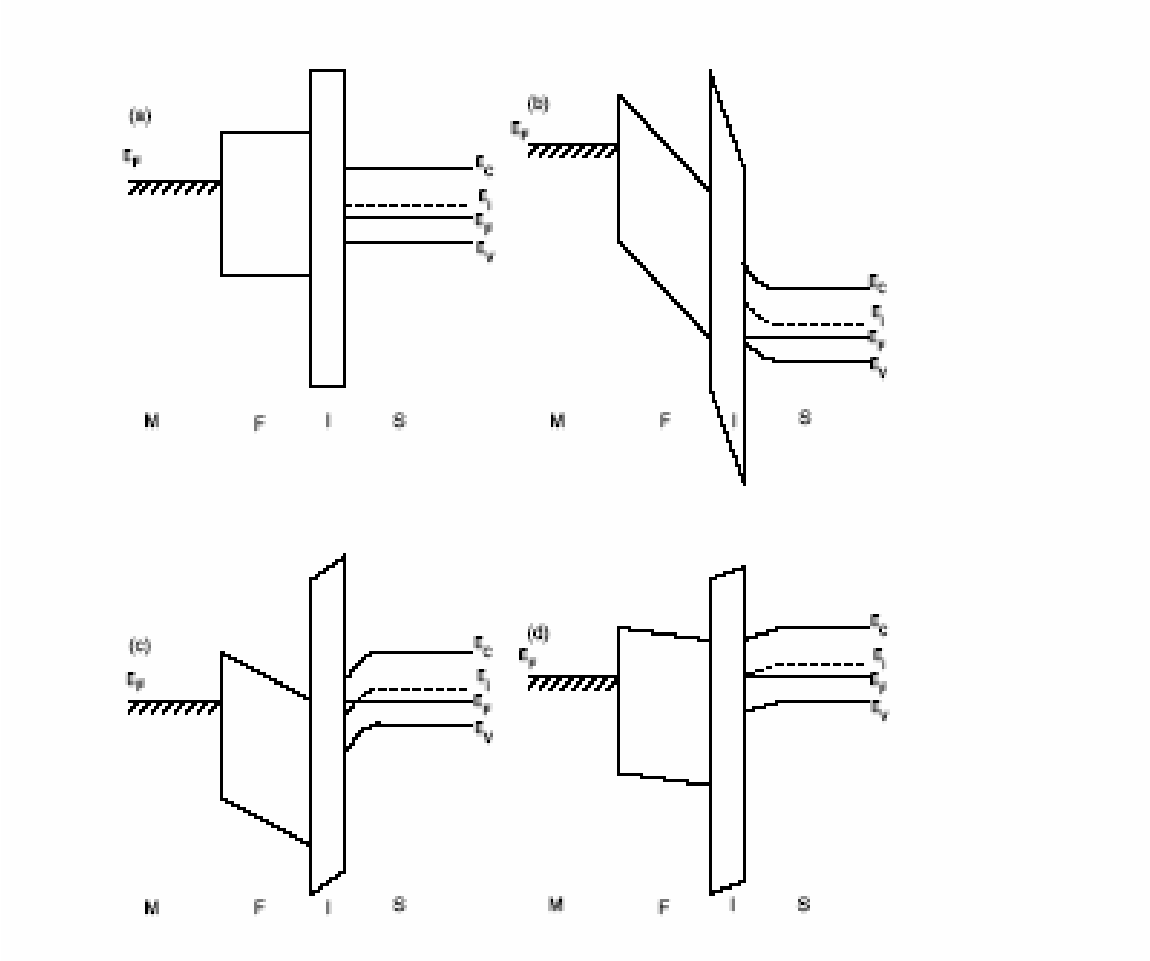


Şekil 2.11. Metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken yapının şematik gösterimi

Bu çalışmada ferroelektrik malzeme olarak; $Bi_4Ti_3O_{12}$, yarıiletken malzeme olarak; özdirenci 0,7 Ω.cm olan (111) yönelimli n-tipi Si ve yalıtkan olarak, SiO_2 kullanılmıştır. SiO_2/Si kombinasyonunun, mükemmel arayüzey karakteristiklerine bağlı olarak, gözlenen geçit potansiyelini kesinlikle kontrol edebileceğine ve aynı zamanda MFIS yapının çalışması sırasında, hafızada tutma ya da aşırı yorulma karakteristikleri dikkate alındığında güvenilirlik kazanmasından dolayı en kararlı ve umut verici yapı olduğu düşünülmektedir [10,12]. Diğer bir sebep ise SiO_2 'nin; silisyum üzerine kolay büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmasıdır. Dolayısıyla SiO_2 birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. BTO/Si arayüzeylerinde, SiO_2, SnO_2 ve Si_3N_4 gibi ince bir yalıtkan tabaka kullanarak, MFS yapı, MFIS yapı haline getirilmiştir. Yarıiletken üzerine bir yalıtkan tabaka büyütmenin birçok yöntemi vardır. Fakat bunlardan en çok kullanılan Si üzerine termal oksidasyon yoluyla, belirli sıcaklıklarda ortamdan belirli hızlarda kuru O_2 geçirilerek, SiO_2 büyütülmesidir. Bu ultra incearayüzey yalıtkan tabaka (SiO_2), ferroelektrik film (BTO) ve (Si) örneği arasındaki iç difüzyonu önlemekle kalmamış, aynı zamanda, MFIS yapılarda elektrik alanın azalmasını engellemiştir [10,30,46].

Ferroelektrik malzeme ile yarıiletken arasına konulan yalıtkan tabaka, ferroelektrik malzemeyi ve yarıiletkeni birbirinden izole eder aynı zamanda yük geçişlerini de düzenler [10,48]. Şekil 2.12'de bir MFIS yapının enerji bant diyagramları farklı çalışma bölgeleri için verilmektedir. Bir MFIS yapıda geçide voltaj uygulandığında farklı sonuçları ortaya koyar.

Şekil 2.12 (a)'da görüldüğü gibi V_{GB} (uygulanan geçit voltajı)=V_{FB}'ye (flatband voltajı) eşit olduğunda, yarıiletkendeki enerji bantları düzdür, bükülmez. Bu durumda yarıiletkenin geçit elektrodunda yük bulunmaz. 2.12 (b)'den açıkça görüldüğü gibi, $V_{GB} < V_{FB}$ olduğunda (yığılma bölgesi), pozitif yükler yarıiletkenin oksit tabakaya yakın yüzeyinde birikir, enerji bantlarında gözlenen bükülme yüzeye yakın olan yerlerde gözlenir ve sadece oksit tabakada voltajda azalma meydana gelir.



Şekil 2.12. Bir MFIS yapı için farklı çalışma bölgeleri için enerji bant diyagramları

2.12 (c)'de görüldüğü gibi $V_{FB} < V_{GB} < V_{TH}$ (treshold) (tüketim bölgesi), uzay yüklerinden dolayı yarıiletkenin içerisinde negatif yüklü bir alan oluşur ve artan voltajla bu alan da artar. Bu negatif yüklü bölge, alıcı mobil iyonların pozitif geçit voltajı ile örneğe doğru itilerek geride hareketsiz eksi yüklü iyonları bırakması sonucu meydana gelir. 2.12 (d)'den ise $V_{GB} > V_{TH}$ (tersinim bölgesi) durumunda, elektrononların iletim kanalı üst seviyede oluştuğu ve p-tipi yarıiletkenin, n-tipine dönüştüğü görülmektedir.

Kapasitans-voltaj ölçümlerinden yapının farklı bölgelerdeki durumu elde edilebilir. Düşük frekans eğrisi elde etmek için yapı denge durumundayken kapasitans ölçülür.

Yüksek frekans eğrisi için ise, düşük sinyal kapasitansı yavaş değişen, düşük genlikli yüksek frekanslı sinyal jeneratörü kullanılarak ölçümler gerçekleştirilir.

2.4. Analiz ve Karakterizasyon Yöntemleri

Yapının elektriksel ölçümlerini gerçekleştirmeden önce, çeşitli teknikler kullanarak yapısal analizinin gerçekleştirilmesi ve yüzey homojenliğinin belirlenmesi, daha gerçekçi yaklaşımların ortaya konmasına yardımcı olur. İnce film yüzey morfolojisi genellikle aygıtın performansını etkileyen elektriksel ve optiksel özelliklerinin belirlenmesi için önemlidir [49].

2.4.1. Yapısal analiz

Yapısal karakterizasyonun temel amacı, atomların bir katı içerisinde üç boyutlu yerleşimlerinin tanımlanmasıdır. Pratikte temel amaç birim hücredeki atomların uzunluk ve açılarının ölçümüdür yani; latis parametreleri ve atomların birim hücredeki yerleşimlerinin belirlenmesidir. Çatlaklar gibi bazı yapı kusurları ve nitelikleri makroskopik, boşluk gibi bazı kusurlarınki ise mikroskopik yapı analizi ile belirlenir. Yarıiletkenlerin yapısal analizinde kullanılan standart teknikler x-ışını difraksiyonu, nötron difraksiyon analizi, elektron mikroskopu ve elektron kırınımı ve raman spektroskopisidir. Bu teknikler kristal durumları, kusurları, faz geçişleri ve materyaldeki stresin varlığı gibi yapısal durumları belirlemekte kullanılır (malzeme kristal, polikristal, amorf olabilir.).

<u>X-Işınları Kırınımı (XRD) Yöntemi</u>

Yarıiletkenlerin yapısal analizini belirlemede kullanılan en etkili yöntemlerden biri XRD tekniğidir. Bu teknik ile numune, dalgaboyları 0.5 ve 2 Å aralığındaki x-ışınları demetiyle ışınlanır ve saçılan x-ışınları uygun bir dedektörle belirlenir. Dedektörün ve örneğin oryantasyonu gibi bazı faktörlere ve örnek materyalin belirgin kristal yapısına bağlı olarak XRD desenleri kaydedilir. Saçılma açısının bir fonksiyonu

olarak saçılan x-ışını şiddetlerinin piklerini içeren desenlerden, XRD grafiği elde edilir. XRD nin temel avantajları; analizler ortam şartlarında gerçekleştirilir,geniş alanlı örnekler ufak bir hazırlık gerektirir, hasarsızdır şeklinde sıralanabilir. XRD tekniğinde, x-ışınları Bragg kanununa uygun olarak kristal materyal tarafından kırınıma uğrar. Fazlar, kristal yapı ve kusurlar, kristal büyüklüğü, oriyantasyonu ve gerilim hakkında bilgi edinilir. Bizmut tabanlı ferroelektrikler için amorf ve perovskite yapı arasında, orta fazlarda kristal yapı oluşabilir [50-51]. Faz belirleme XRD nin rutin uygulamalarındandır ve literatürdeki bilinen standartlarla karşılaştırma yapılarak kırınım spektrumundan elde edilir. Seçilen parçanın oriyentasyonu kristalografik yönelimlerin ilgili pik yoğunluğundan elde edilir. Kırınım desenlerine ait piklerinin genişliği, pozisyonu, gerilimleri ile kristalin boyutu belirlenir.

2.4.2. Yüzey analizi yöntemleri

Yüzeyler hakkında detaylı bilgiler, yarıiletken teknolojisi için, önemlidir. Kullanılan en genel yüzey karakterizasyon teknikleri Auger elektron spektroskopi (AES) taramalı Auger elektron mikroskopi (SAEM), X-ışını fotoelektron spektroskopi (XPS), ikincil iyon kütle spektrometri (SIMS) ve Rutherford geri saçılma spektrometrisidir (RBS). Farklı uygulamalar için avantajları ve dezavantajları olan bu teknikler, yarıiletkenlerin arayüzey ve yüzey özellikleri hakkında önemli bilgiler verir. Birçok durumda yüzey analizi teknikleri, materyalin üst birkaç tek tabakasının araştırılmasına olanak tanır, materyaldeki farklı türlerin dağılımı, konsantrasyonu ve kompozisyonu ve ayrıca kimyasal bilgisini verir. Bu tekniklere ek olarak taramalı prob mikroskopu (STM, AFM), SEM kadar yüzey özelliklerini belirleme analizlerinde yaygın olarak kullanılır.

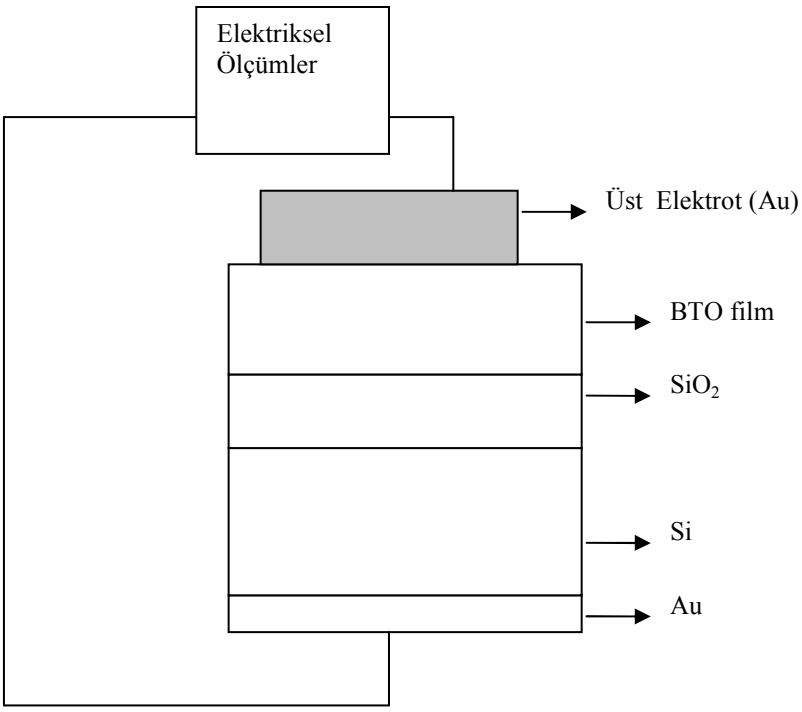
Yüzey analizi metodlarının belirgin kullanım alanları;

* Diğer materyallerle korelasyonda yüzey kompozisyonunun (yüzey kontaminasyonu dahil) araştırılması ve aygıt özellikleri,
* İnce filmlerin ve ince film çok katmanlı yapıları ve aygıtların derinlik profili,

* Yüzeyin, topografyası ve çeşitli tipteki inhomojenlikleri belirleyen, mikroskopik tanımın elde edilmesidir.

2.4.3. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri

Çeşitli yapılar üzerinde, kapasitans-voltaj (C-V) ölçümlerinde, farklı kategoriler (p-n eklem, Schottky bariyer, metal-yalıtkan-yarıiletken metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken) için teknikler bulunmaktadır. Bu durumlar için, yarıiletken tüketim bölgesinde yük dağılımlarıyla ilgili C-V ölçümleri kullanılır. Tüketim bölgesinin genişliği uygulanan voltaja bağlı olduğundan, voltaja bağlı kapasitans ölçümleri, yarıiletkendeki yük yoğunluğu profilini belirlemede kullanılır. Son yıllarda, metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapıların *C–V* ve *G*/*ω*–V karakteristikleri, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve yalıtkan tabaka etkisi dikkate alınarak incelenmektedir.



Şekil 2.13. MFIS yapının elektriksel ölçümlerinin şematik diyagramı

Elektriksel ölçüm diyagramı Şekil 2.13'te verilmektedir. Chattopadhyay ve Raychaudhuri tarafından gerçekleştirilen bir araştırma oldukça ilgi çekici olmuş ve bu çalışmaya göre seridirenç etkisinden dolayı C-V karakteristiklerinde bir pik gözlendiği ortaya konulmuştur. Bu pikin değeri ve pozisyonu, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), katkı atomları konsantrasyonu (N_A), yapının seri direnci (R_s) ve arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı (δ) gibi belirli parametrelerle ilişkilendirilmiştir [48-51]. N_{ss} ve R_s dikkate değer biçimde yapının ideal davranışı için bulunması gereken C ve G/ω karakteristiklerini etkilemektedir. Aynı zamanda ölçülen kapasitans ve iletim önemli oranda frekans, sıcaklık ve voltaja bağlı hale gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı frekans, sıcaklık ve voltaj etkisini ortaya koymak ve kapasitans ve iletim ölçümünde gözlenen pik değerinin frekans ve sıcaklık dağılımını detaylarıyla belirlemek önem kazanmıştır.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-oksit-yarıiletken (MOS), metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) ve metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapılarda arayüzey durumlar (N_{ss}) ve seri direnç (R_s), temel elektriksel parametreleri etkileyen önemli parametrelerdir [53-54]. R_s değerlerinin belirlenmesi için önerilen birkaç metod [17,40,54,56], içerisinde en önemlisi Nicollian and Goetzberger tarafından geliştirilen tekniktir [18]. Şekil 2.14'te MFIS yapının elektriksel ölçüm şeması verilmişitir. Elde edilen ölçüm sonuçları, seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltilmiştir. Mevcut yapıyla ilgili ölçümlerden, frekans ve sıcaklığa bağlı olarak hem elektriksel karakteristiklere hem de dielektriksel özelliklere ait bilgiler, mevcut literatürler de dikkate alınarak ortaya konmaktadır.

2.5. Dielektrikler

Günümüzde teknolojik gelişmeler ile birlikte elektriksel yalıtkanların kullanım alanları da artmaktadır. Bu alanların başında, yüksek gerilimli güç sistem elemanlarında ve düşük gerilimli yüksek frekanslı uygulamalarında ana yalıtkan olarak kullanılması gelmektedir. Çok geniş sınırlar içerisinde ve değişik koşullarda kullanılan bu yalıtkanların elektriksel özelliklerinin nasıl bir değişim gösterdiğinin

bilinmesi güvenli işletim için oldukça önemlidir. Bu nedenle, farklı alanlarda ve işletme koşullarında kullanılan yalıtkan malzemelerin işletildiği koşullar altında dielektrik özelliklerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu özelliklerin başında, dielektrik sabiti ve kayıp faktörü gelmektedir. Malzemeye dışarıdan bir elektrik alan uygulandığı zaman, enerjiyi depolama kabiliyetine sahip ise bu mazleme dielektriktir. Dielektrik sabiti (permittivite veya elektriksel geçirgenlik) bir alan etkisi altında, dış elektrik alanda ne kadar enerji depolandığını ve malzeme içerinde kaybolan enerji miktarını belirlemek için kullanılır. Malzemenin dielektrik sabiti, iki elektrik yükü arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan bir parametredir. Elektrik alan etkisinde malzeme içerisindeki elektronlar ve atomlar yer değiştirir ve sonuçta elektrik yük merkezleri kayacağından elektriksel kutuplanma gözlenir. Oluşan elektriksel dipoller dielektrik malzeme yüzeyinde yük birikimine sebep olur. Yalıtkan olarak kullanılmalarının sebebi elektrik devrelerinde yük transferini engellememeleridir [57,58].

Çizelge 2.3. Bazı dielektrik maddelerin özellikleri

Madde	**Dielektrik Sabiti**	**Dielektrik Sertliği (V/m)**
Boşluk	1,00000	-
Kuru Hava	1,00059	3.10^6
Bakalit	4,9	24.10^6
Pyrex Cam	5,6	14.10^6
Teflon	2,1	60.10^6
Naylon	3,4	14.10^6
Su	80	-
Trafo Yağı	4,5	12.10^6
Porselen	6,5	4.10^6
Kağıt	3,5	14.10^6
Silikon Yağı	2,0	15.10^6

Malzemedeki kutuplanma derecesini dielektrik sabiti ε göstermektedir. Kutuplanmanın derecesi, dipollerin yoğunluğuna ve büyüklüğüne bağlıdır. Genel olarak, bir elektrik alanı tarafından kutuplanabilen bir ortama *DİELEKTRİK* adı verilir. Buradaki kutuplanabilme kavramı, elektrik alan içine konan maddenin moleküllerine ait elektrik dipol momentlerinin, elektrik alanla aynı doğrultuda yönelmesini ifade etmektedir. Bazı dielektrik maddelerin özellikleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Maddeyi oluşturan moleküllerin dipol momentleri ister olsun ister olmasın bir elektrik alan içine konulduklarında böyle bir momente geçici olarak sahip olabilirler ve bunlar kısmen de olsa alanla paralel duruma geçerler. Bu nedenle, paralel levhaları arasında boşluk bulunan kondansatörün plakaları arasındaki potansiyel farkı plakalar arasına dielektrik madde sokulduğunda azalır.

Dielektrikler yani yalıtkanlar, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildir. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda olabilecek tek hareket, pozitif ve negatif yüklerin oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerdeki küçük yer değiştirmeleridir. Bunun sonucunda dipol momentleri oluşur. İçinde böyle küçük yer değiştirmelerin oluştuğu dielektriklere kutuplanmış dielektrikler denir. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alan içine konmadan içerisinde bu yük ayrışımı vardır. Bu maddeler net bir dipol momente sahiptir. Bunlara polar dielektrikler denir. Literatürde yalıtkanların dielektrik özelliklerini inceleyen çalışmalar yer almaktadır [58-66].

Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Bir yalıtkanın dielektrik sabiti, frekans (F) ve sıcaklık (T) ile değişmektedir ve frekansa bağlı olarak azalmaktadır [60].

$$\varepsilon' = f(F, T) \tag{2.11}$$

Çoğu maddelerde bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlıdır [67].

2.5.1. Dielektrik malzemelere statik elektrik alanın etkisi

Dielektrikler, bir dış elektrik alan etkisi altında içerisinde hareket edebilen serbest taşıyıcı bulundurmamaları bakımından iletkenlerden ayrılırlar. Dielektrikler, bir başka ifade ile yalıtkanlar, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildir. Dielektriklerde tüm yükler belirli atom veya moleküllere bağlıdırlar ve hareketleri molekül içinde sınırlıdır. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda olabilecek tek hareket, pozitif ve negatif yüklerin oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerdeki küçük yer değiştirmeleridir. Bunun sonucunda dipol momentleri oluşur. İçinde böyle küçük yer değiştirmelerin oluştuğu dielektriklere kutuplanmış dielektrikler denir. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Pozitif ve negatif yüklerin elektrostatik kuvvet altında yer değiştirmesinden başka sürekli bir dipol momente sahip molekülleri de yönlendirir. Bu tür moleküller, kendilerini alan doğrultusunda yönlendirmeye çalışan bir kuvvet çifti etkisi altında kalırlar. Sonuçta, net bir yönelmenin oluştuğu denge kutuplanması elde edilir. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alan içine konmadan içerisinde bu yük ayrışımı vardır. Bu maddeler net bir dipol momente sahiptir. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğu maddelerde bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlıdır.

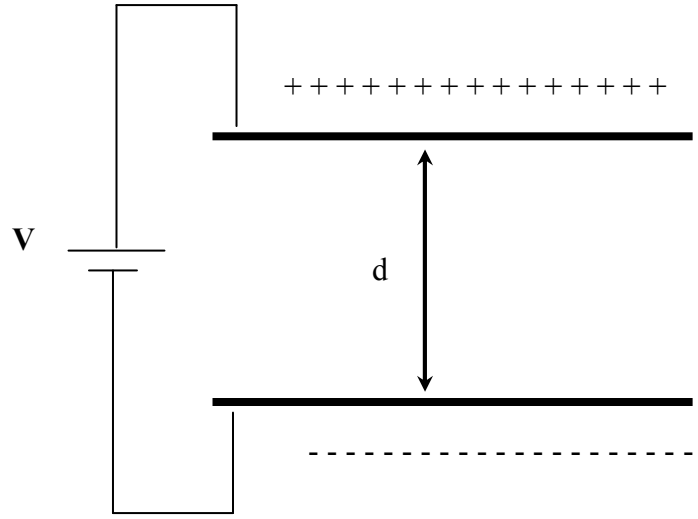
<u>Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör</u>

A yüzey alanına sahip ve aralarında d uzaklığı bulunan iki paralel plakalı bir kondansatör Şekil 2.14'te verilmiştir. Plakalardan birinin yükü +Q, diğerinin yükü –Q olsun. Eğer plakalar arasına bir yalıtkan madde (dielektrik madde) konulursa, yüklerin bir plakadan diğerine geçişi sınırlanır. Bu plakalar bir üretecin uçlarına

bağlanırsa kondansatör kolayca yüklenebilir. Plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E=\sigma/\varepsilon_0 \qquad (2.12)$$

ifadesi ile verilir.



Şekil 2.14. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Burada, ε_o boşluğun geçirgenlik sabiti, σ ise her bir plaka üzerinde birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğudur. Aralarında d uzaklığı bulunan plakalar arasında oluşan potansiyel farkı,

$$V=E.d \qquad (2.13)$$

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

$$C=Q/V=\varepsilon_o A/d \qquad (2.14)$$

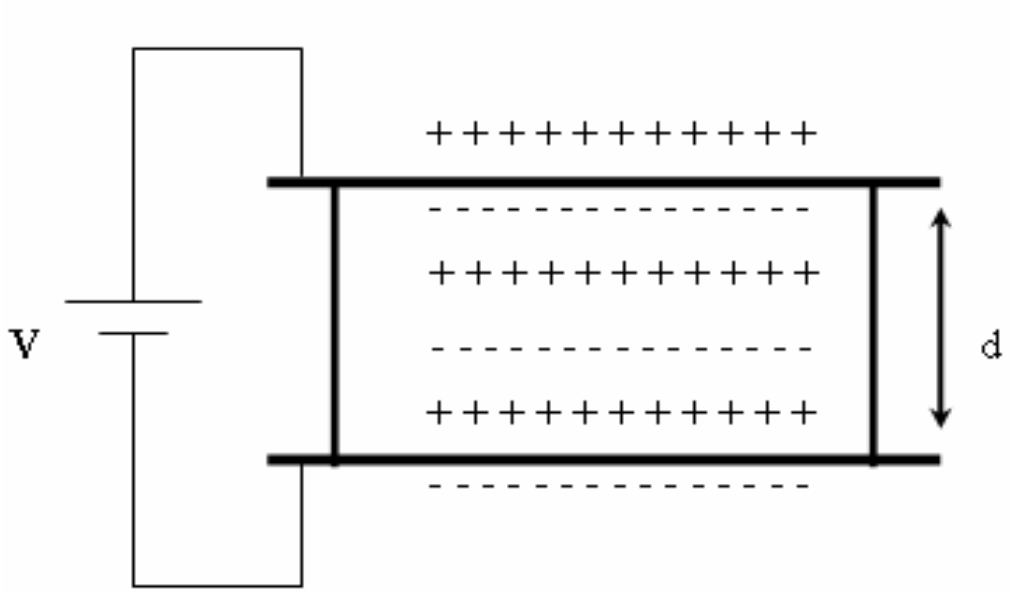
olarak ifade edilir. Ayrıca σ yüzey yük yoğunluğu, plakalar arasındaki bölgede elektrik yerdeğiştirme kaynağı olarak düşünülebilir. Buna göre elektrik yerdeğiştirme;

$$D = \sigma = \varepsilon_o E \tag{2.15}$$

ile ifade edilir [58,70-73].

Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Bir kondansatörün plakaları arasındaki boşluk tamamen bir yalıtkan (dielektrik) madde ile doldurulursa, kondansatörün sığası birimsiz ε' çarpanı kadar artar. Bu ε' çarpanına yalıtkanın dielektrik sabiti denir. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti (ε_o) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır. Şekil 2.15'te dielektrikli paralel plakalı kondansatörün şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2.15. Dielektrikli kondansatör

Bir dielektrik yokken paralel plakalı kondansatörün sığası C_o, kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_o ve elektrik alanı E_o olsun.

$$V=V_o/\varepsilon' \quad (2.16)$$

Plakalar arasına bir dielektrik madde konulursa potansiyel farkı ve elektrik alan $1/\varepsilon'$ çarpanı kadar azalır. Yani,

$$E=E_o/\varepsilon' \quad (2.17)$$

olur. Kondansatör üzerindeki Q yükü değişmediğinden dolayı, sığanın değeri ise ε' çarpanı kadar artmaktadır, yani,

$$C=Q_o/V= \varepsilon'Q_o/ V_o= \varepsilon'C_o \quad (2.18)$$

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

$$C=\varepsilon'\varepsilon_o A/d \quad (2.19)$$

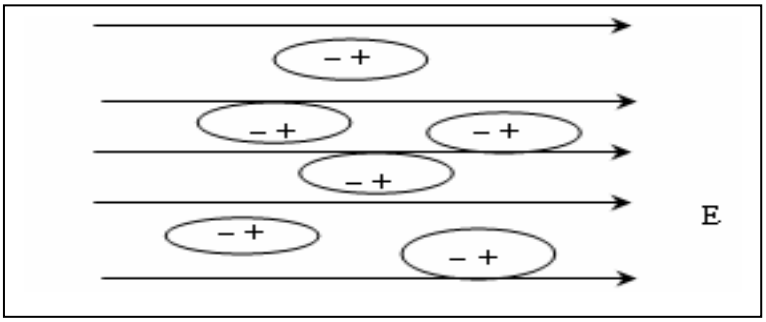
olarak ifade edilebilir [68-71].

2.5.2. Dielektrik kutuplanma

Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik (yalıtkan) yerleştirildiği zaman potansiyelin azalması, elektrik alan şiddetinin (E=V/d) azalmasını gerektirir. Elektrik alan şiddetinin ($E=\sigma/\varepsilon_o$) azalması ile birim yüzeydeki net yük azalır. 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 [58,72].

Bir dielektrik kondansatörün levhaları arasına konulunca, dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde yükler meydana gelir. Bazı dielektriklerin molekülleri daimi dipol ihtiva ederler. 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 polardırlar. 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. Böylece dipolar hale geçen molekül dipol momenti elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığı zaman atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur.

Polar olmayan molekül kutuplandığı zaman yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur. Dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet geri çağırıcı kuvvetlere eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle değişir, bu nedenle verilen bir alan için yüklerin yer değiştirmesi yani kutuplanma farklı olur. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam bir yöneliş olmaz. Fakat uygulanan elektrik alan şiddeti artıkça ve sıcaklık küçüldükçe yönelme derecesi artar [72]. Bir dielektrik polar moleküllerden (daimi dipollerden) meydana gelmiş ise bir dış alan mevcut olmadığı zaman dipoller rasgele doğrultularda yönelirler. Bir dış alanın etkisi altında bulundukları zaman P dipol momentleri Şekil 2.16'daki gibi alana paralel olacak şekilde yönelirler [58,73]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar. Dielektriğin molekülleri daimi dipol momentine sahip değilse, bu durumda dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.



Şekil 2.16. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri

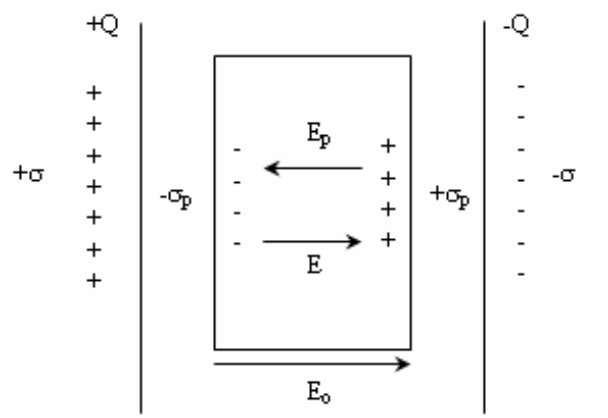
Kutuplanma yükleri

Bir dielektrik madde kondansatörün levhaları arasında bulunduğu zaman, yönelme ile olan kutuplanma, bütün dielektriğin pozitif yüklerinin merkezini, negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak şekildedir. Dielektrik bütün olarak yük bakımından nötr olmakla beraber polarize olmuştur. Net etki dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yük meydana getirecek tarzdadır. Dielektriğin içinde herhangi bir hacim elemanında bir yük fazlalığı yoktur. Dielektrik bütün olarak, elektrik bakımından nötr olduğuna göre, yüzeyde meydana gelen negatif ve pozitif kutuplanma yükleri eşit olmalıdır. Bu olayda dielektriğin kondansatörün levhalarına bakan yüzlerinde meydana gelen yükler son derece ince bir tabaka içindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır. Bunlara bağlı yükler denir. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Bir iletkende serbest yükler bulunduğu halde, polarize bir yalıtkanda meydana gelen yükler bağlıdırlar [72].

Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yükleri nedeniyle levhalar üzerindeki serbest yüklerden ileri gelen alana ters yönde bir alan meydana gelir. Bu durum Şekil 2.17'deki gibi açıklanabilir. Şekil 2.17'de görüldüğü gibi düzgün bir E_o elektrik alan içindeki bir dielektrik maddede moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Böylece

uygulanan elektrik alan, dielektrik madde tümü ile nötr olmasına karşın dielektriği polarize eder.



Şekil 2.17. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

Elektrik alanın etkisi sonucu, negatif yükler sol yüzeyde, pozitif yükler sağ yüzeyde birikmişlerdir. Dielektrik bütünü ile nötr kalmasından dolayı, negatif yüzeyde oluşan yük miktarı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarına eşittir. E_o ile dielektrik bulunmadığı zamanki alan şiddetini ve E_p ile polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti gösterilirse, bileşke alan bunların vektörel toplamına eşit olur.

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_P \tag{2.20}$$

E_o polarize eden alan ile, polarize yüklerden ileri gelen E_p alanı zıt yönlüdürler. O halde Eş. 2.20 denklemi,

$$\vec{E} = \vec{E}_o - \vec{E}_P \tag{2.21}$$

yazılabilir. E_p alanı kutuplanmayı önlemeye çalışan alandır. Bileşke alan daima E_o yönündedir. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ, dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu

σ_p ise, etkili yük yoğunluğu (σ-σ_p) olur. σ serbest yük yoğunluğu, E_o elektrik alanına,

$$E_o = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} \tag{2.22}$$

ile bağlıdır. σ_p kutuplanma yük yoğunluğu ise E_p elektrik alanına,

$$E_P = \frac{\sigma_P}{\varepsilon_o} \tag{2.23}$$

bağıntısı ile bağlı olur. Bu nedenle dielektrik içindeki alan yani bileşke alan,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} - \frac{\sigma_P}{\varepsilon_o} \tag{2.24}$$

olur. Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik yerleştirildiği zaman potansiyel farkının azalmasına, dolayısıyla alan şiddetinin azalmasına yol açan ters yöndeki alanı meydana getiren, bu kutuplanma yükleridir. Kondansatör üzerindeki yük değişmediğinden kondansatörün kapasitesi birimsiz ε' çarpanı kadar artar, potansiyel fark ve elektrik alan şiddeti $1/\varepsilon'$ çarpanı kadar azalır. Bu ε' çarpanına yalıtkanın dielektrik sabiti denir. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti (ε_o) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır.

$$V = \frac{V_o}{\varepsilon'} \tag{2.25}$$

$$E = \frac{E_o}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\varepsilon' \varepsilon_o} \tag{2.26}$$

$$C = \varepsilon' C_o \tag{2.27}$$

ifadeleriyle verilir. Burada C_o, E_o ve V_o, dielektrik yokken kondansatörün kapasitesi, potansiyel farkı ve elektrik alanıdır.

Eş. 2.27 denkleminde C_o ($C_o=\varepsilon_o A/d$) yerine konulursa kondansatörün kapasitesi,

$$C = \frac{\varepsilon' \varepsilon_o A}{d} \tag{2.28}$$

olarak elde edilir. Eş. 2.27, Eş. 2.24'te yerine konulursa,

$$\frac{\sigma}{\varepsilon' \varepsilon_o} = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} - \frac{\sigma_P}{\varepsilon_o} \tag{2.29}$$

$$\sigma_P = \sigma(1 - \frac{1}{\varepsilon'}) \tag{2.30}$$

elde edilir. $E_o>E_p$ olduğundan, dielektrik üzerindeki σ_p kutuplanma yük yoğunluğu, kondansatörün plakaları üzerindeki σ serbest yük yoğunluğundan küçüktür($\sigma_p < \sigma$). Hiçbir dielektrik yoksa $\varepsilon' = 1$ ve $\sigma_p = 0$ olur. Buna karşın, dielektrik yerine bir iletken yerleştirilirse $E = 0$ olur, o zaman Eş. 2.11'den $E_o = E_p$ elde edilir ki bu $\sigma_p = \sigma$ karşılık gelir. Yani, iletken üzerinde kutuplanan yük, plakalar üzerindeki yükle eşit ve zıt işaretli olacak, dolayısıyla iletkendeki net alan sıfır olacaktır [40].

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

$$P = \varepsilon_o \chi E \tag{2.31}$$

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

$$\chi = (\varepsilon' - 1) \tag{2.32}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Kutuplanma etkisi, dielektrik yüzeyde bulunan yüklerin iletkende olduğu gibi serbestçe hareket edemeyip, yer değiştirmesi ile anlaşılır [74].

Polarize dielektrikler için, D elektrik yerdeğiştirme veya elektrik akı yoğunluğu, dielektrik içindeki E alanı ile orantılıdır. D elektrik yerdeğiştirme,

$$D = \varepsilon_o E + P \tag{2.33}$$

ifadesiyle verilir. Eş. 2.31, Eş. 2.33'te yerine konulursa,

$$D = \varepsilon_o (1 + \chi) E = \varepsilon_o \varepsilon' E \tag{2.34}$$

olarak elde edilir [69-70,72].

2.5.3. Dielektriklerde kutuplanma mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayanlar diye genelde iki kısma ayrılırlar. Polar maddeler içerdikleri moleküllerindeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadıklarından kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Bunlar genellikle çift-kutup momentleridir ve bunlara çift kutuplu maddeler denir. Dielektriklerde temelde üç tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik ve yönelme kutuplanmalarıdır [70-71].

Elektronik kutuplanma

Elektrik alanın uygulanmasıyla bütün atomlar ve iyonlarda ortaya çıkar ve tüm dielektriklerde diğer tür kutuplanmalar olmazsa dahi gözlenebilir. Bunun nedeni, bir atomdaki elektronların oluşturduğu negatif yük dağılımının merkezinin çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kaymasıdır. Elektronun kütlesi oldukça küçük olduğundan uygulanan dış elektrik alanla kısa bir süre içinde oluşur (10^{-15} sn).

İyonik yapılı olmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir

($n^2 = \varepsilon$). Buna Maxwell ilişkisi denmektedir. Bunun fiziksel olarak: elektromanyetik dalganın elektrik vektörü madde içindeki yüklere, başlangıçtaki konumlarını değiştirecek kuvvet uygular ve sonuçta bir çift-kutup oluşturacaktır. Sıkı bağlı elektronlar oluşan bu kutuplanmaya daha az katkıda bulunurlar. Elektromanyetik dalganın elektrik vektörü devamlı değiştiğinden elektronlar bu değişmeyi izleyebildiği sürece etkileşmeli çift-kutup momentleri 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 aynısıyla ışırlar. 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 türediği görülür. Daha büyük kutuplanma daha fazla geciktirici davranışa neden olacağından bu da kırılma indisinin büyümesi demektir. Bu, manyetik olmayan materyaller için elektromanyetik teorinin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin (ε') değeri "1" olacak ve gecikme olmayacağından n = 1 olur.

İyonik kutuplanma

Elektronik ve iyonik kutuplanmada yükler alan yönünde birbirlerine göre konum değiştirir, dolayısıyla bu iki kutuplanmaya etkileşmeli kutuplanma denmektedir. İyonik kutuplanmada farklı tip atomlar molekülleri oluşturduğundan, bu atom elektronları simetrik olarak paylaşmayacaktır. Yani, elektron bulutu yük merkezi kayarak daha kuvvetli bağları olan atomlara doğru yönelecektir. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler kazanırlar ve bu net yüklere etkiyen bir dış elektrik alan, atomların kendi aralarında denge konumlarını değiştirecektir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir tip etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelecektir. Bu, dielektriğin iyonik kutuplanmasıdır. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma içinde

oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13}-10^{-12} sn). Bu kutuplanmanın varlığında Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağıl dielektrik katsayısı her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük olacaktır.

Yönelim kutuplanması

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift-kutup momentleri içeren, polar maddeler diye adlandırılan dielektriklerde oluşur. Bazı dielektriklerde kuardropol (dört kutuplu), oktupol (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 yönelime zorlayacaktır ve sonuçta yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır. Yönelim kutuplanmasında 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 değildirler. 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 ε_r "1" değerine ulaşır [70].

Arayüzey-uzay yük kutuplanması

Polikristal malzemelerin eklem yüzeylerinde serbest yük birikimi gözlenebilir. Bu durum kristalin arayüzey kutuplanmasını doğurur. Biriken yükler, elektrotlardaki görüntü yükleri etkiler ve diğer kutuplanmalara olumlu etkide bulunurlar. Arayüzey

kutuplanmasının kristaller arası ayırıcı yüzeylerle bağlantılı olduğu, literatürde yer almaktadır.

Bahsedilen yüzeyler serbest yüklerin bir kristalden diğerine geçişini engelleyecek davranıştadır. Bu engeller herhangi bir hava katmanından veya yüzeydeki oksidasyondan kaynaklanabilir. Arayüzey kutuplanmasının nedeni, tek kristaldeki gerçek kusurlar (boşluklar, safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde deşiklerin birikimi olarak ortaya konulmuştur [71].

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapılarda metal/yarıiletken ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyleri oldukça önemlidir. İdeal bir durumda yarıiletken tabakada ve metal-yalıtkan arayüzeyinde yükler vardır. Doğru beslemde yalıtkan üzerinde herhangi bir yük geçişi olmaz. Gerçek yapıda ise yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde elektronik durumlar oluşur ve bazı yapılarda yalıtkan tabaka üzerinde akım oluşur. Bu durumların sebebi yüzeydeki periyodik örgü yapısının kesiintiye uğramasıdır [73]. Yüzey durumları yarıiletkenin yasak enerji bandı aralığında oluşur ve yapının kapasitans-voltaj karakteristiğini etkiler [74-75].

Elektronik, iyonik ve çift-kutup yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, materyalin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelme etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü veya arayüzey kutuplanması ise 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 materyalin hacmindeki uzay yüklerinin veya dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikmesine sebep olan büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır.

Polikristal materyallerde 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 [68,70-71]. Bu kutuplanma, materyalin 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 [71].

2.5.4. Dielektriklerde elektrik alan ve dielektrik kayıp

Net ve kalıcı dipol momente sahip bir numune elektrik alan içerisine konulduğunda bu numune için elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elektrik yerdeğiştirme vektörünün (D) zamana bağlılığı (dipol-durulma olayı), daimi dipollere sahip numunelerde görülür. Bu durum, hiç dipolü olmayan numunelerden farklıdır. Bir kristale t=0 anında statik bir elektrik alan (E) belli bir süre uygulanmış olsun. Kristaldeki dipollerin hareketi iki şekilde olur: Bu hareket, dipollerin ya uygulanan elektrik alan yönünde hemen düzenlemesi ya da son konfigürasyonlarını yavaş bir şekilde bulmalarıdır. İlk durum statik durum olarak bilinir. Diğeri ise elektrik alan ile kutuplanma vektörünün aynı fazda olmamalarından kaynaklanır.

Elektrostatikte elektrik yer değiştirmenin ifadesi,

$$D = \varepsilon E \tag{2.35}$$

ile verilir. ε , zamandan bağımsız gerçek (real) bir sabittir. Yukarıdaki zaman ile ilgili bir terim eklendiğinde, ifade fiziksel manada zamanın bir fonksiyonu haline gelir. D ve E'nin birinci dereceden zamana göre türev terimleri eklenerek,

$$D + a\frac{dD}{dt} = bE + c\frac{dE}{dt} \tag{2.36}$$

elde edilir. a, b, c'nin eklenen terimlerdeki düzeltme sabitleri olduğunu düşünelim. Zamana göre ikinci, üçüncü vs. türev terimleri eklenebilir. Ancak orta şiddetli elektrik alanlar için yüksek dereceli türevlerin ihmal edildiğini düşünelim. Aşağıda verilen koşullar ele alınarak dielektrik davranış incelenecek olursa, a, b ve c sabitlerinin numuneye özgü oldukları ortaya çıkar [76]. Numunenin, sabit bir elektrik alan etkisinde bırakıldığında elektrik alan ve dolayısıyla elektrik yerdeğiştirme niceliğinin zamanla değişimi görülmez. Bu statik bir durumdur ($\frac{dE}{dt} = 0$ ve $\frac{dD}{dt} = 0$). Bu durumda Eş. 2.36 bağıntısı,

$$D = bE \tag{2.37}$$

olur. Buradaki b, statik dielektrik geçirgenlik (ε_s) sabitidir. Yani Eş. 2.36 bağıntısı yeniden yazılırsa,

$$D + a\frac{dD}{dt} = \varepsilon_s E + c\frac{dE}{dt} \tag{2.38}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Numune sabit bir elektrik alan etkisinde iken, $\frac{dE}{dt} = 0$ durumu için, Eş. 2.38 bağıntısı,

$$D + a\frac{dD}{dt} = \varepsilon_s E \tag{2.39}$$

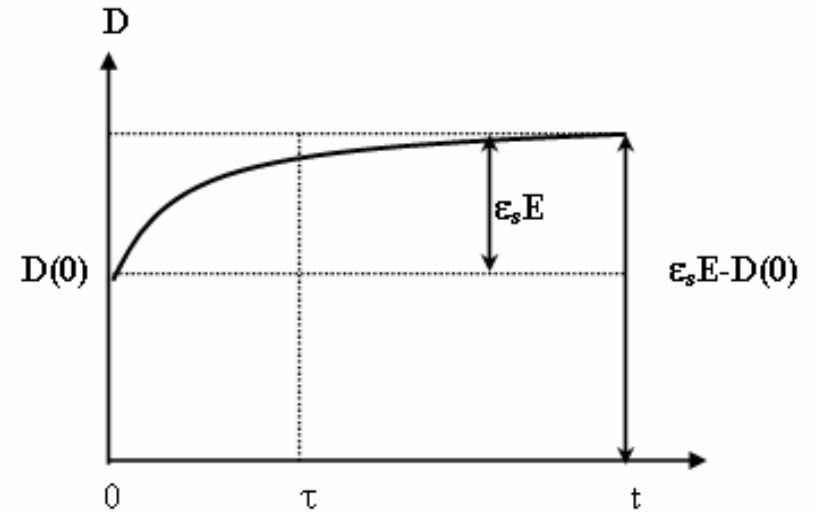
olarak ifade edilir. Bu denklemin çözümü, "ln ($D-\varepsilon_s E$) = -t/a+sabit" ile verilir. t=0'da D=D(0) olsun. Buna göre,

$$D = \varepsilon_s E - [-D(0) + \varepsilon_s E]\, e^{-t/a} \qquad (2.40)$$

olur. Yukarıdaki denklem göz önüne alınarak D'nin zamanla değişimi Şekil 2.18.'da verilmiştir. Elektrik yer değiştirmenin ilk değerinin D(0), son değerinin de exponansiyel bir artış ile geldiği ($\varepsilon_s E$) maksimum değer olduğu görülmektedir. Bu incelemenin Eş. 2.36 bağıntısında yer alan a sabiti, bu exponansiyel davranışta görülen τ zaman sabitidir (durulma zamanı). Buna göre Eş. 2.38 bağıntısının son hali,

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \varepsilon_s E + c \frac{dE}{dt} \qquad (2.41)$$

olur.



Şekil 2.18. D'nin zamanla değişim grafiği (E=sabit)

Numune, t=0 anında E(0) değerine sahip bir elektrik alan etkisinde kaldığında, numune içinde meydana gelen elektrik yerdeğiştirme değerinin D_1 olduğunu düşünelim.

D'nin D_1 değerinde sabit kalması için, elektrik alan zamanın bir fonksiyonu olarak değişecektir. Eş. 2.41 denklemi,

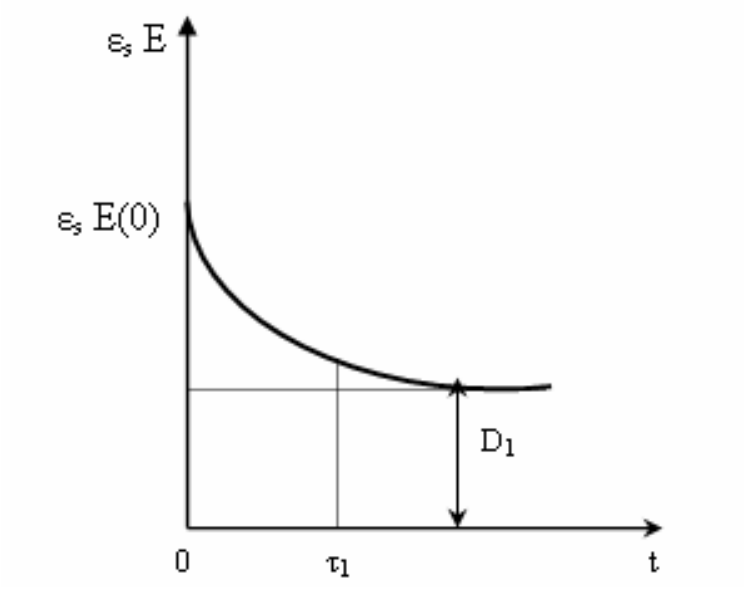
$$D_1 = \varepsilon_s E + c\frac{dE}{dt} \tag{2.42}$$

olur. Yukarıdaki denklemin integrali alındığında,

$$\varepsilon_s E = D + \left[\varepsilon_s E(0) - D_1\right] e^{-\varepsilon_s t / c} \tag{2.43}$$

elde edilir. Bu ifadeye karşılık gelen grafik şekil 2.19.'da verilmiştir. Şekil 2.19'da farklı bir zaman sabiti ile exponansiyel azalma olduğu görülmektedir. ($\tau_1 = c/\varepsilon_s$). Bu nedenle Eş. 2.41 bağıntısının son hali,

$$D + \tau\frac{dD}{dt} = \varepsilon_s \mathrm{E} + \varepsilon_s \tau_1 \frac{dE}{dt} \tag{2.44}$$



Şekil 2.19. Elektrik alanın (E) zamanla değişim grafiği (D=sabit)

olarak ifade edilir. Dielektrik numuneye Δt süresince ΔE artırımları ile elektrik alan uygulanırsa D'de ΔD kadar bir artış meydana gelir. Eş. 2.44 denkleminde, bu değişimin etkisi diferansiyel formda Δt üzerinden terim integral alınarak anlaşılabilir.

$$\int_0^{\Delta t} D dt + \tau \int_0^{\Delta D} dD = \varepsilon_s \int_0^{\Delta t} E dt + \varepsilon_s \tau_1 \int_0^{\Delta E} dE \qquad (2.45)$$

Δt zaman aralığı küçüldüğünde, denklemin her iki tarafındaki ilk terimler sıfıra yaklaşır. ΔE dolayısıyla ΔD, zamandaki bu daralmayı, herhangi bir değişim ile karşılamaz. Sözgelimi bu zaman aralıklarında, elektrik alan ΔE artırımları ile uygulandığında sözü edilen terimler sabit bir değerde kalır. Buna göre,

$$\tau \Delta D = \varepsilon_s \tau_1 \Delta E \qquad \text{yada} \qquad \frac{\Delta D}{\Delta E} = \frac{\varepsilon_s}{\tau} \tau_1 \qquad (2.46)$$

olur. Bu ifadeler ışığında ε_∞ gibi bir terim kullanılabilir,

$$\Delta D = \varepsilon_\infty \Delta E \qquad (2.47)$$

Buradaki ε_∞, numunedeki sürekli dipoller hareket etmeden önce, ΔD ve ΔE'deki ani bir değişime karşılık gelen geçirgenlik (permitivite) değerini ifade eder. Buna göre, Eş. 2.46;

$$\tau\, \varepsilon_\infty = \varepsilon_s\, \tau_1 \qquad (2.48)$$

olur. Eş. 2.44 denkleminin, son hali,

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \varepsilon_s E + \tau \varepsilon_\infty \frac{dE}{dt} \qquad (2.49)$$

olarak elde edilir. Dipol yöneliminin en ilginç yanı Eş. 2.49 denkleminde görülebilir. Buna göre dielektrik numunedeki bir dipol yönelimi, frekansı ω olan periyodik bir elektrik alan uygulandığında meydana gelir. Periyodik alan,

$$E = E_1 e^{i\omega t} \qquad (2.50)$$

olur. D elektrik yerdeğiştirme vektörü, elektrik alana uymaya çalışır. Bu durum aralarındaki muhtemel bir faz kayması ile tarif edilir. Sonuç olarak, dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı fazda ve farklı fazda olan iki bileşeni bulunur. Bu durum kompleks gösterimle tarif edilebilir,

$$D = \varepsilon^* E \tag{2.51}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2.52}$$

ε' ve ε'' değerlerini bulmak için Eş. 2.50 ve Eş. 2.51 denklemleri Eş. 2.49'da kullanıldığında,

$$\varepsilon^* = \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1+\omega^2\tau^2}\right] + j\left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1+\omega^2\tau^2}\omega\tau\right] \tag{2.53}$$

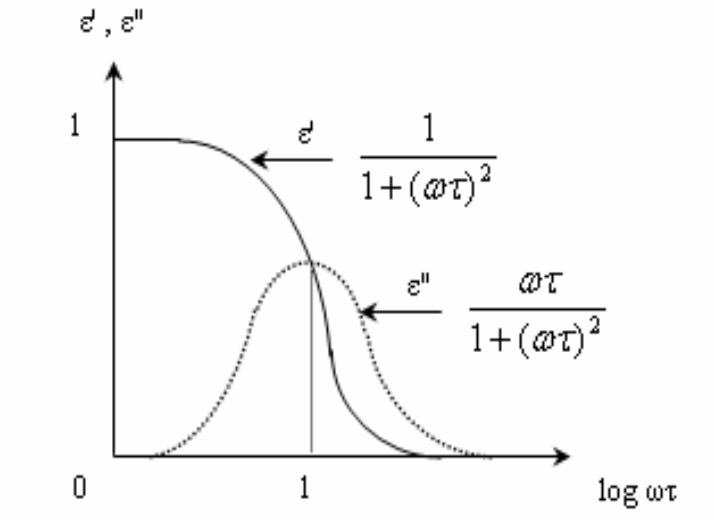
elde edilir. İlk terim gerçel terimdir. E ile çarpıldığı zaman, E ile aynı fazda olan D bileşeni elde edilir. İkinci terim, sanal terimdir. E ile çarpıldığında, D'nin E ile aynı fazda olmayan ya da aralarındaki faz farkı 90° olan bileşenini verir. Kompleks notasyonda ifade edilmiş olan dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı faz ile farklı faz (gerçel bileşen-sanal bileşen) bileşenleri,

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1+\omega^2\tau^2} \tag{2.54}$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1+\omega^2\tau^2}\omega\tau \tag{2.55}$$

olup, τ numuneye özgü bir niceliktir ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. ω ise sıcaklıktan bağımsızdır [76]. Eş. 2.54'ün sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfıra yaklaşır. Bu terim Şekil 2.20'de dolu çizgi ile verilmiş olan log ωτ 'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir.

Çok düşük frekanslarda ($\omega << 1/\tau$), dielektrik sabitin gerçel bileşeni, statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ($\omega >> 1/\tau$) ise, gerçel bileşen ε_∞ değerine yaklaşır. Yüksek ve alçak frekans arasında kalan bölgede ise düzgün geçişler (iki faz bölgesi arasında) olur.



Şekil 2.20. Dielektrik sabitinin gerçel (ε') ve sanal (ε'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

Dielektrik sabitin sanal bileşeni ile ilgili eğri yine Şekil 2.20'de (kesik çizgili olan) verilmektedir. Eğride bu terimin $\omega = 1/\tau$ olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir.

Dielektrik kayıplar

Dielektrik ihtiva eden bir kondansatörün plakaları arasına, yüksek gerilim uygulanırsa dielektrik ısınır. Yalıtkanı oluşturan atomların dış yörüngelerinde bulunan elektronların, bağlı oldukları atomları terk etmeleri sonucu oluşan iletkenlik, özellikle nem ve yabancı maddelerin ortama ilavesi ve ile artar.

Alternatif bir gerilim uygulandığında, dış alanın değişen yönüne göre, hareket eden moleküllerin birbirlerine sürtünmeleri sonucu ısınma olur ve açığa çıkan ısı frekans

ile artar. Bu sürtünmeler sonucu yapılan iş, ısıya dönüşür. Sürtünmeler nedeniyle, molekülün yönelimi takip edişi gecikmeli olur. Bu olay "dielektrik kayıp" olarak tanımlanır ve sıcaklık artıkça dielektrik kayıplarda artar [72,77]. Elektrik yer değiştirme (D) ifadesindeki, elektrik alan ile farklı fazda olan terim, dielektrikteki enerji kaybını gösterir. Birim hacimdeki güç kaybı P,

$$P = J.E \tag{2.56}$$

ifadesi ile verilir: Burada J, E ile aynı fazda olan akım yoğunluğu bileşenidir. Toplam akım yoğunluğu,

$$J = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\varepsilon^{'}E - \varepsilon^{"}E\right) = \left(j\omega\varepsilon^{'} + \omega\varepsilon^{"}\right)E \tag{2.57}$$

Buna göre güç kaybı,

$$P = \omega \mid \varepsilon'' \mid E^2 \tag{2.58}$$

Güç kaybı elektrik yer değiştirmenin faz farkı bileşeni ile orantılıdır ve Şekil 2.20'de verilen frekansın bir fonksiyonu olarak, ε″ bileşene yakın bir davranış sergiler. Alçak ve yüksek frekanslarda değeri düşer. Bunun dışında ara frekanslarda ise "ω=1/τ" bir maksimum verir. Benzer şekilde enerji kayıp değeri, kayıp açısı δ ile tanımlıdır ve

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon^{'}}{\varepsilon^{"}} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2\tau^2}\omega\tau \tag{2.59}$$

ile ifade edilir. P güç kaybı ε' ve tanδ cinsinden,

$$P = \omega E^2 \varepsilon' \tan\delta \tag{2.60}$$

ifade elde edilir [78].

2.5.5. Dielektrik sabitinin hesaplanması

Dielektriklerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülür. Bu nedenle bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile ödeştirilir. Dielektrik madde ile doldurulmuş bir paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ile karakterize edilebilir. Admittans Y ile gösterilir. Buna göre,

$$Y = G + j\omega C \tag{2.61}$$

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

$$Y = G + j\omega\left(C_0\varepsilon^*\right) \tag{2.62}$$

şeklinde yazılabilir. C_0 kondansatörün dielektrik madde yok iken sahip olduğu sığa, ε* ise dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik sabitidir. Bağıl dielektrik sabiti,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2.63}$$

olarak ifade edilmektedir. Admittansın son hali,

$$Y = G + j\omega C_0\left(\varepsilon' - j\varepsilon''\right)$$
$$Y = \left(G + \omega\varepsilon'' C_0\right) + j\omega C_0\varepsilon' \tag{2.64}$$

olur [70-81].

Buna göre admittansın gerçel ve sanal bileşenleri elde edilmiş olur. Empedans ise admittansın tersine eşittir. Yani, Z=1/Y olur. Buna göre,

$$Z = \frac{1}{j\omega C + G} = \frac{1}{j\omega C_0 \varepsilon^*} \tag{2.65}$$

ifade edilir. Eş. 2.63, Eş. 2.65'te yerine yazılırsa gerçel ve sanal kısımların çözümleri;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_o} \qquad \text{ve} \qquad \varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_o} = \frac{1}{\omega R C_0} \tag{2.66}$$

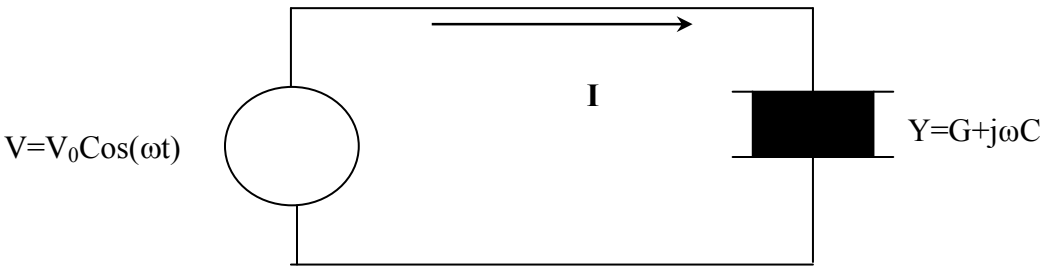
olarak elde edilir [80]. Şekil 2.21'de dielektrikli bir kondansatördeki a.c. akımı gösterilmektedir. Bir dielektrik maddeye ac sürücü gerilim ($V=V_0 Cos\omega t$) uygulandığında, numuneden geçen akım,

$$I = \left(\varepsilon^* C\right)\frac{dV}{dt} \tag{2.67}$$

olarak ifade edilir. Numuneden geçen akım,

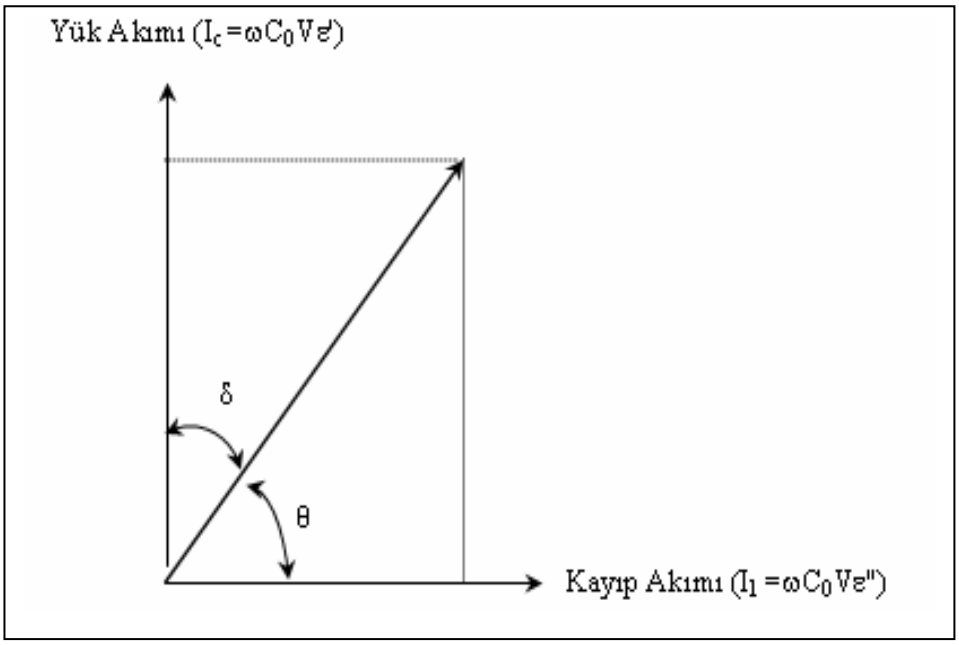
$$I = I_R + jI_C \tag{2.68}$$

olarak ifade edilir. Burada I_R; sürücü gerilim ile aynı fazda olan, gerçel yada dirençsel bileşen olarak adlandırılır. I_C; sürücü gerilim ile farklı fazda olan, sanal yada sığasal bileşen olarak adlandırılır.



Şekil 2.21. Dielektrikli bir kondansatördeki a.c. akım

Numuneden geçen akım, bileşenleri ile birlikte Şekil 2.22'de verilen fazör diyagramında görülmektedir. Bu diyagramda görülen δ terimi, numune üzerindeki ac sürücü gerilim etkisi nedeniyle, dielektrik bir maddenin davranışında ifade edilmiş olan periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. tan δ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarı biçiminde dielektrik tanjant yada kayıp açı olarak ifade edilir.



Şekil 2.22. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki

Ölçüm esnasında, akımın dirençsel bileşeninin sığasal bileşene oranı olarak elde edilir. Buna göre,

$$\tan\delta = \left|\frac{I_R}{I_C}\right| = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \tag{2.69}$$

kayıp açı faktörünü ifade eder [79,81-82].

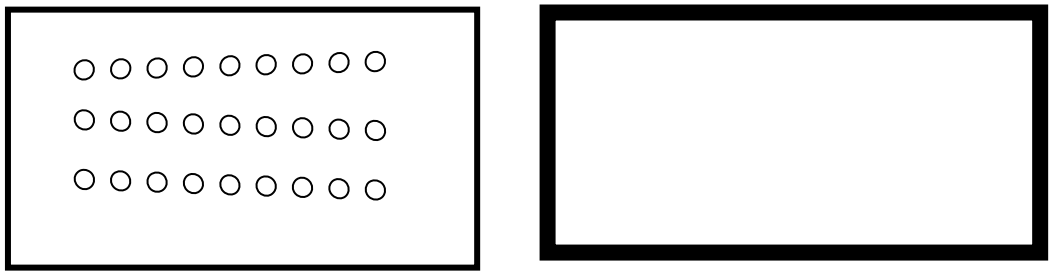
3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Deneysel Hazırlık

Ölçümlere başlamadan önce, gerekli deneysel hazırlıkların yapılması, kullanılacak ölçüm sistemlerinin ve adımların belirlenmesi, daha doğru ölçüm sonuçlarına ulaşmayı sağlar. Bu bölümde MFIS yapının oluşturulma adımları, fiziksel ve elektriksel karakterizasyon yöntemleri ve kullanılan ölçüm cihazlarından bahsedilmektedir.

3.1.1. MFIS yapının oluşturulması

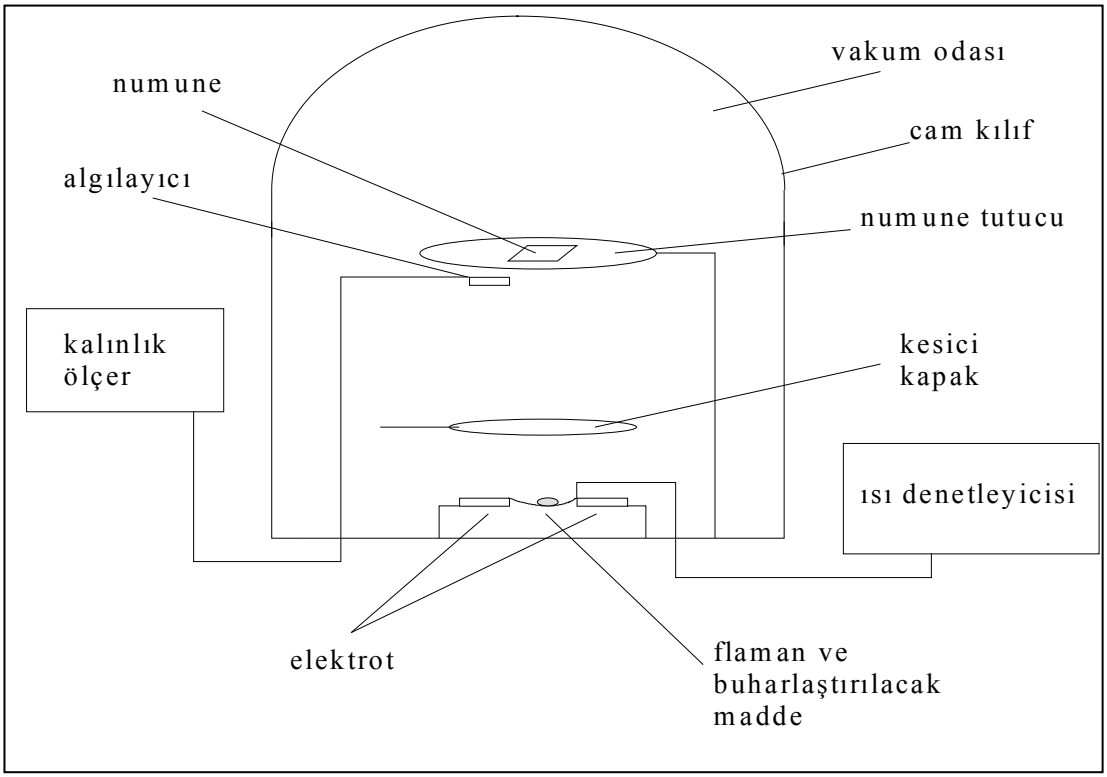
* $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO) ince filmleri, (111) yönelimli ve 0.7 Ω.cm özdirençli n-Si yarıiletken üzerine püskürtme yöntemiyle, yüzeye çöktürülmüştür. Isıtılıp sıkıştırılmış stokiometrik BTO tozu kullanılmıştır.
* Çalışma ortamı olarak Ar ve O_2 gazları karışımı kullanılmış ve çöktürme işlemi için örnek 700 ^oC'de tutulmuştur. Bu işlem BTO/Si arayüzeyinde ince bir SiO_2 tabakası oluşmasına hizmet etmiştir.
* BTO filmlerin hava ortamında tavlanması sırasında BTO/Si arayüzeyinde ince bir SiO_2 tabakasının, genişleyerek yayıldığı kabul edilmiştir [3].
* Yüzeye yerleştirilen BTO ince filmlerin kalınlığı yaklaşık 2,4 μm olarak Veeco Dektak 6M kalınlık profilometresi kullanılarak ölçülmüştür.
* Filmlerin kimyasal kompozisyonu lokal X-ray spectral metodu ile taramalı elektron mikroskobu kullanılarak (REM-101M) belirlenmiştir. Burada filmlerin spektral çizgi yoğunlukları, standart olarak belirlenen örneğe ait verilerle karşılaştırılmıştır.
* Elektriksel ölçümler için, üst kontaklar (doğrultucu) yaklaşık 2000 Å kalınlığında ve 1 mm çapında dairesel noktalar, saf Au (99,999 %) kullanılarak maske yardımıyla, oluşturulmuştur. Şekil 3.1 (a) ve (b) de sırasıyla alt ve üst kontaklar için kullanılan maskeler verilmektedir. Üst kontaklar, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında Leybold Univex 300 vakum kaplama sistemi kullanılarak ısıl buharlaştırma yöntemi ile BTO filmler üzerine oluşturulmuştur.



(a) (b)

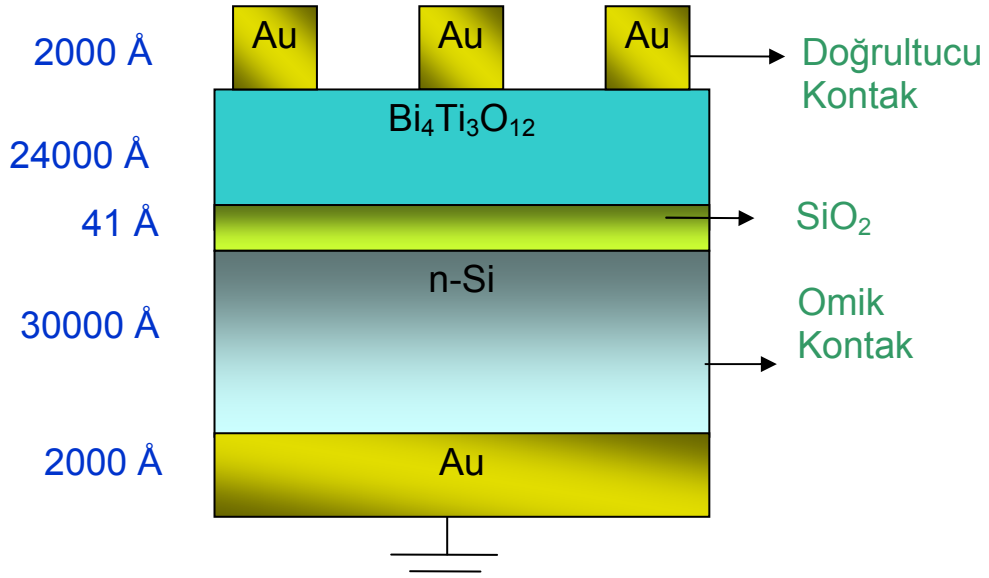
Şekil 3.1. Yapının (a)üst ve (b) alt kontakları oluşturulurken kullanılan bakır maskelerin şematik görünümü

* Alt kontaklar aynı şekilde Si örneğinin arka yüzeyinde, MFIS yapının oluşması için hazırlanmış, omik kontak oluşması için, yapı yaklaşık 700 ^{o}C'de tavlanmış bu işlem Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de kullanılan düzenek verilmektedir.



Şekil 3.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği

Şekil 3.3'te oluşturulan Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si (MFIS) yapının şematik diyagramı verilmektedir. Ölçümler için elektrod bağlantıları ince bakır teller ile iletken saf altın (Au) kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Oluşturlulan MFIS yapının kesit alanları şematik olarak gösterilmektedir.

3.2. Fiziksel Karakterizasyon Teknikleri

Fiziksel karakterizasyon teknikleri kullanılan malzemenin yapısını belirleyecek ve yapının yüzey homejenliğini ortaya koyacak yöntemlerle gerçekleştirilir. Doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşmak için, üzerinde çalışılan malzemenin fiziksel karakterizasyonunun gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir.

3.2.1. X-ışınları kırınımı yöntemi (XRD)

$Bi_4Ti_3O_{12}$ ince filminin yapısal analizi, X-ışınları kırınımı (XRD) yöntemiyle gerçekleştirilmiş, XRD kırınım desenleri; Bruker-as D8 Discover HR-Difraktometre ile CuK_α kaynağı kullanılarak, Gazi Üniversitesi laboratuvarında elde edilmiştir.

3.2.2. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM)

$Bi_4Ti_3O_{12}$ ince filminin yüzey morfolojisi ve yüzey mikroyapısı, Atomik Kuvvet Mikroskopisi (AFM) metoduyla gözlenmiş ve AFM görüntüleri, Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi AFM laboratuarında Topometrix TMX2000 Explorer, 10 x 10 μm AFM cihazı kullanılarak, iletim modunda ve hava ortamında elde edilmiştir.

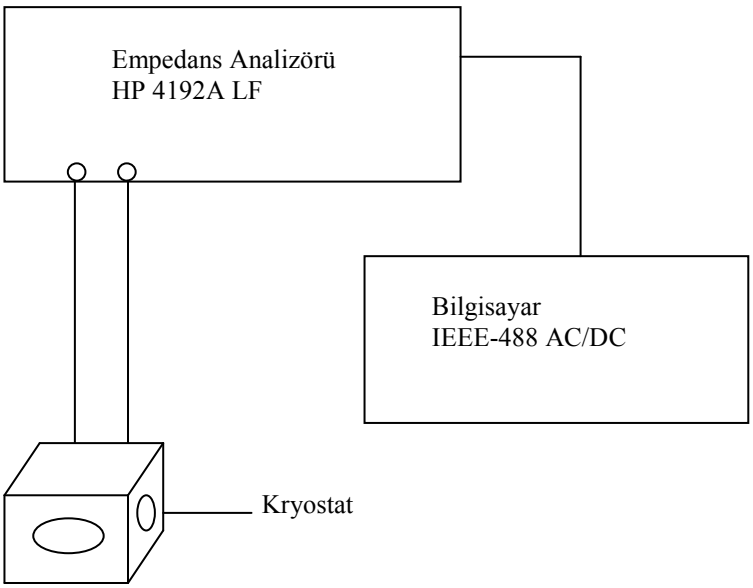
3.3. Elektriksel Karakterizasyon Teknikleri

Elektriksel karakterizasyon teknikleri genellikle malzemeyi tanımlamak, performans ve kararlılığını belirlemek için kullanılır. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri elektriksel karakterizasyon yöntemlerinden olup, yalıtkan tabaka kalınlığı, doping konsantrasyonu ve tuzak yükleri belirlemede kullanılılır.

3.3.1. Frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri

Deneysel ölçümler oda basıncı ve sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Farklı frekans ve sıcaklıklardaki dielektrik sabitini belirlemek için C-V yönteminden elde edilen kapasitans ve voltaj ölçümleri kulanılmıştır. C-V yöntemi, metal ile yarıiletken arasında yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerdeki yük tuzaklarının anlaşılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Arayüzeylerde, arayüzey kutuplanması ile ilgili bilgiler bu ölçümlerden elde edilebilmektedir [75]. Dahası C-V ölçümlerinden oksit tabaka kalınlığı, tuzakların yoğunluğu ve flatband voltajı da bu ölçümlerden elde edilir. C-V ve G/w-V ölçümlerinde frekans aralığı 1 kHz-5 MHz olup, sebebi Si/SiO_2 arayüzeyindeki kusurlu durumlardan kaynaklanan gelişigüzel sinyaller $1\text{-}10^4$ Hz mertebesinde gözlenmesidir [83]. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen C-V ve G/w-V ölçümleri, HP 4192A LF empedans analizörü (5 Hz–13 MHz) ve 40 mV_{rms} test sinyali ile bilgisayar kontrollü olarak elde edilmiştir. Ölçümler ters ve doğru beslem altında, karanlık ortamda bilgisayar kontrollü alınmıştır. Ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE–488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir.

Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek

3.3.2. Sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri

C-V ve G/w-V ölçümleri, HP 4192A LF empedans analizörü (5 Hz–13 MHz) ve 40 mV_{rms} test sinyali ile bilgisayar kontrollü olarak elde edilmiş ve 80-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan MFIS yapı için, Janes vpf-475 kryostat içinde, yaklaşık $5x10^{-4}$ Torr basınç altında bakır tutucuda konumlandırılmış ve bilgisayar kontrollü olarak, hassasiyeti ± 0.1 K olan Lakeshore model 321 Auto-tuning sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak, ters ve doğru dc geriliminde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

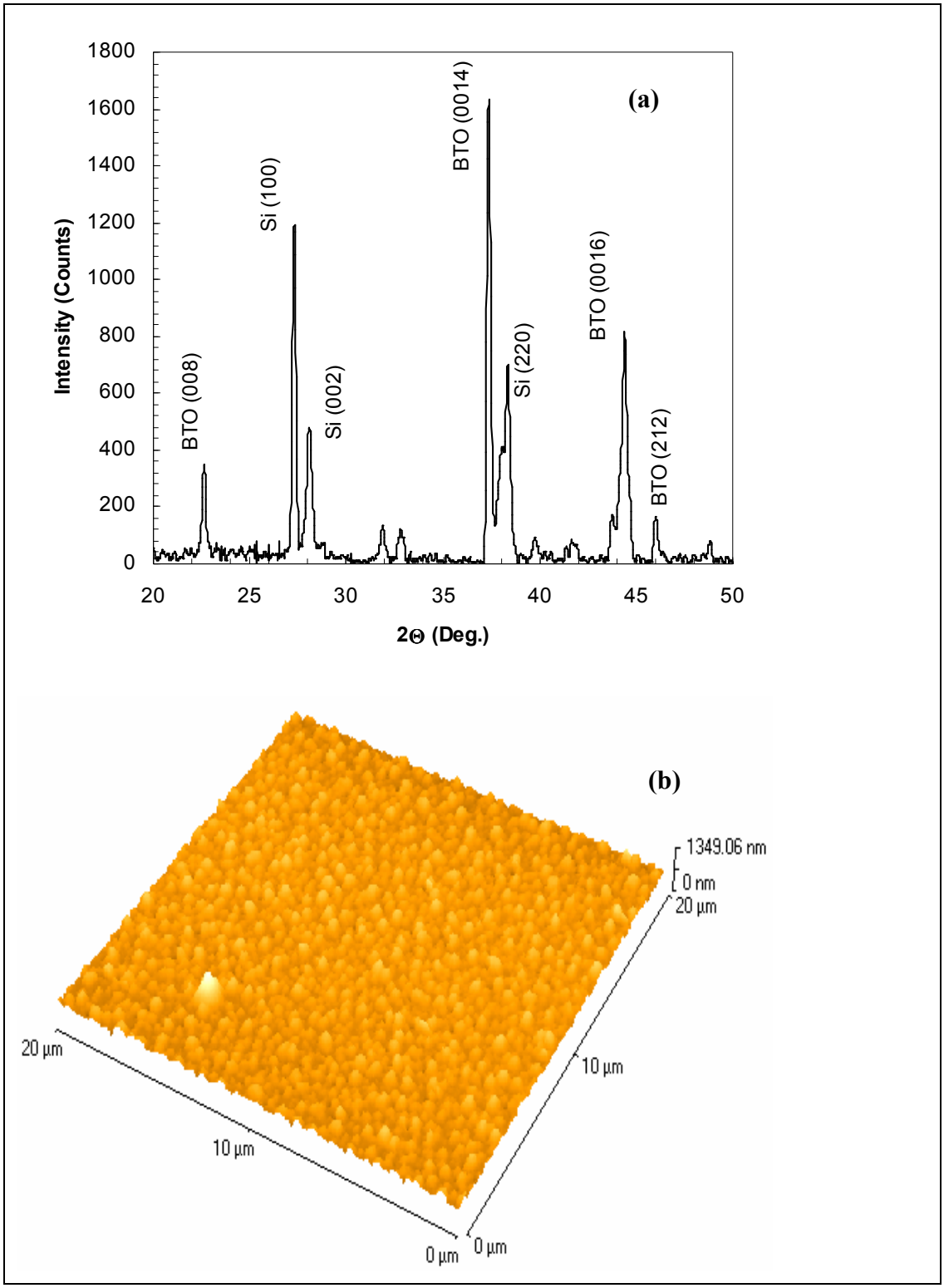
4. DENEYSEL SONUÇLAR

Yapısal analizi gerçekleştirilen ve yüzey morfolojisi elde edilen BTO filmleri, metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapı olarak hazırlanmış ve elde edilen $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik özelliklerini geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında araştırmak için; kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri sırasıyla 1 kHz–5 MHz frekans (oda sıcaklığında) ve 80-400 K sıcaklık arlığında (1MHz frekansta) gerçekleştirilmiştir. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ (MFIS) yapıların C-V-f ve G/w-V-f ölçümleri hem negatif hem de pozitif gerilimde geniş bir aralıkta (-2V ile +6V), C-V-T ve G/w-V-T ölçümleri ise (-4V ile +6V) ölçülmüş, amaçlandığı şekilde, C-V ve G/w-V eğrileri, kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılma bölgesine kadar (tersinim, tüketim ve yığılma) elde edilmiştir.

Deneysel olarak elde edilen C-V ve G/w-V ölçümlerinden, MFIS yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplamıştır. Elektriksel ölçüm sonuçları kullanılarak arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s), difüzyon potansiyeli (V_d), katkılanan verici atomların sayısı (N_D), tüketim tabakalarının genişliği (W_D), Fermi enerjisi (E_F) ve potansiyel engel yüksekliği (ϕ_B) gibi temel parametreler frekansa ve sıcaklığa bağlı hesaplanmış, dielektrik hesaplamaları kullanılarak, dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp açı ($\tan\delta$) frekans ve sıcaklığa bağlı belirlenmiştir.

4.1. Yüzey Morfolojisi ve Yapısal Analiz

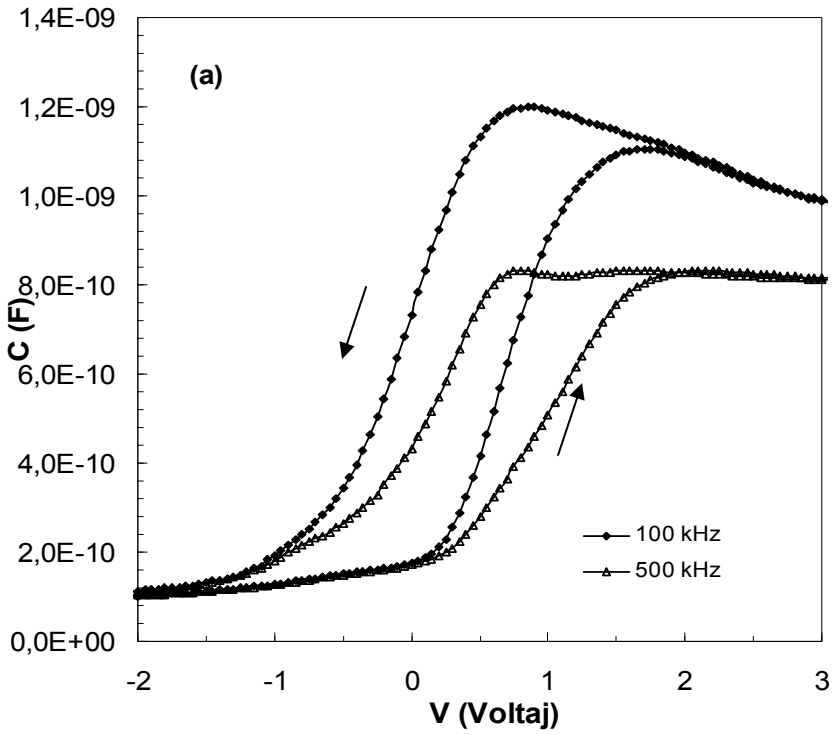
Örneklerin kristal yapısı x-ışınları toz kırınım yöntemiyle test edilir. CuK_α (λ=1.5418 Å) ışınımı kullanılarak alınan kırım desenlerinin değerlendirilmesi ile örneğe ve safsızlıklara ait yansımalar belirlenebilmektedir. $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO) ince filmin yapısal analizi X-ışınları kırınım yöntemi (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. X-ışınları kırınım desenleri Bruker-axs D8 Discover HR-Diffractometre cihazı ile ve CuK_α radyasyonu altında elde edilmiştir.



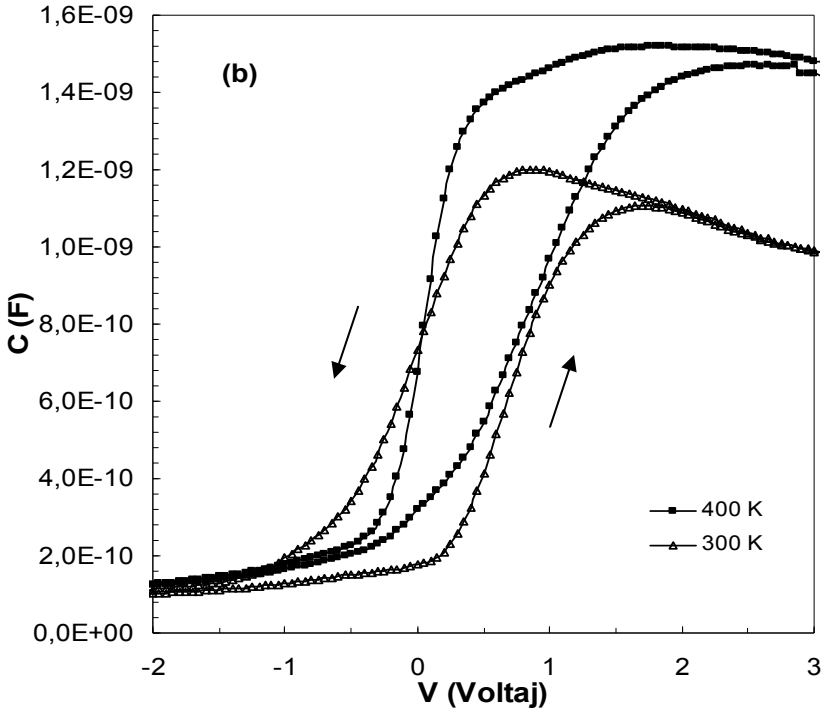
Şekil 4.1. Oluşturulan MFIS yapının (a) 300 K'de elde edilen $Bi_4Ti_3O_{12}$ filmlerin X-ışınları kırınım desenleri, (b) $Bi_4Ti_3O_{12}$ filminin (AFM) yöntemiyle elde edilen görüntüsü

Tipik kırınım desenlerinden BTO filmine ait bir örnek, Şekil.4.1 (a)'da verilmiştir. BTO filmine ait kırınım desenleri, gerçek yapıyı ortaya koymaktadır. Gözlenen gürültü safsızlıklardan kaynaklanmış olabilir. Filmlerin oldukça iyi kristalize olduğu ve desenlerin literatürdekilerle birebir eşleştiği söylenebilir [84].

Yüzey morfolojisi ve yüzey mikroyapı ise atomik kuvvet mikroskopu (AFM) yöntemiyle elde edilmiştir. Yüksek yanal (0.01 nm) ve dikey (1 nm) çözünürlüğe sahip olduğundan AFM, yüzey morfolojisinin atomik skala ölçümleri için iyi bir yöntemdir [3]. Atomik kuvvet mikroskobu ölçümleri, Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi AFM laboratuarında, ölçüm aralığı 10x10 μm. olan, Topometrix TMX2000 Explorer AFM cihazı kullanılarak, iletim modunda ve hava ortamında elde edilmiştir. Şekil 4.1 (b)'den de açıkça görüldüğü gibi numune yüzeyi oldukça düzgün ve yoğun bir görünüm vermektedir. Dikkate değer bir kusur ve çatlak gözükmemektedir [84].



Şekil 4.2. Oluşturulan MFIS yapının (a) oda sıcaklığında farklı frekanslardaki, (b) 100 kHz frekansta farklı sıcaklıklardaki histeriz eğrileri



Şekil 4.2. (Devam) Oluşturulan MFIS yapının (a) oda sıcaklığında farklı frekanslardaki, (b) 100 kHz frekansta farklı sıcaklıklardaki histeriz eğrileri

Oluşturulan MFIS yapı için elde edilen histeriz eğrileri Şekil 4.2'de verilmiştir. Yapının ferroelektrik özellik gösterdiği açıkça gözlenmektedir. Histeriz eğrisinde gözlenen homojensizlik, ferroelektrik-yalıtkan arayüzeyinde fabrikasyon işlemi esnasında, arayüzeyde tuzak yoğunluğunu arttıran iç difüzyondan kaynaklanmış olabilir.

4.2. Frekans ve Sıcaklığa Bağlı C-V ve G/w-V Ölçümleri

4.2.1. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının frekansa bağlı elektriksel karakteristikleri

MFIS yapılarının seri direncini hesaplamak için literatürde çeşitli metotlar önerilmiştir [51,54,85]. Bu çalışmada, Nicollian ve Goetzberger tarafından ortaya konulan iletkenlik metodu ya da orjinal adıyla admittans metodu kullanılmıştır [18].

Bu metoda göre MFIS yapıların gerçek seri direnci (R_s), yeteri kadar yüksek frekansta ($f \geq 1MHz$) güçlü yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans (C_{ma}) ve iletimden (G_{ma}) hesaplanabilir [18]. R_s'nin voltaja bağlılığının yanısıra, frekansa bağlılığı da C-V-f ve G/w-V-f ölçüm grafiklerinden elde edilebilir. MFIS yapısının oda sıcaklığında, frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) karakteristikleri geniş bir frekans (1 kHz-5 MHz) ve voltaj ((-2V)-(6V)) aralığında ölçülmüş ve 3 kHz ile 5 MHz aralığındaki eğrileri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmektedir.

Yüksek frekansta, seri direnci belirlemek için, MFIS yapılar $40mV_{rms}$'lik bir osilasyon voltajı ile uyarıldıktan sonra ölçüm voltajı yani dc gerilim -2V değerinden +6V değerine kadar 50mV adımlarla değiştirilerek, tersinim bölgesinden yığılma bölgesine kadar C-V ve G/w-V eğrileri, 1kHz-5 MHz frekans aralığında, farklı frekanslar için elde edildi. Düşük frekanslardaki durumun tersine, arayüzeylerde bulunan yükler, ac sinyali takip edememektedir, çünkü yüksek frekanslarda, taşıyıcıların ömrü (τ), $1/(w=2\pi f)$ ten çok daha büyüktür. Paralel RC devresini kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli yığılım altındaki eşdeğer devrenin toplam admittansı (Y_{ma}),

$$Y_{ma} = 1/Z_{ma} = G_{ma} + j\omega C_{ma} \tag{4.1}$$

eşitliğiyle verilir [18,86]. MFIS yapı için güçlü yığılma bölgesinde ölçülen empedans (Z_{ma}) toplam devre empedansına eşittir:

$$Z_{ma} = \frac{1}{G_{ma} + jwC_{ma}} \tag{4.2}$$

Empedansın gerçel ve hayali kısımları karşılaştırıldığında, seri direnç aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [24,51];

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G^2{}_{ma} + (wC_{ma})^2} \tag{4.3}$$

Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla, kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerlerini temsil eder. Kuvvetli yığılma bölgesindeki kapasitans (C_{ma}) ile R_s ve yalıtkan oksit tabakanın kapasitansı (C_{ox}) arasındaki ilişki,

$$C_{ma} = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{ox}^2)} \tag{4.4}$$

eşitliği ile verilir. Yalıtkan oksit tabaka kapasitansı C_{ox}; yalıtkan tabaka kalınlığı d_{ox} ve seri direnç R_s'ye bağlıdır. Eş. 4.3 ve Eş 4.4 kullanılarak, C_{ox} değeri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_{ox} = C_{ma}\left[1 + (\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}})^2\right] = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_0 A}{d_{ox}} \tag{4.5}$$

Burada ε_i=3,8ε_o ve ε_o=8,85x10^{-14} F/cm olup, ε_i ve ε_o sırasıyla, yalıtkan arayüzey tabaka ve boşluğun geçirgenlik sabitleridir[1]. Son olarak, düzeltilmiş empedansın sanal ve gerçel kısımlarını (Z_c=1/G_c+jωC_c) karşılaştırarak, düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c) için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

$$C_c = \frac{\left[G_m^2 + (\omega C_m)^2\right] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \tag{4.6}$$

ve

$$G_c = \frac{G_m^2 + (\omega C_m)^2 a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \tag{4.7}$$

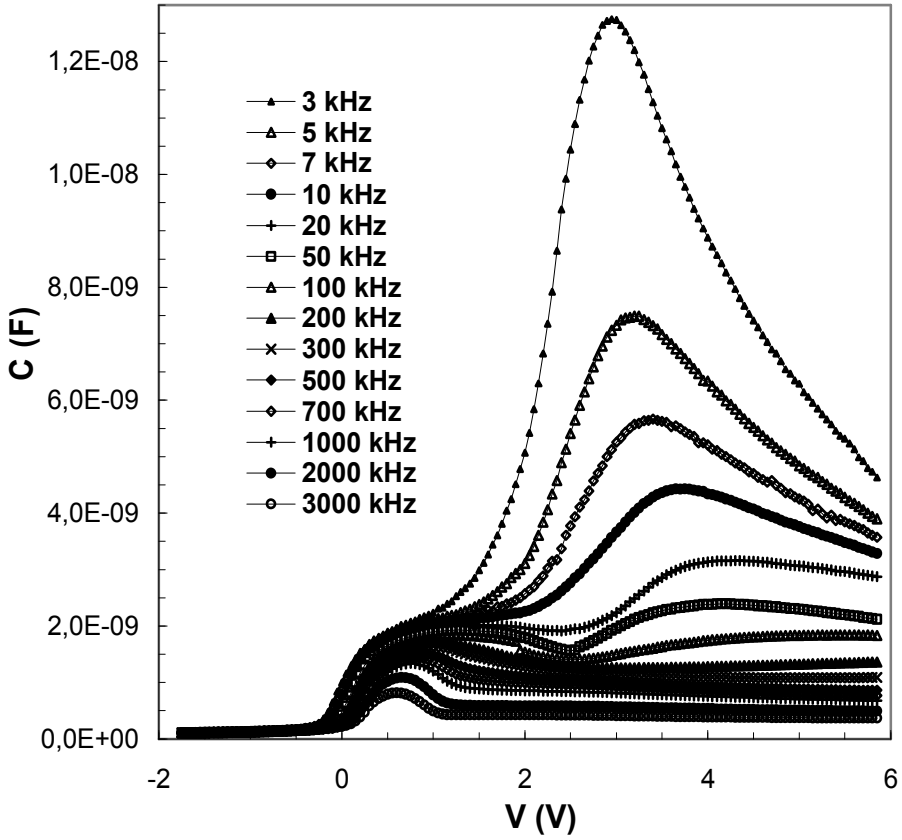
Burada;

$$a = G_m - \left[G_m^2 + (\omega C_m)^2\right] R_s \tag{4.8}$$

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterildiği gibi, 40 mV_{rms} büyüklüğündeki küçük bir ac sinyali ile 3 kHz-3 MHz frekans aralığında ölçülen MFIS yapısına ait, oda sıcaklığında ölçülen C-V ve G/w-V karakteristikleri -2V ile +6V aralığında verilmiştir. Böylece hem C hem de G/ω değerleri tersinim, tükenim ve yığılım bölgelerinde elde edilmişitir. Şekilde görüldüğü gibi, oda sıcaklığında, 3 kHz- 3 MHz frekans aralığında, zayıf tersinim bölgesinden güçlü tüketim bölgesine kadar, C-V ve G/w-V karakteristikleri değişim göstermektedir. Tüketim, yığılma ve tersinim bölgeleri açıkça görülmekte ve tipik metal-oksit-yarıiletken (MOS) davranışı göstermektedir.

Eş. 4.5 ve MFIS yapının doğrultucu kontak alanı A için, $7.85x10^{-3}cm^2$ değeri kullanılarak yüksek frekans (f=1 MHz) C-V eğrisinden elde edilen yalıtkan tabaka (SiO_2) kalınlığı (d_{ox}) 41 Å olarak bulundu. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, ölçülen C değerleri, azalan frekansla tersinim bölgesine yönelmekte ve özellikle düşük frekans değerlerinde, 2 pik vermektedir. İlk pik (~0,5 V'ta) hemen hemen sabit kalmakta ancak ikinci pik (~3.0 V'ta) yüksek gerilim bölgesine yönelmektedir. Düşük frekanslarada, kapasitans ve iletimin yüksek değerleri, ve yüzey durumlarından kaynaklanan ilave kapasitans, Si ve onun gevşeme zamanıyla dengededir. C-V grafiğinde gözlenen C pikinin varlığı MIS veya MFIS yapılar üzerinde, temelde seri direnç ve arayüzey durumların moleküler yapılanması ve yeniden sırlanmasına bağlı çeşitli sonuçlarla değerlendirilmiştir [87,88]. Şekil 4.3 ve 4.4'ten de görüldüğü gibi yığılma ve tüketim bölgesinde, C-V ve G/ω-V ölçülen karakteristikleri, frekansa bağlılık göstermektedir. Bu davranış veya diğer bir deyişle düşük frekanslardaki daha yüksek C değerleri, Si ile dengede olan arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilebilir [18,40,88-89]. Yani, düşük frekanslarda arayüzey durumları (N_{ss}) ac sinyali takip edebilir ve sonuç olarak MFIS kapasitansına önemli ölçüde bu N_{ss}'lerden dolayı bir katkı gelmektedir. Bu katkıdan dolayı meydana gelen kapasitansa ilave kapasitans denir. Frekans arttırıldıkça, MFIS kapasitansı azalır ve daha sonra hemen hemen sabit olur. Yani yüksek frekanslarda ölçülen kapasitans değerlerine N_{ss}'lerden dolayı

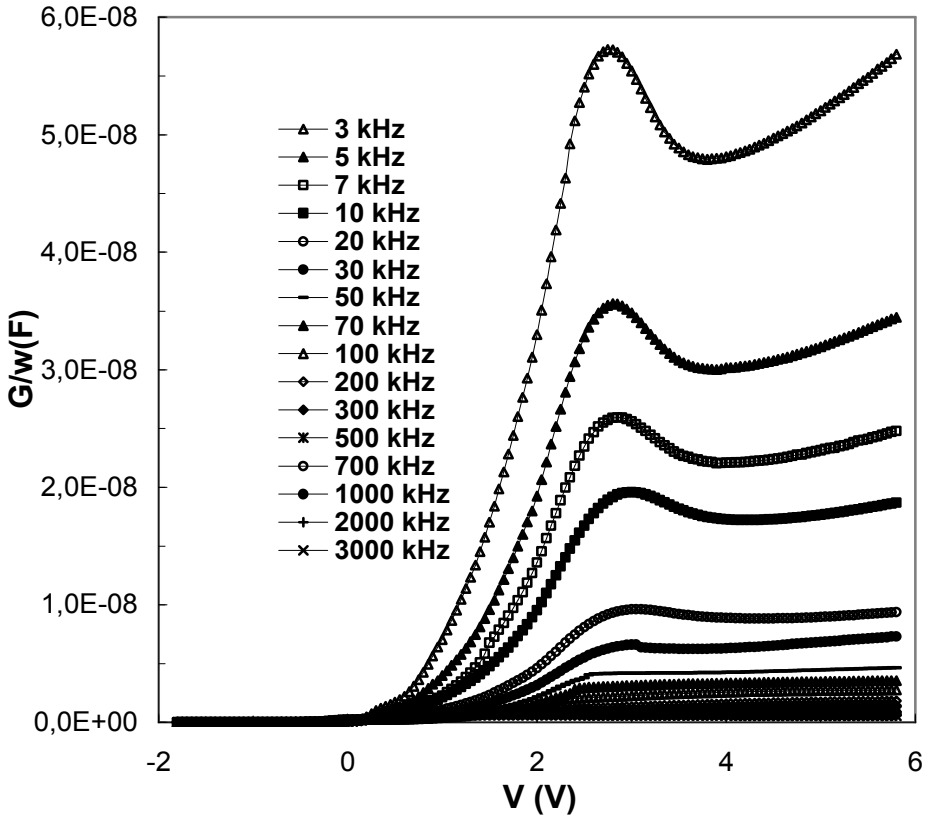
meydana gelen katkı gittikçe azalır ve yaklaşık 1 MHz'den sonra bu katkı tamamen ortadan kalkar [18]. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, kapasitans piklerinden ilkinin sadece N_{ss}'lerden, ikincisinin ise sadece R_s'den kaynaklandığı söylenebilir.Çünkü N_{ss}'ler hem tüketim hem de terslenim bölgesinde etkin iken, R_s sadece yığılma bölgesinde etkindir [18]. Geniş bir frekans aralığında C-V ve G/w-V ölçümleri, hazırlanan aygıtın temel elektriksel ve dielektrik özellikleri hakkında çok önemli bilgiler verir. Son zamanlarda, metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken MFIS yapılarla ilgili literatürde bir çok deneysel sonuç bulunmaktadır [12].



Şekil 4.3. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının oda sıcaklığında, farklı frekanslardaki C-V karakteristikleri

Farklı frekanslardaki MFIS yapısının G/w-V karakteristikleri Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, C-V eğrilerine benzer biçimde artan voltajla genelde artmakta, ancak artan frekanslarla azalmaktadır. Bu davranışlar düşük ve orta seviye frekanslarda, arayüzey

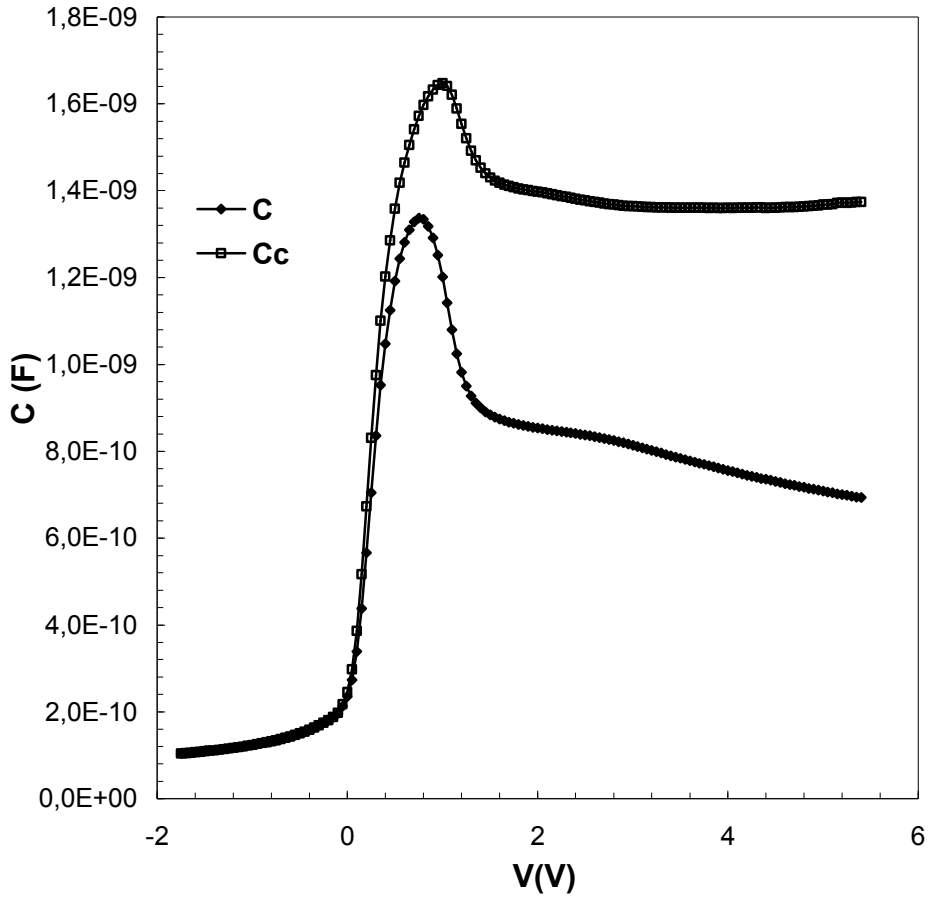
durumlarının gevşeme zamanına ve ac sinyalin frekansına bağlı olarak farklı olabilir. Yani düşük açısal frekanslarda elde edilen C-V veya G/w-V ölçümleri için periyot değeri ($T=1/2\pi f$), arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden (τ) büyük olacaktır ($T>\tau$). Bu nedenle çok küçük frekanslarda ($f\leq 50Hz$), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda ($f\geq 1MHz$), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyalini takip edemez [18]. Bu frekans değerleri arasında (orta frekanslarda) ise arayüzey durumlarının ac sinyalini takip etme gücü, azalan frekansla artmaktadır.



Şekil 4.4. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının oda sıcaklığında, farklı frekanslardaki G/w-V karakteristikleri

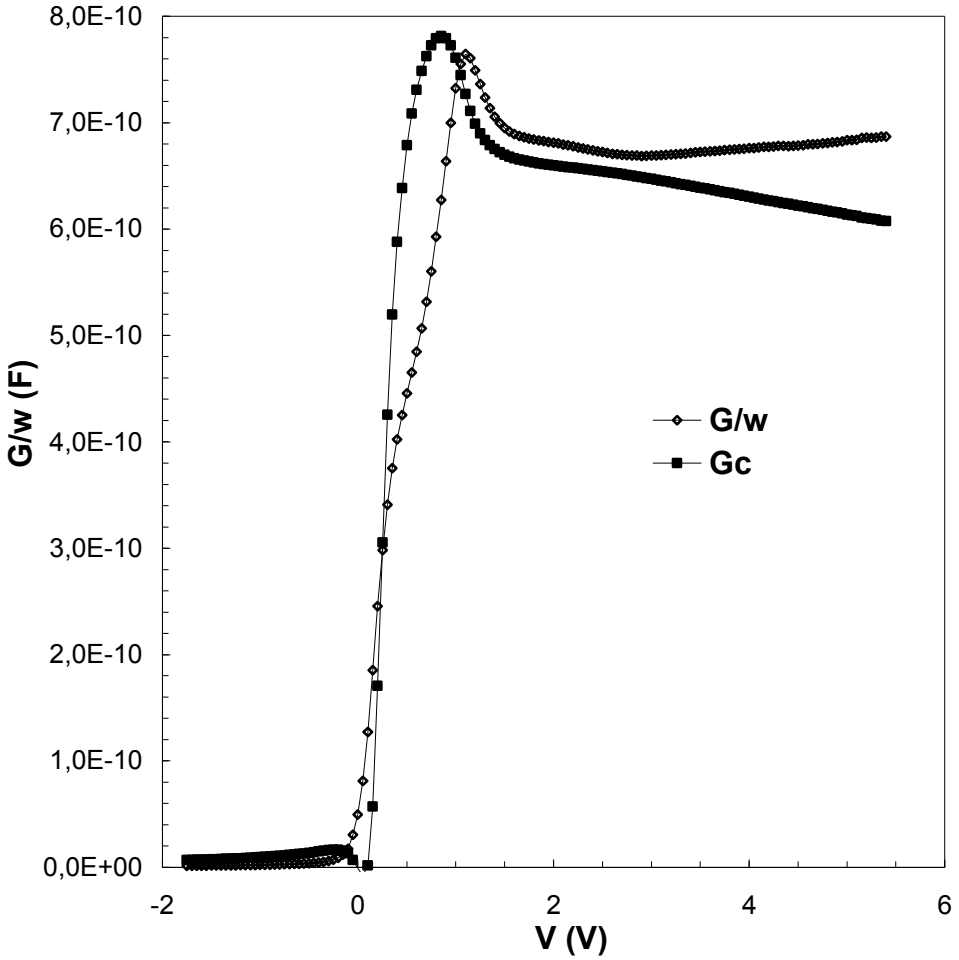
Hem C-V hem de G/w-V ölçümlerinde; arayüzey durumları tersinim ve tükenim bölgesinde etkin olurken seri direnç ise yığılma bölgesinde etkilidir yani kuvvetli yığılma bölgesinde, C-V ölçümlerinde R_s'den dolayı bir pik görülmektedir [13].

MFIS yapının gerçek kapasitans ve iletkenliğini elde etmek için, 1 MHz frekansta, doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C_c-V ve hem de (G_c/ω) eğrileri Eş 4.5 ve Eş 4.6 kullanılarak, seri direnç etkisinden dolayı düzeltilmiş ve sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



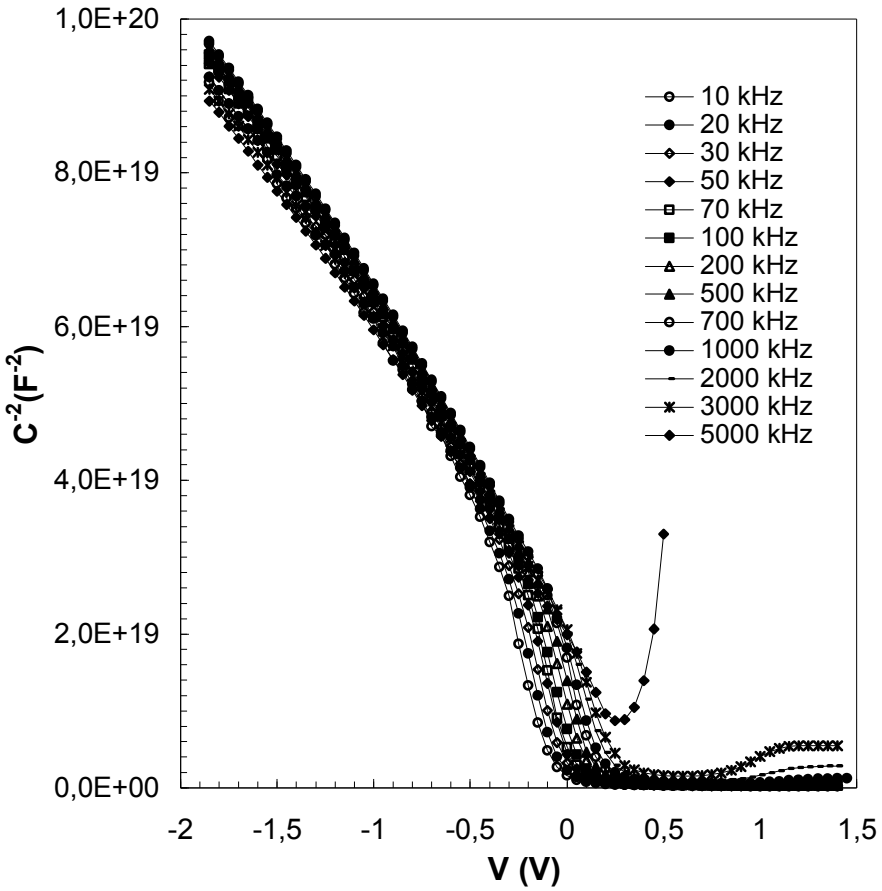
Şekil 4.5. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının 1 MHz frekansta ölçülen ve düzeltilmiş C_c-V eğrileri

C-V grafiğinde seri direnç etkisinden dolayı düzeltme gerçekleştirildiğinde, doğru beslemde düzeltilmiş C_c değerleri artan voltajla artmaktadır. Öte yanda, düzeltilmiş G_c/w grafiğinde pik gözlenmektedir. Bu pik, yük transferinin arayüzde olabileceğini düşündürmektedir. Düzeltilmiş kapasitans (C_c) değerleri Şekil 4.5'te görüldüğü gibi özellikle doğru beslem altında artan voltajla artarken, Şekil 4.6'da görülen düzeltilmiş iletkenlik-voltaj (G_c/w) değerleri ise azalmaktadır.



Şekil 4.6. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının 1 MHz frekansta ölçülen ve düzeltilmiş G_c/w eğrileri

$1/C^2$-V grafiği 10 kHz- 5 MHz frekans aralığında elde edilmişitr. Şekil 4.7'den görüldüğü gibi, orta frekanslarda bile geniş bir voltaj aralığında $1/C^2$-V grafiği lineerdir. $1/C^2$-V grafiğinin eğimi ve kesişme voltajı arayüzey yalıtkan tabaka ve arayüzey durum yoğunluğunun bir fonksiyonudur [1,29,87]. Her frekans için -0.3V-0.3V voltaj aralığında aşağı yönlü bükülme, arayüzey durumların varlığının yarıiletkenle dengede olduğunu göstermektedir. MFIS yapı için, grafiğin eğimi ve ters beslem C-V karakteristiklerinden elde edilen Φ_B(C-V) engel yüksekliği değerleri, Çizelge 4.1'de verilmiştir. 1 MHz'de elde edilen Φ_B değeri 0.73 eV olup, 10 kHz'de elde edilen 0.358 eV değerinin, neredeyse iki katıdır.

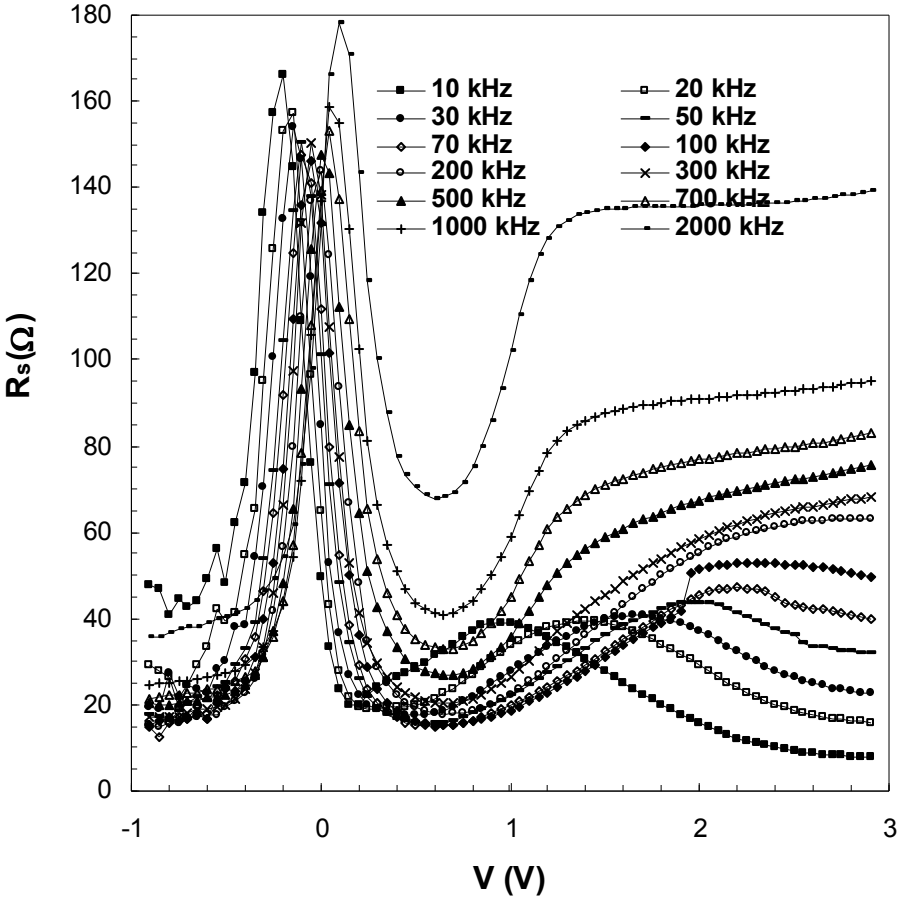


Şekil 4.7. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslardaki, $1/C^2$-V Karakteristikleri

$1/C^2$-V grafiğinde gözlenen bu durum düşük frekanslarda sadece bazı arayüzeyler uygulanan ac sinyali takip edebilmektedir, şeklindeki bir yaklaşımla açıklanabilir. Özellikle yüksek frekanslarda (f≥ 1MHz), $1/C^2$-V grafiği açıkça bir minimum vermektedir. Bu minimumun pozisyonu ve büyüklüğü artan frekansla artmakta ve negatif değerlere doğru kaymaktadır. Bu davranış seri direncin yüksek frekanslarda daha etkin olduğunu göstermektedir. $1/C^2$-V grafiği özellikle güçlü terslenim ve yığılma bölgesinde arayüzey yüklerin ac sinyali izleyemediğini ortaya koymaktadır. Benzer sonuçlar literatürde sunulmaktadır [21].

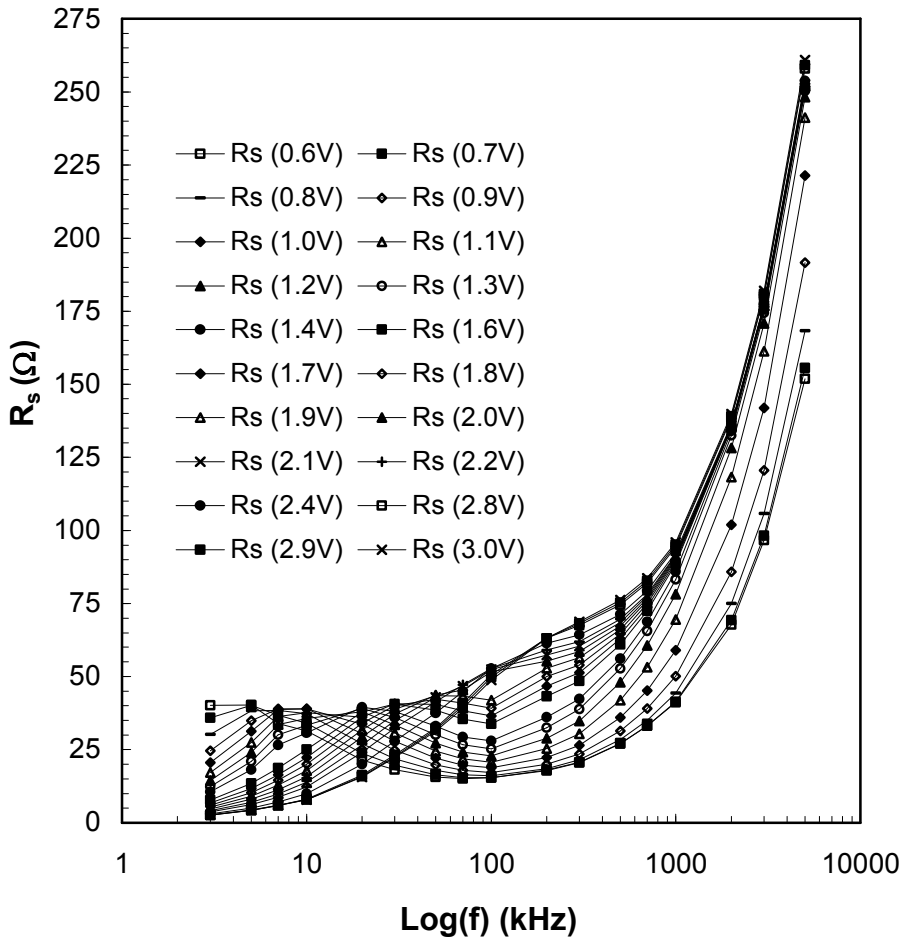
Eş 4.3'ten yararlanılarak, MFIS yapının voltaja bağlı seri direnç profili, farklı frekanslar için elde edilerek Şekil 4.8'de verilmektedir. Bu deneysel sonuçlar, seri direncin C-V ve G/w-V karakteristikleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu

göstermektedir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, frekansa bağlı seri direnç -1.0 V≤ V ≤1.0 V aralığında maksimuma ulaşmaktadır. Azalan frekansla güçlü yığılma bölgesine yönelen seri direnç grafiği için, piklerin genliğinin artan frekansla azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.8. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen seri direnç-voltaj (R_s-V) eğrileri

Seri direnç, hem frekansa hem de voltaja kuvvetlice bağlıdır ve bölgeden bölgeye değişmektedir. Bu davranış Si yasak enerji aralığındaki taşıyıcıların, metal ve yarıiletken arayüzeyinde bulunan tuzaklardan kaçmaya yetecek enerjiye sahip olduklarını göstermektedir. Aynı zamanda, yüksek frekanslarda arayüzeydeki yükler, ac sinyali takip edememektedir. Bu davranışlar, yük tuzaklarının Si yasak band aralığındaki metal/yarıiletken arayüzeyinde yerleşmiş tuzaklardan kaynaklanmaktadır [19].



Şekil 4.9. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si(MFIS)$ yapının oda sıcaklığında farklı doğru beslem voltajlar için elde edilen seri direnç-frekans (R_s-f) eğrileri

yarıiletken (Si) üzerine büyütülen yalıtkan tabaka (SiO_2) kalınlığı, Eş 4.5'ten yararlanarak ve $\varepsilon_{Sio2}=3,8\varepsilon_o$ ve $A=7,85x10^{-3}$ cm^2 değerleri alınarak, 41 Å olarak hesaplanmıştır. Si band aralığında Si/SiO_2 arasına yerleşmiş arayüzey durumları (N_{ss}), Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te farklı frekanslar için elde edilen C_m-V ve G_m/w-V eğrilerinden faydalanılarak Hill-Coleman metoduna [24] göre hesaplanmıştır ve Çizelge 4.1'de verilmiştir. Seri direncin farklı voltajlardaki frekansa bağlı davranışını gözlemleyebilmek için 0,6-3,0 V aralığında 0,2 V aralıklarla R_s-V grafiği oda sıcaklığında frekansa bağlı seri direnç grafiği elde edilmiş ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük frekanslarda seri direnç hemen hemen voltajdan bağımsızdır.

Çizelge 4.1. MFIS yapının 1 kHz-5 MHz frekans aralığında C-V ve G/w-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel elektriksel parametrelerine ait değerler

f (kHz)	V_m (V)	C_m (F)	G_m/w (F)	N_{ss} (eV^{-1} cm^{-2})
1	2.6	3.92E-08	1.35E-07	1.50E+15
2	2.9	1.96E-08	7.96E-08	2.67E+14
3	3.0	1.27E-08	5.54E-08	1.38E+14
5	3.2	7.49E-09	3.30E-08	6.76E+13
7	3.5	5.64E-09	2.30E-08	4.41E+13
10	3.7	4.42E-09	1.76E-08	3.24E+13
20	4.0	3.14E-09	8.88E-09	1.56E+13
30	3.7	2.78E-09	6.26E-09	1.09E+13
50	4.0	2.38E-09	4.24E-09	7.28E+12
70	4.4	2.12E-09	3.38E-09	5.76E+12
100	5.0	1.84E-09	2.71E-09	4.57E+12
200	1.1	1.73E-09	4.77E-10	8.02E+11
300	1.0	1.65E-09	4.14E-10	6.94E+11
500	1.0	1.51E-09	5.38E-10	8.98E+11
700	0.9	1.41E-09	5.69E-10	9.47E+11
1000	0.9	1.32E-09	6.27E-10	1.04E+12
2000	0.7	1.09E-09	7.73E-10	1.27E+12
3000	0.7	8.11E-10	9.60E-10	1.57E+12
5000	0.3	3.35E-10	6.17E-10	9.92E+11

Hill-Coleman metoduna göre, arayüzey durum yoğunluğu;

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{((G_m / \omega)_{\max} C_{ox})^2 + (1 - C_m / C_{ox})^2)} \tag{4.9}$$

eşitliğinden elde edilir [24]. Burada A; MFIS yapının doğrultucu kontak alanı, ω; açısal frekans, C_m ve $(G_m/w)_{max}$ ise; ölçülen kapasitansın pik değerine karşılık gelen kapasitans ve iletkenlik ve C_{ox}; yalıtkan tabakanın kapasitansıdır. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının 1 kHz-5 MHz frekans aralığında gerçekleştirilen C-V ve G/w-V ölçümlerinden elde edilen temel bazı elektriksel

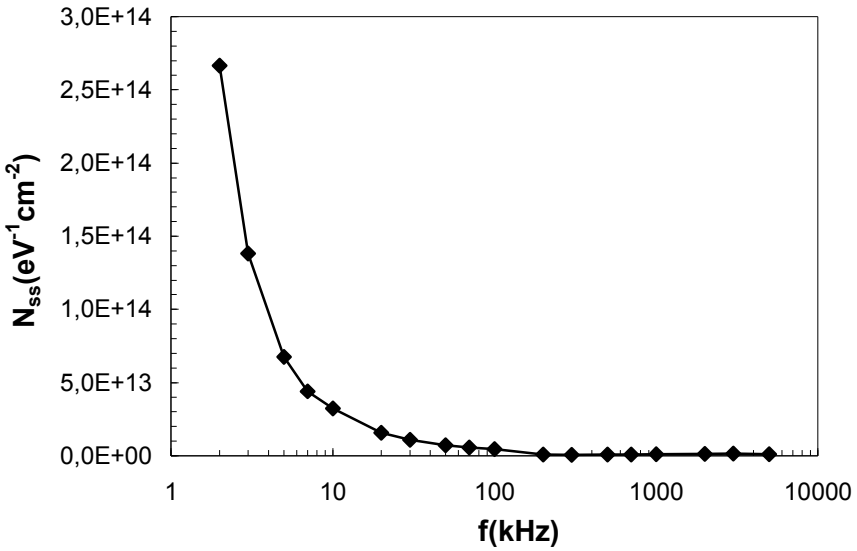
parametreler, Çizelge 4.1'de verilmektedir. Çizelge 4.1'de görülebileceği gibi, frekansın arttırılmasıyla, kapasitansın (C_m) pik değeri ve buna karşılık gelen $(G_m/w)_{max}$ değeri artan seri direnç (R_s) ile azalmaktadır.

Çizelge 4.2. MFIS yapı için 10 kHz-5 MHz frekans aralığında ters beslem C-V karakteristiklerinden elde edilen çeşitli parametreler

f (kHz)	N_d 10^{15}x(cm^{-3})	V_o (eV)	V_d (eV)	E_f (eV)	$\Delta\Phi_b$ (meV)	Φ_b (C-V) (eV)	c_2	W_D 10^{-5}x (cm)	N_{ss} 10^{14}x($eV^{-1}cm^{-2}$)
10	3.32	0.110	0.14	0.2339	11.98	0.358	0.539	2.31	3.46
20	3.50	0.190	0.22	0.2325	13.62	0.435	0.568	2.84	3.07
30	3.66	0.225	0.25	0.2314	14.30	0.468	0.595	2.99	2.75
50	3.78	0.235	0.26	0.2305	14.57	0.477	0.615	3.00	2.54
70	3.96	0.310	0.34	0.2293	15.70	0.549	0.644	3.33	2.24
100	4.01	0.320	0.35	0.2291	15.85	0.559	0.650	3.36	2.18
200	4.05	0.415	0.44	0.2288	16.89	0.653	0.657	3.77	2.11
500	4.16	0.425	0.45	0.2281	17.10	0.662	0.676	3.76	1.94
700	4.22	0.470	0.50	0.2277	17.58	0.706	0.686	3.92	1.85
1000	4.27	0.495	0.52	0.2274	17.84	0.730	0.693	3.99	1.79
2000	4.28	0.510	0.54	0.2273	18.00	0.745	0.696	4.04	1.77
3000	4.52	0.520	0.55	0.2259	18.31	0.754	0.734	3.97	1.47
5000	4.54	0.460	0.49	0.2258	17.81	0.694	0.737	3.74	1.44

C^{-2}-V grafiği kullanılarak elde edilen Çizelge 4.2'den de görüldüğü gibi difüzyon potansiyeli ($V_d=V_o+kT$), tüketim tabakasının genişliği ($W_D=2\varepsilon\varepsilon_o V_d/(qN_D)^{1/2}$), potansiyel engel düşmesi ($\Delta\Phi_B=(qE/4\pi\varepsilon\varepsilon_o)^{1/2}$), artan frekansla azalırken, katkılanan verici atomların sayısı ($N_D=2/q\varepsilon\varepsilon_o A^2\tan\Theta$), Fermi enerjisi ($E_F=(kT/q)\ln(N_{cSi}/N_D)$), potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_B=V_D+E_F-\Delta\Phi_B$) ve arayüzey durumlarının sayısı ($N_{ss}=T\varepsilon_o(1-c_2)/c_2Aq$) artmaktadır. Bu davranışlar arayüzey durumlarının azalan frekansla a.c. sinyali takip edebilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. $c_2=N_D$(deneysel)/N_D(teorik) ifadesi ile hesaplanır ve idealde 1'e eşit olmalıdır. N_D(teorik)=$1/q\mu\rho$ kullanılarak $6{,}2x10^{15}cm^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan V_o değeri C^{-2}-V grafiğinde lineer bölgenin x eksenini kestiği noktadır. N_{cSi}

ise $2,8x10^{19}cm^{-3}$'tür. Bu deneysel sonuçlar, Chattopadhyay ve arkadaşları tarafından verilen teorik sonuçlar ile iyi bir uyum içindedir [19]. Sonuç olarak, yarıiletken ile dengede olan N_{ss}, ac sinyali düşük frekanslarda daha kolaylıkla takip edebilir ve ilave bir kapasitans üretebilir. Bu sebeple yüksek frekanslarda R_s etkisi azalır. Arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}), MFIS yapıların elektriksel karakteristiklerin önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük frekansların aksine yüksek frekans ($f \geq 1$ MHz) limitinde N_{ss}, ac sinyali takip edemez. Bundan dolayı, arayüzey durumlarının kapasitansının, toplam kapasitansa katkısını ihmal edilebileceği ölçüde küçük kalır. Bu sebeple, yeteri kadar yüksek frekanslarda N_{ss} etkisi, ihmal edilebilir ölçüde azalır. Yani, yeterince yüksek frekanslarda N_{ss}'nin ac sinyali takip edemeyeceğini ve sonuç olarak MFIS kapasitansına katkıda bulunamayacağını söyleyebiliriz.



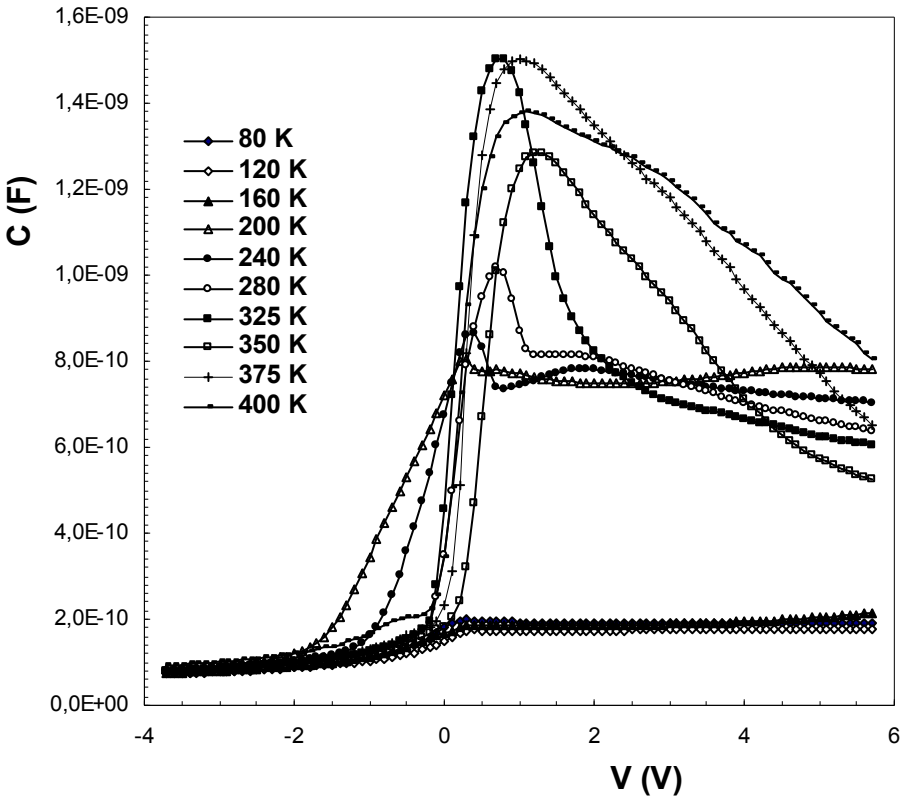
Şekil 4.10. MFIS yapı için oda sıcaklığında, arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) frekansa bağlı grafiği

Arayüzey durumların frekansa bağlılığını gözlemek için frekansa bağlı arayüzey durum yoğunluğu grafiği elde edilmiş ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Düşük frekanslarda Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi arayüzey durum yoğunluğu frekansa önemli ölçüde bağlıdır ve yapının kapasitansında bir artışa sebep olmaktadır. Ancak yüksek frekanslarda hemen hemen frekanstan bağımsızdır. Düşük frekanslarda

kapasitansın yüksek değerleri N_{ss}'ten dolayı ilave kapasitans olduğu şeklinde açıklanabilir.

4.2.2. Au/Bi4Ti3O12/SiO2/n-Si(MFIS) yapının sıcaklığa bağlı elektriksel karakteristikleri

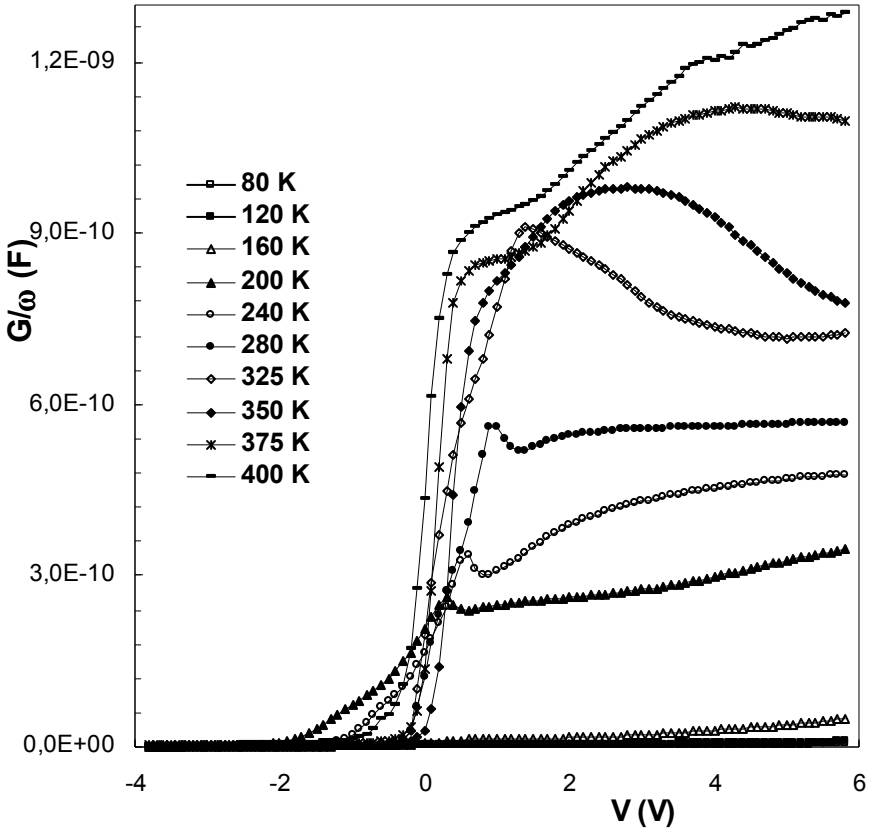
Sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V-T) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V-T) ölçümleri 40 mV_{rms} genliğinde ac sinyali uygulanarak, 1MHz frekansında, 80 K-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde dc elektrik alan -4V negatif gerilimden, 6V pozitif gerilime kadar değiştirilmiştir.



Şekil. 4.11. MFIS yapının 1 MHz frekansta, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen C-V karakteristikleri

Örneğin sıcaklığı bakır tutuculu ısılçift ve hassasiyeti ± 0.1 K'dan daha iyi olan Lakeshore 321 Auto-tuning sıcaklık kontrolörü ile gerçekleştirilmiştir. Eğer yalıtkan

tabakada hareketli yükler olsaydı, dc gerilim bu yükleri yalıtkan/silikon arayüzeyine veya uzağına yönlendirirdi. İletkenlik metoduna göre [46,51]; metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapısına dışarıdan küçük bir ac sinyal uygulandığında, yarıiletkenin arayüzey ve taşıyıcı bandındaki çoğunluk taşıyıcılarının hareketinden dolayı, iletkenlik kayıpları olur. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapı için değişik sıcaklıklarda ölçülen yüksek frekans kapasitans (C-V) ve iletkenlik (G/w-V) grafiği sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmektedir ve açıkça görüldüğü gibi, tipik C-V ve G/w-V karakteristikleri yığılma, tüketim ve terslenim bölgelerini ortaya koymaktadır. Yalıtkan tabaka (SiO_2) kalınlığı d_{ox} güçlü yığılma bölgesinde 1 MHz frekansta elde edilen C-V eğrisinden, Eş.4.5 kullanılarak hesaplanmış ve 41 Å olarak bulunmuştur.



Şekil 4.12. MFIS yapının 1 MHz frekansta, 80-400 K sıcaklık aralığında elde edilen G/w-V karakteristikleri

Kapasitans (C) değerleri artan sıcaklıkla sistematik olarak artmakta ve her bir sıcaklık değeri için pik vermektedir. MIS ve MFIS yapılar için C-V-T grafiğinde maksimum pik değerinin varlığı, diğer araştırmacılar tarafından tespit edilmiş [12,18] ve sebebi arayüzey durumların moleküler yapılanması, yeniden sıralanma ve seri direnç etkisi olarak açıklanmıştır.

Bununla beraber, doğru beslemde G/ω-V eğrilerindeki çakışma ideal MFIS yapıların genel davranışıyla karşılaştırıldığında beklenen bir davranıştır. Homojen MIS veya MFIS yapılarda, seri direnç varlığında, bu çakışmanın gizli ve gözlenemez olduğu düşünülmektedir ancak bu davranış inhomojen yapılarda gözlenebilmektedir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'den görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik yüksek sıcaklıklara karşı oldukça duyarlıdır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda etkili olan arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanabilir [18]. Buna ilave olarak, kapasitans ve iletkenlikte meydana gelen katkı, uzay yükü değerlerinin artmasından kaynaklanır. 80-400 K sıcaklık aralığında MFIS yapılar için elde edilen C-V-T ve G/w-V-T karakteristiklerinden elde edilen çeşitli parametreler Çizelge 4.3'te verilmektedir.

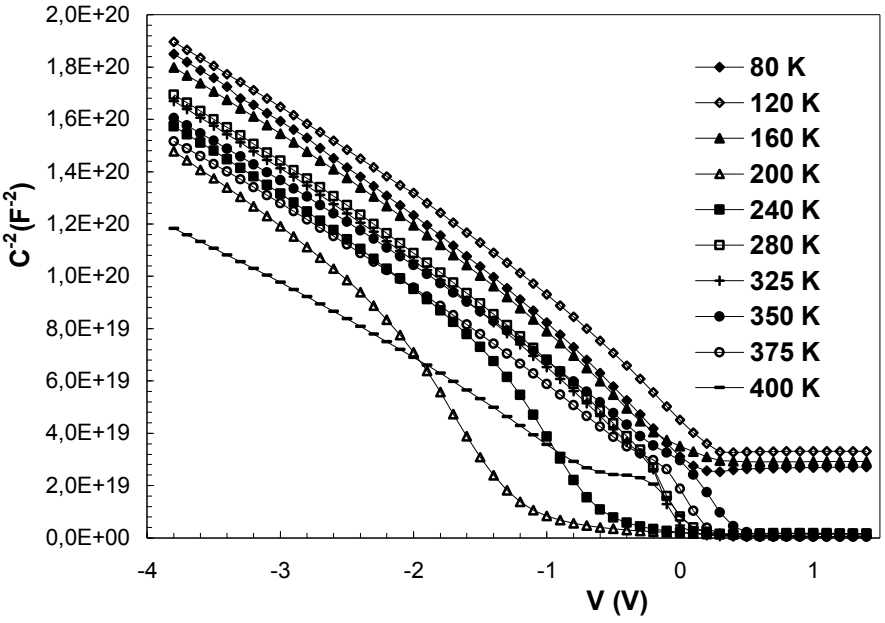
Frekanstaki azalmayla kapasitans artar ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde homojen olmayan tabakanın kapasitans ile frekans dağılımının neden olduğu yalıtkan kapasitansı etkilenir. Bu frekansa bağımlılık arayüzey durumlarının düşük frekanslarda ac sinyalini takip edebilmesinden dolayı hem C hem de G/w değerlerinde ilave katkı meydana gelir. Ancak, yüksek frekanslarda ($f \geq 1000$ kHz) arayüzey durumları ac sinyallerini takip edemez. Bu da arayüzey durumları kapasitansının, toplam kapasitansa katkısını dikkate alınamayacak kadar küçültür [90].

MFIS yapının davranışını incelemek için, 1 MHz frekansta ölçülen C-V grafiği kullanılarak, C^{-2}-V eğrisi elde edilmiştir. Şekil.4.13'te görüldüğü gibi, bahsedilen grafik geniş bir voltaj aralığında doğrusal bir eğri vermektedir.

Çizelge 4.3. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si (MFIS) yapı için 80-400 K sıcaklık aralığında C-V ve G/w-V karakteristiklerinden elde edilen çeşitli parametreler

T (K)	V_m(V)	C_m (pF)	G_m/ω(pF)	N_{ss}(eV^{-1} cm^{-2})
80	0.3	199	4.79	$7.66x10^{9}$
120	0.3	174	4.42	$7.07\ x10^{9}$
160	0.3	184	10.50	$1.68\ x10^{10}$
200	0.3	807	264	$4.31\ x10^{11}$
240	0.4	876	283	$4.63\ x10^{11}$
280	0.7	1020	448	$7.36\ x10^{11}$
325	0.8	1500	681	$1.14\ x10^{12}$
350	1.3	280	859	$1.42\ x10^{12}$
375	1.0	1500	854	$1.42\ x10^{12}$
400	1.1	1380	936	$1.56\ x10^{12}$

Her sıcaklık değerinde 0 V geriliminin biraz üzerinde, C^{-2}-V eğrisinde aşağı yönlü bir bükülme görülmektedir ve bu bükülme arayüzey durmların etkisinden dolayı gözlenmişitir.



Şekil 4.13. MFIS yapının 1 MHz frekansta farklı sıcaklıklar için C^{-2}-V grafiği

MFIS yapı için yük taşıyıcı yoğunluğu (N_D) değerleri çeşitli sıcaklıklar için C^{-2}-V grafiğinin eğiminden elde edilmiştir.

Bariyer yüksekliği Φ_B(C-V) değerleri ise, lineer bölgenin x-eksenini kestiği V_o voltaj değeri ($V_o=V_d-kT/q$) kullanılarak, Eş.4.10'dan elde edilmiştir [87,89];

$$\Phi_B(C\text{-}V) = V_o + kT/q + E_F - \Delta\Phi_B \qquad (4.10)$$

Burada E_F; iletim bandı kenarı ile bulk fermi enrji seviyesi arasındaki farktır. $\Delta\Phi_B$ ve V_d sırasıyla, hayali güç bariyer düşmesi ve difüzyon potansiyelidir.

Çizelge 4.4. MFIS yapı için farklı sıcaklık değerlerinde hesaplanan deneysel N_d, V_d, E_F, $\Delta\Phi_B$, Φ_B(C-V) parametreleri

T (K)	N_d x10^{15}(cm^{-3})	V_d (eV)	E_F (eV)	$\Delta\Phi_b$ (meV)	Φ_b(C-V) (eV)
80	5,26	0,98	0,059	22.00	1,014
120	5,34	0,94	0,089	21.88	1,007
160	5,45	0,90	0,118	21.78	1,000
200	4,92	0,86	0,149	20.94	0,985
240	5,45	0,82	0,177	21.26	0,976
280	5,35	0,78	0,207	20.91	0,970
325	5,54	0,74	0,239	20.78	0,956
350	5,63	0,72	0,257	20.70	0,951
375	5,94	0,70	0,274	20.84	0,949
400	6,03	0,67	0,291	20.75	0,944

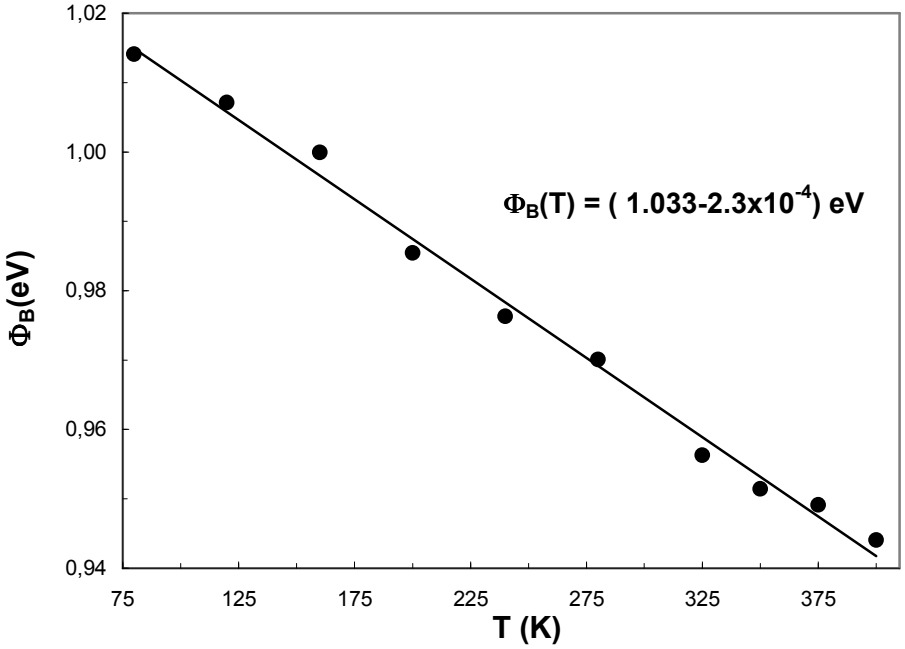
İdealite faktörü, deneysel taşıyıcı yoğunluğu (N_D) değeri ile teorik değerin (N_D'= $6.2x10^{15}$ cm^{-3}) oranı olarak bilinmekte ve

$$c_2 = N_D/N_D' \qquad (4.11)$$

formülü ile de ifade edilmektedir. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi, Φ_B(C-V) sıcaklıkla lineer olarak azalmakta ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir;

$$\Phi_B(C\text{-}V) = \Phi_{B0} - \alpha T \qquad (4.12)$$

Deneysel olarak, mutlak sıcaklıkta bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) ve ısı sabiti (α) sırasıyla 1.033 eV and $2.3x10^{-4}$ eV/K olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) yapının farklı sıcaklıklar için hesaplanan bariyer yüksekliği değerleri

4.3. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$(MFIS) Yapının Frekans ve Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Özellikleri

Hazırlanan metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken ($Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$) yapılarda ferroelektrik malzeme ile yarıiletken arasına büyütülen yalıtkan tabaka (SiO_2) için, kompleks geçirgenliğin gerçel kısmı ε' (dielektrik sabiti), hayali kısmı ε'' (dielektrik kayıp), tanδ (dielektrik kayıp açı) frekansa ve sıcaklığa bağlı incelenmiştir. C-V ve G/w-V, ters ve doğru beslemde, 1 kHz-5 MHz frkans ve 80 K-

400 K, sıcaklık aralığında gerçekleştirilen ölçümler kullanılarak, dielektrik sabiti (ε') ve dielektrik kayıp (ε''), sırasıyla ölçülen kapasitans C_m ve iletkenlik G_m değerlerinden elde edilmiş, yalıtkan tabaka kalınlığı ise, yapının alanı ve boşluğun dielektrik katsayısı ε_o kullanılarak hesaplanmıştır.

4.3.1. Dielektrik özelliklerin frekansa bağlı değişimi

Yığılma bölgesinde, yüksek frekanslardaki MFIS yapısının kapasitansı temel olarak, yalıtkan tabakanın kalınlığı ve yapısal özellikleri tarafından kontrol edilmektedir· Kompleks geçirgenlik aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir [91]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{4.13}$$

Burada *j;* -1'in hayali köküdür. Kompleks geçirgenlik formülü bir yapının elektrik ve dielektrik özelliklerini tanımlamak için kullanılır.

ε* formülasyonu, kapasitans ve admittans ölçümleri(C-V ve G/w-V) dikkate alındığında, aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\varepsilon^* = \frac{Y^*}{j\omega C_o} = \frac{C}{C_o} - j\frac{G}{\omega C_o} \tag{4.14}$$

burada; Y^*, C ve G dielektrik malzemenin sırasıyla ölçülen admittans, kapasitans ve iletimi olup, ω(ω=2πf); uygulanan elektrik alanın açısal frekansıdır.

Dielektrik sabiti (ε'), çeşitli frekanslarda, güçlü tüketim bölgesinde ölçülen kapasitans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve hesaplamalarda aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır [92]:

$$\varepsilon' = \frac{C_{ox}}{C_o} \tag{4.15}$$

Burada C_o kapasitörün yalıtkan tabaka konmadan önceki kapasitansıdır ve Eş.4.16 ile verilmektedir.

$$C_o = \varepsilon_o(A/d_{ox}) \tag{4.16}$$

Burada, A; MFIS yapının doğrultucu kontak alanı olup birimi cm^{-2} dir. d_{ox}; arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı ve ε_o; serbest uzayın (boşluğun) dielektrik geçirgenlik sabitidir ($\varepsilon_o = 8.85x10^{-14}$ F/cm).

Kuvvetli yığılım bölgesinde, MFIS yapısının maksimum kapasitansı, yalıtkan tabakanın kapasitansına ($C_m=C_{ox}$) karşılık gelmektedir.

$$C_m = C_{ox} = \varepsilon' \varepsilon_o A / d \tag{4.17}$$

Dielektrik kayıp (ε"), çeşitli frekanslarda ölçülen iletim değerlerinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_o} \tag{4.18}$$

Eş.4.16'daki değer, Eş.4.18 ile birleştirildiğinde ε" aşağıdaki şekilde yazılabilir:

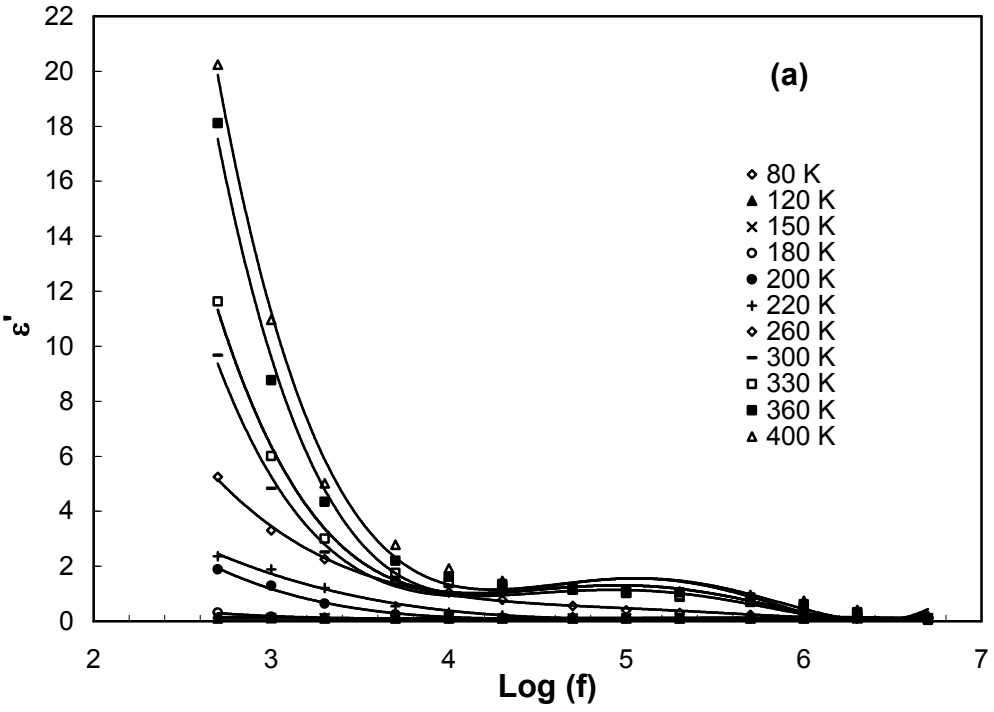
$$\varepsilon'' = \frac{G_m}{C_o \omega} = \frac{d_{ox}}{A \varepsilon_o} \frac{G_m}{\omega} \tag{4.19}$$

Burada G_m; MFIS yapının iletkenliği, ω; açısal frekanstır. Kayıp açı (tanδ), ε' ve ε" değerlerinin oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [30]. Yani tanδ değeri, ε" değerinin ε' değerine oranıdır.

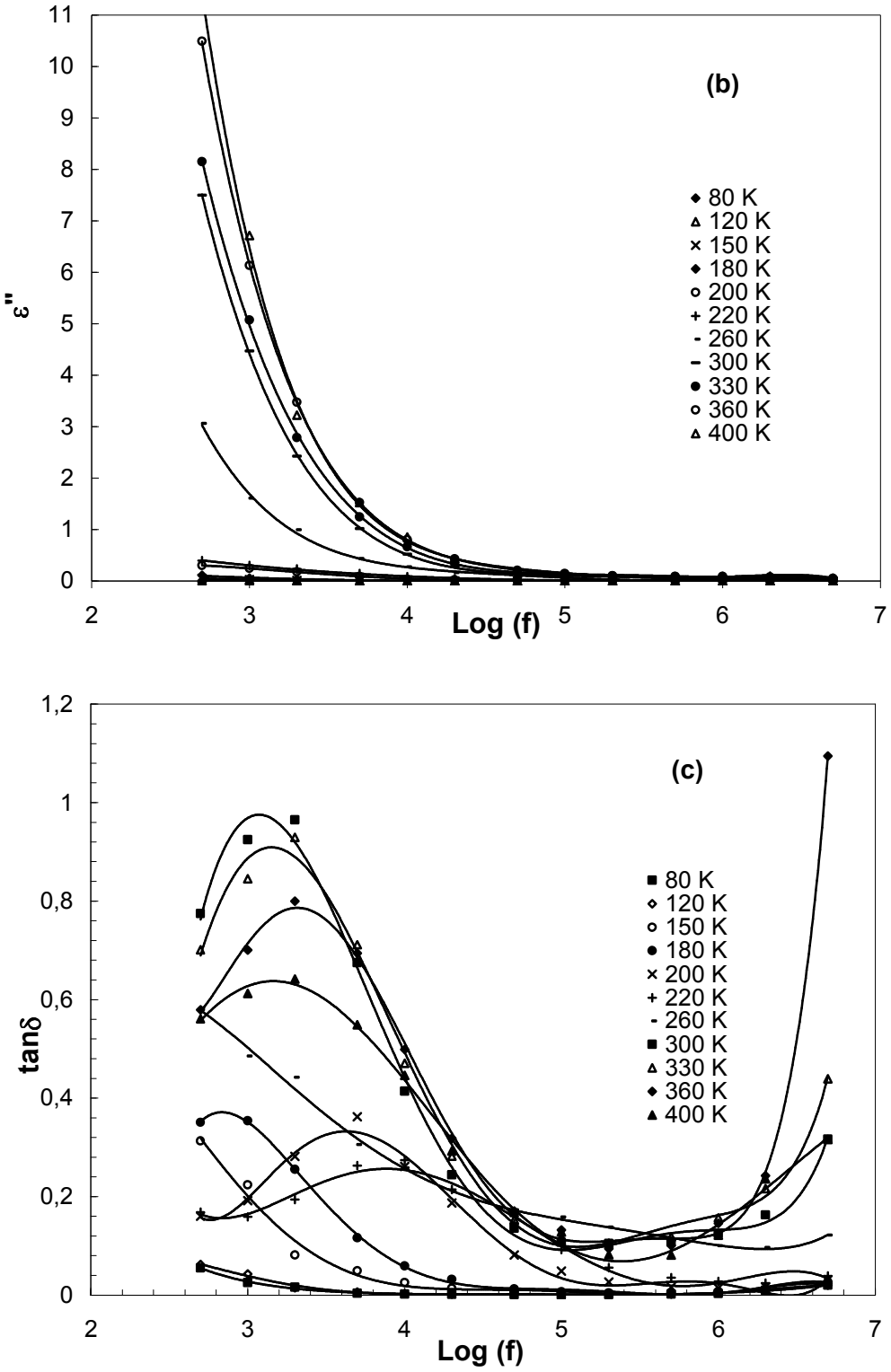
$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{4.20}$$

deneysel sonuçlar göstermektedir ki, ölçülen C ve G değerleri artan frekansla azalmakta ve dolayısıyla dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') değerleri de artan frekansla azalmaktadır (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).

Düşük frekans bölgesine doğru bu değerlerde meydana gelen artışlar, düşük frekansta etkili olabilecek arayüzey kutuplanma mekanizmasının varlığına atfedilebilir. MFIS yapı için farklı sıcaklıklar için, hesaplanan dielektrik sabiti (ε') dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp açının (tanδ) frekansa bağlılığı sırasıyla Şekil 4.15 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si yapının farklı sıcaklıklar için; (a) dielektrik sabiti (ε'), (b) dielektrik kayıp (ε'') ve (c) kayıp açı (tanδ)'nın frekansa bağlı eğrileri



Şekil 4.15. (Devam) $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ yapının farklı sıcaklıklar için; (a) dielektrik sabiti (ε'), (b) dielektrik kayıp (ε") ve (c) kayıp açı (tanδ)'nın frekansa bağlı eğrileri

Açıkça görülmektedir ki; dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') yüksek frekanslarda (f≥200 kHz) voltajdan bağımsızdırlar. Yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumları N_{ss} ac sinyali izleyemez ve herhangi bir arayüzeysel kutuplaştırma mekanizmasının olmaması nedeniyle de; C, ε' ve ε'' ye ilave bir katkıda olamaz. Genel olarak, MIS ve MOS yapılarının düşük frekanstaki yalıtkan davranışına dört olası mekanizma katkıda bulunabilir; elektrotların arayüzeyi, dc iletkenlik, dipol yönelimi ve yük taşıyıcıları [93].

Şekil 4.15 (c)'de gösterildiği gibi, kayıp açı (tanδ), artan frekans ile artmakta ve daha sonra artan frekans ile azalarak bir pik vermektedir. Ancak bu pik düşük doğru beslemde kaybolmaktadır. Bu pik davranışı, bu frekans ve uygulanan voltaj aralığı için ε'=ε'' olmasından kaynaklanmaktadır.

Deneysel sonuçlar, ε', ε'', tanδ'nın frekans ve uygulanan voltaja bağlı olduklarını göstermektedir. Frekans ile dielektrik sabiti ve dielektrik kaybının değişimi düşük sıcaklıklarda ve yüksek frekanslarda küçüktür. Eğer bir elektrik alan yoksa, farklı konumlanmalarda veya durumlarda sınırlandırmış taşıyıcı yükler farklı dipol yönelimleri gösterebilir. Bir elektron ac alanın etkisi altında iki merkez arasında atlama yapabilir ve bu durum elektrik dipolunun yeniden yönelimine yol açar. Bu işlem dielektrik sabitinin değişmesine sebep olur. Bu sebeple azalan frekans ile dielektrik sabitinin artması dipollerin etkisine atfedilebilir. Yığılma bölgesinde dc gerilim için empedans ölçümleri dielektrik sabiti ve dielektrik kaybı frekansın bir fonksiyonu olarak belirlememizi sağlamaktadır.

Güçlü tüketim bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletim değerleri kullanılarak elde edilen ε', ε'' ve tanδ, sıcaklık ve frekansa dikkate değer şekilde bağlıdır. Bütün sıcaklık değerleri için ε' ve ε''azalan frekansla artmaktadır. Yeteri kadar yüksek frekansta (f ≥ 1 MHz), arayüzey durumların (N_{ss}) ac sinyalini takip edememesine bağlı olarak, özellikle yüksek frekanslarda ε' değeri, ε'' değerine yakındır. Bu davranış, 10 kHz frekansın altında daha çok gözlenmektedir.

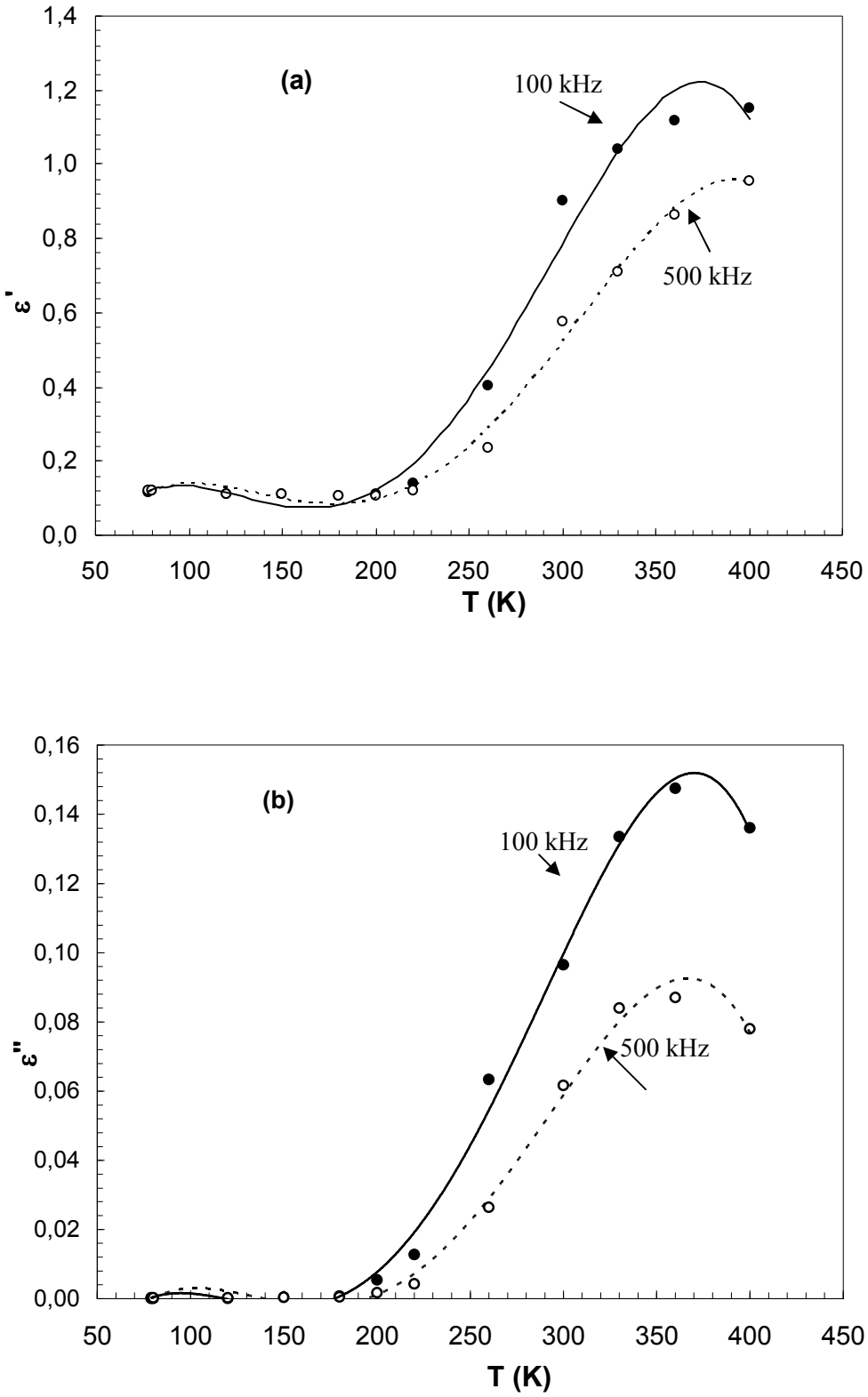
Azalan frekansla, ε' ve ε'' değerlerinde gözlenen artış, özellikle düşük frekanslarda güçlü arayüzey polarizasyonu olduğunu göstermektedir çünkü; yalıtkan tabaka ve yarıiletken arasında birtakım yüzey durumlarından dolayı daha düşük frekansta arayüzey polarizasyonu çok daha kolay gözlenir. Bu durum MFIS yapının dielektrik özelliklerinin ortaya konulmasına yardımcı olur. ε' için güçlü düşük frekans dağılımında bir kayıp olmaması ve ε'' değerinde kayıp piki gözlenmemesi, yük taşıyıcı sisteminin bir karakteristiği olarak kabul edilebilir.

4.3.2. Dielektrik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimi

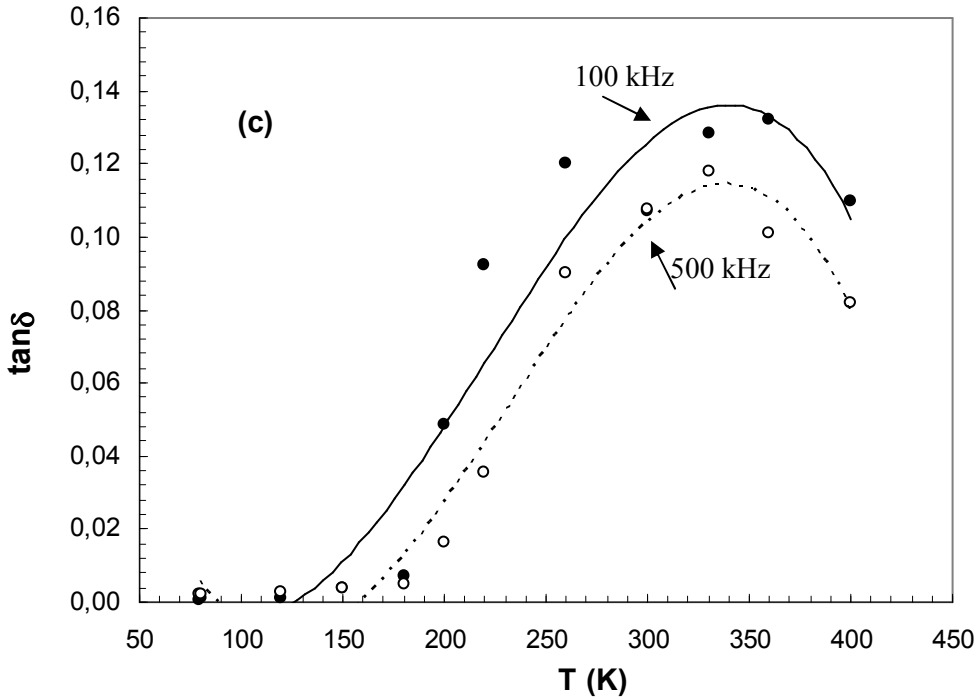
İki farklı frekansta Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/Si (MFIS) yapının sıcaklığa bağlı ε', ε'' ve tanδ değerleri Eş. 4.15, Eş. 4.18 ve Eş. 4.20 kullanılarak hesaplandı ve sırasıyla Şekil 4.16 (a), (b) ve (c)'de gösterildi. Güçlü yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletim değerlerinden, ε', ε'' and tanδ parametreleri hesaplanmış ve önemli ölçüde sıcaklığa bağlılı oldukları ancak düşük sıcaklık değerlerinde bağlılığın azaldığı tespit edilmiştir.

Prensipte düşük frekans ve sıcaklıklarda elektronik, iyonik, dipolar ve arayüzey veya yüzey polarizasyonu olmak üzere dört tip polarizasyon oluşumu gözlenir ve ε', ε'' değerlerine katkıda bulunur. İki farklı frekans için ε', ε'' and tanδ değerleri hesaplandıktan sonra elde edilen grafikler, ε', ε'' ve tanδ değerlerinin artan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Ölçüm frekansı arttırıldığı taktirde grafiklerde gözlenen maksimum değer, yüksek sıcaklık değerine doğru yönelmektedir

Sırasıyla Şekil 4.16 (a), (b), (c)'den görüldüğü gibi, ε', ε'' ve tanδ artan sıcaklık ile artmaktadır. Sıcaklık arttıkça, örgüde kusurlar/düzensizlikler oluşur ve çoğunluk yük taşıyıcılarının (iyonlar ve elektronlar) hareketliliği (mobilitesi) artar [93]. Bileşik etki, sıcaklıkta bir artış ile ε', ε'' ve tanδ değerlerinde bir artış vermektir. Bu hem iyon sıçraması, hem yönelim ve yük taşıyıcılarının konstrasyonlarının artmasından meydana gelen uzay yük etkisi nedeniyle olabilir. Ayrıca, sıcaklıktaki artma, elektronik polarizasyonda bir artışa sebep olur.



Şekil 4.16. $Au/Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2/n\text{-}Si$ (MFIS) yapının 100 kHZ ve 500 kHz için (a) ε', (b) ε" ve (c) tanδ parametrelerinin sıcaklığa bağlı grafiği



Şekil 4.16. (Devam)Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si (MFIS) yapının 100 kHZ ve 500 kHz için (a) ε', (b) ε" ve (c) tanδ parametrelerinin sıcaklığa bağlı grafiği

Polarizasyonda gözlenen artışın etkisiyle dielektrik malzemenin ε' ve ε" değerleri de artar. Yani dielektrik malzemenin ε' ve ε" değerlerinde gözlenen artış, moleküllerin sıcaklıkla genişlemesinden kaynaklanır [94-95]. Katı yapıda bir çözülmeye neden olan sıcaklıktaki artış oranı, dipol yöneliminde bir artış ve dolayısıyla da ε', ε" ve tanδ'da bir artış ile sonuçlanır. Bu sonuçlar, MFIS yapının, oda sıcaklığından daha düşük olan sıcaklıklarda, daha iyi dielektrik özelliklere sahip olduğunu gösterir.

Sıcaklık ile beraber ε', ε" ve tanδ'nin değişimi iyonik katılarda genel bir eğilimdir. Bu ise materyallerde safsızlık yada çatlaklar sebep olan uzay yükü polarizasyonu nedeniyle olabilir. Buna ilaveten, yasak enerji aralığı dar olan yarıiletkenlerde, yük taşıyıcıları hareketsiz olup, ancak polarizasyon nedeniyle tuzaklanabilir. Sıcaklık artarsa, yük taşıyıcılarının sayısı üstel olarak artar ve bunun sonucunda daha fazla uzay yükü polarizasyonu meydana gelir ve bu da dielektrik sabiti ε''inde hızlı bir artışa sebep olur. Şüphesiz, hem n hem de p tipi yük taşıyıcıları sayısındaki artış, ε' ve ε" değerlerine katkıda bulunur [93].

5. SONUÇ

Metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) veya daha kalın yalıtkan tabakaya sahip olan metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıların elektriksel ve dielektrik özelliklerinin geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında incelenmesi bize bu yapıların iletim mekanizmaları ve fiziksel davranışları hakkında çok önemli bilgiler verir. Son yıllarda, metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) yapılarla ilgili literatürde bir çok deneysel sonuç bulunmaktadır. Ancak bu yapılar üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, metal ile yarıiletken arasında büyütülen yalıtkan tabaka kalınlığı, yapının seri direnci ve arayüzey durumların, C-V ve G/ω-V üzerine etkileri halen tam açıklığa kavuşturulmamıştır. Özellikle yalıtkan tabakanın homojensizliği, metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engelin oluşumu ve arayüzey durumların iletim mekanizmaları hakkında çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle, X-ışınları analiz yöntemiyle $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO) ince filminin yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. BTO filmlerin X-ışınları kırınım desenlerinde gözlenen kırınım pikleri yapının göstergesidir. Yapı iyi kristalize edilmiştir ve elde edilen desenler literatürle uyum içindedir. BTO filminin yüzey morfolojisini belirlemek amacıyla AFM yöntemi kullanılmış ve yüzey morfolojisine ait görüntü elde edilmiştir. Numune yüzeyi oldukça düzgün ve yoğun bir görünüm vermektedir. Dikkate değer bir kusur ve çatlak gözükmemektedir. Yapının farklı frekans ve sıcaklıklardaki histeriz eğrisi elde edilmiş ve ferroelektrik özellik gösterdiği belirlenmiştir.

Oluşturulan Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) yapının elektriksel ve dielektrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, frekans ve sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) karakteristikleri 1 kHz–5 MHz frekans ve 80-400 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Ölçümler, MFIS yapının elektriksel ve dielektrik özelliklerinin voltaja bağlı dağılım profillerini verecek şekilde geniş bir voltaj aralığında gerçekleştirilmiştir. Doğru ve güvenilir sonuçlardan elde edilen frekans ve sıcaklığa bağlı dielektrik özellikler oldukça önemlidir.

MFIS yapılarda seri direnç etkisini kaldırmak için farklı metodlar öne sürülmüştür. Hesaplamalarımızda kullandığımız yöntem, Nicollian ve Goetzberger metodudur. Bu metoda göre MFIS yapıların gerçek seri direnci, yüksek frekanslardaki ($f \geq 1$ MHz) güçlü yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans (C_{ma}) ve iletimden (G_{ma}) elde edilebilir.

Yüksek frekansta (1 MHz), ters ve doğru beslem altında ölçülen kapasitans (C_m) ve iletime (G_m/ω) seri direnç etkisinden dolayı, düzeltme faktörü uygulanarak, MFIS yapı için gerçek kapasitans C_c ve iletim değerleri G_c/ω, belirlenmiştir. Düzeltilmiş kapasitans-voltaj eğrileri doğru beslem altında artan voltajla artarken, düzeltilmiş iletkenlik-voltaj eğrileri ise azalmakta ve pik vermektedir.

MIS/MFIS yapılar üzerine gerçekleştirilen araştırmalarda seri direnç varlığında, C-V eğrilerinde pik gözlendiği, Chattopadhyay ve Raychaudhuri tarafından ortaya konmuştur. C'nin pik değeri ve pozisyonu, moleküler yapılanma, arayüzey durum yoğunluğu N_{ss}, katkı atomlarının sayısı, yapının seri direnci, arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı gibi parametrelere bağlıdır.

Yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde arayüzey durum yoğunluğu sayısı MFIS yapının dielektrik özelliklerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Dielektriksel özelliklerin değişimi özellikle sıcaklık, frekans, arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı ve yüzey durum yoğunluğuna bağlıdır. Yalıtkan tabaka arayüzey durumları, sabit yüzey yükleri ve seri direnç dielektrik özelliklerde sapmaya sebep olur. Frekans artarken, arayüzey, dipolar veya iyonik polarizasyondan gelen katkılar arkalarında sadece elektronik kısmı bırakacak şekilde etkilerini yitirirler. Dahası, artan frekansla ε' ve ε'' değerlerindeki azalma; frekans arttırılırken, arayüzey kutupların alternative alan yönünde kendilerini yönlendirmek için daha az süreleri olduğu şeklinde açıklanabilir. Sıcaklık artarken örgüde oluşan kusurlar ve taşıyıcı yüklerin (iyon ve elektronlar) büyük bölümünün mobilitesi, artar. Muhtemelen bu durum yük taşıyıcıların artan yoğunluğu sonucunda, yönelim ve yüzey yüklerinin etkisine bağlıdır. Sıcaklığın

artması elektronik kutuplanmada artışa dolayısıyla dielektrik parametrelerde artışa sebep olur.

Frekansa bağlı ölçümlerde, C-V ve G/ω-V grafiklerinde gözlenen pikler azalan frekansla yığılma bölgesinden tüketim bölgesine doğru yönelmiştir. Kapasitans ve iletime ait pik değerleri azalan frekansla artmaktadır. Bu pikler azalan frekansla ve artan sıcaklıkla artmaktadır. Pikler ara yüzeylerde ısıl yapılanma ve sıralanmaya bağlı olarak özellikle düşük sıcaklıklarda ve doğru beslem bölgesinde ısıya hassasiyet göstermektedir. *C-V* ve *G/ω-V* karakteristiklerinden gözlenen bu davranış, N_{ss}'in alternatif akım sinyalini izleyebilmesinden kaynaklanır ve N_{ss}'in durulma zamanına bağlı olarak yapı, aşırı bir kapasitans ve iletime sahip olur. MFIS yapının farklı frekanslardaki G/ω-V karakteristikleri Şekil 4.4'ten görüldüğü gibi, C-V eğrilerine benzer biçimde artan voltajla artmakta, ancak artan frekanslarla azalmaktadır. Bu davranışlar düşük ve orta seviye frekanslarda, arayüzey durumlarının gevşeme zamanına ve ac sinyalin frekansına bağlı olarak farklı olabilir. Düşük açısal frekanslarda elde edilen C-V veya G/ω-V ölçümleri için periyot (T) değeri, arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden (τ) büyük olacaktır. Bu nedenle çok küçük frekanslarda (f≤50 Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda (f≥1 MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyali takip edemez.

Yalıtkan tabakanın (SiO_2) kalınlığı d_{ox}, 1 MHz'de (Şekil 4.3 ve 4.11) C-V eğrisinden Eş. 4.15 kullanılarak elde edilmiş ve 41 Å olarak hesaplanmıştır.

R_s-V grafiğinin dağılım profilleri düşük frekanslarda, yığılma bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı pik vermektedir ve artan frekansla bu pik kaybolmaktadır. Pikler azalan frekansla güçlü yığılma bölgesine doğru yönelmektedir ve piklerin genliği artan frekansla azalmaktadır. N_{ss} değerleri hem ters hem doğru belsem altında farklı tüketim bölgesinde anlamlı büyüklüğe sahipken R_s değerleri, yığılma bölgesinde anlamlı değerlere sahiptir. Açıkça R_s değerleri, bölgelerdeki frekans ve voltaj değişimlerine bağlıdır. Seri direnç, hem frekansa hem de voltaja kuvvetlice

bağlıdır ve bölgeden bölgeye değişmektedir. Bu davranışlar, yük tuzaklarının Si yasaklı band aralığındaki metal/yarıiletken arayüzeyinde yerleşmiş arayüzey tuzakların özel bir dağılıma atfedilebilir. Yarıiletken ile dengede olan N_{ss}, ac sinyali düşük frekanslarda daha kolaylıkla takip edebilir ve mevcut kapasitans değerine ilave bir katkı getirebilir. Bu sebeple yüksek frekanslarda R_s etkisi azalır. Düşük frekansların aksine yüksek frekans limitinde ($f \geq 1$ MHz), N_{ss}, ac sinyali takip edemez. Bundan dolayı, arayüzey durumlarının kapasitansının toplam kapasitansa katkısını ihmal edilebilecek derecede küçük kalır.

Voltaja bağlı seri direnç, düşük frekanslarda hemen hemen sabit kalmakla beraber 2 MHz'den sonra artmaktadır. Bu davranış, Si yasak enerji aralığında metal ve yarıiletken arayüzünde bulunan tuzaklardan, kaçmaya yetecek enerjiye sahip tuzaklanmış yüklere bağlanmıştır. Yüksek frekanslarda, arayüzeylerdeki yükler ac sinyalini takip edememektedir. Deneysel sonuçlar N_{ss}'nin artan frekansla azaldığını göstermektedir.

Ters beslem katkı atomları sayısını hesaplamak için $1/C^2$ grafiği çizilmiştir. Seri direnç etkisi burada da görülmektedir.

Seri direnç etkisi C-V grafiğinde düzeltildiğinde, doğru beslem altında düzeltilmiş C_c değerlerinin artan voltajla arttığı gözlenmiştir. Düzeltilmiş G_c/ω grafiğinin arayüzeylerde yük transferi olduğunu gösteren bir pik verdiği görülmüştür.

Sıcaklığa bağlı ölçümlerde kapasitans değerleri azalan sıcaklıkla doğru beslem bölgesine kaymakta ve her sıcaklık değeri için bir pik değeri vermektedir. MFIS yapının C-V ve G/w-V karakteristikleri arayüzeylerde ısıl yapılanma ve sıralanmaya bağlı olarak özellikle düşük sıcaklıklarda ve doğru beslem bölgesinde ısıya hassasiyet göstermektedir. Tüm sıcaklıklar için artan frekans ile kapasitans ve iletkenlik değerleri azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru kapasitans ve iletkenlikte gözlenen artış, düşük frekanslarda etkili olan arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanabilir.

N_{ss} değeri artan sıcaklıkla artmaktadır. N_{ss} ac sinyali izleyebilir ancak, değerindeki azalma süresine bağlı olarak yapı, aşırı bir kapasitans ve iletime sahip olabilir.

MFIS yapıya ait frekans ve sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε"), ve kayıp açı tanjant (tanδ) değerleri araştırılmıştır. Dielektrik ve iletkenlik değerleri düşük frekansa ve yüksek sıcaklığa hassasiyet göstermektedir. Elde edilen sonuçlar bir dielektrik malzemenin normal davranışıdır. Prensipte düşük frekans ve sıcaklıklarda, dört tip (elektronik, iyonik, dipolar ve arayüzey veya yüzey polarizasyonu) polarizasyon oluşumu gözlenmekte olup, hepsi ε' ve ε" değerlerine katkı sağlamaktadır. Grafikler, ε', ε" ve tanδ değerlerinin artan frekansla azaldığını artan sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Arayüzeyledeki polarizasyon düşük sıcaklıklarda daha kolay gözlenmektedir.

Frekansa bağlı grafikte, tanδ azalarak bir pik vermektedir. Ancak bu pik düşük doğru beslemde kaybolmaktadır. Bu pik davranışı, bu frekans ve uygulanan voltaj aralığı için ε'=ε" olmasından kaynaklanmaktadır.

Sonuçlar hem C-V hem de G/ω-V karakteristiklerinin, önemli ölçüde sıcaklık, frekans ve voltaja bağlı olduğunu ve her sıcaklık ve frekans değerinde bir pik gözlendiğini, C-V ve G/ω-V karakteristiklerinden elde edilen arayüzey durumları N_{ss}, seri direnç R_s ve yalıtkan tabaka kalınlığı d_{ox}'in, MFIS yapılarda elektriksel ve dielektrik parametreleri önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Arayüzey durumlardan kaynaklanan bu durumu elimine etmek için, yalıtkan tabaka kalınlığını arttırmak gerekmektedir. Benzer çalışmalar literatürde rapor edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Wu D., Li A., Ming N., "Characteristics of metal-ferroelectric-insulator-semiconductor structure using La-modified $Bi_4Ti_3O_{12}$ as the ferroelectric layer", ***Microelectronic Engineering***, 66: 773-778 (2003).

2. Yang Ch.H., Wang Zh., Xu H.Y., Sun X.Q., Han J.R., "Samarium doped Bi4Ti3O12 thin films grown on SiO_2/p-Si (111) by spin coating metalorganic solution decomposition method", ***Materials Chemistry and Physics***, 88: 67-70 (2004).

3. Joshi P.C., Krupanidh S.B., "Structural and electrical studies on rapid thermally processed ferroelectric $Bi_4Ti_3O_{12}$ thin films by metalloorganic solution deposition", ***Journal of Applied Physics***, 72(12): 5817-5819 (1992).

4. Park C.H., Won M.S., Oh Y.H., Son Y.G., "An xps study and electrical properties of $Pb_{1.1}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O_3$/PbO/Si (MFIS) structures according to the substrate temperature of the PbO buffer layer", ***Appl. Surface Science***, 252: 1988-1997 (2005).

5. Kamiya H., "Operation characteristics of integrated FET type ferroelectric memory with an intermediate electrode on an Si substrate", Master's Thesis, ***Japan Advanced Institute of Sci.and Tech.***, Hokuriku, 1-5 (2006).

6. Fujimori Y., Nakamura T., Kamisawa A., "Properties of ferroelectric memory FET using $Sr_2(Ta, Nb)_2O_7$ thin film", ***Jpn. J. Appl. Phys***, 38: 2285-2288 (1999).

7. Tokomitsu E., Fujii G., Ishivara H., "Nonvolatile ferroelectric-gate field-effect transistors using $SrBi_2Ta_2O_9$/Pt/$SrTa_2O_6$/SiON/Si structures", ***Applied Physics Letter*****,** 75(4): 575-577 (1999).

8. Fujisaki Y., Iseki K., Ishiwara H., "Long retention performance of a MFIS device achieved by introducing high-k Al_2O_3/Si_3N_4/Si buffer layer", ***Material Research Society Symposium Proceedings***, 786: 297 (2004).

9. Fitsilis M., "Scaling of the Ferroelectric Field Effect Transistor and Programming Concepts for Non-volatile Memory Applications" Master's Thesis, ***Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik,*** Deutsche, 1-14 (2005).

10. Brown G.W., Hawley M.E., Theis C.D., YEH J., Schlom D.G., "Atomic force microscopy examination of the surface morphology of $Bi_4Ti_3O_{12}$ grown by molecular beam epitaxy", ***Journal of Electroceramics***, 4(2/3): 351-356 (2000).

11. Macedo Z.S., Lente M.H., Eiras J.A., Hernandes A.C., "Dielectric and ferroelectric properties of $Bi_4Ti_3O_{12}$ ceramics produced by a laser sintering merhod", ***J.Phys: Condens. Matter***, 16: 2811-2818 (2004).

12. Parlaktürk F., Altındal Ş., Tataroğlu A., Parlak M., Agasiev A., " On the profile of frequency dependent series resistance and surface states in Au/ $Bi_4Ti_3O_{12}/SiO_2$/n-Si (MFIS) structures", ***Microelectronic Engineering, In Press, Corrected Proof,*** (2007).

13. Bae J.C., Kim S.S., Kim W.J., Choi E.K., Son T.K., " Ferroelectric lanthanum-substituted $Bi_4Ti_3O_{12}$ thin films fabricated on p-type Si(100) substrates by a sol-gel method", ***Thin Solid Films***, 468: 23-27 (2004).

14. Harman T.V., "Ferroelectric thin film development", Master's Thesis, ***Oregon State University Electrical Engineering & Computer Science,*** U.S.A., 4-23, 40-72 (2003).

15. Tataroğlu B., Altındal Ş., Tataroğlu A., "The C-V-f and G/w-V-f characteristics of Al/SiO_2/p-Si (MIS) structures", ***Microelectronic Engineering***, 83 (3): 582-588 (2006).

16. Xiong S.B., Sakai S., "Memory properties of $SrBi_2Ta_2O_9$ thin films prepared on SiO_2/Si substrates", ***Appl. Phys. Lett.***, 75: 1613-1615 (1999).

17. Bülbül M.M., Zeyrek S., Altındal Ş., Yüzer H., "On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si_3N_4/p-Si (MIS) Schottky diodes", ***Microelectron. Eng.***, 83(3): 577-581 (2002).

18. Nicollian E.H., Brews J.R., "Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology" 1st ed., ***John Wiley & Sons***, New York, 423–491 (1982).

19. Chattopadhyay P., Raychaudhuri B., "New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diyotes", ***Solid-State Electron.*** 35: 1023-1024 (1992).

20. Cheung S.K., Cheung N.W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", ***Apply. Phys. Lett.,*** 49(2): 85-87 (1986).

21. Lea K.C., Kima W.S., Parka H., Jeonb H., Pae Y.H., "Thermal-stress stability of yttrium oxide as a buffer layer of metal-ferroelectric-insulator-semiconductor field effect transistor", ***Thin Solid Films***, 473: 335– 339 (2005).

22. Altındal, Ş., " Al - SiO_x - pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri.", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 52-74 (1993).

23. Leea J.M., Kim K.T., Kim C.I., "Structural and electrical properties of metal-ferroelectric-insulator-semiconductor field-effect transistors using a Pt/$Bi_{3.25}La_{0.75}$ Ti_3O_{12}/CeO_2/Si structure", ***Thin Solid Films,*** 447–448: 322–326 (2004).

24. Coleman Hill W. A, Coleman C.C., "A single-frequency approximation for interface-state density determination", ***Solid State Electronics***, 23: 987-993 (1980).

25. Durlu T**.,** "Katıhal Fiziğine Giriş", 2nd ed., ***Ankara Üniversitesi Yayınları***, 2 (1992).

26. Lain X.C., "Study of ferroelectric device integration", Master's Thesis, ***National Sun Yat-Sen University Department of Physics,*** China, 5-9, 20-23 (2002).

27. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K., "Measurement and Materials Characterization", 1st ed., ***Microwave Electronics, Jhon Willey & Sons,*** 19 (2004).

28. Tarui Y., Hirai I.T., Teramoto K., Koike H, Nagashima K., "Application of the ferroelectric materials to ULSI memories", ***Applied Surface Science,*** 113/l 14: 656-663 (1997).

29. Moll J.L., Tarui Y., "A new solid state memory resistor", ***IEEE Trans. Electron Devices,*** ED-10, 338-341 (1963).

30. Sugibuchi K., Kurogi Y.,. Endo N, "Ferroelectric field effect memory device using $Bi_4Ti_3O_{12}$ film", ***J. Appl. Phys.,*** 46: 2877–2881 (1975).

31. Kato Y., Kaneko Y., Tanaka H., Kaibara K., Koyama S., Isogai K., Yamada T., Shimada Y., "Overview and Future Challenge of Ferroelectric Random Access Memory Technologies", ***Japanese Journal of Applied Physics***, 46 (4B): 2157-2163 (2007).

32. Li W.P.,. Liu Y.M,.Zhang R, Chen J., Cheng P.,. Yuan X.L, Zhou Y.G., Shen B., Jiang R.L., Shi Y., Liu Z.G., Zheng Y.D., "Improvement of metal-ferroelectric-silicon structures without buffer layers between Si and ferroelectric films", ***Appl. Phys.,*** 72 (A): 85-87 (2001).

33. Pandey S.K., James A.R., Raman R., Chatterjee S.N., Goyal A., Prakash C., Goel T.C., "Structural, ferroelectric and optical properties of PZT thin films", ***Physica B***, 369: 135-142 (2005).

34. Kanbur H., Altındal Ş., Tataroğlu A., The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO2/p-Si Schottky diodes" ***Appl. Surf. Sci.,*** 252: 1732-1738 (2005).

35. Hahn B.R., Yoon D.Y., "Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide-Silicon Structure", ***Journal Of Applied Physics***, 65(7): 2766-2771 (1989).

36. Sharma B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications", 1st ed., ***Plenum Press***, New York, 113-118 (1984).

37. Terman L. M., "An investigation of surface states at a silicon-silicon dioxide interface employing metal-oxide-silicon diodes", ***Solid-State Electronics***, 5(5): 259-285 (1962).

38. Grove A. S., Deal, B. E., Snow, E. H., Sah, C. T., "Investigation of thermally oxidized silicon surfaces metal-oxide-semiconductor structures", ***Solid-State Electronics***, 8(2): 145-163 (1965).

39. Neamen D. A., "Semiconductor Physics and Devices" 2nd ed.", ***Mc Graw-Hill***, New York, 420-450: 517-523 (1997).

40. Sze S. M., "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed., ***John Wiley & Sons***, New York, 362-390 (1981).

41. Cooke M. J., "Semiconductor Devices", ***Prentice Hall***, New York, 294-308 (1990).

42. Grove A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", ***John Wiley & Sons***, New York, 91-106: 334-357 (1967).

43. Symth C. P. "Dielectric behaviour and structure", 1st ed., ***McGraw-Hill***, New York, 191-201 (1955).

44. Ghandhi S. K., "VLSI Fabrication Principles", 1st ed., ***John Wiley & Sons***, New York, 401-405 (1983).

45. Lee H.N., Lim M., Kim Y.T., Kalkur T.S., Choh S.H., "Characteristics of Metal/Ferroelectric/Insulator/Semiconductor Field Effect Transistors using a $Pt/SrBi_2Ta_2O_9/Y_2O_3/Si$ Structure," ***Japanese Journal of Applied Physics***, 1(37):1107-1109 (1998).

46. Huang C. H., Tseng T. Y., Chien C. H., Yang M. J., Leu C. C., Chang T. C., Liu P. T., Huang T. Y., "Electrical properties of metal-ferroelectric-insulator-semiconductor using sol-gel derived $SrBi_2Ta_2O_9$ film and ultra-thin Si_3N_4 buffer layer", ***Thin Solid Film,*** 420-421: 377 (2002).

47. Choi K. J., Shin W. C., Yang J. H., Yoon S.G., "Metal/ferroelec-. tric/insulator/semiconductor structure of Pt ", ***Appl. Phys. Lett.***, 75: 722 (1999).

48. Huang C.H., Wang Y.K., Lue H.T., Huang J.Y., Lee M.Z., Tseng T.Y., "Memory properties of metal/ferroelectric/insulator/semiconductor structures using rf sputtered ferroelectric $Sr_{0.8}Bi_{2.5}Ta_{1.2}Nb_{0.8}O_9$ thin films", ***J. Euro. Ceram. Soc.***, 24 (8): 2471-2476 (2004).

49. Kim K., Kim C., "Characterization of ferroelectric $Bi_{3.25}La_{0.75}Ti_3O_{12}$ thin films prepared by metal organic decomposition method", ***Thin Solid Films***, 478: 6-12 (2005).

50. Shao T., Ren T., Wei C., Wang X., Li C., Liu J., Liu L., Zhu J., Li Z., "High Quality Silicon-Based PLZT Thin Films for Ferroelectric Memory Applications", ***Integrated Ferroelectrics,*** 57: 1241 (2003).

51. Kumari N., Parui J., Varma K.B.R., Krupandhi S.B." *C–V* studies on metal–ferroelectric bismuth vanadate ($Bi_2VO_{5.5}$)–semiconductor structure", ***Solid State Com.,*** 137: 566-569 (2006).

52. Pontes F.M., Leite E.R., Lee J.H., Longo E., Varela J.A., "Dielectric properties and microstructure of $SrTiO_3/BaTiO_3$ multilayer thin films prepared by a chemical route", ***Thin Solid Films,*** 385: 260-265 (2001).

53. Olsen C. L., "Model calculations for metal-insulator-semiconductor solar cells", ***Solid State Electronics***, 20(9): 741-751 (1977).

54. Cheung S.K., Cheung N.W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", ***Apply. Phys. Lett.,*** 49(2): 85-87 (1986).

55. Vogel E.M., Ahmed K.Z., Hornung B.,. Henson W.K, McLarty P.K., Lucovsky G., Hauser J.R., Wortman J.J., "Modeled tunnel currents for high dielectric constant dielectrics", ***IEEE Trans. Electron Devices*** 45(6): 1350-1355 (1998).

56. Park B. H., Kang B.S., Bu S.D., Noh T.W., Lee J., Jo W., " Imprint failures and asymmetric electrical properties induced by thermal processes in epitaxial Bi4Ti3O12 thin films", ***Journal Of Applied Physics***, 84(8): 4428-4435 (1999).

57. Göver K., "Bazı endüstriyel malzemelerin mikrodalga dielektrik sabitinin ölçülmesi" Y.L.Tezi, ***Uludağ Üni. F.B. Elektr. Müh.,*** Bursa, 2-20 (1996).

58. Yücedağ İ., "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Ü. Endüstriyel Teknoloji Eğitimi***, Ankara, 29-52 (2007).

59. İnal M., Aras F., "Yalıtkan malzemelerin dielektrik özelliklerinin yapay sinir ağlarıyla belirlenmesi", ***G.Ü. M. Mim. Fak. Dergisi,*** 20(4): 455-462 (2005).

60. Solymar L. and Walsh D. "*Electrical Propertiesof Materials*", ***Oxford Science Publications***, 6th Edition, 53-59 (1999).

61. Tuncer, E., Gubanski, S.M. "On dielectric data analysis using the Monte Carlo method to obtain relaxation time distribution and comparing non-linear spectral function fits" ***IEEE Conference On Dielectric and Related Phenomena***. 8 (3): 310-320 (2001).

62. Nguyen, D.H.; Sylvestre, A.; Gonon, P.; Rowe, S "Dielectric Properties Analysis of Silicone Rubber", ***Solid Dielectrics***, 1:103–106 (2004).

63. Yılmaz G. Kalanderli Ö. "Dielectric Properties of Aged Polyester Films" ***IEEE Conference On Electrical Insulation and Dielectric Phenomena***, Minneapolis, 19-22 (1997).

64. Morgan V.T. "Effects of Frequency, Temperature, Compression and Air Pressure on The Dielectric Properties of Multilayer Stack of Dry Kraft Paper" ***IEE Trans. Dielectric Elect. Ins.***, 5 (1): 125-131 (1998).

65. Zong L., Kempel L.C., Hawley M.C.,"Dielectric Properties of Polymer Materials at a High Microwave Frequency Microwave Processing", ***Antennas and Propagation Society Symposium,*** 1: 333–336 (2004).

66. Pfeiffer W., "Dielectric Testing of Solid Insulation with Respect to Insulation Coordination of Low-Voltage Equipment", ***IEEE Electrical Insulation Magazine***, 17 (3): 34–47 (2001).

67. McCulloch W.S., Pitts W., "A Logical Calculus of The Ideas Immanent in Nervous Activity", ***Bull. Math. Biophys,*** 5: 115-133 (1943).

68. Tareev B., "Physics of Dielectric Materials", 2nd ed., ***Mir Publishers***, Moscow, 67-95, 140-156 (1979).

69. Fröhlich H., "Theory of Dielectrics", 2nd ed., ***Clarendon Press***, Oxford, 1-21, 70-78 (1958).

70. Von Hippel A. R., "Dielectrics and Waves", ***John Wiley & Sons***, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234 (1959).

71. Popescu M., Bunget I., "Physics of Solid Dielectrics", ***Elsevier***, Amsterdam, 206-245, 282-291 (1984).

72. Oral M., "Elektrostatik", ***Ege Üniversitesi Matbaası***, İzmir, 221-252 (1983).

73. Okuyama M., "Ferroelectric thin films: Basic properties and device physics for memory applications", ***Springer-Verlag,*** New York, 98 (2005).

74. Konofaos N., McClean J.P. and Thomas C.B., Characterization of the interface states between amorphous diamond like carbon films (100) Silicon, ***Phys. Solid State Statius***, A: 161, 111-123 (1997).

75. Koşal M., Bozdemir S., "MOS yapısında SiO_2'nin kompleks dielektrik sabitinin frekansa bağlı değişiminin C-V ölçüm yöntemiyle belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Fizik,*** Adana, 2-7 (2005).

76. Wert C.A., Thomson R.M., "Physics of Solids 2nd ed.", ***McGraw-Hill***, New York, 410-421, 388-403 (1970).

77. İyibakanlar G., Oktay A., "Bazı polimerlerin dielektrik özelliklerinin frekansla değişimlerinin incelenmesi", ***Havacılık ve Uzay Tekno. Der.,*** 3 (1): 11-19 (2007).

78. Yamaguchi M., Hiraki K., Homma T., Nagatomo T., Masuda Y., "Fabrication and properties of Bi_2SiO_5 thin films for MFIS structures", ***Applications of Ferroelectrics,*** 2: 629 - 632 (2000).

79. Berger L. I., "Semiconductor Materials", 1st ed., ***CRC Press***, New York, 145-152 (1997).

80. Symth C. P., "Dielectric Behaviour and Structure", ***McGraw-Hill***, New York, 52-61, 202-215 (1955).

81. Daniel V.,"Dielectric Relaxation", 1st ed., ***Academic Press***, London, 1-19, 79-87 (1967).

82. Chelkowski, A., "Dielectric Physics", ***Elsevier***, Amsterdam, 97-105 (1980).

83. Uren M.J., Helms C.R., "Observation of "1/f-Noise states " in Conductance Measurements on MOS Structure", ***The Physics and Chemistry of SiO_2 and The Si-SiO_2 Interface***, ***Plenum Press***, 335-340 (1978).

84. Zhang X.J., Zhang S.T., Chen Y.F., Liu Z.G.,. Ming N.B, "Completely (001)-textured growth and electrical properties of $Bi_4Ti_3O_{12}/LaNiO_3$ heterostructures prepared by pulsed laser deposition on $LaAlO_3$ single crystal substrates**",** ***Microelect. Eng.*** 66(1): 719-725 (2003).

85. Norde H., A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance", ***Journal of Applied Physics***, 50(7): 5052-5053 (1979).

86. Kwa K.S.K, Chattopadhyay S., Jankovic N.D., Olsen S.H., Driscoll L.S., O'Niell A.G., **"**Thermal oxidation of strained Si/SiGe: impact of surface morphology and effect on MOS devices" ***Materials Science and Engineering***, 109(1-3): 78-84 (2004).

87. Depas M., Van Meirhaeghe R.L., Laflere W.H., Cardon F., "Electrical characteristics of Al/SiO_2/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation", ***Solid-State Electron.,*** 37: 433-441 (1994).

88. Konofaos N., McClean I.P., Thomas C.B., "Characterisation of the Interface States between Amorphous Diamond-Like Carbon Films and (100) Silicon" ***Phys. Stat. Sol***.(a) 161: 111-123 (1997).

89. Kar S., Dahlke W. E., "Interface states in MOS structures with 20-40 Åthick SiO_2 films on nondegenerate Si", ***Solid-State Electronics***, 15: 221-237 (1972).

90. Akkal B, Benamara Z, Gruzza B, Bideux L., "Characterization of interface states at Au/InSb/InP(100) Schottky barrier diodes as a function of frequency"**,** ***Vacuum,*** 57(2): 219-228 (2000).

91. Lam Y.W, Lam H.C., "Dielectric and interface-state measurements of metal-spin-on-oxide-silicon capacitors", ***J. Phys. D: Appl. Phys.*** 9: 1477-1487 (1976).

92. Chelkowski A., Dielectric Physics, ***Elsevier***, Amsterdam, 313 (1980).

93. Fanggao C., Saunders G. A., "Temperature and frequency dependencies of the complex dielectric constant of poly under hydrostatic pressure", ***J. Polymer Sc. Part B: Polymer Phys.***, 34: 425-433 (1996).

94. Sharma, B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications", 1st ed., ***Plenum Press***, New York, 113-118 (1984).

95. Schulz M., Klausmann E., Transient capacitance measurements of interface states on the intentionally contaminated $Si-SiO_2$ interface interface ***Applied Pyssics A:Materials Science & Processing***, 18(2): 169-175 (1979).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: PARLAKTÜRK, Funda
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 06.05.1972 Bursa
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (312) 295 88 51
Faks	: 0 (312) 287 87 61
e-mail	: funda.parlakturk@taek.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gebze Yük.Tek.Ens. /Fizik Bölümü	2001
Lisans	O.D.T.Ü./ Fizik Bölümü	1993
Lise	Cumhuriyet Lisesi	1988

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-2007	Türkiye Atom Enerjisi Kurumu	Fizikçi
2000-2001	ODTÜ B.İ.D.B	Programcı
1997-1999	TÜBİTAK U.M.E.	Araştırıcı
1995-1997	Bartın Anadolu Lisesi	Öğretmen
1994-1995	Gediz Anadolu Tic.Mes.Lisesi	Öğretmen
1993-1994	Mat Fen Dershanesi	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Parlaktürk F., Altındal Ş., Tataroğlu A., Parlak M., Agasiev A., "On the profile of frequency dependent series resistance and surface states in Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/n-Si(MFIS) structures", Microelectronic Engineering, Baskıda, (2007).

2. Parlaktürk F., Altındal Ş., Parlak M., Agasiev A., "Temperature-dependent electrical characteristics of Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/Si (MFIS) structures", 13. Yoğun Madde Fiziği – Ankara Toplantısı, 35, (2006).

3. Parlaktürk F., Altındal Ş., Parlak M., Agasiev A., "Temperature and frequency dependent dielectric properties of Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/Si (MFIS) structures",13. Yoğun Madde Fiziği – Ankara Toplantısı, 36, (2006).

4. Altındal Ş., Parlaktürk F., Agasiev A., Parlak M., "On the profile of frequency-dependent series resistance in Au/$Bi_4Ti_3O_{12}$/SiO_2/Si (MFIS) structures",13. Yoğun Madde Fiziği – Ankara Toplantısı, 37,(2006).

5. Turhan Ş., Zengin T., Ocak S., Ünal S., Parlaktürk F., Tuğluoğlu N., Karadeniz S., Erçin D., "Study of Plasma - Based Stack Gases Cleaning Technology to Remove SO_x and NO_x emission from Coal-fired Power Plants in Turkey", Nuclear Science and Its Application, 3:190-200, (2002).

6. Karaböce B., Sadıkhov E., Bilgiç E., Parlaktürk F., "Yapay Kulak Kalibrasyonu", 4.Ulusal Akustik Kongresi Bildiriler Kitabı, 259-266, (1998).

7. Parlaktürk F., Parlaktürk H., "Metroloji'nin Türkiye'deki Yeri, Önemi ve Geleceği" (Yeni Türkiye 21. Yüzyıl Özel Sayısı II, 1518-1521, (1998).

8. Bilgiç E., Parlaktürk F., Sadıkhov E., "Ulusal Ultrasonik Ölçeğinin Oluşturulması", 3. Ulusal Akustik Kongresi, Bildiriler, 56-64, (1997).

9. Sadıkhov E., Parlaktürk F., Bilgiç E., "IEC 651 ve 804 Standartlarına Göre Ses Düzeyi Ölçer Kalibrasyonu", 3. Ulusal Akustik Kongresi, Bildiriler, 65-70, (1997).

Hobiler

Dağcılık ve kayak sporları, belgeseller