

**Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) YAPILARIN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI
İNCELENMESİ**

Muharrem GÖKÇEN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2008
ANKARA**

Muharrem GÖKÇEN tarafından hazırlanan Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) Yapıların Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Tülay SERİN	
Fizik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi	
Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL	
Fizik, Gazi Üniversitesi	
Prof. Dr. Bahtiyar SALAMOV	
Fizik, Gazi Üniversitesi	
Doç. Dr. Mahir BÜLBÜL	
Fizik, Gazi Üniversitesi	
Doç. Dr. İlbilge DÖKME	
Fizik Eğitimi, Ahi Evran Üniversitesi	

Tarih: 28/11/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL	
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü	

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.

Muharrem GÖKÇEN

**Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) YAPILARIN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Muharrem GÖKÇEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2008**

ÖZET

Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) yapıların; seri direnç (R_s), arayüzey durumları (N_{ss}) ve ac elektrik iletkenlik (σ_{ac}) gibi elektriksel karakteristikleri ile dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$), reel ve imajiner elektrik modülü (M' and M'') gibi dielektrik özelliklerinin frekans, sıcaklık ve oksit tabaka kalınlığına bağımlılığı, 80-350 K sıcaklık aralığında değişik frekans ve oksit tabaka kalınlıkları için deneysel kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/w-V) ölçümleri kullanılarak araştırıldı. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki; özellikle yüksek sıcaklık ve düşük frekanslarda, arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) dağılımı ile gevşeme zamanı τ ve arayüzeyin termal olarak yeniden yapılanmasına bağlı olarak C ve G/w değerleri frekans, sıcaklık ve oksit tabaka kalınlığına oldukça bağımlıdır. Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) yapısının R_s ve N_{ss} değerleri sırasıyla Nicollian ve Hill-Coleman metotları kullanılarak hesaplanmış olup bu değerler artan frekansla azalmaktadır. Artan sıcaklıkla azalan seri direnç, artan oksit kalınlığına bağlı olarak lineer olarak artmaktadır. Dielektrik sabiti, dielektrik kayıp, kayıp tanjant ve elektrik modülünün frekans, sıcaklık ve oksit tabaka kalınlığının kuvvetli bir fonksiyonu olduğu bulundu. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri artan frekansla azalırken reel ve imajiner elektrik modülü artan frekansla artmaktadır. Ayrıca, ϵ' ve ϵ'' artan

sıcaklıkla artarken, reel ve imajiner elektrik modülü artan sıcaklıkla azalmaktadır. Artan oksit kalınlığına bağılı olarak dielektrik sabiti ϵ' değerleri azalıırken, $\tan\delta$ ve elektrik modülü'nün imajiner bileşeni olan M'' değerleri artmaktadır.

Bilim Kodu : 404.05.01

Anahtar Kelimeler : Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) yapılar; Seri direnç;
Elektrik ve dielektrik özellikler; Sıcaklık etkisi;
Frekans etkisi; Oksit tabaka kalınlığı etkisi

Sayfa Adedi : 125

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

**THE INVESTIGATION OF FREQUENCY AND TEMPERATURE
DEPENDENCE OF ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF
Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) STRUCTURES
(Ph.D. Thesis)**

Muharrem GÖKÇEN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
November 2008**

ABSTRACT

The frequency, temperature and oxide thickness dependence of electrical characteristics such as series resistance (R_s), interface states (N_{ss}) and ac electrical conductivity (σ_{ac}) and dielectric properties such as dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), dielectric loss tangent ($\tan\delta$), real and imaginary part of electric modulus (M' and M'') of the Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) structures have been investigated in the temperature range of 80-350 K at various frequencies by using experimental capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/w-V) measurements. Experimental results show that both the values of C and G/w were quite sensitive to frequency, temperature and oxide layer thickness at relatively high temperatures and low frequencies due to a continuous density distribution of N_{ss} and their relaxation time (τ), and thermal restructuring and reordering of the interface. The values R_s and N_{ss} of the Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) structure were obtained from Nicollian and Hill-Coleman methods, respectively, and their values decrease with increasing frequency. While the series resistance decreases with increasing temperature, it increases linearly with increasing oxide layer thickness. The dielectric constant, dielectric loss, loss tangent and the electric modulus were found a strong function of frequency, temperature and oxide layer thickness. While the values of the ϵ' , ϵ'' and $\tan\delta$ decrease with increasing frequencies, the electric modulus (real and imaginary part) increase

with increasing frequency. Also, while the dielectric constant and dielectric loss increase with increasing temperature, electric modulus (real and imaginary part) decrease with increasing temperature. While the ϵ' decreases with increasing oxide layer thickness $\tan\delta$ and imaginary electric modulus increase with increasing oxide layer thickness.

Science Code : 404.05.01

**Key Words : Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) structures; Series resistance;
Electric and Dielectric properties; Temperature effect;
Frequency effect; Oxide layer thickness effect**

Page Number: 125

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Tülay SERİN ve Prof. Dr. Bahtiyar SALAMOV'a, çalıştığımız numunenin temini, kontak oluşumu ve verilerin ölçümünde bana büyük katkıları olan değerli arkadaşım Araş. Gör. Halit ALTUNTAŞ'a, tez yazımı sırasında değerli katkılarından dolayı iş arkadaşlarıma ve ayrıca öğrenim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL KAVRAMLAR.....	5
2.1. İletken, Yarıiletken ve Yalıtkan.....	5
2.2. Katıların Bant Yapısı ve İletkenlik.....	7
2.3. Yarıiletken Tipleri.....	8
3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR	11
3.1. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri.....	11
3.1.1. İdeal metal-yarıiletken kontak için Schottky-Mott teorisi.....	13
3.1.2. Schottky engel alçalması.....	16
3.2. İdeal MOS Yapısı.....	18
3.2.1. Yığılım.....	22
3.2.2. Tükenim.....	22
3.2.3. Tersinim.....	23
3.3. Gerçek MOS Yapısı.....	25
3.3.1. Hareketli oksit yükü.....	26

Sayfa

3.3.2. Oksitte tuzaklanmış yükler.....	27
3.3.3. Sabit oksit ve arayüzey yükleri.....	28
3.3.4. Arayüzey durumları.....	29
4. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILARIN ÖZELLİKLERİ.....	32
4.1. Elektriksel Özellikler.....	32
4.1.1. MOS yapılarda arayüzey durum yoğunluğu teorisi.....	32
4.1.2. MOS yapının arayüzey özelliklerinin belirlenmesi.....	38
4.1.3. MOS yapının kapasitans-voltaj (C–V) eğrileri.....	43
4.2. Dielektrik Özellikler.....	46
4.2.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....	47
4.2.2. Dielektrik kutuplanma.....	49
4.2.3. Kutuplanma mekanizmaları.....	54
4.2.4. Negatif dielektrik sabiti ve negatif kapasitans.....	58
4.2.5. Dielektrik sabitinin ölçülmesi.....	59
5. DENEYSEL YÖNTEM.....	62
5.1. MOS Yapımında Kullanılan Galyum Arsenide (GaAs) Kristalinin Temel Fiziksel Özellikleri	62
5.2. MOS Yapımında Kullanılan SiO ₂ Yalıtkanının Temel Fiziksel Özellikleri ...	64
5.3. MOS Yapıların Hazırlanması.....	65
5.4. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri	65
6. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE BULGULAR	67
6.1. Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerin Frekans Bağımlılığı	67
6.1.1. Elektrik karakteristikler.....	67

Sayfa

6.1.2. Dielektrik karakteristikler.....	73
6.2. Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerin Sıcaklık Bağımlılığı.....	79
6.2.1. Elektrik karakteristikler.....	79
6.2.2. Dielektrik karakteristikler.....	89
6.3. Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerin Oksit Tabaka Kalınlığı Bağımlılığı.....	99
6.3.1. Elektrik karakteristikler.....	99
6.3.2. Dielektrik karakteristikler.....	103
7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	109
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Yarıiletken tipine göre doğrultucu ve omik kontağın oluşumu.....	12
Çizelge 5.1. Gallium-arsenide (GaAs) yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 K) temel bazı fiziksel özellikleri.....	63
Çizelge 5.2. Silisyum-dioksit'in oda sıcaklığındaki (300 K) temel bazı fiziksel özellikleri.....	64
Çizelge 6.1. Değişik frekanslar için oda sıcaklığında ki C-V ve G/w-V ölçümlerinden hesaplanan N_{ss} değerleri.....	70
Çizelge 6.2. M1, M2 ve M3 MOS yapıların oda sıcaklığında ki 1 MHz ve 0,8 volt için ölçülen ve hesaplanan bazı elektriksel parametreleri.....	103
Çizelge 6.3. M1, M2 ve M3 MOS yapıların oda sıcaklığında ki 1 MHz ve 0,8 volt için hesaplanan bazı elektriksel parametreleri.....	108

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için şematik bant diyagramı.....	8
Şekil 2.2. Silikon katkılı GaAs yarıiletkeninde Si atomlarının Ga ve As atomlarının yerini işgal etmesi.....	10
Şekil 3.1. Şematik MOS yapısı.....	11
Şekil 3.2. Metal/n-tipi yarıiletken kontakta, $\phi_m > \phi_s$ için elektron enerji-bant diyagramı (a) Birbirinden yalıtık materyaller (b) Kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu.....	13
Şekil 3.3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji-bant diyagramı (a) Termal denge durumu (b) Doğru beslem (c) Ters beslem.....	16
Şekil 3.4. Metal yarıiletken doğrultucu kontakta Schottky etkisinden kaynaklanan potansiyel engel alçalması.....	18
Şekil 3.5. İdeal bir MOS yapısı için enerji-bant diyagramı.....	19
Şekil 3.6. MOS kapasitesinin eşdeğer devresi	21
Şekil 3.7. (a) İdeal MOS yapısı için; yığılım, tükenim ve tersinim enerji bant diyagramları (b) Yük dağılımları.....	24
Şekil 3.8. İdeal bir MOS yapısının, (a) Yığılım (b) tükenim (c) tersinim durumları için MOS kapasitesinin eşdeğer devresi	25
Şekil 3.9. İdeal olmayan MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin temel Sınıflandırılması.....	26
Şekil 3.10. MOS yapısının eşdeğer devresi (a) Bir enerji seviyesi için (b) Birbirinden farklı birçok enerji seviyesi için.....	30
Şekil 4.1. Arayüzey tuzaklar ve seri direnç etkisini içeren eşdeğer devre.....	34
Şekil 4.2. MOS yapının eşdeğer devresi	35
Şekil 4.3. Arayüzey durumlarını ihtiva eden MOS yapının eşdeğer devresi.....	37
Şekil 4.4. MOS kapasitörün eşdeğer devresi (a) Yüksek frekans (b) Düşük frekans.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. n-tipi MOS kapasitörün yüksek frekans, düşük frekans ve derin tükenim eğrileri.....	40
Şekil 4.6. İletkenlik ölçümü durumunda eşdeğer devre.....	42
Şekil 4.7. İdeal n-MOS kapasitörün karakteristik C–V eğrileri.....	44
Şekil 4.8. n-MOS için C-V eğrileri (a) Pozitif oksit yüküyle (b) Negatif oksit yüküyle (c) Yüklenmiş arayüzey tuzaklarıyla (d) Verici yüküyle.....	45
Şekil 4.9. (a) Dielektriksiz (b) Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....	47
Şekil 4.10. Dipollerin dış elektrik alan etkisiyle yönelimleri.....	50
Şekil 4.11. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu.....	51
Şekil 4.12. Elektronik kutuplanma.....	54
Şekil 4.13. İyonik kutuplanma.....	56
Şekil 4.14. Yönelme kutuplanması.....	56
Şekil 4.15. Uzay yükü kutuplanması.....	57
Şekil 4.16. Dielektrikli bir kondansatördeki ac akım.....	61
Şekil 4.17. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı ile kayıp akımı arasındaki ilişki	61
Şekil 5.1. GaAs kristalinin birim hücresi	62
Şekil 5.2. (a) Kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/w-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek (b) Kriyostat içindeki numuneler.....	66
Şekil 6.1. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) C-V (b) G/w-V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı	68
Şekil 6.2. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) R_s -V (b) σ_{ac} -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı	72
Şekil 6.3. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı.....	74

Şekil	Sayfa
Şekil 6.4. M2 (163 Å) MOS yapısının ϵ' karakteristiklerinin farklı voltajlardaki frekans bağımlılığı.....	76
Şekil 6.5. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) M' -V (b) M'' -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı.....	78
Şekil 6.6. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz'de elde edilen (a) C-V (b) G/w-V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı.....	80
Şekil 6.7. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz'de elde edilen (a) R_s -V (b) σ_{ac} -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı	82
Şekil 6.8. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz'de ki farklı voltajlar için (a) σ_{ac} -T (b) $\ln\sigma$ -1000/T (Arrhenius) karakteristikleri.....	84
Şekil 6.9. M3 (240 Å) MOS yapısının (a) kapasitans (C) (b) kondüktansının (G/w) 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı.....	86
Şekil 6.10. M3 (240 Å) MOS yapısının (a) seri direnç (R_s) (b) iletkenliğinin (σ_{ac}) 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı.....	88
Şekil 6.11. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz'de ki (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı.....	90
Şekil 6.12. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz'de ki (a) M' -V (b) M'' -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı.....	92
Şekil 6.13. M3 (240 Å) MOS yapısının farklı voltajlar için (a) dielektrik sabiti (ϵ'), (b) dielektrik kayıp (ϵ'') (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 1 MHz'de ki sıcaklık bağımlılığı.....	94
Şekil 6.14. M3 (240 Å) MOS yapısının (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı	96
Şekil 6.15. M3 (240 Å) MOS yapısının elektrik modülünün (a) reel (M') (b) imajiner (M'') değerlerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı	98
Şekil 6.16. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz'de ki (a) C-V (b) G/w-V karakteristikleri.....	100
Şekil 6.17. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz'de ki (a) R_s -V (b) σ_{ac} -V karakteristikleri.....	102

Şekil	Sayfa
Şekil 6.18. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristikleri.....	105
Şekil 6.19. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) M' -V (b) M'' -V karakteristikleri.....	107

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	MOS yapının alanı
A_{OX}	Yalıtkan tabakanın alanı
C	Kapasitans
C_D	Yarıiletken tüketim tabakasının kapasitansı
D_{it}	Arayüzey durum yoğunluğu
d_{OX}	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_i	Saf Fermi enerji seviyesi $((E_C - E_V)/2)$
E_V	Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
g	Temel seviye dejenerasyonu
G	Kondüktans
M	Elektrik modülünün reel kısmı
M'	Elektrik modülünün imajiner kısmı
N_A	Katkılanan alıcı atomların (akseptör) yoğunluğu
N_D	Katkılanan verici atomların (dönor) yoğunluğu
N_{SS}	Arayüzey durum yoğunluğu
Q_A	Birim yüzeydeki akseptörlerin (alıcıların) yükü
Q_D	Birim yüzeydeki dönorların yükü
Q_M	Metal yüzeyindeki toplam yük
Q_{SC}	Uzay yükü bölgesinde biriken yük
Q_{SS}	Arayüzey yük yoğunluğu
R_S	Seri direnç

Simgeler**Açıklama** $\tan \delta$

Dielektrik kayıp tanjantı

 V

Metal plakaya uygulanan gerilim

 V_{OX}

Oksit üzerine düşen gerilim

 W Açısal frekans($=2\pi f$) W_D

Tüketim tabakasının genişliği

 Y

Admitans

 Z

Empedans (Rezistans)

 ϵ_{OX}

Oksidin dielektrik sabiti

 ϵ_s

Yarıiletkenin dielektrik sabiti

 ϵ

Boşluğun dielektrik sabiti

 ϵ'

Dielektrik sabiti (Dielectric constant)

 ϵ''

Dielektrik kayıp (Dielectric loss)

 ϕ_B

Potansiyel engel yüksekliği

 ϕ_m

Metalin iş fonksiyonu

 ϕ_s

Yarıiletkenin iş fonksiyonu

 ψ_B

Fermi ve saf Fermi enerjisi arasındaki fark

 ψ_s

Arayüzeydeki bant gerilimi

 χ

Yarıiletkenin elektron alınganlığı

 χ_o

Oksidin elektron alınganlığı

 τ

Arayüzey tuzaklarının ömrü

 σ

Öziletkenlik

Kısaltmalar**Açıklama****MS**

Metal-Yarıiletken

MIS

Metal-Yarıiletken-Yalıtkan

MOS (MOY)

Metal–Oksit–Yarıiletken

1. GİRİŞ

Mekanik bilgisayarlardan günümüzdeki nanometre boyutundaki transistörlerle çalışan ileri teknoloji bilgisayarlara kadar uzanan süreçte yarıiletken malzemenin rolü çok büyüktür. 1947’li yıllarda yarıiletken transistörlerin kullanılmaya başlanmasıyla entegre devreli elektronik cihazlar ve bilgisayarlar üretilmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler yarıiletken malzemelerin kullanım alanlarını ve teknolojik önemlerini çok büyük ölçüde artırmıştır. Küçük boyutları ve düşük elektrik enerjisi sarfiyatları nedeniyle elektronik sanayinin vazgeçilmez hammaddesi olmuşlardır. Öyle ki şu an evlerimizde kullandığımız hemen hemen tüm elektrikli cihazda yarıiletken devre elemanları bulunmaktadır.

1947 yılında Walter H. Brattain ve John Barden [1,2] kristal redresör (doğrultmaç) yapmak için Bell Laboratuvarında araştırmaya başlamışlardır. Esas olarak yapılan çalışma çeşitli kristallere temas eden bir “catwhisker” in tek yönde iletken, diğer yönde büyük bir direnç göstermesi üzerindir. Yapılan deneyler sırasında Ge kristalinin ters akıma daha fazla direnç gösterdiği ve daha iyi bir doğrultma işlemi yaptığı gözlenmiştir. Böylece ilk Ge redresör bulunmuştur.

Brattain ve Bardeen [1,2] germanyum redresör ile yaptıkları deneylerde, germanyum kristali üzerindeki serbest elektron yoğunluğunun, redresörün her iki yöndeki karakteristiğine olan tesirini incelemişler ve bu sırada, catwhisker'e yakın bir başka kontak daha yaparak deneylerini sürdürmüşlerdir. Bu sırada ikinci whisker de akım şiddetlenmesinin farkına vardılar ve elektronik tarihinin bir dönüm noktasına tekabül eden transistor böylece keşfedilmiş oldu. Adını “Transfer – Resistor” yani taşıyıcı direnç kelimesinden alan transistör’ün geliştirilmesine daha sonra William Shockley de katılmış ve bu üçlü 1956 yılı Nobel Fizik ödülüne layık görülmüşlerdir.

İlk yapılan transistörler “Nokta Kontaktlı” transistörlerdi. Nokta kontaktlı transistörler, iki whisker’li bir kristal diyottan ibarettir. Kristale “Base”, whiskerlerden birine “Emitter” diğerine de “Collector” adı verilmekteydi. Bu transistörlerde N-tipi Germanyum kristali base olarak kullanılmış olup whiskerler fosforlu bronzdan

yapılmıştır. Daha sonraları “Yüzey Temaslı” transistörler yapılmış olup, bu transistörler PNP veya NPN olacak şekilde üç kristal parçası birbirine yapıştırılarak imal edilmişlerdir. Yüzey temaslı transistörlerin yapılması ile Silisyum transistörler piyasaya çıkmış ve daha sonraları transistörler şekil ve kullanım alanları bakımından oldukça artmıştır [1]. Transistörler yapısal bakımdan yükselteç olarak çalışma özelliğine sahip bir devre elemanı olmasına rağmen daha yaygın olarak devrelerde anahtarlama yapmak için kullanılmaktadırlar. Yapım özellikleri ve kullanılan malzemeye göre güneş pili (MIS) veya kapasitör (MOS) olarak kullanılan transistörler de oldukça yaygındır.

Metal–yalıtkan/oksit–yarıiletken (MIS/MOS) yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasına yalıtkan bir tabakanın oluşturulmasıyla meydana gelirler ve birer transistör olarak kullanılmaktadırlar. MIS ve MOS yapılar gerek oluşturma teknikleri ve gerekse tabaka yapıları olarak çok benzerdir. Bu iki benzer yapıyı birbirinden ayıran temel fark, arayüzeyde ki yalıtkan tabaka kalınlığıdır. MIS yapılarıdaki yalıtkan tabaka ($<50 \text{ Å}$) MOS yapılara göre daha incedir. Yapısal olarak sadece aradaki yalıtkan tabaka kalınlıkları farklı olan bu iki yarıiletken cihaz farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. MIS yapılar ince bir yalıtkan tabakaya sahip olduğu için bir Schottky diyot gibi kullanılabilir veya bir eklem transistör gibi güneş pili olarak kullanılabilirken MOS yapılar kalın yalıtkan tabakasından dolayı diyot olarak kullanılamazlar. Genellikle yük depolama kapasitörü veya voltaj-kontrol kapasitans olarak kullanılırlar. Bir orijinal MOSC yapısı 1959 da John L. Moll tarafından voltaj-kontrol kapasitans olarak önerilmiştir. Bu yapı; AM-FM, CB radyolarda, TV ve diğer alıcılarda kullanılmaktadır [3,4].

MIS ve MOS yapılarda yalıtkan olarak kullanılan SnO_2 , Si_3N_4 ve SiO_2 gibi yalıtkan tabakalar, metal ve yarıiletken tabakaları birbirinden izole eder. Yarıiletken olarak genelde silisyum (Si), germanyum (Ge) ve galyum-arsenide (GaAs) kullanılan bu yapılarda yarıiletkenin p veya n-tipi olmasına göre metal olarak sırasıyla alüminyum veya altın kullanılır. Bu yapılarda yarıiletken yüzeyi, yalıtkan arayüzey, yalıtkan tabaka ve arayüzey özellikleri yapının elektrik performansı ve dielektrik özellikleri üzerinde büyük öneme sahiptir. Gerçek bir MOS yapısı idealden farklı olarak,

yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde birçok örgü kusuru, safsızlık, ve yerleşmiş arayüzey durumları içerir. Bu arayüzey durumlarının varlığı; yüzeyde periyodik örgünün kesilmesi, yüzey hazırlanışı, yarıiletken yüzeyindeki aktif dangling bağları, yalıtkan tabakanın yüzey şekillenimi ve yarıiletkenin safsızlığından kaynaklanmaktadır. Yarıiletken üzerine oluşturulan yalıtkan tabaka, yarıiletken yüzeyindeki aktif dangling bağlarını tamamıyla pasivize edemez. Tamamıyla dengeye ulaşmayan ve pasivize olmayan bu arayüzey tabakası, arayüzeyde ilave bir elektrik alanına ve gerilim değişimine sebep olan arayüzey yüklerini oluşturabilir. Bu arayüzey durumlarının dolma boşalma zamanı birbirinden farklı olabilir ve uygulanan uyarma frekansına bağlı olarak arayüzey durumları ac sinyali takip edebilir veya edemez. Arayüzey durumlarının frekans bağımlılığı genellikle kapasitans ve kondüktans eğrilerinde bir voltaj kayması ve frekans dağılımına sebep olur. Genel olarak 1 MHz civarındaki frekanslar yüksek frekans kabul edilir ve arayüzey durumlarının bir çoğu bu sinyali takip edemez. Ve bu nedenle 1 MHz ve üzeri ölçümlerde kapasitans ve kondüktansa arayüzey durumlarından dolayı gelen katkı ihmal edilebilir.

MOS kapasitöre bir gerilim uygulandığında bu gerilim; arayüzey oksit tabakası, tüketim tabakası ve bu yapının seri direnci tarafından paylaşılır. Paylaşılan bu gerilimin oranı yalıtkan oksit tabakasının kalınlığına ve seri dirence bağlı olarak değişir. İnce bir oksit tabakası yüksek bir kapasitans değeri sağlarken aynı zamanda metal-yarıiletken arasında bir sızıntı akımına da sebep olabilir. Kalın bir oksit tabakası bu sızıntıyı önlemesine rağmen, hem arayüzey tabakasında homojensizlikler meydana gelebilir hem de MOS yapının kapasitansı azalır. Bu yüzden, bu yapıların performansı ve güvenilirliği metal/yarıiletken (M/S) arasındaki yalıtkan tabakanın oluşumuna bağlıdır [4-6].

Ayrıca, sıcaklık gerek yarıiletken ve iletken ve gerekse yalıtkan üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kullanılan malzemenin sıcaklığındaki bir değişim maddelerin elektronlarının ve dolayısıyla atom ve moleküllerin termal enerjilerinin değişmesine sebep olur ki bu da o maddenin örgü parametrelerinden, direnci, iletkenliği v.b.

birçok davranışını değiştirir. Kristal yapılu maddeler genellikle artan sıcaklıkla daha düzensiz hale gelirken, düşük sıcaklıklarda daha kararlı bir davranış sergilerler.

Dolayısıyla sıcaklık ve frekanstaki değişim ve dolayısıyla seri direnç (R_s) ve arayüzey durum yoğunluğundaki (N_{ss}) değişim MOS yapıların elektrik ve dielektrik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [4-21]. MOS kapasitörlerin performansı ve güvenilirliği özellikle metal-yarıiletken arasındaki bu yalıtkan tabakanın şekli, kalınlığı, safsızlığı ve homojenliğine bağlı olarak değişir.

Yalıtkan olarak farklı bileşikler kullanılmasına rağmen halen silisyum dioksit (SiO_2) teknolojik öneminden dolayı, sensörlerde, güneş pillerinde, ince-film transistörlerde, dokunmatik ekranlar vb. uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir [7-10]. Yalıtkan SiO_2 tabakasını oluşturmak için; termal buharlaştırmayla oksit biriktirme, püskürtme, sol-gel ve spray birikim (spray deposition) gibi bazı geleneksel yöntemlerle PECVD teknik gibi bazı teknikler de vardır. Hepsinde amaç daha homojen ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmak ve arayüzey etkilerini en aza indirerek ideal bir eklem oluşturmaktır. Bu açıdan her tekniğin kendi içinde avantajlı veya dezavantajlı olduğu yönler vardır.

Bu çalışmada kullanılan $Au/SiO_2/n-GaAs$ (MOS) yapılar; 5.08 cm çaplı, (100) yönelimli, 350 μm kalınlıklı ve $2-3 \times 10^{18} cm^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğuna sahip silisyum katkılı n-tipi GaAs yarıiletkeninin alt yüzeyine buharlaştırma yöntemiyle omik, üst yüzeyine PECVD yöntemiyle farklı kalınlıklarda SiO_2 ve yalıtkan SiO_2 üzerine doğrultucu Au kontakların buharlaştırılmasıyla oluşturulmuştur. Farklı oksit kalınlığına sahip $Au/SiO_2/n-GaAs$ (MOS) yapılarının C-V ve G/w-V ölçümleri 100 kHz-1MHz frekans ve 80 K-350 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlerden MOS yapılara ait seri direnç (R_s), arayüzey durumları (N_{ss}), iletkenlik (σ_{ac}) gibi elektriksel karakteristiklerle; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) ve elektrik modülü (M' ve M'') gibi dielektrik karakteristikleri hesaplanarak frekans, sıcaklık ve oksit kalınlığına bağımlılıkları incelenmiştir.

2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1. İletken, Yarıiletken ve Yalıtkan

Doğadaki tüm maddeler atom ve moleküllerden oluşmuştur. Moleküller de esasında birden fazla atomun birleşmesinden meydana gelmiş birleşik yapılardır. Tüm maddeleri meydana getiren atomların kendisi ise, merkezde pozitif yüklü (+) proton ve yüksüz nötronlardan oluşan bir çekirdek ve çekirdek çevresindeki kararlı yörüngelerde dolanan negatif yüklü (-) elektronlardan oluşmaktadır. Dolayısıyla doğadaki tüm maddeler temel yapı taşlarında elektrik yükleri içermektedir. Pozitif yüklü proton ve negatif yüklü elektron sayıları eşit olan maddelere nötr, negatif yüklü elektron fazlalığı olan maddeler negatif (-) yüklü ve negatif yük eksikliği yani pozitif yüklü proton sayısı fazlalığı olan maddelere ise pozitif (+) yüklü maddeler denir. Maddelerdeki yüklenme olayını çekirdek çevresinde dolanan (-) yüklü elektronlar sağlamaktadır. Yani nötr maddeler elektron alıp-vererek yüklü hale geçebilirler.

Katılarda doğadaki diğer maddeler gibi atomlardan oluşmuştur. Bir katı maddeyi oluşturmak için aynı tür atomlar bir araya gelebileceği gibi farklı tür atomlardan oluşmuş moleküllerde bir araya gelebilir. Katılarda genel olarak atom ve molekülleri metalik bağ veya kovalent bağlarla bağlanmış olanların iletkenlik yetenekleri daha iyidir. İyonik bağlı maddeler ise katı halde genellikle yalıtkandır. Katıları elektrik iletim özelliklerine göre iletken, yarıiletken veya yalıtkan olarak üç gruba ayırabiliriz. Bu maddelerin elektrik iletkenliği katı içerisinde serbestçe hareket edebilecek elektronlarının olup olmamasıyla alakalıdır. Mesela metaller elektron denizinde yüzen çekirdekler gibidir, dolayısıyla çok fazla miktarda serbest elektronları vardır. Ve bu serbest elektronlarından dolayı elektrik iletkenlikleri iyidir. Yarıiletkenler ise genellikle kovalent bağlarla oluşmuş kristal yapıdadırlar. Normal halde elektrik akımını iletmedikleri halde küçük bir gerilim, ısı veya ışık gibi dış etkilerle iletme geçirilebilirler. Yalıtkanlar ise genellikle iyonik bağlı bileşiklerden meydana gelmiştir. Madde içerisinde serbest hareket edebilecek elektronları

olmadığından elektrik akımını iletmezler. Ancak çok yüksek gerilimlerde madde içerisindeki elektronlar harekete geçirilebilir.

İletkenler (metaller) son yörüngelerinde (valans elektronları) 1, 2 veya 3 elektron bulunan atomlardan meydana gelmişlerdir ve bu elektronlar çekirdeğe zayıfça bağlı olduğundan metalik bağdaki atomlardan ayrılarak katı içerisinde serbestçe hareket edebilirler. Elektronların katı içerisindeki bu hareketi onların elektrik akımını kolaylıkla iletmesini sağlar.

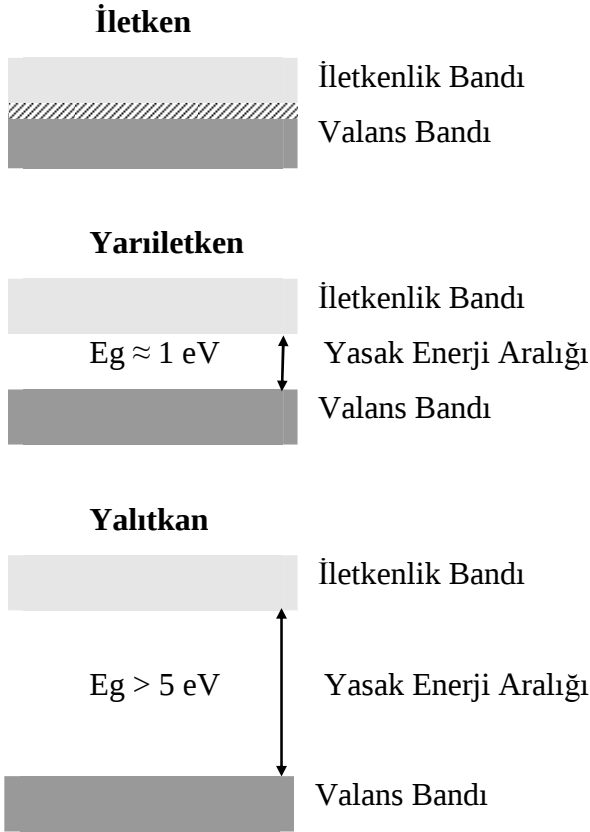
Yalıtkanların son yörüngeleri ya tamamen doludur ya da 4 ten fazla sayıda elektron içermektedir. Kararlı bir son yörüngeye sahip yalıtkanlar kolaylıkla elektron alış-verişi yapmadıklarından katı içerisinde dolanacak serbest elektronları yoktur. Yalıtkanların valans (değerlik) elektronları katı içersinde serbest olmadıklarından elektriği iletmedikleri düşünülür. Gerçekte yalıtkan içersindeki elektronlar harekette serbesttirler, fakat bir yalıtkanda birçok elektron olmasına karşın bir o kadar da elektronlar tarafından doldurulacak enerji seviyesi vardır. Eğer bir elektron başka bir elektronla yer değiştirirse, elektronlar ayırt edilemediğinden, herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Yalıtkanlarda elektronların serbestçe hareket edilebileceği yüksek enerji seviyeleri de mevcuttur, fakat elektronları bu enerji seviyelerine göndermek için çok yüksek gerilime ihtiyaç vardır. Her yalıtkan çok az da olsa bir miktar akım geçirmekte olup bu akım artan gerilimle artmaktadır. Ve kırılma gerilimi denen bir gerilimden daha yüksek bir gerilim değeri için yalıtkan delinmesi denen olay gerçekleşir ki, yalıtkan madde artık belirgin bir akım geçirmeye başlar.

Yarıiletkenler ise yalıtkanlarla iletkenler arasında yer alırlar. Yarıiletkenlerin ise son yörüngelerinde 4 elektron vardır. Yarıiletken atomları elektron alıp-vermekten çok paylaşmayı tercih ederler. Ve böylece kovalent bağlı kristalleri oluştururlar. İletkenler kadar iyi olmasa da, çeşitli katkı maddeleri veya diğer dış etkiler yardımıyla elektrik akımını ilettebilirler.

2.2. Katıların Bant Yapısı ve İletkenlik

Katıların bant teorisi, bir katıdaki elektronların davranışını tanımlayan enerji-bant ilişkisini açıklar. Bu teoriye göre bir katıdaki enerji seviyeleri, tek tek atomlar için değil o katıyı oluşturan tüm atomların bir katkısı olarak düşünülür. Dolayısıyla tek başına bir atom için bir çizgiden ibaret olan enerji seviyeleri, katıyı oluşturan atomların etkileşimleri sonucu yarılmaya uğrayarak geniş aralıklı bir bant oluştururlar. Atomlardaki enerji seviyeleri arasındaki farka katılarda bantlar arası boşluk karşılık gelir. Yani, katıda elektronlar tarafından doldurulacak sürekli enerji bantları ve elektronların bulunamayacağı enerji aralıkları bulunur. Katıların bant teorisi yukarıda bahsedilen yalıtkan, iletken ve yarıiletken arasındaki farkı anlamak için faydalıdır. Elektronlar en düşük enerji seviyesinden başlayarak üst seviyelere doğru enerji seviyelerini doldururlar. Bununla birlikte katıdaki atomların dalga özelliklerinden dolayı bazı enerji seviyeleri yasaklıdır. İzinli enerji seviyeleri bant oluştururlar. $T=0$ K de en yüksek dolu seviye valans bant ve bu bantının üstündeki ilk boş bant iletkenlik bandı olarak bilinir.

Metallerde iletkenlik bandıyla valans bandı kısmen üst üste binmiştir ve yasak enerji aralığı yoktur. Bu durum ilettime katılan serbest elektronların oluşmasını sağlar. Yalıtkanlarda yasak enerji aralığının değeri elektronun termal enerjisinden çok daha büyük olup bu durum normal şartlarda yalıtkanlarda, elektronların valans bandından iletkenlik bandına geçişlerini engeller. Dolayısıyla yalıtkanlar enerji-bant yapılarından dolayı normal şartlarda iletken değildirler. Yarıiletkenlerde ise yasak enerji aralığı 1 eV civarındadır. Bu durum yarıiletkenlerin küçük bir dış etkiyle iletken hale geçirilebilmesini mümkün kılmaktadır. Aşağıdaki diyagram katıların enerji bant modelini açıklamaktadır.



Şekil 2.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için şematik bant diyagramı

2.3. Yarıiletken Tipleri

Yarıiletkenler, kimyasal yapılarına göre; elementel, bileşik ve alaşım yarıiletkenler olarak sınıflandırılabilirken, katkı durumlarına göre ise; hakiki (saf, pür), p-tipi ve n-tipi olarak sınıflandırılabilirler.

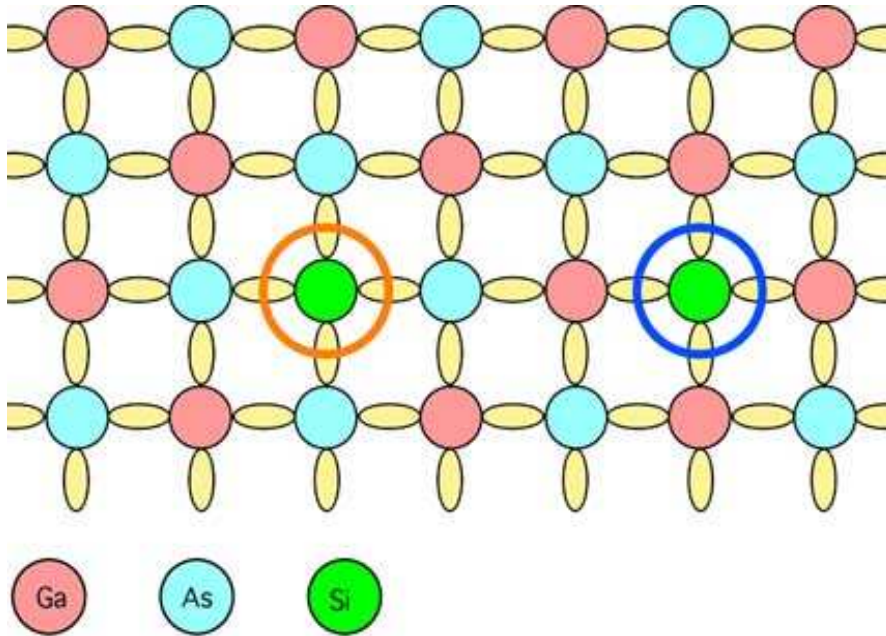
Ge, Si gibi aynı atomdan oluşan yarıiletkenler elementel yarıiletkenlerdir. Bu atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır. Kovalent bağda her bir atom bir elektronu en yakın bir komşuyla paylaşarak kuvvetli bir bağ oluşturur. Bileşik yarıiletkenler ise iki veya daha çok elementten meydana gelirler. Yaygın Örnekleri GaAs ve InP'dır. Bu yarıiletkenler III-V grubu yarıiletkenler grubundandır. İlk element periyodik tablonun III., ikinci element periyodik tablonun V. grubunda bulunmaktadır. Bu nedenle bu tür yarıiletkenlere III-V grup yarıiletkenleri denir. Alaşım yarıiletkenler ise bileşiğe az miktarda üçüncü bir elementin ilavesiyle

($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ gibi) meydana gelirler. Buradaki x indeksi ne oranda ilave yapıldığını ve alaşım maddesiyle yer değişirime oranını belirten alaşım bileşenini temsil eder. Yarıiletkenlere alaşım ilavesiyle $\text{Ga}_x\text{In}_{(1-x)}\text{As}_y\text{P}_{(1-y)}$ gibi dörtlü yarıiletkenler de elde edilebilir. Yine indisler alaşımı meydana getiren element oranlarını gösterirler. Üçlü veya dörtlü yarıiletkenler alaşım yarıiletkenler olarak bilinirler. Alaşım yarıiletkenlerde bant yapısı, örgü sabiti gibi diğer fiziksel özellikleri kendisini meydana getiren ikili (anne-baba) yarıiletkenlerden farklıdır.

Hakiki yarıiletken esasen saf (pür) yarıiletkendir. Yarıiletken maddenin herhangi bir safsızlık ihtiva etmediği durumdur. Elementel ve bileşik yarıiletkenler hakiki yarıiletken olabilirler. Oda sıcaklığında yarıiletken maddenin atomlarının termal enerjileri iletme katılacak çok az sayıda elektron sağlar. Metallere zıt olarak yarıiletken bir maddenin direnci sıcaklıkla düşer. Sıcaklık artarken valans elektronların termal enerjileri artar ve daha fazla elektron yasak enerji aralığını atlayarak iletkenlik bandına geçer. Bir elektron bağlı bulunduğu atomun elektrostatik çekim enerjisini yenecek kadar enerji kazandığında arkasında başka bir elektron tarafından doldurulabilecek bir boşluk bırakıp atomdan ayrılarak serbest hale geçer. Üretilen bu boşluk pozitif yüklü ikinci bir taşıyıcı olarak kabul edilir ve deşik (hole) olarak adlandırılır. Yarıiletkende elektronlar ve deşikler birbirlerine zıt yönde hareket ederler. Hakiki bir yarıiletkende n sayıda elektron varsa aynı sayıda deşik olmalıdır. Bu yolla üretilen elektronlar ve deşiklere hakiki yük yoğunlukları denir. Taşıyıcı yoğunluğu veya yük yoğunluğu birim hacimdeki yüklü taşıyıcı sayısını tanımlar. Bu tanımlama, n birim hacimdeki elektron sayısı ve p birim hacimdeki deşik sayısı olmak üzere $n = p$ olarak yazılabilir. Herhangi bir sıcaklıkta farklı yarıiletkenlerde yasak enerji aralığındaki değişme hakiki taşıyıcı yoğunluğundaki değişme anlamındadır.

Katkılı yarıiletkenler, katkılama diye bilinen bir yöntemle kristale safsızlık atomları ilavesiyle p-tipi veya n-tipi olarak elde edilen yarıiletkenlerdir. Bu çalışmada silikon katkılı n-tipi bir bileşik yarıiletken olan GaAs kullanılmıştır. Genel olarak n-tipi bir GaAs elde etmek için katkı atomu olarak Si, Se, Ge, Sn ve Te kullanılırken, p-tipi bir GaAs elde etmek için katkı atomu olarak Be, Mg, Zn ve C atomları kullanılır.

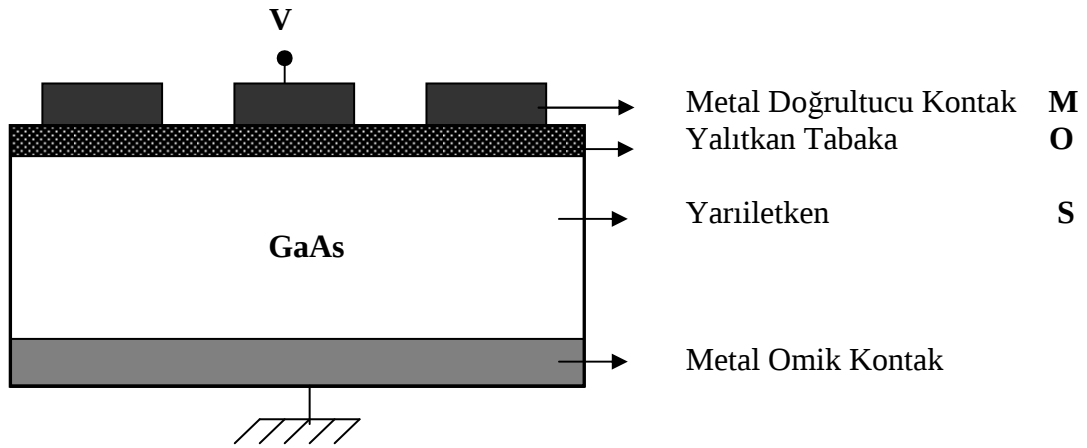
Katkılanan elementin GaAs bileşiminde işgal ettiği yere göre katkılı yarıiletken p veya n tipi olarak davranır. Eğer silikon atomları Ga atomları yerine yerleşirse donör gibi davranır ve n-tipi bir GaAs yarıiletkeni elde edilir, bunun yerine eğer silikon atomları As atomları yerine yerleşirse akseptör gibi davranır ve p-tipi bir GaAs yarıiletkeni elde edilir. Fakat (100) yönelimli GaAs alttaş üzerine MBE (Molecular Beam Epitaxy) yöntemi ile büyütülen silikon katkılı GaAs yarıiletkeni daima n-tipi olmaktadır. Silikon atomlarının Ga ve As atomlarının yerlerini işgal etmesi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Silikon katkılı GaAs yarıiletkeninde Si atomlarının Ga ve As atomlarının yerini işgal etmesi

3. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR

Metal-Oksit-Yarıiletken yapılar, omik kontak yapılmış bir yarıiletken yaprak üzerine yalıtkan bir oksit tabakası ve bu oksit tabakası üzerine de bir metal tabakanın büyütülmesiyle oluşan sandviç yapılardır. Şematik bir MOS yapısı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Dışarıdan uygulanan gerilim V , metal plakaya uygulanır ve yönü de ona göre belirlenir. Yani metal plakaya omik kontağa göre pozitif bir gerilim uygulanırsa MOS yapıya uygulanan gerilim pozitif, metal plakaya omik kontağa göre negatif bir gerilim uygulanırsa MOS yapıya uygulanan gerilim negatif olarak tanımlanır.



Şekil 3.1. Şematik MOS yapısı

3.1. Metal-Yarıiletken Kontak Türleri

Metal-yarıiletken kontak türlerinden bahsetmeden önce bunlara ait bazı nicelikleri tanımlamak gerekmektedir. Bu nicelikler:

Fermi Enerjisi: İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviye *Fermi enerjisi* olarak tanımlanır. N tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi iletim bandından itibaren ölçülürken p tipinde ise valans bandından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale geçirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Metalin iş fonksiyonu (ϕ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu(ϕ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi katkılanan madde atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden dolayı ϕ_s de değişken bir niceliktir.

Elektron yakınlığı (χ) : Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır.

Bir metal ile bir yarıiletkenin oluşturduğu kontağın türünün doğrultucu veya omik olması, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile yarıiletkenin p veya n tipi olmasına bağlıdır. Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\phi_s < \phi_m$ olması halinde doğrultucu kontak ve $\phi_s > \phi_m$ olması halinde omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\phi_s < \phi_m$ olması halinde omik kontak ve $\phi_s > \phi_m$ olması halinde de doğrultucu kontak oluşur.

Çizelge 3.1. Yarıiletken tipine göre doğrultucu ve omik kontağın oluşumu

Kontak Tipi	n -tipi	p-tipi
Doğrultucu kontak	$\phi_s < \phi_m$	$\phi_s > \phi_m$
Omik kontak	$\phi_s > \phi_m$	$\phi_s < \phi_m$

Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi katılanan alıcı/verici atomların miktarına bağlı olarak değiştiğinden yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s değişken bir nicelikdir. Şekil 3.2a'da yarıiletken yüzey durumları içermediğinden yüzeyin bant yapısı yarıiletken gövde (bulk) bant yapısı ile aynıdır yani bantlarda bir bükülme yoktur. Şekil 3.2b, metal ile yarıiletken kontak yapıldıktan sonra dengeye ulaşmış durumun enerji-bant diyagramını göstermektedir. Metal ile yarıiletken kontak yapıldığında, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki veya uyarılmış durumdaki elektronlar, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar, yarıiletkenden metale doğru akarlar. Bu geçiş neticesinde, yarıiletkenin sınırında serbest elektron konsantrasyonu azaldığı için yarıiletkendeki Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kayacaktır. Yani iletkenlik bant kenarı E_C ile Fermi seviyesi E_F arasındaki fark, azalan bu elektron konsantrasyonu ile artar ve termal dengede E_F tamamen sabit kaldığı için iletkenlik ve valans bant kenarları Şekil 3.2b'deki gibi yukarı doğru bükülürler. Yarıiletkenin vakum seviyesi ve yarıiletkenin elektron yakınlığı χ_s kontak ile değişmediğinden aynı şekilde yukarı doğru bükülür. Yarıiletkenden metale geçen iletkenlik bandı elektronları arkalarında pozitif yüklü verici (donor) iyonları bırakırlar. Böylece yarıiletkenin metale bakan ön yüzeyinde hareketli yükler bu geçiş nedeniyle azalır. Bunun sonucu olarak da arayüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yükler oluşur aynı zamanda metal tarafında da yarıiletkenden metale geçen elektronlar ince bir negatif yük tabakası oluştururlar. Bu yük düzenlemeleri sonucunda, yarıiletkenden metale doğru doğal bir elektrik alan oluşur.

Termal denge durumunda, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanmış olur ve bant bükülme miktarı (qV_i), metal ile yarıiletken materyallerin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. Bu fark $qV_i = \phi_m - \phi_s$ olarak ifade edilir. Burada qV_i yarıiletkenden metale gidecek olan elektronun sahip olması gereken enerji yani engel yüksekliğidir. Bununla birlikte metal tarafından gözüken engel yüksekliği, yarıiletken tarafından gözüken engel yüksekliğinden farklıdır ve

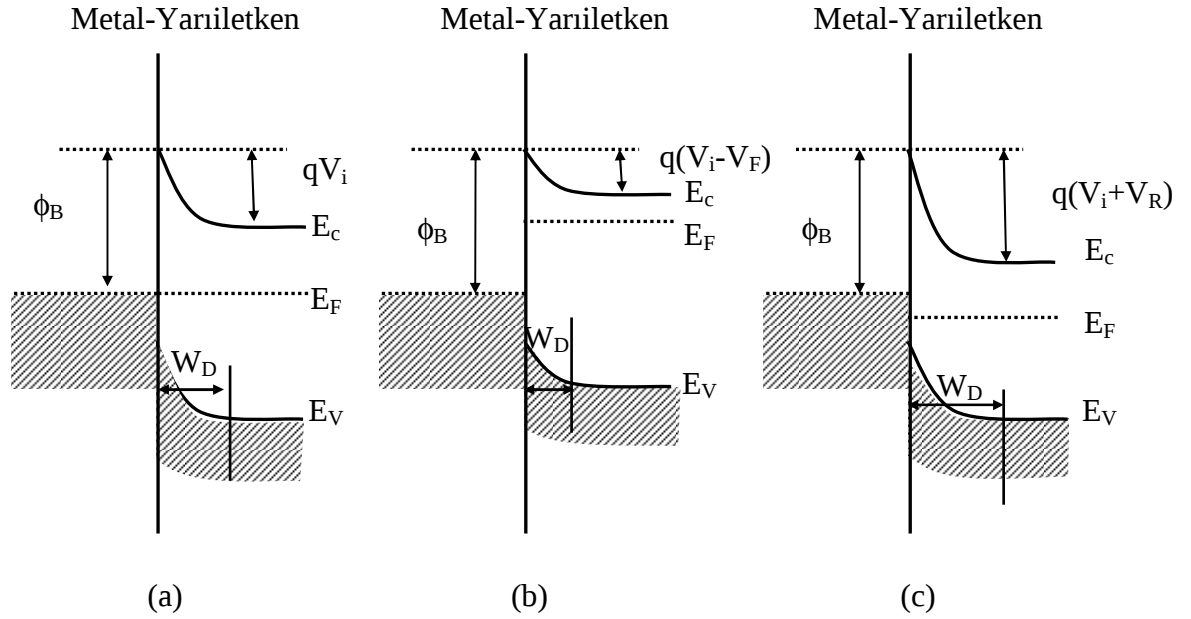
$$\phi_B = \phi_m - \chi_s \quad (3.1)$$

ile verilir [15,16]. $\phi_s = \chi_s + \phi_n$ ve $\phi_m = qV_i + \phi_s$ olduğundan,

$$\phi_B = (qV_i + \phi_n) \quad (3.2)$$

elde edilir. Burada $\phi_n = (E_c - E_F)$ dir, ancak E_c referans olarak sıfır alınırsa $\phi_n = E_F$ olur. Eş. 3.1, birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir [14]. Şekil 3.3’de metal-yarıiletkenin kontak edildikten sonraki; termal dengede, doğru ve ters beslem enerji-bant diyagramları sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 3.3(a), termal denge halinde, yarıiletkenden metale geçen elektronlar metalden yarıiletkene geçen elektronlar ile dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir. Bu nedenle uygulanan dış gerilimin neredeyse tamamı bu bölgeye düşer. Yapıya uygulanacak doğru veya ters bir ön gerilim voltajı termal denge durumundaki enerji-bant diyagramını değiştirecektir. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletken tarafı metale göre negatif olacak şekilde $V=V_F$ gerilim uygulandığında, tüketim bölgesinin genişliği azalır, ve Şekil 3.3b’de gösterildiği gibi termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği, qV_i ’den $q(V_i - V_F)$ ’ye düşer. Bu durumda yarıiletkenden metale geçecek elektronlar azalmış bir engel ile karşılaşacaklar ve bunun sonucu olarak da yarıiletkenden metale doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre artarken metalden yarıiletkene elektron akımı değişmez. Çünkü metalde herhangi bir gerilim düşmesi oluşmaz ve potansiyel engel yüksekliği ϕ_B uygulanan gerilimden etkilenmez. Sonuç olarak yarıiletken tarafı negatif metal pozitif olacak şekilde kontağa bir dış gerilim uygulandığı zaman, yarıiletkenden metale doğru olan net bir akım vardır. Bu durumda metal-yarıiletken kontak doğru ön gerilimlenmiş olur. Doğru beslem akımı, uygulanan V_F doğru belsem gerilimi ile üstel olarak artar [5]. Kontakın ters beslem durumundaki enerji bant diyagramı ise Şekil 3.3c’de verilmiştir. Yarıiletken metale göre pozitif olacak şekilde $V=V_R$ gerilimi uygulandığında ise tüketim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği qV_i ’den $q(V_i + |V_R|)$ ’ye yükselir. Bu nedenle yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge durumuna göre azalır. Metalden yarıiletkene elektron akımı ise pratik olarak

termal dengedeki akımın aynısıdır. Yarıiletkenden metale doğru olan akım doğru beslemdeki ile kıyaslandığında daha küçüktür. Böylece bu tartışmalar altında bahsedilen kontak tek yönde akım ileten doğrultucu bir kontak oluşturmuş olur.



Şekil 3.3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için elektron enerji-bant diyagramı (a) Termal denge durumu (b) Doğru beslem (c) Ters beslem

Şekil 3.3b ve 3.3c' deki enerji-bant diyagramları denge şartlarında değildir ve tek bir Fermi seviyesi yoktur. Uygulanan düz ve ters beslem gerilimleriyle oluşan elektron akışından dolayı değişir ve elektronlar yüksek Fermi enerjili bölgeden düşük Fermi enerjili bölgeye geçiş yaparlar.

3.1.2. Schottky Engel Alçalması

Bir metal-vakum sisteminde, metalin yüzeyinden x kadar uzakta bulunan bir elektron göz önüne alınırsa metalin yüzeyinden x kadar içeride pozitif değerli bir hayali (görüntü) yük oluşur [1]. Bu durumda Coulomb denklemine göre elektronu metale doğru çeken kuvvet [5],

$$F = -\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)\left(\frac{q}{2x}\right)^2 \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϵ_0 , boşluğun dielektrik geçirgenliği olup değeri $8,85 \times 10^{-14}$ F/cm'dir. Bu Coulomb kuvveti, $+\infty$ ile x arasında integre edilirse,

$$\int_{\infty}^x F dx = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (3.4)$$

elde edilir. Metal-yarıiletken Schottky diyotları (kontaklar) için bu metalden vakuma doğru olan emisyon, metalden yarıiletkene doğru emisyon şeklinde düşünülebilir [17]. O halde, metalden x kadar uzakta yarıiletken içinde bir elektron dikkate alınırsa, metal yüzeyinden x kadar arkada pozitif değerli bir görüntü yük oluşur. Schottky engelinin uygulanan elektrik alanı ve görüntü yük etkisiyle $q\Delta\Phi_B$ kadar azalmasına *Schottky engel alçalması* denir. Bu durum Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Yapıya bir dış elektrik alan (ξ) uygulandığında uzaklığın fonksiyonu olarak toplam potansiyel enerji Eş. 3.5' de ki gibi olur.

$$U(x) = -q^2/(16\pi\epsilon_0 x) - q\xi x \quad (3.5)$$

Schottky engel alçalması metal yüzeyinden x_m kadar uzakta potansiyel enerji değişiminin $dU(x)/dx=0$ olduğu noktada meydana gelir. Eş. (3.5)' in x e göre türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde,

$$x_m = (q/(16\pi\epsilon_0 \xi))^{1/2} \quad (3.6)$$

elde edilir ve bu değer Eş. (3.5) de yerine yazılırsa $\Delta\Phi_B$ için,

$$\Delta\phi_B = (q\xi/4\pi\epsilon_s)^{1/2} \quad (3.7)$$

ifadesi elde edilir ve engel alçalması uygulanan gerilimin bir fonksiyonudur.

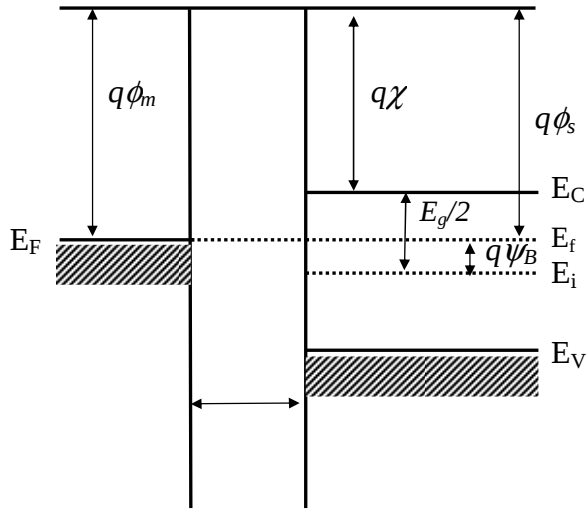
ii) Herhangi bir beslem şartı altında, MOS yapıdaki yükler okside bitişik metal yüzeydekiler ile yarıiletkendekiler eşit miktarda fakat zıt yüklüdür.

iii) Uygulanan dc gerilim şartları altında okside doğru taşıyıcı geçişi yoktur.

iv) Oksit ve Oksit-yarıiletken arayüzeyine yakın bölgelerde tuzaklar, sabit veya hareketli yükler bulunmaz. Yani oksit iyi nitelikli bir yalıtkandır.

v) Oksidin bant aralığı büyüktür, öyle ki oksidin iletim bandında termik taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilecek kadar küçüktür.

İdeal bir MOS yapısının enerji-bant diyagramı Şekil 3.5' de ki gibidir.



Şekil 3.5 İdeal bir MOS yapısı için enerji-bant diyagramı

İdeal bir MOS yapısına uygulanan gerilim oksit tabaka ve yarıiletken yüzey tarafından paylaşılır [18,19].

$$V = V_{OX} + \psi_s \quad (3.10)$$

V : Metal plakaya uygulanan gerilim

V_{ox} : Oksit üzerine düşen gerilim

ψ_s : Arayüzeydeki bant gerilimidir.

Q_M : Metal yüzeyindeki toplam yük

Q_{SC} : Uzay yükü bölgesinde biriken yük olmak üzere, toplam yük ise şöyledir :

$$Q_M = Q_N + q N_D W = Q_S \text{ veya}$$

$$Q_M + Q_{SC} = 0 \quad (3.11)$$

Burada Q_N tersinim bölgesinde birim alan başına düşen toplam yük, $qN_D W$, W genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş dönorlardır. Q_S yarıiletkendeki toplam yük ve Q_{SC} uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür.

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan oksit tabakasından dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşmaktadır. Bu kapasitans MOS kapasitesi olarak adlandırılır ve bu kapasitörlerin özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki oksit ve oksit–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasite arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MOS kapasitesine karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Burada C_{OX} oksidin kapasitesi ve C_{SC} uzay yükü kapasitesidir. Bunların eşdeğer kapasiteleri bize MOS kapasitesini verecektir. Poisson denkleminin çözümünün sonucu ve uygulanan geriliminin çok küçük diferansiyel değişiminin olduğunu varsayarak sırayla oksit, uzay yükü bölgesi ve MOS kapasitelerini tanımlayalım:

$$C_{OX} = \frac{dQ_M}{dV_{OX}} A_{OX} \quad (3.12)$$

$$C_{SC} = -\frac{dQ_{SC}}{d\psi_{SC}} A_{OX} \quad (3.13)$$

$$C = \frac{dQ_M}{dV} A_{OX} \quad (3.14)$$

A_{OX} oksit alanı, dolayısıyla MOS yapısının alanıdır. Şekil 3.6’da ki eşdeğer devrenin çözümünde MOS kapasitesi:

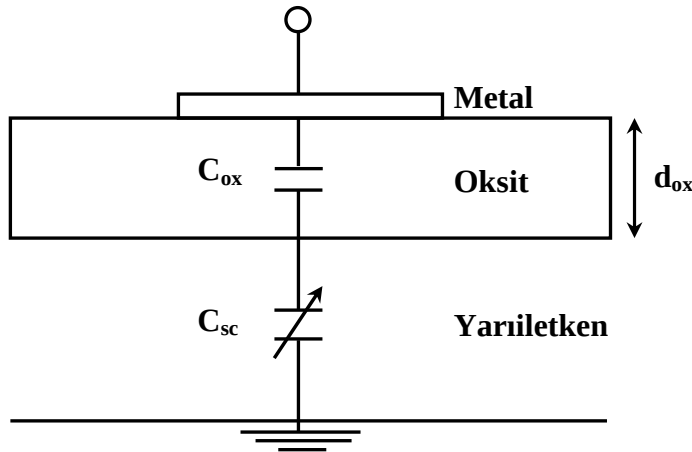
$$C = \left(\frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_{SC}} \right)^{-1} = \frac{C_{SC} \cdot C_{OX}}{C_{SC} + C_{OX}} \quad (3.15)$$

biçiminde olur. Bu, yukarıda yazılan denklemlerden Eş. 3.10’ u Eş. 3.14’ de yerine koyarak doğrulanabilir.

Oksit kapasitesi C_{OX} eşitliğinin diğer bir tanımı,

$$C_{OX} = \frac{\epsilon_{OX}}{d_{OX}} A_{OX} \quad (3.16)$$

olarak ifade edilir. Burada ϵ_{ox} Oksidin dielektrik sabiti ve d_{OX} oksit kalınlığıdır. Bu eşitlik sabittir, çünkü eşitlikteki bütün nicelikler MOS yapısı için sabittir. Bu sonuçlara bağlı olarak MOS kapasitesini sadece uzay yükü kapasitesi belirleyebilir.



Şekil 3.6. MOS kapasitesinin eşdeğer devresi

Uygulanan gerilime bağlı olarak n-tipi yarıiletkenli bir MOS kapasitörde meydana gelen yığılm, tükenim ve tersinim olaylarını sırasıyla tanımlayalım:

3.2.1. Yığılım

İdeal bir n-MOS yapısında metal plakaya pozitif bir gerilim ($V > 0$) uygulandığında, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronları yarıiletken arayüzeyine doğru çekecek ve yarıiletkenindeki değerlik (valans) elektronları bandı aşağı bükülecek ve fermi enerjisine yaklaşacaktır (Şekil 3.7a). İdeal bir MOS yapısında denge durumunda yük akışı olmadığı için Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalmaktadır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_C - E_F$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan elektronların yığılmasına sebep olur (Şekil 3.7b). Değerlik bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak aşağı büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmelerinden dolayı bu duruma *yığılım* adı verilir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$ ve $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

3.2.2. Tükenim

İdeal bir n-MOS yapısında metal plakaya küçük bir negatif gerilim ($V < 0$) uygulandığında, oksit içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindeki elektronları yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki elektron yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar yukarı doğru bükülür (Şekil 3.7a). Valans bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, holler toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen W genişliğinde bir bölgede, elektronların azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur (Şekil 3.7b). Çoğunluk taşıyıcı olan elektronların azaldığı bu bölgeye *tükenim bölgesi*, bu olaya da *tükenim* denir.

Uygulanan gerilim arttığında, tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda donör iyonları sağlamak için genişler. Tükenim yaygınlaştığı zaman, yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin beslem tükenimi ve katkı yoğunluğu 0,1-10 μm civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir. Bu bölgenin genişliği W ile temsil edilir ve

$$W = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (3.17)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A_{ox} oksit tabakasının kalınlığı ve C_{ox} oksit kapasitesidir.

Tükenim durumunda oluşan uzay yükü,

$$Q_{SC} = q N_D^+ W = Q_D \quad (3.18)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada N_D^+ iyonlaşmış donör yoğunluğu ve Q_D birim yüzeydeki donör yüküdür. Bu bölgede MOS kapasitesi, uzay yükü kapasitesi ve oksit kapasitesi ile belirlenir.

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 tükenim* olarak tanımlanır.

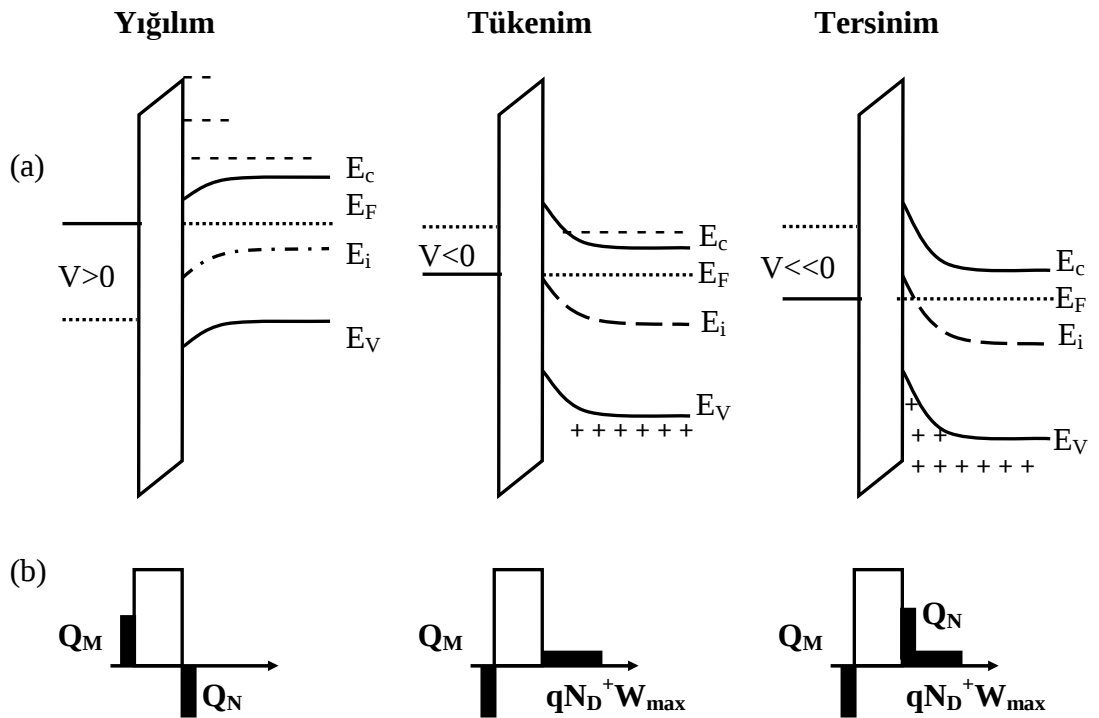
3.2.3. Tersinim

İdeal bir n-MOS yapısında metal plakaya büyük bir negatif gerilim uygulandığı zaman bantlar daha fazla yukarı doğru bükülürler ve E_i öz durumdaki enerji seviyesi, E_F Fermi enerji seviyesinin üzerine çıkar (Şekil 3.7a). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olandeşikler artmaya başlar ve bunun sonucundadeşiklerin yoğunluğu elektronların yoğunluğundan daha büyük olur (Şekil 3.7b). Bu aşamadan sonra n-tipi yarıiletken yüzeyi p-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin *tersinimi* olarak adlandırılır ve bu durumda oluşan uzay yükü,

$$Q_{SC} = Q_N + Q_D \quad (3.19)$$

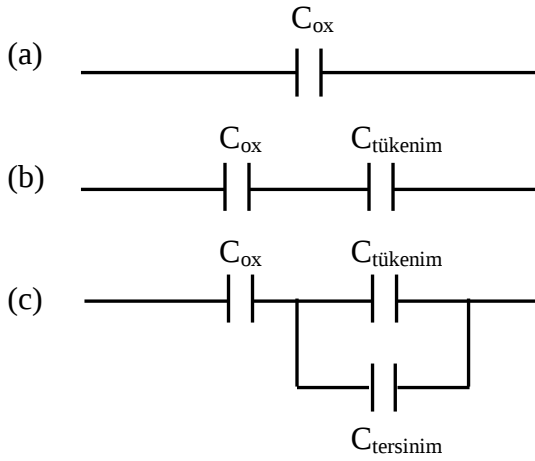
ifadesiyle verilir. Burada Q_N tersinim bölgesinde birim yüzeydekideşiklerin yükü ve Q_D birim yüzeydeki vericilerin yüküdür. Bu durum Şekil 3.7b’de gösterilmiştir. Bu durumda MOS kapasitesini, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin frekansını takip edebilme yeteneği belirler.

Elektron yoğunluğu ac sinyali küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasite artan gerilimle oksit kapasitesinin 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 kapasite $C_{\min}$ ’de kalır. Yüksek frekansta eğer dc gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların rekombinasyon hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin $C_{\min}$ ’un altında değerler almasına sebep olur. Bu dengesizlik durumu derin tükenim durumudur.



Şekil 3.7. (a) İdeal MOS yapısı için; yığılım, tükenim ve tersinim enerji bant diyagramları (b) Yük dağılımları

Yukarıda anlatılan ve uygulanan gerilime bağlı yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde meydana gelen yığılım, tükenim ve tersinim durumları için MOS kapasitelerinin eşdeğer devreleri sırasıyla Şekil 3.8’de ki gibidir.



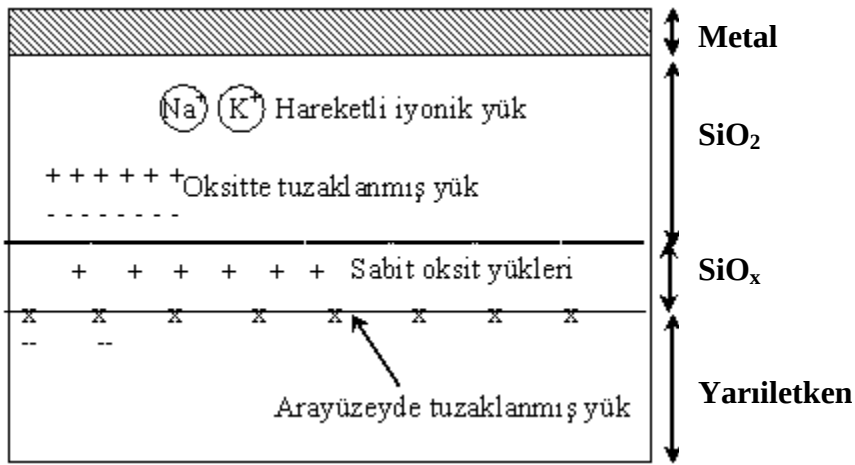
Şekil 3.8. İdeal bir MOS yapısının, (a) Yığılım (b) tükenim (c) tersinim durumları için MOS kapasitesinin eşdeğer devresi

3.3. Gerçek MOS Yapısı

İdeal bir MOS yapısında; yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde hiçbir sabit veya hareketli yük yoktur fakat gerçekte ise oksit-yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan oksit-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak ortaya çıkan; hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MOS yapısının özelliklerini değiştirerek ideal özelliklerinden sapmasına neden olmaktadır [20,21]. Gerçek bir MOS yapısında birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Genel olarak bir yalıtkan/yarıiletken sisteminde dört tip yük bulunur. Bunlar; sabit oksit yükü, hareketli (mobil) oksit yükü, oksitte tuzaklanmış yük ve arayüzeyde tuzaklanmış (arayüzey durumları) yüklerdir. Bu yükler Şekil 3.9’da gösterilmiştir [1].

i) Beslem altında oksit içinde hareketli iyonlardan oluşan hareketli oksit yükü

- ii) Oksit içindeki safsızlıklar ve kırık bağlar gibi kusurlardan veya numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşabilen oksitte tuzaklanmış yükler
- iii) Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alanı altında hareketsiz olan sabit oksit ve arayüzey yükleri
- iv) Oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasaklanmış bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları



Şekil 3.9. İdeal olmayan MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin temel Sınıflandırılması[1]

3.3.1. Hareketli oksit yükü

Hareketli iyonlar genellikle Na⁺, K⁺, Li⁺, H⁺, H₃O⁺ iyonlarıdır [22]. Bunlardan H⁺ ve H₃O⁺ oda sıcaklığında geri kalanlar da 100 °C’de hareketlikleri gözlenir. Bu hareketli iyonlar kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslara, oksitleme fırını, kuvarz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden metal-oksit arayüzeyinde ya da yarıiletken-oksit arayüzeyinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanında hareket ettiklerinden MOS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar. Hareketli yükleri C-V eğrisindeki düz bant kaymasından yararlanarak,

$$Q_m = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (3.23)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

3.3.2. Oksitte tuzaklanmış yükler

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar oksit içinde bulunurlar ve yarıiletken yüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir oksit tabakasında elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Bunun dışında, elektronlar ve deşikler oksit tabakasına enjekte edildiğinde (tünelleme yoluyla) bunların bazıları da oksitte tuzaklanabilir. Bu tuzaklar yüksek enerjili foton veya parçacıklarla bombardıman edildiğinde de ortaya çıkabilir. MOS yapının oluşturulmasında ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan 550 °C üzerindeki sıcaklıklarda tavlama ile kaldırılabilir [22]. Oksitte tuzaklanmış yük, oksite doğru dağıldığından genellikle oksit-yarıiletken yüzeye yerleşmezler. Oksit içinde tuzaklanmış yük (Q_{ot}),

$$Q_{ot} = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (3.24)$$

ile verilir. Burada, ΔV_{FB} düz bant gerilim kaymasını göstermektedir.

İyonlaşmış tuzaklar MOS kapasitörlerin kapasitans-voltaj karakteristiklerini etkilerler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru değiştirirken ölçülen kapasitans farklılıklarından dolayı kapasitans-voltaj eğrisinde *hysteresis* etkisi gözlenir [23]. Bu eğrilerin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma (ΔV_{HisFB} düz banttaki kayma) oksit içindeki tuzakların miktarını verir.

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (3.25)$$

3.3.3. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit Oksit arayüzey yükleri oksit içinde ve oksit-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Oksitle yarıiletkenin kristal yapılarının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıiletkenden oksit tabakasına geçerken kaçınılmaz olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olurlar. Bu yükler yarıiletkenin safsızlığından ve oksit kalınlığından etkilenmezler [1]. Sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına ve yarıiletkenin yönüne bağlıdır. Oksidin büyüme koşulları bu oksit yük yoğunluğuna etki eder (oksidin büyüme hızı, oksitleyen gaz, sıcaklık gibi).

Bu yüklerin başlıca özelliği, oksit-yarıiletken yapısına uygulanan gerilimden yük durumlarının bağımsız olmasıdır. Yarıiletken ile bu yük merkezleri arasında yük alış-verişi olmaz. Sabit oksit arayüzey yükleri $C-V_G$ eğrilerinin ideal $C-V_G$ eğrisinden kaymasına neden olurlar. Bu kaymadan faydalanılarak oksit içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{OX} , oksit-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük ΔQ_{eff} ve arayüzey yük yoğunluğu ΔQ_{SS} hesaplanır.

$$\Delta Q_{OX} = \frac{\Delta V_{MG} C_{OX}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (3.20)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{OX}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (3.21)$$

$$\Delta Q_{SS} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{OX} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (3.22)$$

burada, ΔV_{MG} gerçek ve ideal $C-V_G$ eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve ΔV_{FB} düz bant durumundaki gerilim kaymasını göstermektedir.

3.3.4. Arayüzey durumları

Arayüzey durumlarının tanımı Shochley, Tamm ve diğer bilim adamları tarafından teorik olarak araştırılmış ve bir kristalin arayüzeyinde periyodik örgü yapılarının kesilmesinden dolayı yasaklanmış bant aralığı içinde var olduğu gösterilmiştir. Tanım olarak, “kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasaklanmış bant aralığı içindeki enerji seviyeleri” olarak ifade edilir. Arayüzey durumları dönor (verici) veya akseptör (alıcı) tipte olabilirler. Akseptör tipte; enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Dönor tipte ise; enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. MOS yapısına bir gerilim uygulandığı zaman, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzaklarının iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Bu yükün değişimi MOS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MOS eğrisini değiştirir. Arayüzey durumları genelde arayüzeye çok yakın bulunurlar. Arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlığından etkilenmez. Arayüzey durumları uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptıklarından temel eşdeğer devre Şekil 3.10’da gösterildiği gibidir.

Birim enerji başına arayüzey yükü olarak tanımlanan arayüzey durum yoğunluğu şu şekilde verilir:

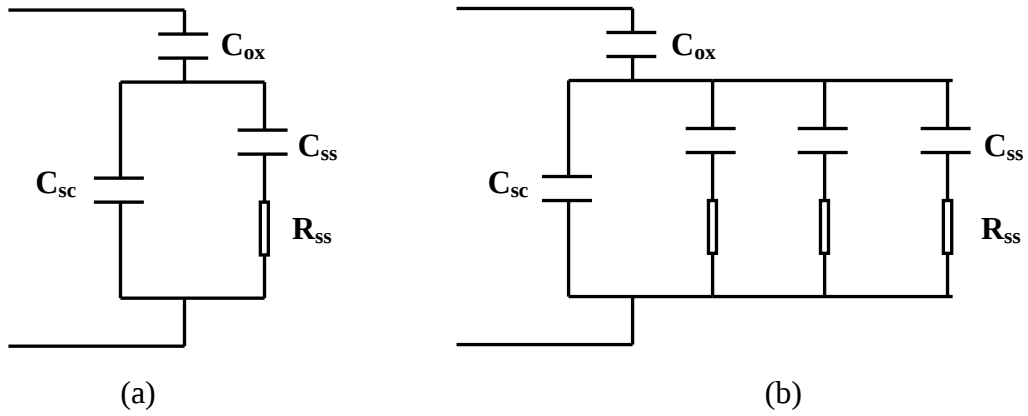
$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} \quad (3.26)$$

Burada E enerji olup $E = q\psi_s$ ile verilir. E ’nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Eş. 3.26 tekrar düzenlenirse durum yoğunluğu şu şekli alır:

$$N_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} = \frac{dQ_{ss}}{d\psi_s} \frac{d\psi_s}{dE} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{ss}}{d\psi_s} \quad (3.27)$$

Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez. Devredeki arayüzey kapasitesi ise şu şekilde verilir:

$$C_{ss} = \frac{dQ_{ss}}{dE} A_{ox} \quad (3.28)$$



Şekil 3.10. MOS yapısının eşdeğer devresi

(a) Bir enerji seviyesi için

(b) Birbirinden farklı birçok enerji seviyesi için

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şunlardır:

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

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

c) Arayüzey potansiyeli : Yukarıda ifade edilen kapasite ve iletim ac etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir de dc etkisine de sebep olur. Arayüzey durumlarında depo edilmiş yük, arayüzey elektrik alanını değiştirir. Arayüzey durumları mevcut olunca arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite-gerilimin zorunlu genişlemesi (stretch out) olarak gözükür.

4. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILARIN ÖZELLİKLERİ

4.1. Elektriksel Özellikler

4.1.1. MOS yapılarda arayüzey durum yoğunluğu teorisi

Gerçek bir MOS yapıda; idealden farklı olarak birçok arayüzey durumları ve oksit yüklerinin varlığı MOS yapının karakteristiklerinin idealinden farklı olmasına neden olmaktadır. Gerek yarıiletkenin kendisi büyütülürken oluşan örgü kusurları ve safsızlıklar ve gerekse, MOS yapıyı oluşturmak için yarıiletken üzerine herhangi bir yöntemle SiO_2 büyütülürken oluşan örgü kusurları ve arayüzeydeki safsızlıklar izinli olmayan yasak enerji aralığında birçok enerji seviyesinin oluşmasına neden olur. Yasak enerji aralığındaki bu izinli seviyelere arayüzey durumları adı verilir [1,6,19].

Arayüzey durumlarını yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Yavaş yüzey durumları daha çok yalıtkanın metal tarafında bulunurlar. Bunlar; oksit içerisinde hareketsiz yükler ihtiva eden bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan altında oksit içerisinde göç etmeye yatkın hareketli iyonlar tarafından meydana getirilirler. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile hemen hemen giderilebilir ve MOS kapasitesini çok fazla etkilemezler.

Hızlı arayüzey durumları ise yalıtkan-yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji aralığının ortasına yakın enerjilere sahiptirler. Dolayısıyla bant bükülmesi yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alışverişi yaparlar. Arayüzeyde, yasak enerji aralığı dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit arayüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit arayüzey yükü veya oksit yükü denir.

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

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

Alıcı arayüzey tuzaklar için :

$$f(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} \quad (4.1)$$

Verici arayüzey tuzaklar için :

$$f(E_t) = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_t - E_f}{kT}\right)} \quad (4.2)$$

şeklindedir. Burada E_t , arayüzey tuzak enerjisi, E_f Fermi enerjisi ve g ise termal durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için 4'dür [13].

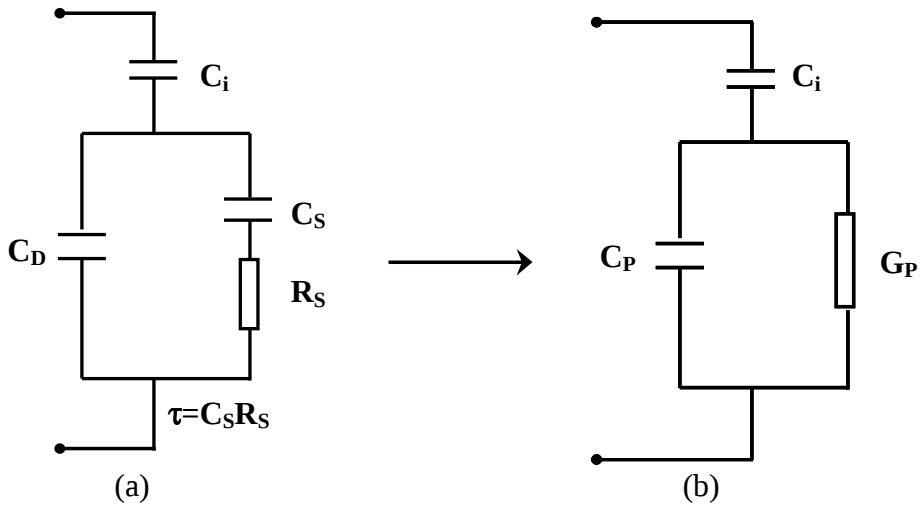
Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket eder. Bu değişme MOS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur. Arayüzey tuzaklarının etkisini kapsayan eşdeğer devre Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Burada C_i oksit kapasitans, C_D yarıiletken tüketim tabaka kapasitansı ve C_S arayüzey kapasitansıdır. $C_S R_S$ çarpanı arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanmış olup bu arayüzey tuzaklarının davranışını belirler. Şekil 4.1a'nın paralel kolu, Şekil 4.1b'deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_p ve ona paralel bağlı frekans bağımlı iletkenlik G_p şeklinde yazılabildiği gösterilebilir.

Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_S + \frac{1}{j\omega C_S}} = G_P + j\omega C_P \quad (4.3)$$

şeklindedir.



Şekil 4.1. Arayüzey tuzaklar ve seri direnç etkisini içeren eşdeğer devre

Burada iletkenlik G_P ve kapasitans C_P ,

$$G_P = \frac{1}{R_P} = \frac{C_S \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4.4)$$

$$C_P = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4.5)$$

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans Z ise,

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_P + j\omega C_P} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_P}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2}\right) + \frac{G_P}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2} \quad (4.6)$$

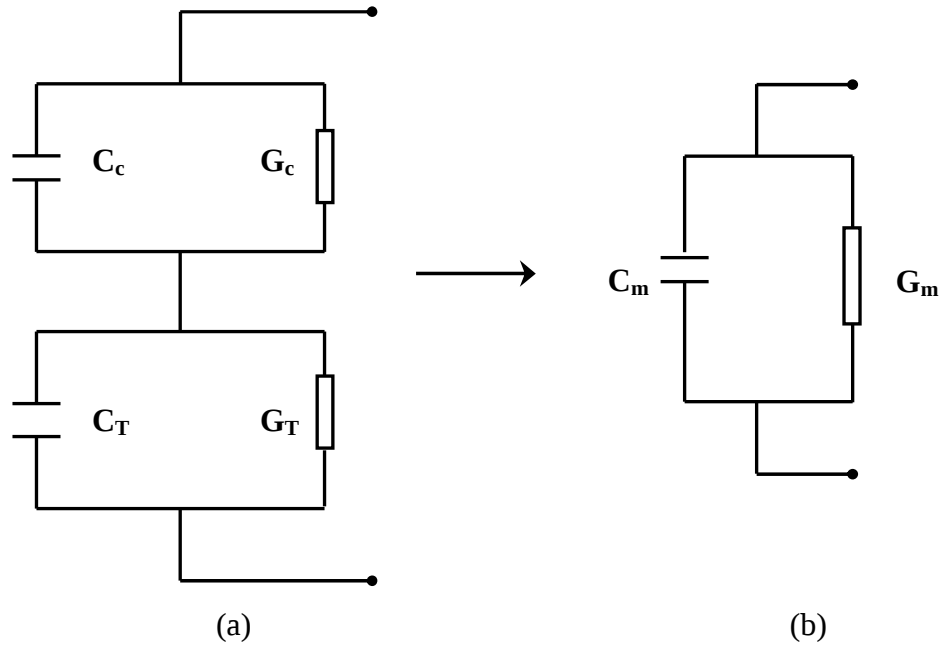
ve buradan toplam admittans Y_{top} için,

$$Y_{top} = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p} \right) + j\omega \left(\frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2) C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p} \right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (4.7)$$

eşitliği elde edilir [1,24]. Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik G_m ve kapasitans C_m gerçek değerler değildir [25]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (4.8)$$

şeklindedir.



Şekil 4.2. MOS yapının eşdeğer devresi

Şimdi C_c ve G_c analitik çözümünü yapılabilir.

$Z = Z_1 + Z_2$ ’den $Z_1 = Z - Z_2$ ’dir. Buna göre,

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

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (4.9)$$

denkleminin paydası eşleniği ile çarpılır. $G_T = 1/R_s$ yazılır ve C_T değeri ihmal edilirse düzeltilmiş iletkenlik için,

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (4.10)$$

elde edilir. Burada seri direnç R_s , Şekil 4.2b'deki devrenin empedansı Z 'nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir [6].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.11)$$

den,

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.12)$$

elde edilir. Eş. 4.9'un düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı yani düzeltilmiş kapasitans,

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (4.13)$$

şeklindedir. Eş. 4.10 ve Eş. 4.13 denklemlerini yeniden düzenlersek [6],

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.14)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.15)$$

elde edilir. Burada,

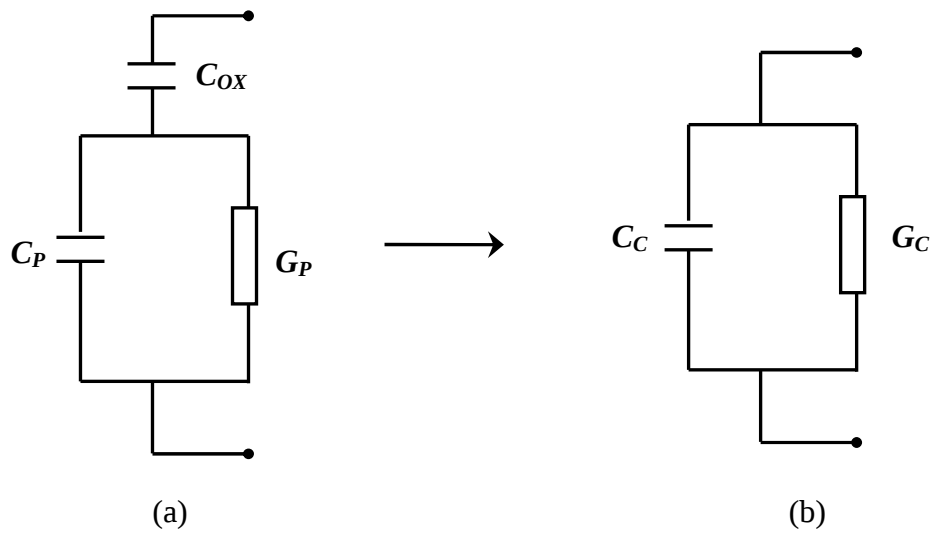
$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (4.16)$$

olup C_m ve G_m ölçülen kapasitans ve iletkenliktir. $R_s = 0$ durumunda $C_c = C_m$ ve $G_c = G_m$ olur.

Benzer şekilde G_p/ω için Şekil 4.3'den

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{G_c/\omega}{(G_c/\omega C_{ox})^2 + (1 - C_c/\omega C_{ox})^2} \quad (4.17)$$

denklemini elde edilir [26]. Tuzaklanmış arayüzey yükleri hesaplamak için ya kapasitans-voltaj (C-V) ya da iletkenlik-voltaj (G-V) ölçüm teknikleri kullanılır. Her iki teknik de arayüzey tuzaklar hakkında benzer bilgiler içerir.



Şekil 4.3. Arayüzey durumlarını ihtiva eden MOS yapının eşdeğer devresi

4.1.2. MOS yapının arayüzey özelliklerinin belirlenmesi

MOS yapının arayüzey özellikleri, frekans değerlerinin parametre olarak kaldığı yüksek frekans(HF), düşük frekans(LF), iletkenlik ve Hill-Coleman metotları ile belirlenir. Bu metotlar aşağıda tanımlanmışlardır [22,27,28].

a) Yüksek frekans (HF) metodu

Terman tarafından geliştirilmiş olan bu metot arayüzey tuzak yoğunluklarını hesaplamak için sıklıkla kullanılır. Terman metodu oda sıcaklığında yüksek frekans ($\omega\tau \gg 1$) kapasitans metodu, arayüzey tuzak yoğunluğunun belirlenmesi için kullanılan ilk metotlardan biridir [29]. Bu metotta oksit tabakasının kapasitansı ve tükenim bölgesinin kapasitansı birbirine seri bağlıdır. Zaman sabiti yükün arayüzey durumlarına girip çıkmasına izin vermeyecek kadar uzundur. Arayüzey durum yüklerinin kapasitansa katkılarının olmadığı yüksek frekanslarda (>100 kHz) arayüzey durumlarının varlığı kapasitans-voltaj eğrisinin biçimini değiştirecektir. Belirli bir beslemde, arayüzey durumlarında bulunan yükler oksitte ilave bir elektrik alanının oluşmasına sebep olurlar. Bu, oksit tabakası boyunca bir gerilim düşmesine neden olur. Sonuç olarak, kapasitans-voltaj eğrisi oksit tabakasına düşen gerilimin miktarı kadar yatay olarak kayacaktır. Yani, arayüzey durumları ac sinyaline cevap verememelerine rağmen yavaşça değişen dc gerilimine duyarlıdır ve arayüzey tuzak işgali uygulanan gerilim değişirken, gerilim eksenini boyunca HF kapasitans-voltaj eğrisinin genişlemesine neden olurlar. Tükenim veya tersinim durumunda olan bir MOS için uygulanan bir gerilimle metal tarafında yerleşmiş olan ilave yük, ek yarıiletken yüküne sebep olur. Bu ilave yük ΔQ_{ss} , değişik bant bükülmesi şartlarında oksit kapasitansının uçlarında meydana gelen ilave gerilimin ölçülmesiyle aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir.

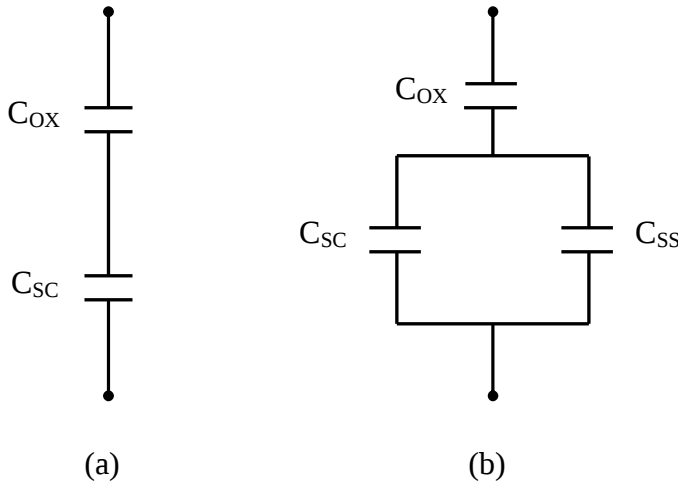
$$\Delta Q_{ss} = \frac{C_{ox} \Delta V_G (\Psi_s)}{A_{ox}} \quad (4.18)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\Delta V_G(\Psi_s)$, ideal kapasitans-voltaj eğrisinden kayma miktarı göz önüne alınarak ölçülür.

Arayüzey tuzakları olduğunda belirli bir yüzey potansiyeli Ψ_s için, V_G 'nin artacağı açıktır. Bu da C-V eğrisinin kaymasının sebebidir. Yarıiletken bant aralığı boyunca düzgün olarak dağılmış arayüzey tuzakları, oldukça yavaş bir değişim meydana getirir ve C-V eğrisini bozar. MOS kapasitörün yüksek frekans eşdeğer devresi Şekil 4.4a'da ki gibidir. Buna göre yüksek frekans kapasitansı,

$$C_{HF} = \frac{C_{ox} C_{sc}}{(C_{ox} + C_{sc})} \quad (4.19)$$

ifadesi ile verilir.



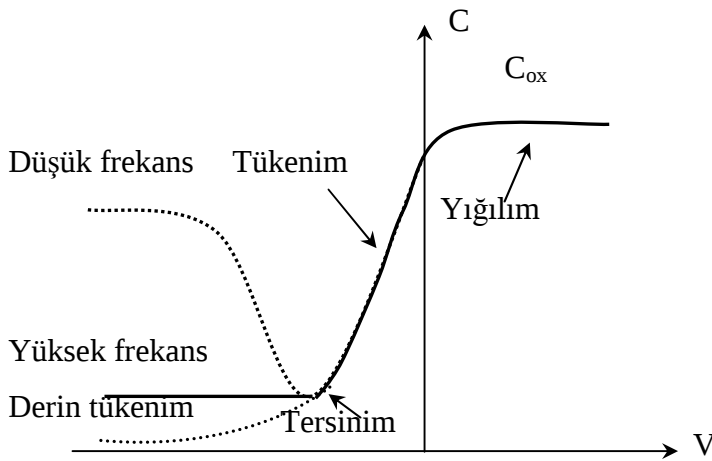
Şekil 4.4. MOS kapasitörün eşdeğer devresi (a) Yüksek frekans (b) Düşük frekans

b) Düşük frekans (quasi-static) metodu

Bu metodun temelleri Berglund [30] tarafından geliştirilmiştir. Düşük frekans metodu, düşük frekans C-V eğrilerini arayüzey tuzakların etkisini içermeyen bir başka eğriyle karşılaştırmak için kullanılır. Bu arayüzey tuzakların etkisini içermeyen eğri için ya teorik bir eğri ya da genellikle arayüzey tuzakların takip edemediği yüksek frekans eğrileri kullanılır. Burada düşük frekanstan kasıt, arayüzey

tuzakların ve azınlık taşıyıcıların uyarma frekansına cevap verebilmesidir. Yani tuzakların dolum-boşalım zamanının uygulanan ac gerilim periyodundan küçük olması durumudur.

Şekil 4.5’de ideal yüksek frekans (HF), düşük frekans (LF) ve derin tükenim (DD) eğrileri gösterilmiştir. Pozitif gerilim bölgesinde HF ve DD eğrileri düşük frekans eğrisi ile aynıdır. Fakat negatif gerilimler için sapma meydana gelmektedir. Çünkü tersinim yükü HF durumu için uygulanan ac gerilimi takip edemez ve tersinim yükü DD durumu için mevcut değildir. Dc gerilimi ile negatiften pozitif gerilimlere doğru taranan bir MOS kapasitörde, dc gerilim beslem şartlarından belirlendiği halde, ac gerilimi kapasitans ölçümlerinde gereklidir. Eğer dc gerilim taraması yeterince yavaş bir şekilde uygulanırsa, tersinim yükü oluşabilir ve bununla birlikte ac gerilimi yeterince düşük frekanslı olursa, tersinim yükü ac frekansına cevap verebilir ve o zaman düşük frekans eğrisi elde edilir. Yine, dc gerilim taraması yeterince yavaş bir şekilde uygulanırsa, tersinim yükü oluşur. Fakat ac frekansı tersinim yüküne cevap verebilmesi için yeterince düşük değilse o zaman yüksek frekans eğrisi elde edilir. Tarama oranı çok yüksek ise derin tükenim eğrisi elde edilir.



Şekil 4.5. n-tipi MOS kapasitörün yüksek frekans, düşük frekans ve derin tükenim eğrileri

Tükenim ve tersinim bölgesi için düşük frekans kapasitansı şu şekilde verilir:

$$C_{LF} = \frac{1}{\frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{(C_S + C_{it})}} \quad (4.20)$$

burada C_S , düşük frekans yarıiletken kapasitansdır. C_{it} değişkeni ise arayüzey (tuzak) durum yoğunluğu $D_{it}=C_{it}/q$ ile verilen D_{it} (N_{SS}) ile ilgilidir. Buradan D_{it} ;

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left(\frac{C_{OX} C_{LF}}{C_{OX} - C_{LF}} - C_S \right) \quad (4.21)$$

bulunur. Eş. 4.21, yasak enerji aralığındaki tüm tuzakların yoğunluğunu hesaplamak için çok kullanışlı bir formüldür.

D_{it} , C_{LF} ve C_S değişkenleri yardımıyla hesaplanabilir. Buradaki C_{LF} uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak ölçülürken, C_S aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$C_S = \frac{C_{OX} C_{HF}}{C_{OX} - C_{HF}} \quad (4.22)$$

Eş. 4.22, Eş. 4.21’de yerine konulursa, D_{it} için ölçülen düşük frekans ve yüksek frekans C-V değerlerinden hesaplanabilecek aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$D_{it} = \frac{C_{OX}}{q} \left(\frac{C_{LF} / C_{OX}}{1 - C_{LF} / C_{OX}} - \frac{C_{HF} / C_{OX}}{1 - C_{HF} / C_{OX}} \right) \quad (4.23)$$

c) İletkenlik metodu

Bu metotta frekans sabit tutulup kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim eğrileri elde edilir [11]. Bu metot diğer iki metottan daha hassas olup daha fazla hesaplama gerektirmektedir. Bu metotla $10^9 \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ve daha düşük arayüzey tuzak yoğunlukları ölçülebilmektedir. İletkenlik metodu durumunda eşdeğer devre Şekil

4.6'daki gibidir. Bu metotta farklı frekanslarda metal elektroda uygulanan gerilimi değiştirmek suretiyle kapasitans (C) ve iletkenlik (G) değerleri elde edilir. Paralel kapasitans C_p ve paralel iletkenlik G_p aşağıdaki eşitliklerle verilir [31].

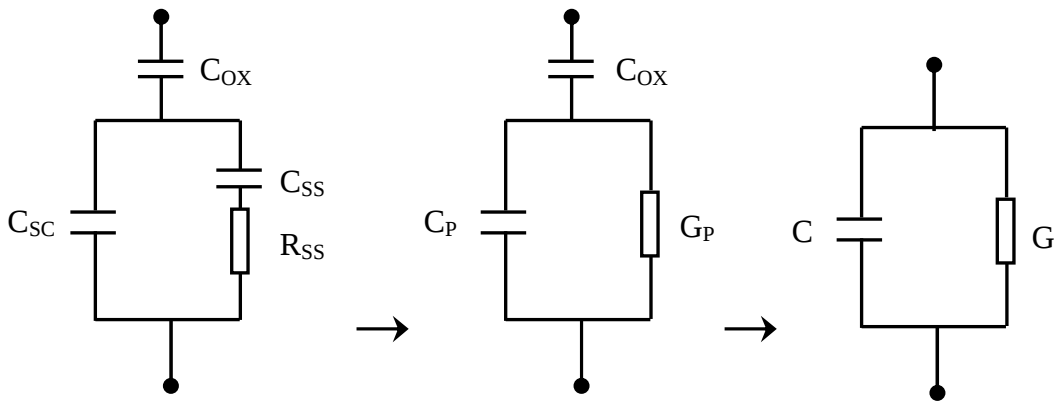
$$\frac{C_p}{C_{ox}} = \frac{1 - \frac{C}{C_{ox}}}{\left(1 - \frac{C}{C_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{G}{\omega C_{ox}}\right)^2} - 1 \quad (4.24)$$

$$\frac{G_p}{\omega C_{ox}} = \frac{\frac{G}{\omega C_{ox}}}{\left(1 - \frac{C}{C_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{G}{\omega C_{ox}}\right)^2} \quad (4.25)$$

$G_p/\omega C_{ox}-\omega$ eğrisi logaritmik ölçekte çizilince, $\omega\tau=1$ durumunda, eğri bir maksimumdan geçer. Eğrinin maksimumundan yararlanarak arayüzey durum yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{C_{ox}}{qA_{ox}} \left(\frac{G_p}{\omega C_{ox}} \right) f_N(\sigma_g) \quad (4.26)$$

ile verilir. Burada $f_N(\sigma_g)$ yakalama tesir kesiti fonksiyonudur.



Şekil 4.6. İletkenlik ölçümü durumunda eşdeğer devre

d) Hill-Coleman metodu

Bu metotta yapılan hesaplamalar her frekans değeri için yapılabilirdiği için her frekans değeri için bağıl bir durum yoğunluğu elde edilebilir. Eğer frekans yeterince yüksekse, arayüzey durumları bu yüksek frekansı takip edemeyeceğinden yoğunluk düşük çıkacaktır. Uygulanan uyarma frekansı yeterince düşükse, bu durumda arayüzey durumlarının çok büyük bir çoğunluğunun bu frekansı takip edebileceği varsayımdan arayüzeydeki tüm durumların yoğunlukları hesaplanmış olur. Düşük frekanslarda hem kapasitans hem de kondüktans değerlerinde ilave bir katkıya sahip olan arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) Hill-Coleman metodundan aşağıdaki eşitlikle elde edilebilir [32].

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / w)_{\max}}{((G_m / w)_{\max} C_{ox})^2 + (1 - C_m / C_{ox})^2} \quad (4.27)$$

burada, A MOS kapasitörün alanı, w açısal frekans, C_{ox} ise güçlü akümülayon (yığılma) bölgesindeki oksit kapasitansı, $G_m/w_{\max}$ ölçülen maksimum kondüktans ve C_m ise buna karşılık gelen kapasitans değeridir.

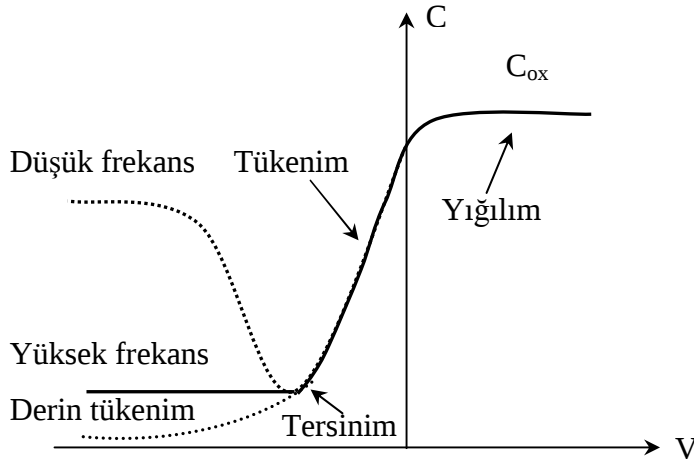
4.1.3 MOS yapının kapasitans-voltaj (C-V) eğrileri

a) İdeal C-V eğrileri

MOS kapasitöre uygulanan dc voltajıyla üç tipik kapasitans değişimi, üç farklı ölçüm koşullarında gözlenebilir [33]. Şekil 4.7’de n-MOS yapısı için, düşük frekans kapasitans-voltaj (C_{LF} -V), yüksek frekans kapasitans-voltaj (C_{HF} -V) ve derin tükenim kapasitans-voltaj (C_D -V) olmak üzere üç karakteristik kapasitans-voltaj (C-V) eğrisi gösterilmiştir.

N-tipi yarıiletkenle oluşturulmuş MOS yapısında metal plakaya büyük bir pozitif gerilim ($V > 0$) uygulandığı zaman, birçok elektron yarıiletken bölgesinden altın metal plaka altındaki yarıiletken yüzeyine doğru çekilir. Yarıiletken yüzeyinde

elektronların yüksek konsantrasyonlarının toplanması bu yüzeyi metalik gibi yapar. Bu da MOS kapasitörün paralel metal plakalı kondansatör gibi davranmasına neden olarak sabit bir oksit kapasitansı (C_{ox}) verir. Bu nedenle n-MOS üzerinde metal plakaya uygulanan pozitif gerilim düz (doğru) beslem ve negatif gerilim ters beslem olarak adlandırılır.



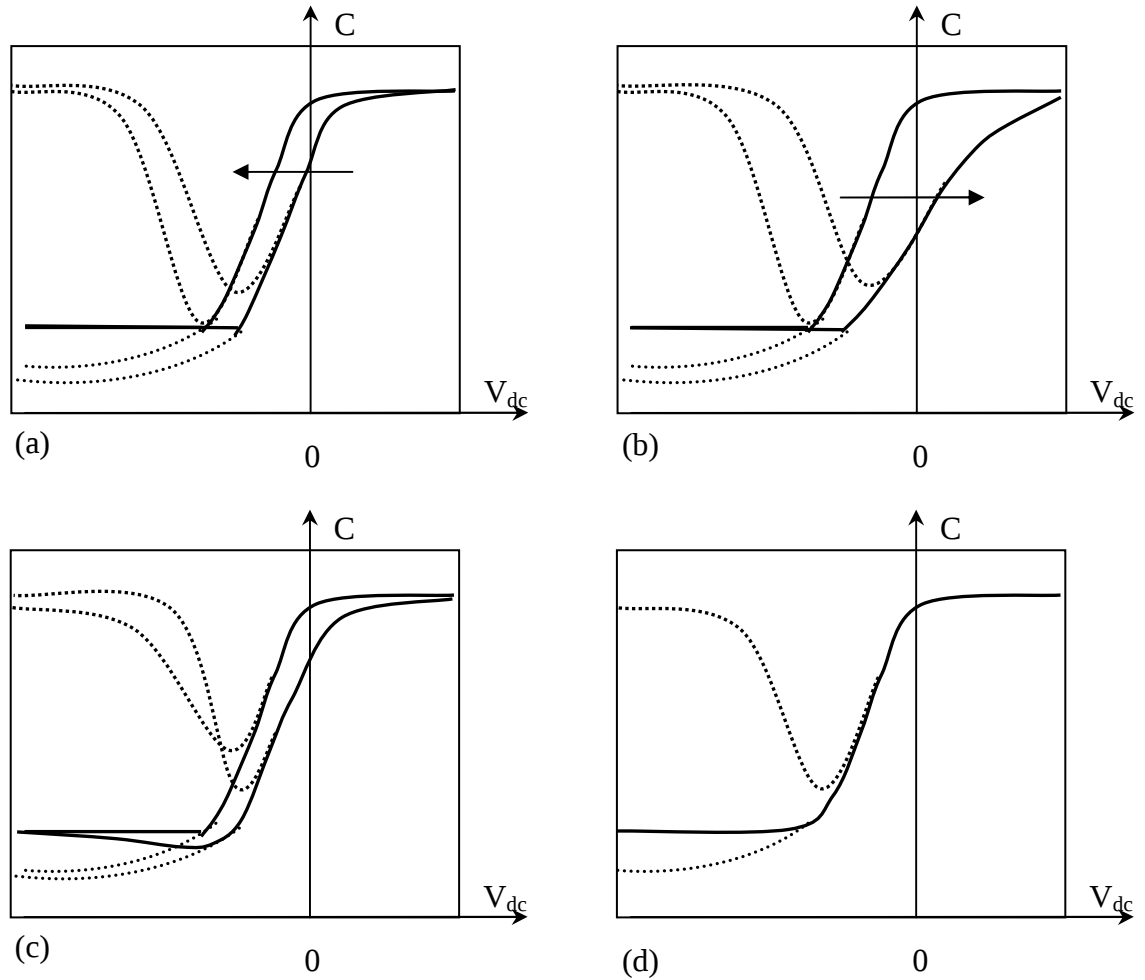
Şekil 4.7. İdeal n-MOS kapasitörün karakteristik C-V eğrileri

Ters beslemde, n-tipi yarıiletken yüzeyinden çoğunluk taşıyıcı elektronların geri çekilmesi ile yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcı deşiklerin çoğalması eş zamanlıdır. Bu durum tersinim olarak bilinir. Çünkü yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcıları çoğunluk taşıyıcılardan daha çoktur, bu da yüzeyin iletkenliğinin yani tipinin değişmesine sebep olur. Tükenim bölgesinde kapasitans azalırken tersinim bölgesinde yavaş dc taramasında tersinim yükü birikir, HF ve LF eğrileri gözlenir. Hızlı dc taramasında ise tersinim yükü birikemediğinden kapasitans derin tükenim deneye minimum değerine düşer.

b) Gerçek C-V eğrileri

Oksit/yarıiletken ($SiO_2/GaAs$) arayüzeyinde ya da yarıiletken yüzeyindeki tuzaklar arayüzey tuzakları olarak bilinirler. Genellikle C-V eğrisinde hem gerilim kayması ve hem de bükülme birlikte ortaya çıkar. Terman birçok frekansta C-V eğrisinin ölçümüyle arayüzey tuzakları ve oksit tuzaklarını ayırmıştır [29]. Şekil 4.8'de verilen deneysel C-V eğrileri ideal teorisinden farklıdır.

Uygulanan bir dc gerilim, C-V eğrisinin ideal C-V eğrisinden paralel kaymasına sebep olur. Şekil 4.8’de oksit içindeki uzay yükleri, oksit yükleri olarak bilinir. Bu yüklerin taşınması MOS kapasitörlerde elektriksel kararsızlığa sebep olmaktadır. Şekil 4.8a, oksit içinde pozitif oksit yükü olduğu zaman n-yarıiletken üzerinde üç MOS C-V eğrisinin negatif gerilim kaymasını göstermektedir. Şekil 4.8b, oksit içinde negatif uzay yükü ya da negatif oksit yükü olduğu zaman n-yarıiletken üzerinde üç MOS C-V eğrisinin pozitif gerilim kaymasını göstermektedir. Gerilim eksenine ideal C-V eğrisinin kıyaslanması Şekil 4.8c’de, yüksek frekans eğrisinin düşük kapasite platosunun yukarı doğru kayması ise Şekil 4.8d’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. n-MOS için C-V eğrileri
 (a) Pozitif oksit yüküyle
 (b) Negatif oksit yüküyle
 (c) Yüklenmiş arayüzey tuzaklarıyla
 (d) Verici yüküyle

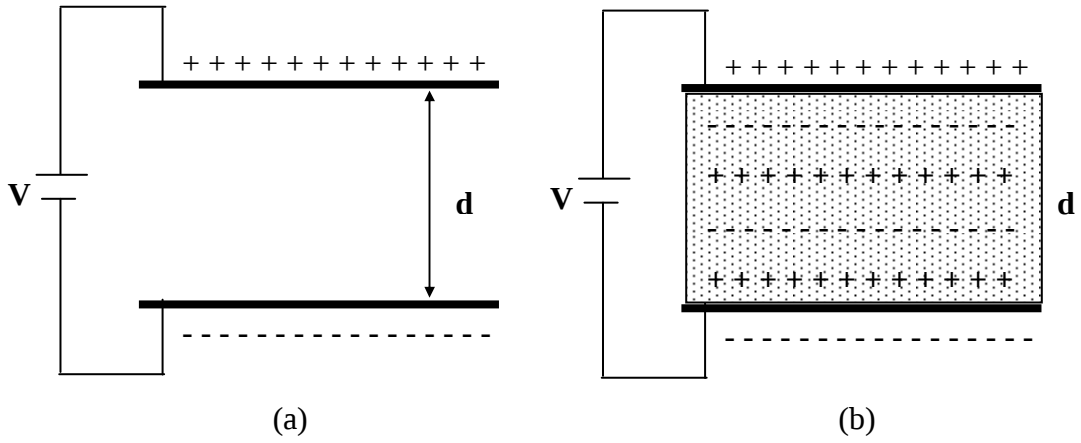
4.2. Dielektrik Özellikler

Dielektrikler, esasen bir dış elektrik alan etkisi altında içerisinde hareket edebilen serbest taşıyıcı bulundurmamalarından dolayı yalıtandırılar. Dielektriklerde tüm yükler belirli atom veya moleküllere bağlıdır ve hareketleri molekül içiyle sınırlıdır. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda olabilecek tek hareket, pozitif ve negatif yüklerin zıt yönlerde küçük yer değiştirmeleridir. Zıt yönlerde kutuplanan dielektrikteki yükler dipol momentlerini oluşturur. İçinde böyle küçük yer değiştirmelerin olduğu dielektriklere kutuplanmış dielektrikler denir. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Uygulanan bir dış elektrik alan; pozitif ve negatif yüklerin elektrostatik kuvvet altında yer değiştirerek kutuplanmasından başka, sürekli bir dipol momente sahip molekülleri de alan doğrultusunda yönlendirmeye çalışan bir kuvvet çifti etkisi altına alır. Sonuçta, net bir yönelmenin olduğu denge kutuplanması elde edilir. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alan içine konulmadan içerisinde buna benzer bir yük ayrışması vardır ve bu maddeler net bir dipol momentine sahiptir. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğu maddede bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlıdır.

Bir yalıtkan maddede bazı dış faktörlerle maddenin dielektrik özelliğinde azalma meydana gelebilir. Bir dielektrik maddeyi oluşturan atomların dış kabuklarındaki elektronların bağlı bulundukları atomlardan ayrılmaları sonucu madde içinde bir iletkenlik oluşur ve bu iletkenlik yabancı madde karışması ve özellikle nem ile artar. Eğer alternatif bir gerilim uygulanırsa, önemli bir ısınma olur ve açığa çıkan ısı bu gerilimin frekansı ile artar. Buna sebep olan dış alanın değişen yönüne göre yönelme eğilimi olan moleküllerin birbirlerine sürtünmeleridir. Komşu moleküllerle olan sürtünmeler nedeniyle molekülün alanının değişimini takip etmesi gecikir. Bu olaylarla dielektrikte ısıya dönüşen enerji “dielektrik kayıp” olarak tanımlanır. Sıcaklık arttıkça dielektrik maddenin termal enerjisi arttığından hem iletkenliği artacak hem de sürtünmeler artarak dış alanla yönelim gecikmeye uğrayacaktır. Bu nedenle artan sıcaklık genel olarak dielektrik kayıplarda artışa sebep olmaktadır [18].

4.2.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör

A yüzey alanına sahip ve aralarında d uzaklığı bulunan iki paralel plakalı bir kondansatörün plakaları arasında dielektrik bir malzeme yokken ve varken ki durumları Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. (a) Dielektriksiz (b) dielektrikli paralel plakalı kondansatör

İletken paralel plakalar arasında boşluk veya yalıtkan bir tabaka varken levhalar arasında bir yük geçişi olmaz ve plakalar bir üretcin uçlarına bağlanırsa bu kondansatör kolayca yüklenebilir. Plakalardan birinin yükü $+Q$, diğerinin yükü $-Q$ olur. Plakalar arası boş iken bu arada oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E_o = \sigma / \epsilon_o \quad (4.28)$$

ifadesi ile verilir. 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,

$$V_o = E_o \cdot d \quad (4.29)$$

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

$$C_o = Q_o / V_o = \epsilon_o A / d \quad (4.30)$$

olarak ifade edilir.

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

$$D = \sigma = \epsilon_o E_o \quad (4.31)$$

ile ifade edilir [18].

Bu kondansatörün plakaları arasındaki boşluk yalıtkan (dielektrik) bir madde ile tamamen 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.

Bir dielektrik yokken paralel plakalı kondansatörün sığası C_o , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_o ve elektrik alanı E_o olsun, plakalar arasına bir dielektrik madde konulursa potansiyel farkı ve elektrik alan $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. Yani,

$$V = V_o / \epsilon' \quad (4.32)$$

$$E = E_o / \epsilon' \quad (4.33)$$

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

$$C = Q_o / V = \epsilon' Q_o / V_o = \epsilon' C_o \quad (4.34)$$

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

$$C = \epsilon' \epsilon_0 A / d \quad (4.35)$$

olarak ifade edilebilir.

4.2.2. Dielektrik kutuplanma

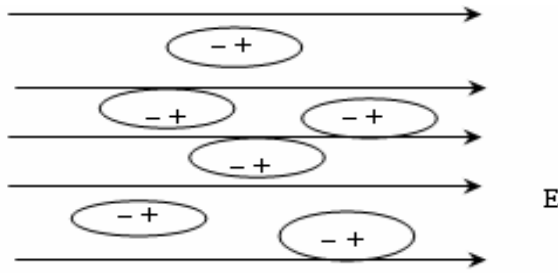
Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik (yalıtkan) yerleştirildiği zaman potansiyelin azalması, elektrik alan şiddetinin ($E=V/d$) azalmasını ve dolayısıyla birim yüzeydeki net yükün azalmasını gerektirir. Bu da ancak, dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yüklerin meydana gelmesiyle mümkündür. Bu durum lokaldır ve yalıtkan içinde serbest olmayan yükler uygulanan dış elektrik alanla uzak mesafelere yer değiştiremezler.

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 çakışır. H_2 , N_2 , O_2 gibi simetrik moleküller polar değildirler. Fakat bir dielektrik elektrik alan içine yerleştirildiği zaman, bir yük hareketi olmamakla beraber elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğinden çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük boyutlarda (atomik) dielektrik kutuplanarak dipolar haline geçerler. Dipolar hale geçen bu moleküllerde 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. Geri çağırıcı kuvvetler dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvete eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle değişir, bu nedenle verilen bir alan için yüklerin yer değiştirmesi yani kutuplanması farklı olur. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam

bir yönelim olmaz. Fakat uygulanan elektrik alan şiddeti arttıkça ve sıcaklık azaldıkça yönelme derecesi artar [34].

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 4.10'da ki gibi alana paralel olacak şekilde yönelirler [35]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar.



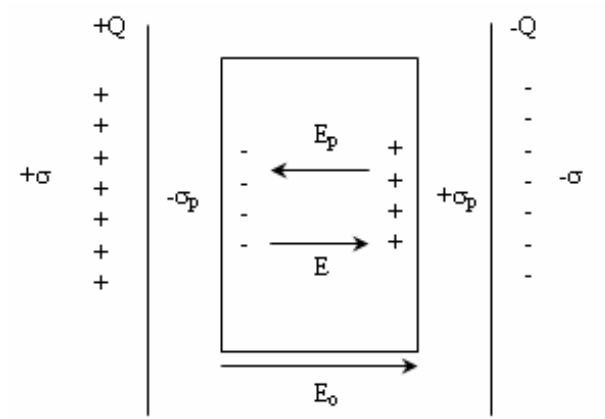
Şekil 4.10. Dipollerin dış elektrik alan etkisiyle yönelimleri

Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektriğin levhalara yakın olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yüklerinin oluşturduğu elektrik alan dış elektrik alana ters yönde olup, levhalar arasındaki toplam elektrik alanı azaltmaktadır. Bu durum Şekil 4.11'deki gibi açıklanabilir. Şekilde görüldüğü gibi düzgün bir E_0 elektrik alanı 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. 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_0 , dielektrik bulunmadığı zamanki alan şiddetini ve E_p ise polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti gösterilirse, bileşke alan bunların

vektörel toplamına eşit olur.



Şekil 4.11. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_p \quad (4.36)$$

E_o polarize eden alan ile, polarize yüklerden ileri gelen E_p alanı zıt yönlüdürler. 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 $(\sigma - \sigma_p)$ olur. σ serbest yük yoğunluğu, E_o elektrik alanına,

$$E_o = \frac{\sigma}{\epsilon_o} \quad (4.37)$$

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

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (4.38)$$

bağıntısı ile bağlı olur. Bu nedenle dielektrik içindeki alan yani bileşke alan şu şekilde olur:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (4.39)$$

Paralel levhalar arasında dielektrik madde varken, levhalar arasındaki potansiyel farkı, elektrik alan ve sistemin kapasitansı aşağıdaki gibi verileceği bulunmuştur.

$$V = \frac{V_o}{\epsilon'} \quad (4.40)$$

$$E = \frac{E_o}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_o} \quad (4.41)$$

$$C = \epsilon' C_o \quad (4.42)$$

Burada C_o , E_o ve V_o , dielektrik yokken kondansatörün kapasitesi, elektrik alanı ve potansiyel farkıdır. Dielektrikli paralel plakaların kapasitansı, $C_o = \epsilon_o A/d$ eşitliği yerine konularak,

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_o A}{d} \quad (4.43)$$

olarak elde edilir. Eş. 4.41, Eş. 4.39'da yerine konulursa,

$$\frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_o} = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (4.44)$$

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (4.45)$$

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 $\epsilon' = 1$ ve $\sigma_p = 0$ olur. Buna karşın, dielektrik yerine bir iletken yerleştirilirse $E = 0$ olur, o zaman $E_o = E_p$ elde edilir ki bu $\sigma_p = \sigma$ karşılık gelir. Yani, iletken üzerinde kutuplanan yük, plakalar üzerindeki yüklerle eşit ve zıt işaretli olacak, dolayısıyla iletkendeki net alan sıfır olacaktır [1].

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

$$P = \epsilon_o \chi E \quad (4.46)$$

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

$$\chi = (\epsilon' - 1) \quad (4.47)$$

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

$$D = \epsilon_o E + P \quad (4.48)$$

ifadesiyle verilir. Eş. 4.46, Eş. 4.48'de yerine konulursa,

$$D = \epsilon_o (1 + \chi) E = \epsilon_o \epsilon' E \quad (4.49)$$

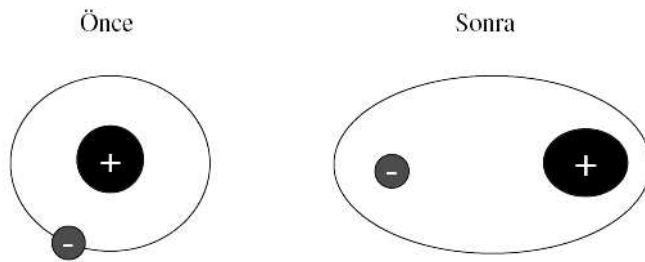
olarak elde edilir [34,36,37].

4.2.3. Kutuplanma mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayanlar diye ikiye ayrılabilir. Polar maddeler, moleküllerindeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezlerinin bir noktada çakışmamasından dolayı kalıcı bir elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift-kutup momentleridir ve bunlara çift kutuplu maddeler denir. Dielektriklerde temelde dört tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik, yönelme ve uzay yükü kutuplanmalarıdır [37,38].

a) Elektronik kutuplanma

Bir dış 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 çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kaymasıdır (Şekil 4.12). Elektronun kütlesi oldukça küçük olduğundan uygulanan dış elektrik alanla kısa bir süre içinde oluşur (10^{-15} sn).



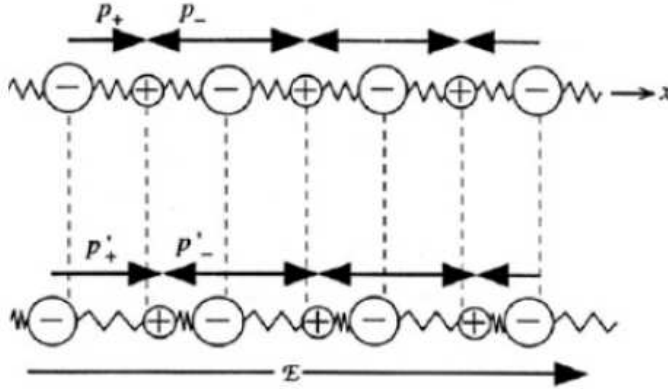
Şekil 4.12. Elektronik kutuplanma

İyonik yapılmı olmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ($n^2 = \epsilon$). Buna Maxwell ilişkisi denilmektedir. Bunun fiziksel içeriği şöyle açıklanabilir: elektromanyetik dalganın elektrik vektörü madde içindeki yüklere, başlangıçtaki konumlarını değiştirecek kuvvet uygular ve sonuçta bir çift-kutup

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 aynıyla 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 teoremin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin (ϵ') değeri “1” olacak ve gecikme olmayacağından $n = 1$ olur.

b) İyonik kutuplanma

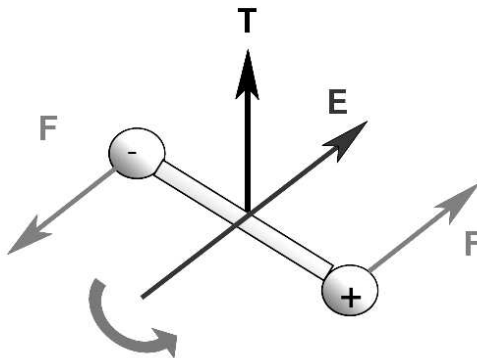
İyonik kutuplanmada, molekülleri farklı tip atomlar oluşturduğundan, bu atomlar elektronları simetrik olarak paylaşmayacaklardır. Yani, elektron bulutunun yük merkezi kayarak daha kuvvetli bağlayıcı atoma doğru yönelecektir. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler kazanırlar ve bu net yüklere etkiyen bir dış elektrik alan, atomların kendi aralarındaki denge konumlarını değiştirecektir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir tip etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelecektir (Şekil 4.13). Bu, dielektriğin iyonik kutuplanmasıdır. Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü, her ikisinde de yüklerin alan doğrultusunda birbirlerine göre konum değiştirmesidir ve dolayısıyla bu iki kutuplanmaya etkileşmeli kutuplanma denmektedir. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma için de oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13} - 10^{-12} s). Bu kutuplanmanın varlığında Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağlı dielektrik katsayısı her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük olacaktır.



Şekil 4.13. İyonik kutuplanma

c) Yönelme kutuplanması

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift-kutup momentleri içeren, polar dielektriklerde oluşur (10^{-9} - 10^{-3} s). Bazı dielektriklerde kuadropol (dört kutuplu), oktipol (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 (Şekil 4.14). 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.

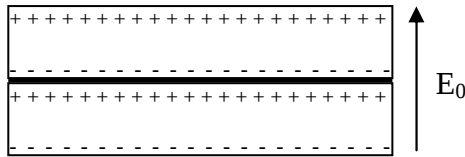


Şekil 4.14. Yönelme kutuplanması

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 statik dielektrik sabiti ϵ_r “1” değerine ulaşır [35]

d) Uzak yükü (Space charge) kutuplanması

Etkileşmeli kutuplanmalar genel olarak uygulanan bir dış elektrik alan etkisiyle yüklerin birbirinden ayrılmasıyla, yönelme kutuplanması ise dipollerin elektrik alanına paralel olarak dönmesiyle oluşur. Uzak yükü ya da arayüzey kutuplanmasında da etkileşmeli kutuplanmalara benzer bir durum olmasına karşın, buradaki polarizasyonu bir birinden izole yerel katmanlar oluşturmaktadır. Bu durum arayüzey kutuplanmasının genel olarak polikristaller, elektriksel açıdan heterojen materyaller ya da birbirinden yalıtılmış tabakalar içeren yapılarda gözlenir. MOS yapılarıdaki arayüzey yalıtkan tabakanın varlığı, gerek yarıiletken ve gerekse yasak enerji aralığındaki yerel safsızlıklar ve kusurlar bu kutuplanma mekanizmasının oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bu kutuplanma mekanizması düşük ve orta frekanslarda etkin bir mekanizmadır.



Şekil 4.15. Uzak yükü kutuplanması

Polarizasyonun bu tipine Maxwell-Wagner polarizasyonu denir. Burada, polarize olmuş birbirinden yalıtık katmanlar birbirinden farklı kapasitörler gibi davranarak arayüzey potansiyelini ve elektrik alanını değiştirirler.

4.2.4. Negatif dielektrik sabiti ve negatif kapasitans

Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1'den büyük olduğu düşünülür fakat negatif kapasitans ve negatif dielektrik sabiti olgusu, p-n eklemler, Schottky kontaklar ve GaAs yarıiletkenli cihazlar gibi birçok elektronik cihazda gözlenmiştir. Gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($\tau_d \gg \tau_0$) birçok farklı mekanizma yardımıyla kapasitansın hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür [39,40]. Değişik cihazlardaki negatif kapasitansın mikroskobik boyuttaki fiziksel mekanizması; kontak enjeksiyonu, arayüzey durumları veya azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuna atfedilmektedir [39,40]. Negatif kapasitansın oluşması, elektrotlardaki (tabakalar) yükün artan gerilim voltajıyla azalması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir. Negatif kapasitans, malzemenin indükleyici bir davranış gösterdiği anlamına gelmektedir [41]. Azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuyla negatif kapasitans oluşumu sadece doğru beslemde ve düşük frekanslarda gözlenebilmektedir [39].

Dielektrik gevşeme zamanının ($\tau_d = \rho \epsilon \epsilon_0$) azınlık taşıyıcıların oluşma ve yeniden birleşme ömründen (τ_0) küçük veya büyük olup olmamasına göre yarıiletkenler başlıca iki farklı gruba ayrılabilirler [40]. $\tau_d \gg \tau_0$ durumuna gevşeme durumu (relaxation case) ve bu tür yarıiletkenlere de gevşemiş yarıiletkenler (relaxation semiconductor) denir. Bu durumun tersi ise $\tau_0 \gg \tau_d$ olan uzun ömürlü durum (lifetime case) bu tür yarıiletkenlere de uzun ömürlü yarıiletkenler (lifetime semiconductor) denir. Bu gevşeme mekanizması kontak yapıdaki elektronik cihazlarda negatif kapasitans ve dolayısıyla negatif dielektrik sabitine neden olmaktadır. N tipi bir relaxation yarıiletken içeren kontakta ileri doğru beslemlerde, deşik enjeksiyonu oluşarak bu deşikler kontak kenarındaki serbest dipol taşıyıcısı olan elektronlarla birleşirler. Bu nedenle kontak kenarındaki yük dipolü azalır. Bu durum büyük bir negatif kapasitans etkisine neden olur. Çünkü yeniden birleşme (recombination) mekanizması güçlüdür ve kontak yüklerinin çok yakınlarına kadar sokulabilirler. Bu negatif kapasitans etkisi yaratılma-yeniden birleşme (g-r) merkezlerinin yoğunluğu ve iyonize uzay-yükü tuzaklarının etkisiyle meydana gelmektedir [41].

4.2.5. Dielektrik sabitinin ölçülmesi

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,

$$Y = G + j\omega C \quad (4.50)$$

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

$$Y = G + j\omega(C_0 \epsilon^*) \quad (4.51)$$

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

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4.52)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu durumda admitans;

$$Y = G + j\omega C_0 (\epsilon' - j\epsilon'')$$

$$Y = (G + \omega \epsilon'' C_0) + j\omega C_0 \epsilon' \quad (4.53)$$

olur [36,37,42].

Buna göre admittansın reel ve imajiner bileşenleri elde edilmiş olur. Empedans ise admittansın tersi ($Z=1/Y$) olup;

$$Z = \frac{1}{G + j\omega C} = \frac{1}{G + j\omega C_0 \epsilon^*} \quad (4.54)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eş. 4.52, Eş. 4.54'de yerine yazılırsa gerçel ve sanal kısımların çözümleri;

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad \text{ve} \quad \epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (4.55)$$

olarak elde edilir [36,43].

Bir dielektrik maddeye ac uyarıcı gerilim ($V=V_0 \cos \omega t$) uygulandığında, numuneden geçen akım,

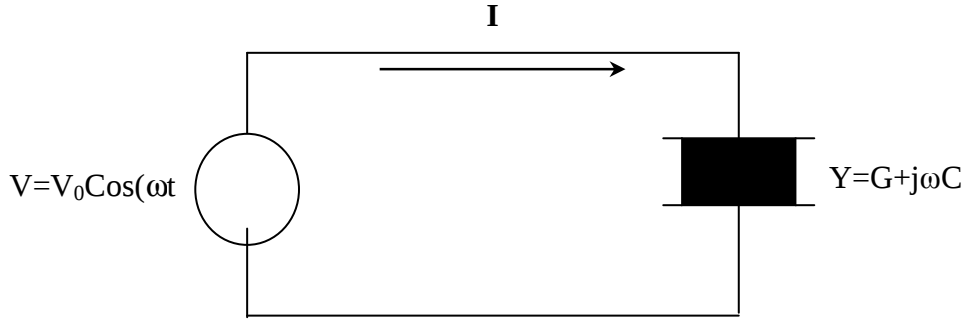
$$I = (\epsilon^* C_0) \frac{dV}{dt} \quad (4.56)$$

olarak ifade edilir. Numuneden geçen akım,

$$I = I_R + jI_C \quad (4.57)$$

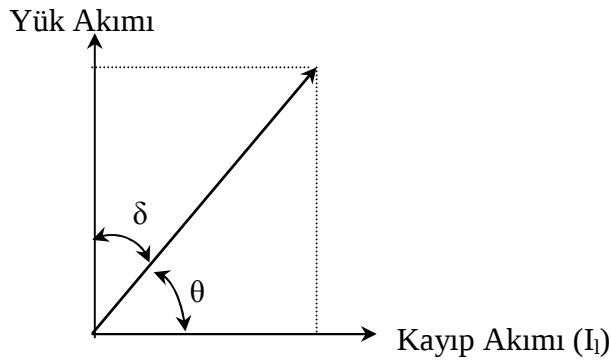
olarak ifade edilir

I_R ; uyarma gerilimi ile aynı fazda olan, reel yada dirençsel bileşen olarak adlandırılır.
 I_C ; uyarma gerilimi ile farklı fazda olan, imajiner ya da sığasal bileşen olarak adlandırılır.



Şekil 4.16. Dielektrikli bir kondansatördeki ac akım.

Numuneden geçen akım, bileşenleri ile birlikte Şekil 4.17.'de verilen fazör diyagramında görülmektedir.



Şekil 4.17. Dielektrikli bir kondansatörde yük akımı ile kayıp akımı arasındaki ilişki

Bu diyagramda görülen δ terimi, numune üzerindeki ac uyarıcı gerilim etkisiyle, bir dielektrik maddenin periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan \delta$ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin bir periyot kayıp miktarı biçiminde dielektrik tanjant yada kayıp açısı olarak ifade edilir. Ölçüm esnasında, akımın dirençsel bileşeninin sığasal bileşene oranı olarak elde edilir. Buna göre,

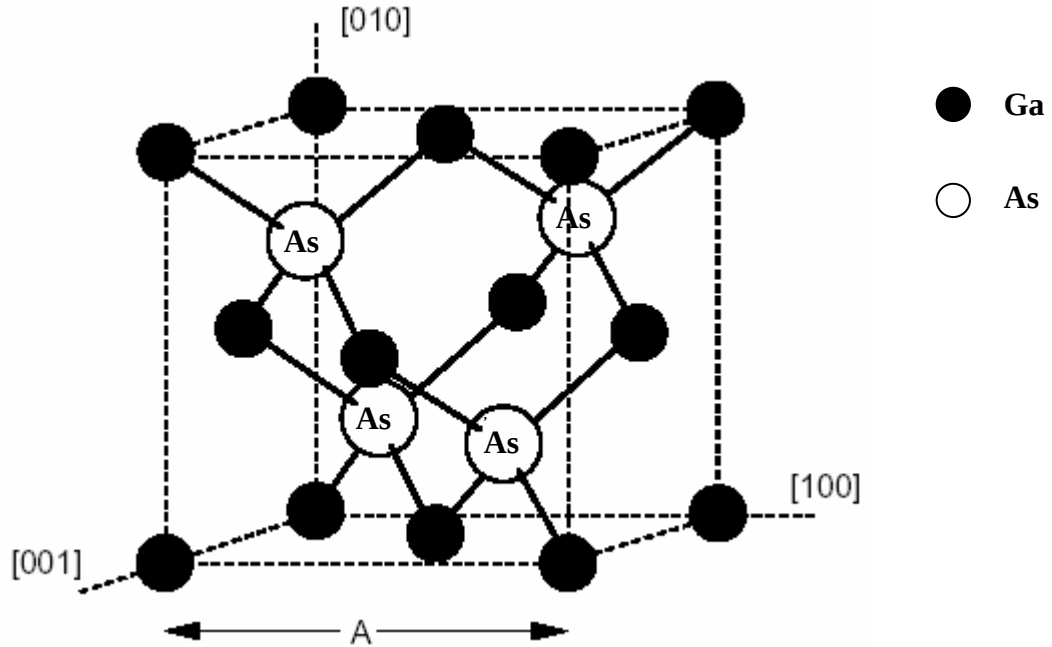
$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (4.58)$$

kayıp açısı faktörünü ifade eder [42,44].

5. DENEYSEL YÖNTEM

5.1. MOS Yapımında Kullanılan Galyum Arsenide (GaAs) Kristalinin Temel Fiziksel Özellikleri

Gallium-arsenide (GaAs) galyum (Ga) ve arsenik (As) elementlerinden oluşmuş III-V grubu bir bileşik yarıiletkenidir. GaAs Zincblende örgü yapısında kübik bir kristaldir. Bir GaAs kristal yapısının birim hücresi Şekil 5.1’ de gösterilmiştir. Burada siyah noktalar Ga atomlarını, beyaz noktalar ise As atomlarını göstermektedir. Kristal yapının örgü sabiti a olmak üzere; Ga atomları yüzey merkezli kübik örgü (fcc) şeklinde yerleşmiş olup, As atomları ise alt ve üstteki çapraz köşelerden karşılıklı olarak Ga atomlarından $a/4$ uzaklıkta merkeze yönelmiş olarak yerleşmişlerdir. Her bir As atomu kendine en yakın dört Ga atomuyla bağ yapmıştır.



Şekil 5.1. GaAs kristalinin birim hücresi

GaAs; mikrodalga frekanslı entegre devrelerde, kızılötesi LED’lerde, lazer diyotlarda, güneş pillerinde ve diğer birçok uygulamada kullanılan önemli bir yarıiletkenidir. GaAs, silikona (Si) göre daha kaliteli elektronik özelliklere sahip bir

yarıiletken malzeme olup, 250 GHz'in üzerinde bile çalışabilen transistörler yapılmasını sağlayan doygun elektron hızı ve daha yüksek elektron mobilitesine sahiptir. Ayrıca yüksek frekanslarda GaAs malzemeli cihazlar silikonlu cihazlara göre daha az gürültü üretirler. Yine daha yüksek kırılma (breakdown) voltajları dolayısıyla silikona göre daha yüksek voltajlarda çalıştırılabilirler. Bu özellikleri dolayısıyla GaAs devreleri özellikle mobil telefonlar, uydu iletişimleri, noktadan-noktaya mikrodalga bağlantıları ve bazı radar sistemleri için özellikle tercih edilirler. Buna ilaveten mikrodalga üretici olarak GaAs diyotlar kullanılır. GaAs'ın, dolaylı (indirect) bant aralıklı silikona göre diğer bir avantajı ise doğrudan (direct) bant aralığına sahip olmasıdır ki bu da GaAs'ın ışık yayıcı (LED veya LASER) olarak verimli bir şekilde kullanılması anlamına gelir. Saf bir gallium-arsenide (GaAs) kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir .

Çizelge 5.1. Gallium-arsenide (GaAs) yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 K) temel bazı fiziksel özellikleri

Atom ağırlığı (g/mol)	144,63
Atom/cm ³	4,42 x 10 ²²
Kristal yapısı	Zinc Blende
Örgü sabiti (Å)	5,65
Yoğunluğu (g/cm ³)	5,32
Öz direnci (Ohm.cm)	1,0 x 10 ⁸
Dielektrik sabiti (statik-yüksek frekans)	12,9-10,89
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N _c (cm ⁻³)	4,7 x 10 ¹⁷
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N _v (cm ⁻³)	7,0 x 10 ¹⁸
Elektronların etkin kütlesi, (m _e) m*/m _o	0,063
Deşiklerin etkin kütlesi, (m _h) m*/m _o	0,51
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4,07
Yasak enerji aralığı (eV)	1,424
Hareketliliği (cm ² /V.s) (Elektron için)	8500
Hareketliliği (cm ² /V.s) (Deşik için)	400
Erime sıcaklığı (°C)	1238

5.2. MOS Yapımında Kullanılan SiO₂ Yalıtkanının Temel Fiziksel Özellikleri

Dielektrik (yalıtkan) tabakalar genel olarak elektronik devreleri birbirinden izole etmek ve cihazı mekanik ve kimyasal olarak korumak için kullanılırlar. MOS yapılarda ise metal ve yarıiletken arasındaki izolasyonu sağlamak için kullanılır. Son zamanlarda kullanılmaya başlayan dielektrik sabiti çok büyük yalıtkanlar olmasına rağmen SiO₂, gerek Si ve gerekse diğer yarıiletkenlerle birlikte halen sıklıkla kullanılmaktadır. SiO₂ özellikle Si kullanılan kontak yapılarda, örgü sürekliliği ve arayüzey safsızlıklarının diğer yalıtkanlara göre daha iyi olması, yarıiletken üzerine kolay büyümesi ve özelliklerinin iyi biliniyor olması nedeniyle tercih edilmektedir. Çünkü bir MOS yapıdaki arayüzey tabakasının kusursuzluğu ve dielektrik özellikleri cihazın tüm karakteristiklerini etkilemektedir. Yalıtkan tabakada veya yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde oluşacak bir kusur, homojensizlik, örgü bozukluğu veya safsızlık yasak enerji aralığında izinli bir durum gibi davranarak cihazın verimini düşürür. Bu nedenle arayüzey yalıtkan tabakanın mümkün olduğunca kusursuz olmasına ve iyi nitelikli bir yalıtkan olmasına dikkat edilmelidir. MOS yapısını oluşturmak üzere, metal/yarıiletken arayüzeyine oluşturulan yalıtkan tabaka olan silisyum-dioksitin (SiO₂) bazı fiziksel özellikleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Silisyum-dioksit’in oda sıcaklığındaki (300 K) temel bazı fiziksel özellikleri

Atom ağırlığı (g/mol)	60,07
Kristal yapısı	Amorf
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,2
Öz direnci (Ohm.cm)	$1,0 \times 10^{14}$ - $1,0 \times 10^{16}$
Dielektrik sabiti	3,9
Dielektrik sertlik (V/cm)	10^6 - 10^7
Yasak enerji aralığı (eV)	9
Erime sıcaklığı (°C)	~1600

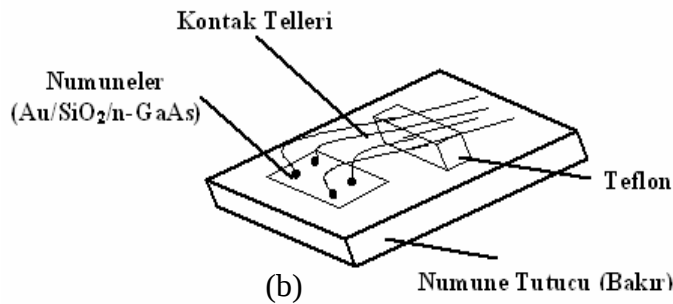
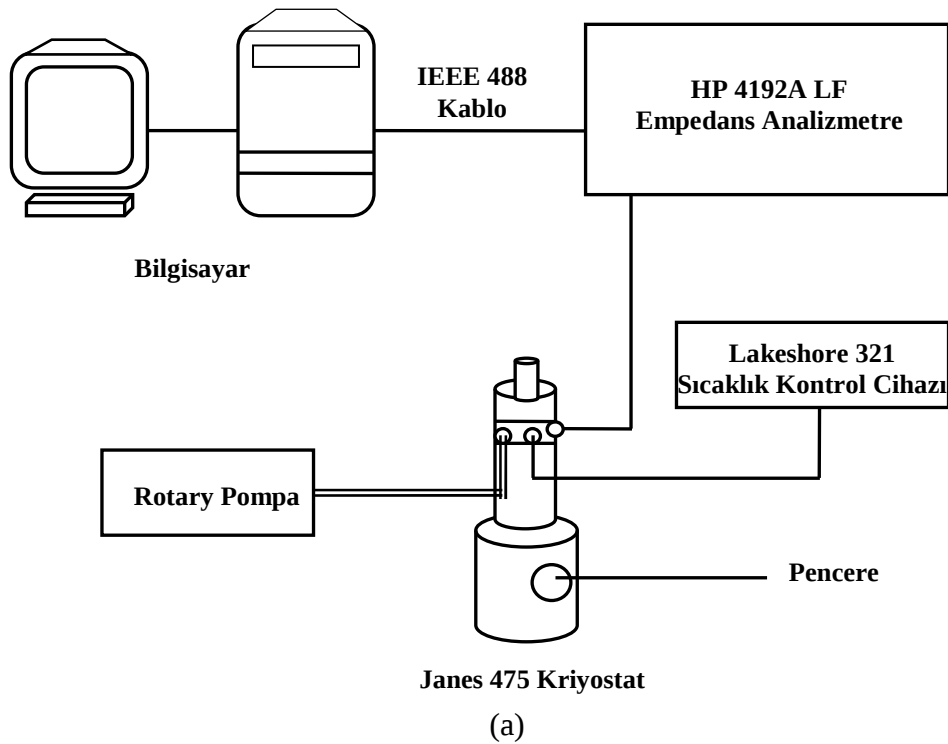
5.3. MOS Yapıların Hazırlanması

Kullanılan MOS yapılar hazırlanırken yarı iletken olarak, 2" (=5.08 cm) çaplı, 350 μm kalınlıklı, $2\text{-}3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğuna sahip, (100) yönelimli n-tipi GaAs kullanılmıştır. Fabrikasyon aşamasında; ilk önce GaAs dilimi (wafer), üzerindeki doğal oksit tabakasını temizlemek için birkaç saniyeliğine amonyum peroksit içine daldırılmıştır. Omik kontağı oluşturmak için 10^{-7} Torr basınçlı bir vakum sisteminde, Au/Ge/Ni alaşımı GaAs diliminin arka yüzeyine tamamını homojen olarak kaplayacak şekilde buharlaştırılmış ve 430 °C de 40 saniye tavlansmıştır. Yalıtkan SiO_2 tabakası ise PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) tekniği kullanılarak GaAs dilimin üst yüzeyine kaplanmıştır. PECVD sisteminde Si kaynağı olarak silan (SiH_4) gazı ve oksijen kaynağı olarak ise O_2 gazı kullanılmıştır. Bu yalıtkan oksit tabakası kaplama işleminden sonra GaAs dilimler tekrar vakum sistemine alınarak oksitli yüzeyi üzerine konulan 1mm çaplı dairesel boşluklu bir metal maske yardımıyla, metal üst kontakları (Schottky) oluşturmak için yüksek saflıktaki (%99,999) altın (Au) yaklaşık 2 Å/s hızıyla buharlaştırılmıştır. Buharlaştırılan metal tabaka kalınlığı ve birikme hızı kuartz kristal kalınlık monitörü (quartz crystal thickness monitor) yardımıyla kontrol edilmiştir. Arayüzey oksit tabaka (SiO_2) her bir dilim için farklı kalınlıkta oluşturulmuş olup, omik ve metal kontaklar ise aynı şartlarda oluşturulmuştur. Au/ SiO_2 /n-GaAs yapısı hazırlanırken, GaAs yarıiletkenlerinin alt yüzeyine omik kontaklar ve üst yüzeyine yalıtkan SiO_2 tabakaları Weizmann bilim enstitüsünden (Weizmann Institute of Science/Israel) oluşturulmuş olarak temin edilmiş olup doğrultucu kontaklar ise Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırmalar Laboratuvarında yapılmıştır.

5.4. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Fiziksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırmalar Laboratuvarında yapılmıştır. Kapasitans-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/w-V) ölçümlerinde Hawlett Packard 4192A LF Empedance Analyzer (empedansmetre) (5Hz–13MHz) kullanılmıştır. Tüm bu

ölçümler Hewlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir. Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) yapısının farklı frekans, sıcaklık ve oksit kalınlıkları için yapılan kapasitans ve kondüktans ölçümleri HP 4192A LF empedansmetre (5 Hz–13 MHz) ile 40 mV_{rms} test sinyali ile yapılmıştır. Tüm bu ölçümler 77-450 K aralığında ölçüm yapılabilen sıcaklık kontrollü Janes vpf-475 kriyostat içinde gerçekleştirilmiştir. Numune sıcaklığı; copper-constantan thermocouple ve ± 0.1 K'e duyarlı Lakeshore 321 auto-tuning sıcaklık kontrol cihazıyla sürekli olarak kontrol edilmiştir. Kapasite-gerilim(C-V) ve iletkenlik-gerilim(G/w-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. (a) Kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G/w-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek (b) Kriyostat içindeki numuneler

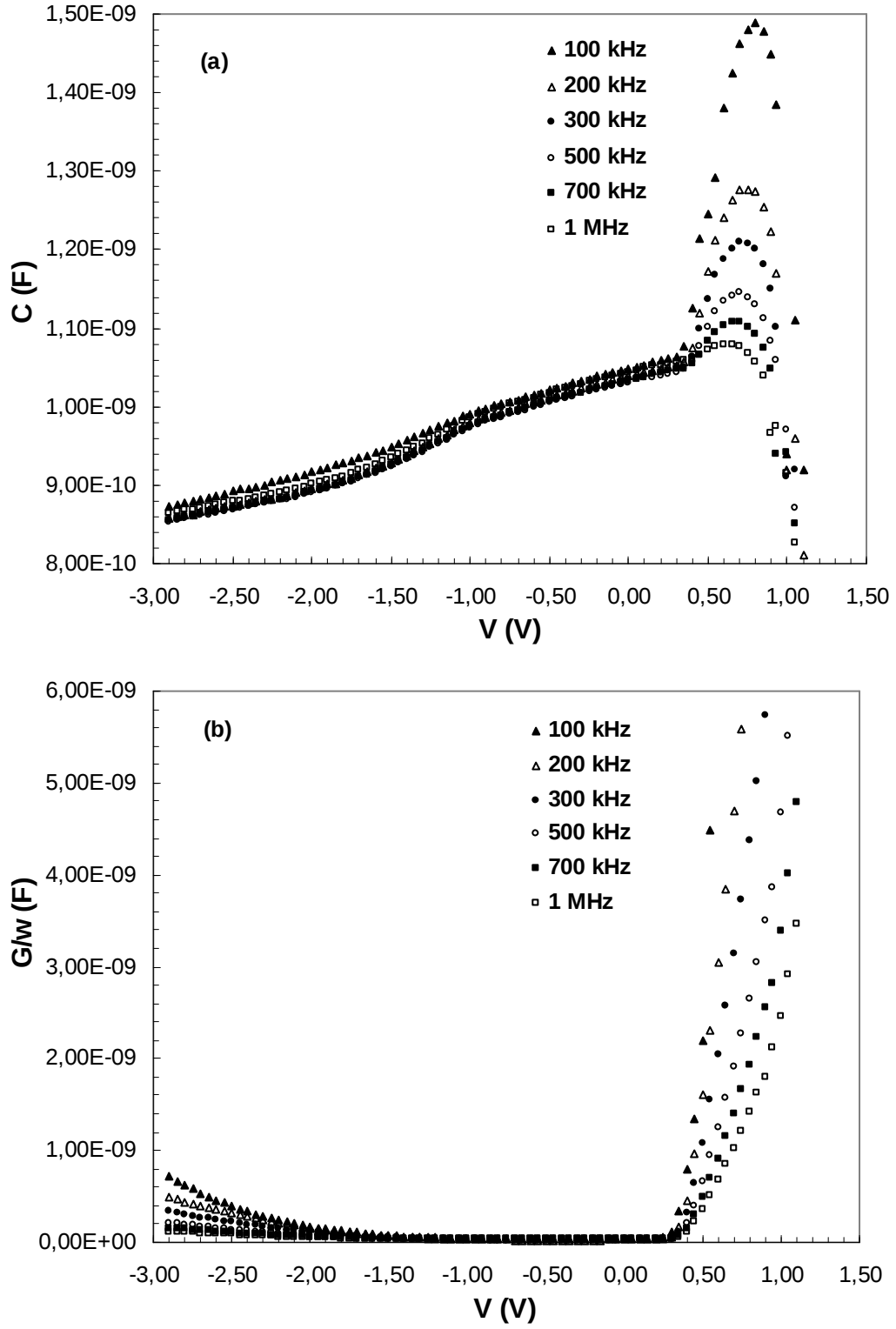
6. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE BULGULAR

Yukarıda bahsedilen aşamalardan sonra oluşturulan farklı yalıtkan oksit kalınlığına sahip Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) yapılar, oksit kalınlıklarına göre sırasıyla M1 ($d_{ox}=130$ Å), M2 ($d_{ox}=163$ Å) ve M3 ($d_{ox}=240$ Å) şeklinde isimlendirilmiştir. Bu MOS yapıların C-V ve G/w-V ölçümleri değişik frekans ve sıcaklıklar için yapılarak elde edilen veriler ve sonuçlar aşağıda grafikler ve çizelgeler şeklinde verilmiştir.

6.1. Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerin Frekans Bağımlılığı

6.1.1. Elektrik karakteristikler

Şekil 6.1(a) ve (b) M2 MOS yapısının kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/w-V) karakteristiklerinin frekansla değişimini göstermektedir. Gerek C-V gerekse G/w-V eğrileri özellikle pozitif gerilim bölgesinde bir frekans dağılımına sahiptir. Bu bölgede belirgin olarak kapasitans ve kondüktans artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekanslardaki kapasitans ve kondüktans değerlerinin büyüklüğü GaAs/SiO₂ arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dolup boşalma zamanının frekans bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda her bir C-V eğrisi, MOS yapının seri direncinin varlığından dolayı yığılma bölgesinde anormal bir pik vermektedir. Bu C-V piklerinin büyüklüğü artan frekansla hızla azalırken konumu ise negatif gerilim bölgesine doğru kaymakla beraber fazla değişmemektedir. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyali takip edebilmesi sonucu frekansa bağlı olarak bir ilave kapasitans meydana gelmektedir. Buna karşın yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumları ac sinyali takip edemez ve bu da arayüzey kapasitansını ihmal edilebilecek kadar küçültür [1,4,6,12,45,46].



Şekil 6.1. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) C-V (b) G/w -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı

Hem kapasitans hem de kondüktans değerlerinin yığılma bölgesinde sabit bir değere gitmesi beklenirken, 1 Volt değerinden sonra kapasitans eğrileri hızla sıfıra düşerken iletkenlik eğrileri ise hızla artmaktadır. Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1'den büyük olduğu düşünülür fakat gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($\tau_d \gg \tau_0$) birçok farklı mekanizma yardımıyla kapasitansın hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür [39,40]. Negatif kapasitans ve negatif dielektrik sabiti durumu, p-n eklemler, Schottky kontaklar ve GaAs yarıiletkenli cihazlar gibi birçok elektronik cihazda gözlenmiştir [39]. Değişik cihazlardaki negatif kapasitansın mikroskobik boyuttaki fiziksel mekanizması; kontak enjeksiyonu, arayüzey durumları veya azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuna atfedilmektedir [39]. Negatif kapasitansın oluşması, elektrotlardaki (tabakalar) yükün artan gerilim voltajıyla azalması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir. Negatif kapasitans, malzemenin indükleyici bir davranış gösterdiği anlamına gelmektedir [41]. Azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuyla negatif kapasitans oluşumu sadece doğru beslemde ve düşük frekanslarda gözlenebilmektedir [39]. Kontak durumundaki GaAs yarıiletkenli elektronik cihazlarda (Schottky, MIS, MOS), arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile böyle bir durum söz konusudur. Aşağıda yoğunluğu değişik frekanslar için hesaplanmış olan arayüzey durumları ve yarıiletken arka yüzeyindeki omik kontak enjeksiyonu ile ileri pozitif gerilimlerde verilen tüm frekanslar için, kapasitans değerlerinde hızlı bir düşüş görülürken (Şekil 6.1(a)) kondüktans değerlerinde ise hızlı bir artış görülmektedir (Şekil 6.1(b)).

Ayrıca arayüzeyde oluşturulan SiO₂ tabakasının dielektrik sertliği 10^6 - 10^7 V/cm aralığındadır. Özellikle PECVD benzeri sistemlerde büyütülen SiO₂ tabakasının dielektrik sertliği 10^6 V/cm' ye kadar düşebilmektedir. Bu durum birkaç yüz Å kalınlığında ki yalıtkan arayüzey tabakası (SiO₂) için kırılma gerilimini yaklaşık 1-2 V civarına kadar düşürebilmektedir. Bu durumda SiO₂ tabakası artık bir yalıtkan vazifesi göremez ve dolayısıyla kapasitans hızla sıfıra düşerken kondüktansın artması beklenir. Bu durum Şekil 6.1(a) ve (b)'de görülen kapasitans değerlerindeki hızlı azalma ve kondüktans değerlerindeki hızlı artmaya diğer bir nedenidir.

Tüm frekanslarda hem kapasitans hem de kondüktans değerlerinde ilave bir katkıya sebep olan arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) Hill-Coleman metodundan aşağıdaki eşitlikle elde edilebilir [32].

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / w)_{\max}}{((G_m / w)_{\max} C_{OX})^2 + (1 - C_m / C_{OX})^2} \quad (6.1)$$

burada, A MOS kapasitörün (üst doğrultucu kontağın) alanı, w açısal frekans, C_{ox} ise kuvvetli akümülayon (yığılm) bölgesindeki oksit kapasitansdır.

Hill-Coleman metoduyla hesaplanan arayüzey durumlarının yoğunluğu Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, N_{ss} değerleri artan frekansla hızla azalmaktadır ve frekansın 100 kHz den 1 MHz’e çıkmasıyla N_{ss} değerleri sırasıyla $1,00 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ den $9,38 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ye düşmüştür. Bu durum, arayüzey durumlarının ac sinyali takip etme hızının artan frekansla azalmakta olduğunu göstermektedir. Nicollian ve Brews’e göre [11], $f \geq 1 \text{ MZ}$ için hiçbir arayüzey durumu ac sinyalini takip edemezken, $f \leq 100 \text{ Hz}$ için ise tüm arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilmektedir. Yine Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi, azalan frekansla hem C hem de G/w değerleri, arayüzey durumlarının katkısından dolayı artmaktadır.

Çizelge 6.1. Değişik frekanslar için oda sıcaklığında ki C-V ve G/w-V ölçümlerinden hesaplanan N_{ss} değerleri

F(kHz)	V (V)	C_m (F)	G_m/w (F)	$N_{ss} (\text{eV}^{-1} \text{ cm}^{-2})$
100	0,80	$1,49 \times 10^{-09}$	$1,30 \times 10^{-08}$	$1,00 \times 10^{15}$
200	0,75	$1,28 \times 10^{-09}$	$5,58 \times 10^{-09}$	$1,25 \times 10^{14}$
300	0,70	$1,21 \times 10^{-09}$	$3,15 \times 10^{-09}$	$5,40 \times 10^{13}$
500	0,70	$1,15 \times 10^{-09}$	$1,92 \times 10^{-09}$	$2,61 \times 10^{13}$
700	0,70	$1,11 \times 10^{-09}$	$1,40 \times 10^{-09}$	$1,69 \times 10^{13}$
1000	0,65	$1,08 \times 10^{-09}$	$8,47 \times 10^{-10}$	$9,38 \times 10^{12}$

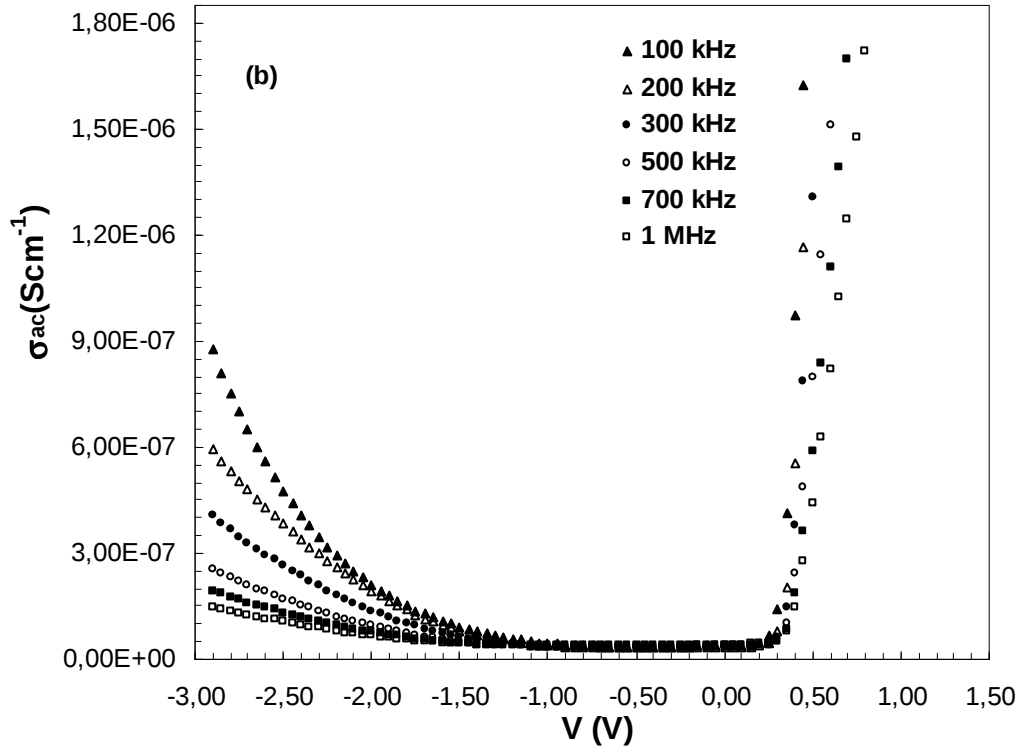
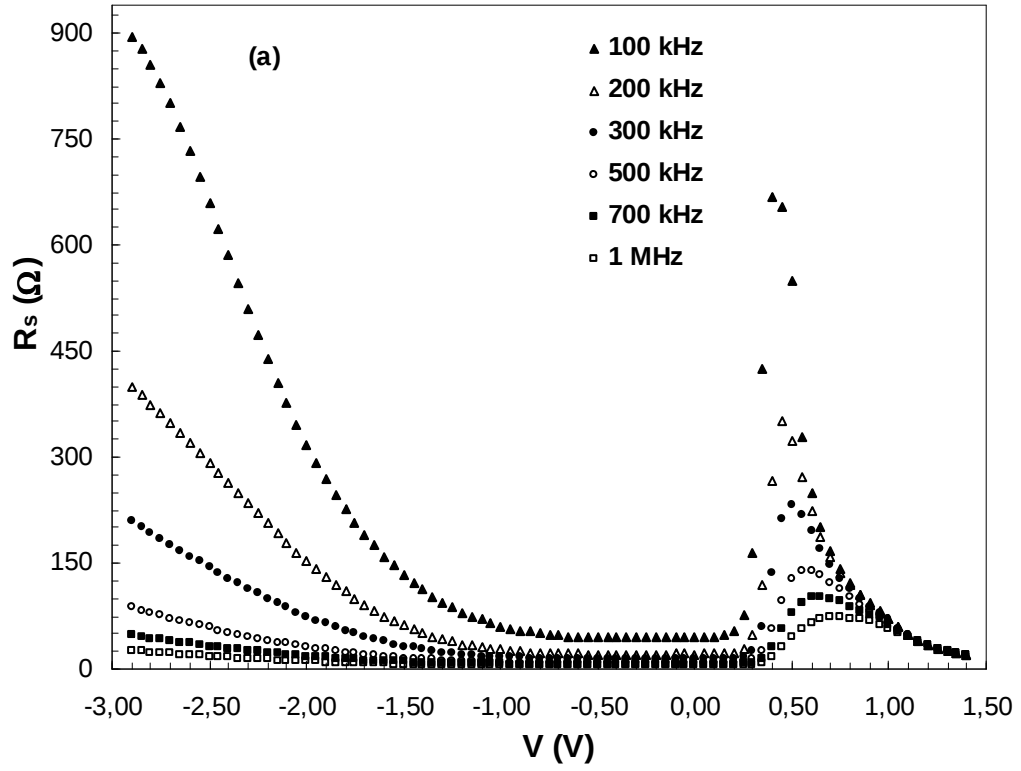
Arayüzey durumları büyük yoğunlukla lokalize oldukları aralıkta etkili iken, seri direnç ise yığılım bölgesinde (ileri pozitif gerilimlerde) etkindir. Bu nedenle C-V eğrilerinin yığılım bölgesinde bir pik vermesi, özellikle seri direncin varlığına atfedilir [6]. Seri direncin hem kapasitans hem de kondüktans üzerindeki etkilerini anlamak için gerilim ve frekansa bağlı değişimini incelemek oldukça faydalıdır. Hazırlanan M2 MOS yapısının seri direnci tüm voltaj değerleri için değişik frekanslardaki C-V ve G/w-V ölçümlerinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı [1,4,8,11].

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (6.2)$$

burada C_m ve G_m ölçülen kapasitans ve kondüktans değerleridir. Şekil 6.2(a) oda sıcaklığında farklı frekanslar için voltaja bağlı elde edilen seri direnç değişimini göstermektedir. M2 MOS yapısının ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) ise ölçülen deneysel G/w-V değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır [7-10].

$$\sigma_{ac} = \frac{\epsilon_o G_m}{C_o} \quad (6.3)$$

burada; G_m ölçülen kondüktans değeri, ϵ_o boş uzayın dielektrik geçirgenliği, C_o ($=\epsilon_o A/d$) arası boş kapasitörün kapasitansıdır. Gerilime bağlı farklı frekanslar için elde edilen σ_{ac} değişimi Şekil 6.2(b)'de gösterilmiştir. Şekil 6.2(a)'da görüldüğü üzere, R_s -V eğrileri yaklaşık 0,6 V civarında bir pik vermektedir. Bu pikin değeri artan frekansla azalırken pozisyonu ise negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. Seri direnç hem uygulanan gerilime ve frekansa hem de N_{ss} 'lerin GaAs/SiO₂ arayüzeyindeki özel dağılımına bağlı olarak bölgeden bölgeye (yığılım, tükenim ve tersinim) değişmektedir. Şekil 6.2(b)'de görüldüğü gibi σ_{ac} değerleri azalan frekansla artmaktadır. İleri negatif gerilim bölgesinde artan gerilimle tersinim yüklerinin artışı iletkenliği artırırken, pozitif gerilim bölgesinde çoğunluk taşıyıcılar iletkenliği sağlamaktadır.

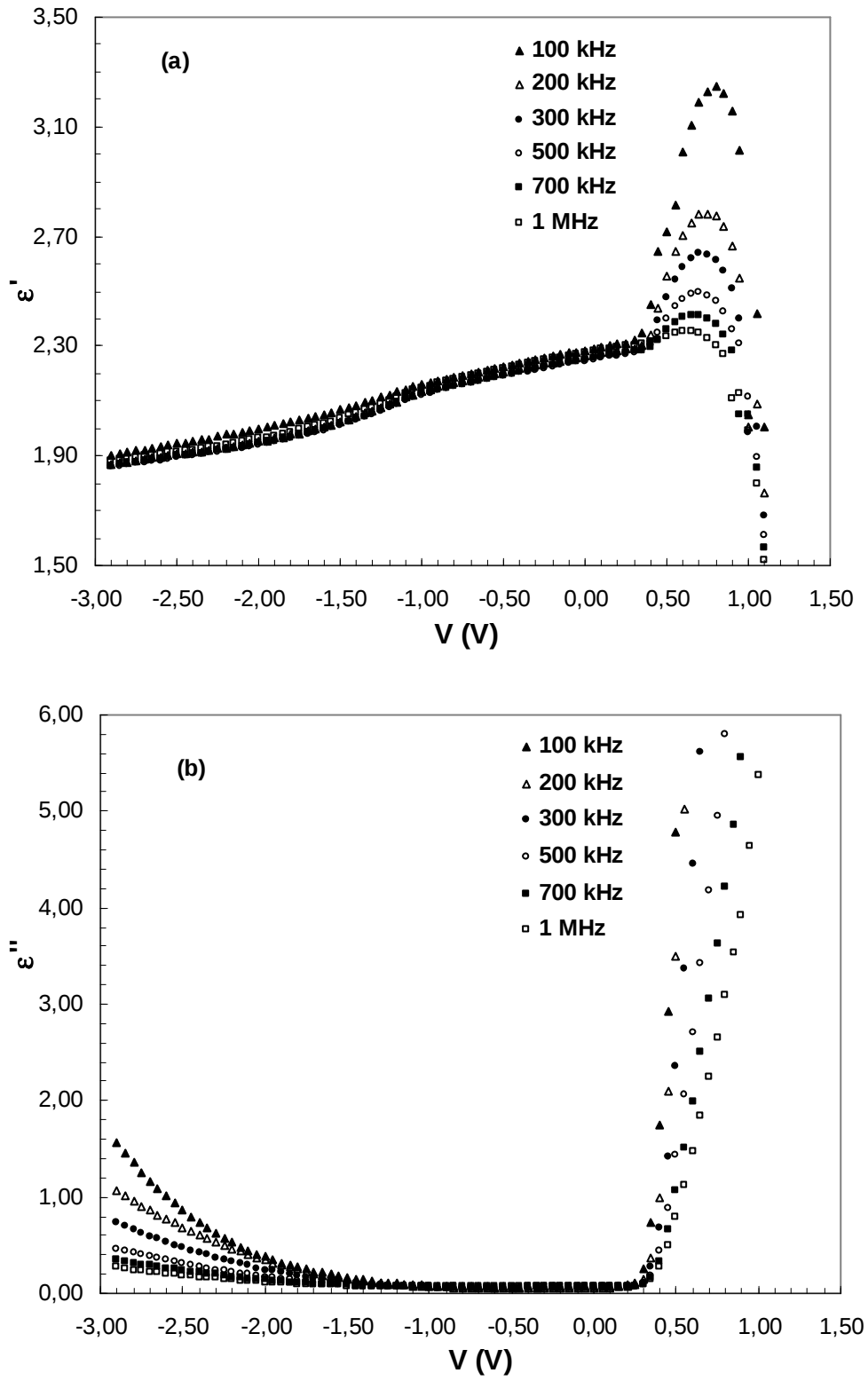


Şekil 6.2. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) R_s -V (b) σ_{ac} -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı

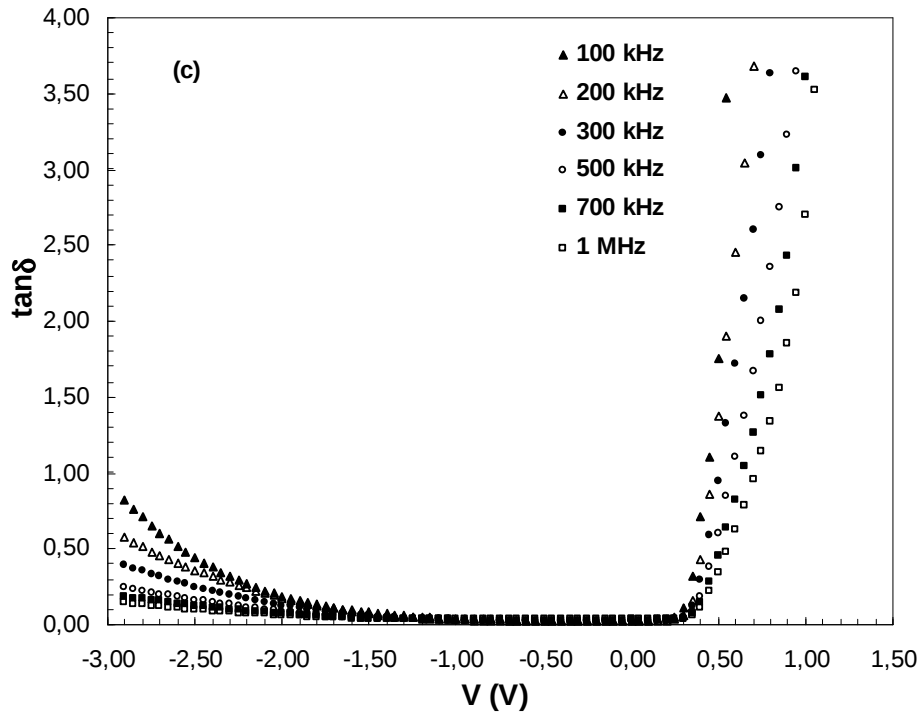
6.1.2. Dielektrik karakteristikler

M2 MOS yapısına ait dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları (dielektrik sabiti ϵ' ve dielektrik kayıp ϵ'') ile dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin frekans bağımlılığı, kapasitans ve kondüktans ölçümlerinden sırasıyla Eş. 4.55 ve Eş. 4.58 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.3(a), (b) ve (c) sırasıyla M2 MOS yapısının farklı frekanslarda ki dielektrik sabiti-voltaj (ϵ' -V), dielektrik kayıp-voltaj (ϵ'' -V) ve dielektrik kayıp tanjantı-voltaj ($\tan\delta$ -V) karakteristiklerini göstermektedir. ϵ' değerleri negatif bölgede artan gerilimle artarken, pozitif gerilime doğru gidildikçe C-V eğrilerine benzer şekilde bir pik vermektedir. Bu benzerlik beklenen bir durumdur. Ancak C-V eğrilerinin ve dolayısıyla ϵ' -V eğrilerinin doğru öngerilim bölgesinde bir pik vermesi beklenmeyen bir durumdur. Son yıllarda bazı araştırmacılar doğru öngerilim C-V ölçümlerinde hem negatif kapasitans hem de anormal bir kapasitans piki gözlemişlerdir [8-10,12]. Bu anormal pikin kaynağı, arayüzey durumlarının yoğunluğuna ve seri dirence atfedilir [10,12]. Ayrıca azınlık taşıyıcıların enjeksiyonu da diğer bir nedendir [39,40]. Bu yüzden yapının gerek elektriksel gerekse dielektrik özelliklerinin tayininde özellikle R_s , N_{ss} ve yalıtkan tabakanın kalınlığı (d_{ox}) dikkate alınmalıdır. Bunlar dikkate alınmadan hesaplanan temel fiziksel parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliği azalmaktadır. Ayrıca temel fiziksel parametrelerin yalnız oda sıcaklığı ve bir frekans için belirlenmesi bize iletim mekanizması hakkında detaylı bir bilgi veremez. Bunun aksine hem geniş bir frekans hem de sıcaklık aralığında gerçekleştirilecek deneysel C- V ve G/w-V ölçümleri, bize iletim mekanizmaları hakkında daha detaylı bilgiler verebilir.

Şekil 6.3 (a)'da görüldüğü gibi, dielektrik-voltaj eğrilerinin negatif gerilimlerde ki frekans dağılımı yok denecek kadar küçüktür, ancak ileri pozitif gerilimler için ($V \geq 0,5$ V) frekans dağılımı oldukça büyüktür. Hatta dielektrik sabiti, artan pozitif gerilimle tüm frekanslar için hızla azalmaktadır. Dielektrik sabitindeki bu düşme, artan frekansla azalan polarizasyona atfedilebilir ve belirli bir yüksek frekansın üstünde elektron sıçramalarının bu dış elektrik alanı takip edememesinden kaynaklanmaktadır [35].



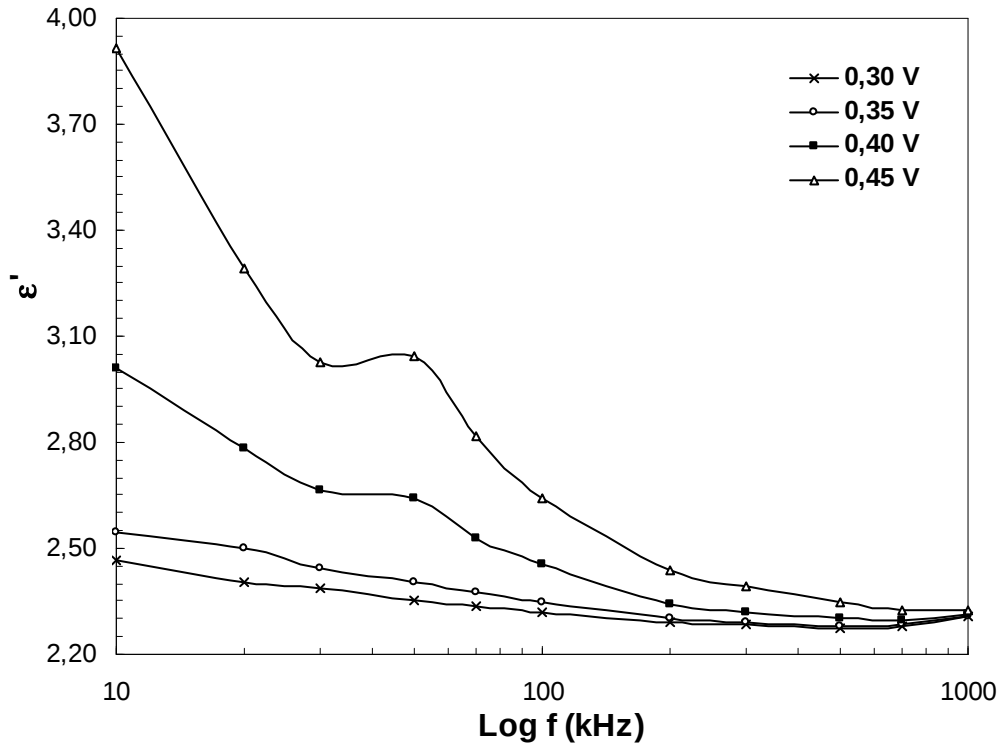
Şekil 6.3. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı



Şekil 6.3 (Devam). M2 (163 Å) MOS yapısının (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı

Şekil 6.3 (b) ve (c) de görüldüğü üzere ϵ'' ve $\tan\delta$ ileri negatif ve pozitif gerilim bölgelerinde hem uygulanan gerilime hem de frekansa oldukça duyarlıdır. Orta gerilim bölgesinde ise hem uygulanan gerilimden hem de frekanstan hemen hemen bağımsız olup yaklaşık sabit bir değer vermektedir. ϵ'' -V ve $\tan\delta$ -V eğrilerinin hem yığılım hem de tersinim bölgesinde bir frekans dağılımı göstermesinin nedeni arayüzey durumlarının ve tersinim yüklerinin yüksek ve düşük frekansa tepki sürelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır [8,10,11,47].

Şekil 6.3(a)'da görüldüğü gibi dielektrik sabiti değerleri artan frekansla azalmaktadır ve tüm frekanslar için teorik değer altındadır. Bu yüzden M2 MOS yapısının dielektrik sabiti dört farklı gerilim için geniş bir frekans aralığında elde edilerek Şekil 6.4'te verildi. Şekilden de görüldüğü gibi dielektrik sabitinin değeri küçük frekanslarda, SiO_2 için dielektrik sabitinin beklenen teorik değeri (3,8) ile uyumludur. Bu sonuç, elde edilen deneysel sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.4. M2 (163 Å) MOS yapısının ϵ'' karakteristiklerinin farklı voltajlardaki frekans bağımlılığı

Kompleks (imajiner) dielektrik geçirgenliği verilerinin Z^* formalizasyonu ile incelenmesi ($Z^* = 1/Y^* = 1/i\omega C_o \epsilon^*$) genellikle yüzey ve bulk (hacim, tüm numune) olgularını ayırt etmek ve yapının bulk dc iletkenliğini elde etmek için kullanılır [48]. Genellikle dielektrik gevşeme spektroskopisi hakkında daha detaylı bir bilgi elde etmek için, elektrik modülü formülasyonu kullanılmaktadır. Elektrik modülünün gerilime bağlı değişik frekanslardaki profili bu yapının dielektrik gevşeme ve polarizasyon mekanizması hakkında önemli bilgiler vermektedir.

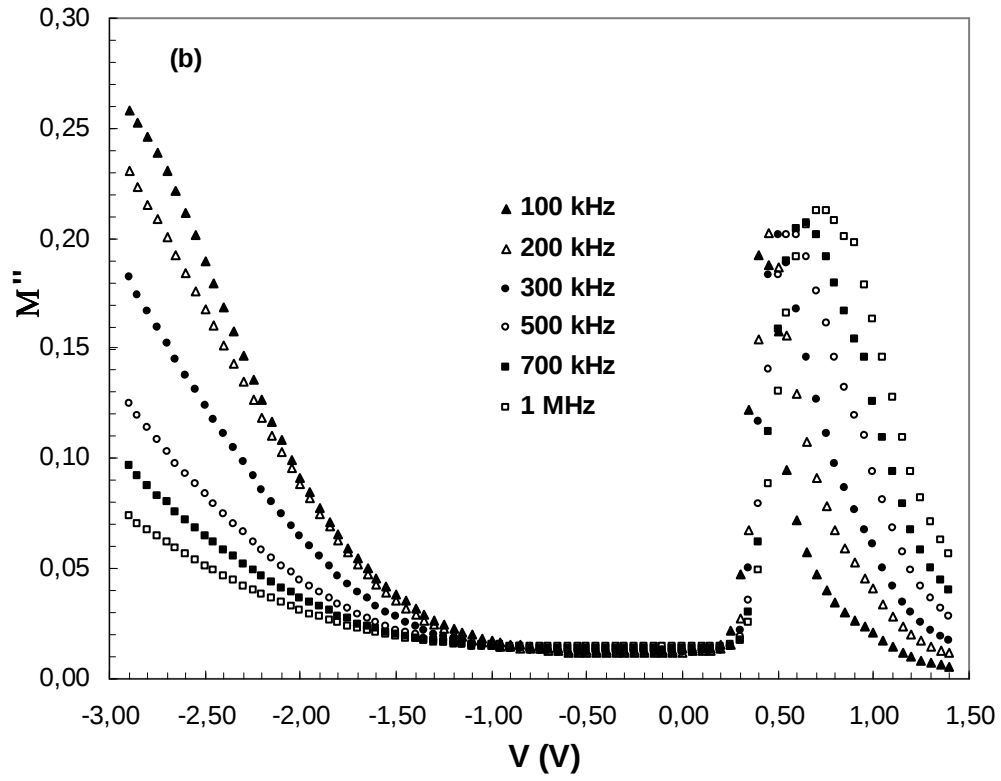
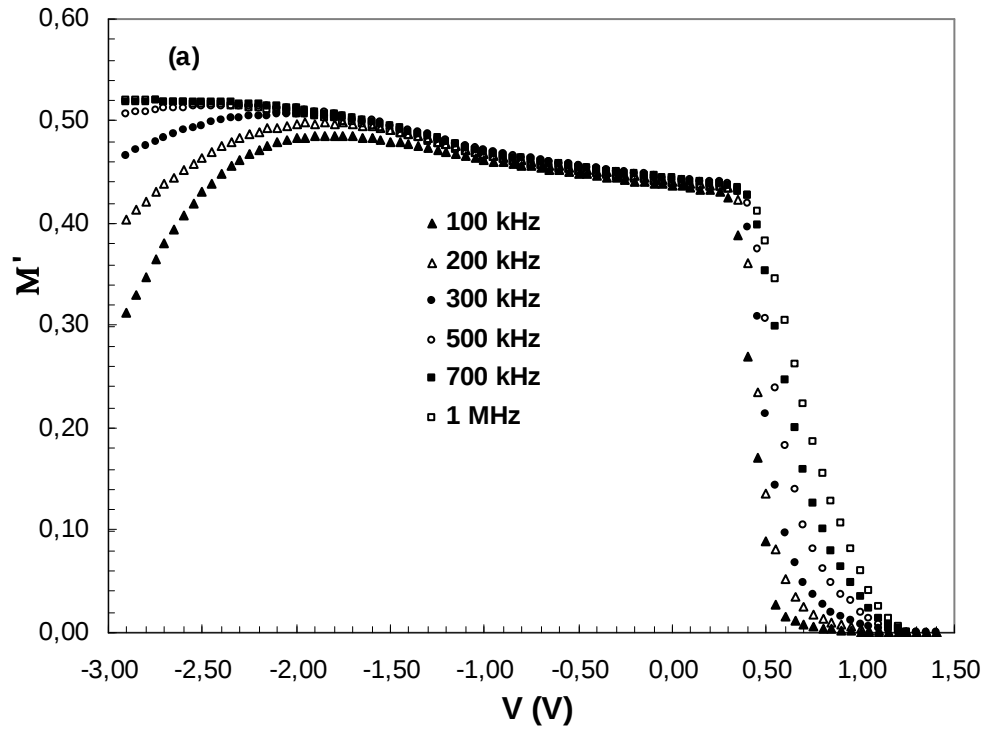
Kompleks empedans veya kompleks permitivity (dielektrik geçirgenlik) ($\epsilon^* = 1/M^*$) aşağıdaki denklem kullanılarak M^* formuna dönüştürülebilir [48,49].

$$M^* = j\omega C_o Z^* \quad (6.4)$$

veya

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (6.5)$$

Elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M'') kısmı ε' ve ε'' değerlerinden hesaplanarak Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Reel ve imajiner elektrik modülü-gerilim eğrileri hem ileri negatif gerilim hem de ileri pozitif gerilimde bir frekans dağılımı göstermektedirler. Orta gerilim bölgesinde ise her iki değerde yaklaşık sabit kalmakta olup gerilim ve frekans bağımlılığı ihmal edilecek kadar azalmaktadır. Reel elektrik modülünün frekans dağılımı negatif ve pozitif gerilim bölgeleri için aynı sırada iken, imajiner elektrik modülünün dağılımı pik değerinden sonra sıra değiştirmektedir. Reel elektrik modülü artan frekansla artan bir dağılım sergilemekte iken imajiner elektrik modülü negatif bölgede artan frekansla azalan, pozitif bölge de ise artan bir dağılım sergilemektedir. İmajiner elektrik modülü frekansa bağlı olarak yaklaşık 0,5-1 V aralığında her bir frekans eğrisi için bir pik vermektedir. Bu pikin maksimumu artan frekansla pozitif gerilim bölgesine doğru kaymaktadır.

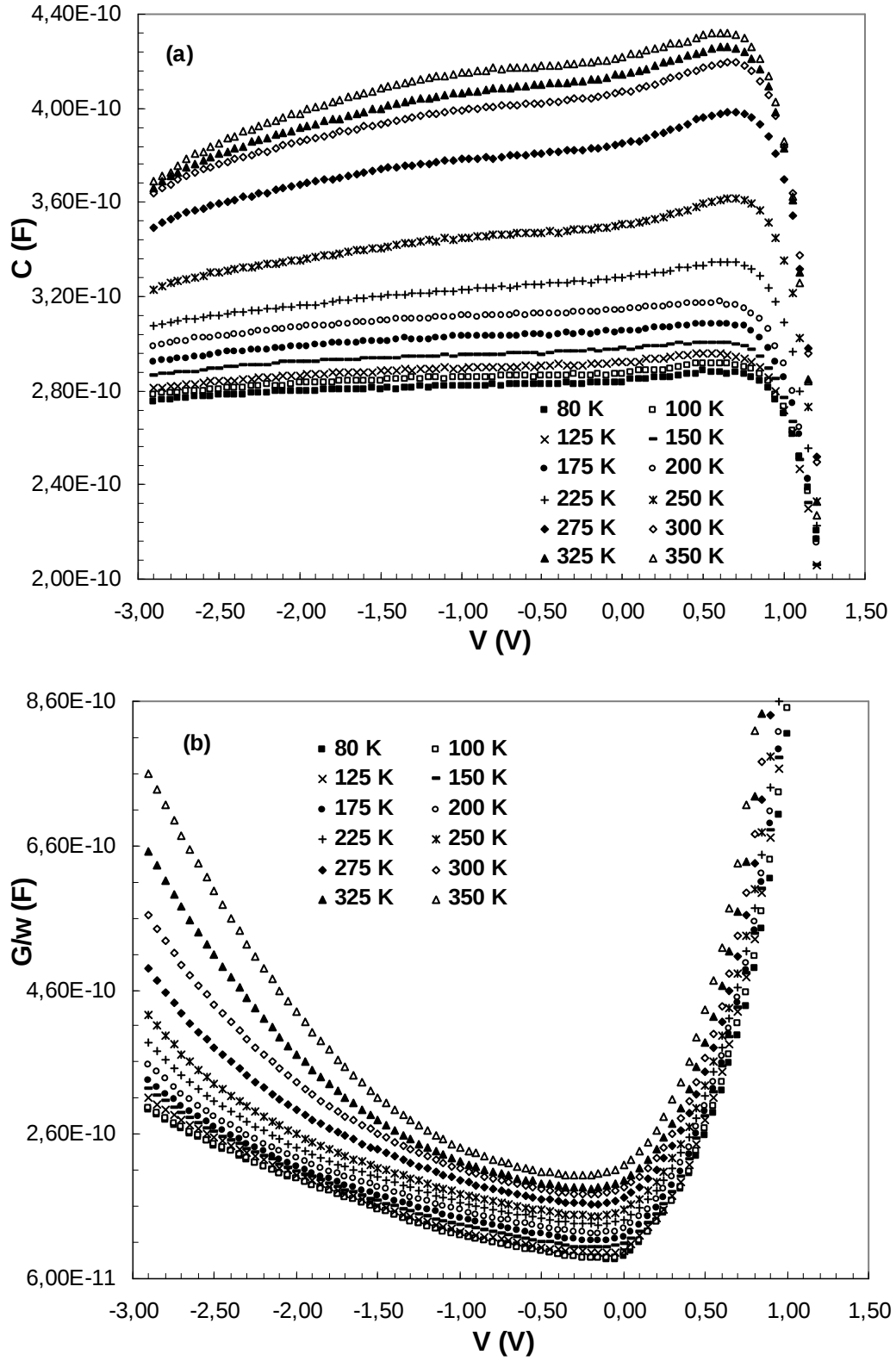


Şekil 6.5. M2 (163 Å) MOS yapısının (a) M' -V (b) M'' -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı

6.2. Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerin Sıcaklık Bağımlılığı

6.2.1. Elektrik karakteristikler

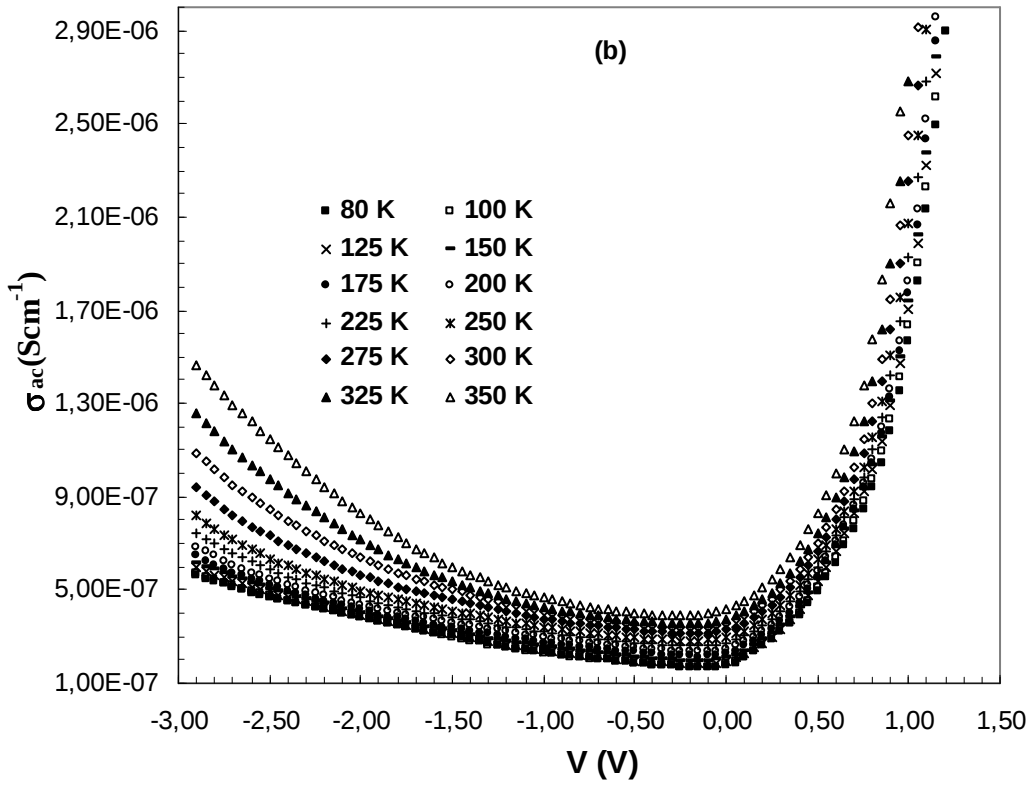
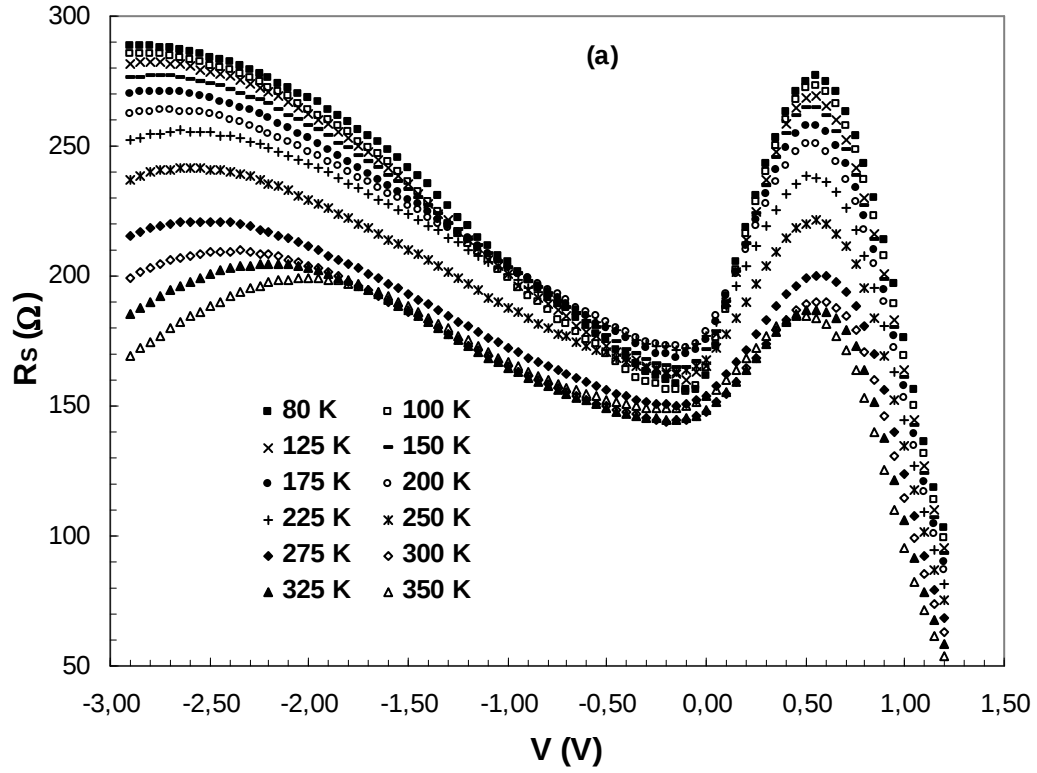
Şekil 6.6(a) ve (b) M3 MOS yapısının kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/w-V) karakteristiklerinin 1 MHz de sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Hem C hem de G/w değerleri sıcaklığa karşı çok hassastır. Kapasitans eğrilerinin dielektrik kırılma bölgesi hariç genellikle uygulanan gerilime bağımlılıkları az olmasına karşın büyük bir sıcaklık bağımlılığı göstermektedirler. Kondüktans değerleri hem uygulanan gerilime hem de sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Her bir sıcaklık için elde edilen G/w-V eğrileri 0 V civarında bir minimuma sahiptir. Pozitif bölgedeki artış negatif bölgeye göre daha hızlı olmasına karşın negatif bölgedeki sıcaklık dağılımı daha belirgindir ve pozitif bölgede sıcaklık dağılımı giderek daralmaktadır. Bu durum arayüzeydeki yalıtkan SiO₂ tabakasının kırılma gerilimine yakın bölgeler olup taşıyıcı iletkenliğinin sağlanması için gerekli enerjinin zaten uygulanan gerilimle elde edilmiş olması ve GaAs'ın bu pozitif gerilim değerleri için gevşeme durumuna geçmesinden kaynaklanmaktadır. İleri pozitif gerilimlerde M3 MOS yapısında ki arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yariletken içine enjeksiyonuyla, kapasitansta hızlı bir düşüşe ilaveten iletkenlikten hızlı bir artış gözlenmektedir. Dolayısıyla bu noktadan sonra hem kapasitans hem de kondüktans için sıcaklıktan çok uygulanan gerilim önemli hale gelmektedir.



Şekil 6.6. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz’de elde edilen (a) C-V (b) G/w -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı

Şekil 6.7(a) ve (b) sırasıyla M3 MOS yapısının seri direnç-voltaj ve iletkenlik-voltaj eğrilerinin sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. Seri direnç-voltaj eğrileri yaklaşık 0,6 V civarında bir pik vermektedir. Bu pikin değeri artan sıcaklıkla azalırken konumu da negatif voltaj bölgesine kaymaktadır. Seri direnç hem uygulanan gerilime hem de sıcaklığa bağlı olarak bölgeden bölgeye (yığılım, tükenim ve tersinim) değişmektedir. Artan sıcaklıkla kapasitans ve kondüktansta meydana gelen azalma hem arayüzey durumlarının sıcaklık (termal uyarma) bağımlılığıyla hem de seri direncin bu davranışıyla açıklanabilir. Akümülyasyon bölgesinde bir pik veren seri direnç bu enerji aralığında bir arayüzey durum yoğunluğunun varlığını göstermektedir.

M3 MOS yapısına ait iletkenlik-voltaj eğrilerinin sıcaklık bağımlılığı ise Şekil 6.7(b)'de gösterilmiştir. Her bir sıcaklık için elde edilen σ_{ac} -V eğrileri 0 Voltta bir minimuma sahiptir. Bu noktadan hem büyük hem de küçük gerilim değerleri için iletkenlik artmaktadır. Pozitif bölgedeki artış negatif bölgeye göre daha hızlı olmasına karşın negatif bölgedeki sıcaklık dağılımı daha belirgindir ve pozitif bölgede sıcaklık dağılımı giderek daralmaktadır. Yaklaşık 1 V gerilim değerinden sonra seri direncin hızlı düşüşü ile birlikte iletkenlikte çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu durum arayüzeydeki yalıtkan SiO₂ tabakasının kırılma gerilimine yakın bölgeler olup taşıyıcı iletkenliğinin sağlanması için gerekli enerjinin zaten uygulanan gerilimle elde edilmiş olması ve GaAs'ın bu pozitif gerilim değerleri için gevşeme durumuna geçmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.7. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz’de elde edilen (a) R_s -V (b) σ_{ac} -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı

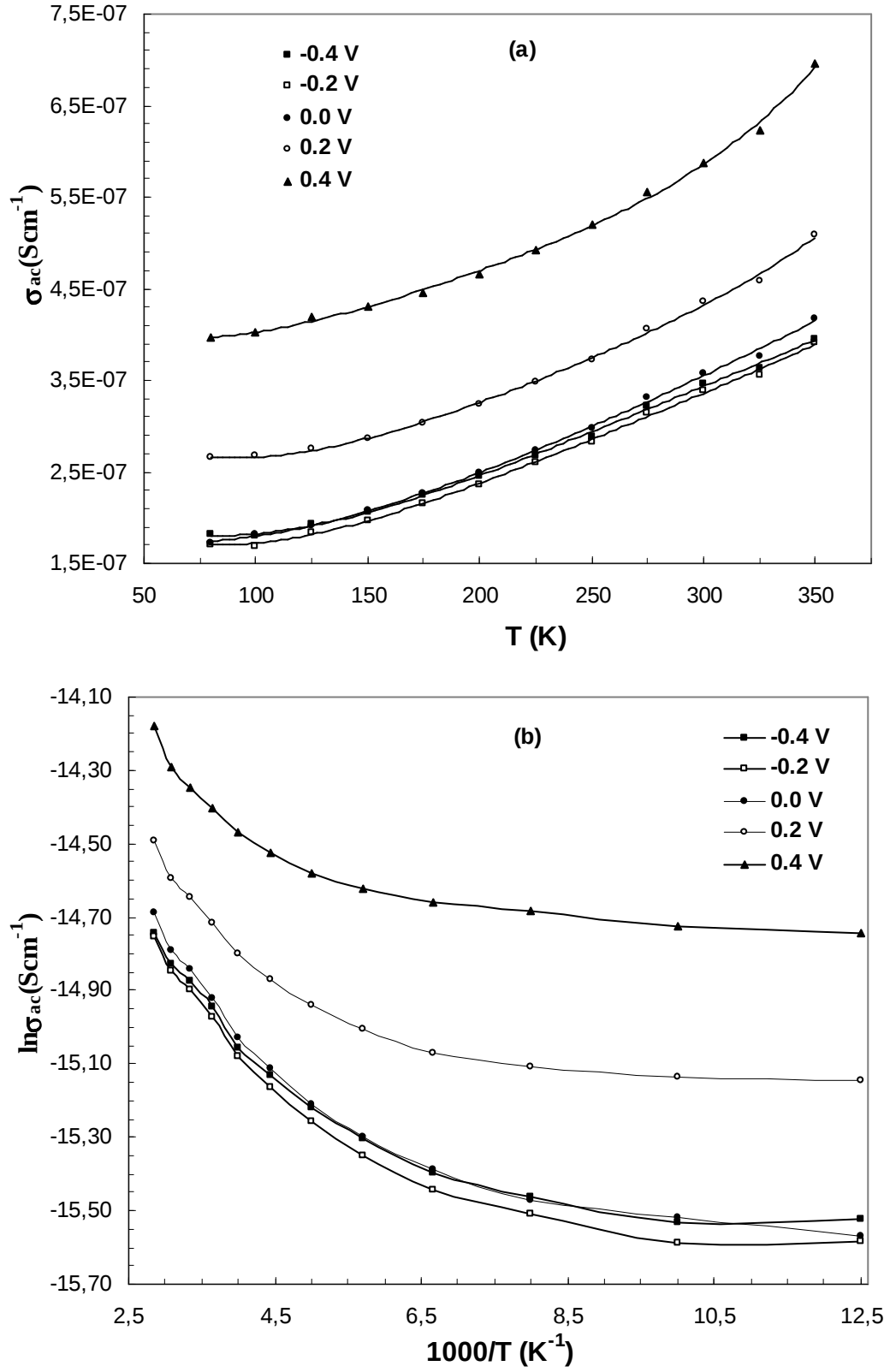
Şekil 6.8(a) M3 MOS yapısının 1 MHz de farklı voltajlar için iletkenlik-sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere iletkenlik her bir voltaj eğrisi için artan sıcaklıkla artmaktadır. İletkenlikteki bu artış 80-125 K aralığında yavaşken 125 K den sonra bu artış daha hızlıdır. Ayrıca iletkenlik-sıcaklık eğrilerinin pozitif voltajlar da dağılımı negatif voltajlara göre daha belirgin hale gelmektedir. Yani iletkenlik pozitif voltajlarda daha belirgin bir gerilim bağımlılığı göstermektedir.

Bir yarıiletkenin iletkenliği ile sıcaklık arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (6.6)$$

Burada, σ_0 iletkenlik sabiti veya üstel faktörü, k Boltzmann sabiti ve E_a ise aktivasyon enerjisidir. Şekil 6.8(b) M3 MOS yapısının farklı voltajlar için 80-350 K aralığındaki Arrhenius eğrilerini göstermektedir. Öncelikle bu eğriler; birinci bölge 80-175 K aralığını ve ikinci bölge 225-325 K aralığını kapsayacak şekilde iki bölgeye ayrılabilir. Birinci bölgede iletkenlik, özellikle pozitif bölgede güçlü bir voltaj bağımlılığı gösterirken, zayıf bir sıcaklık bağımlılığı göstermektedir. Bu durum yarıiletkendeki elektrik alan değişimine ve elektronik sıçrama iletimine bağlanabilir. Düşük sıcaklıklarda termal uyarma iletim için gerekli enerjiyi sağlayamadığından bu bölgede uygulanan gerilim voltajına bağımlılığın daha yüksek olması olağan bir durumdur. İkinci bölgede ise iletkenliğin uygulanan gerilime bağımlılığı azalırken, güçlü bir sıcaklık bağımlılığı göstermektedir. Bu bölgede iletkenliğin büyük olmasının nedeni, elektronik sıçrama iletiminden daha baskın bir tabakalar arası iyonik iletimin olmasıdır [50]. Böylece diyebiliriz ki, elektronik sıçrama iletimi özellikle düşük sıcaklıklarda daha etkilidir.

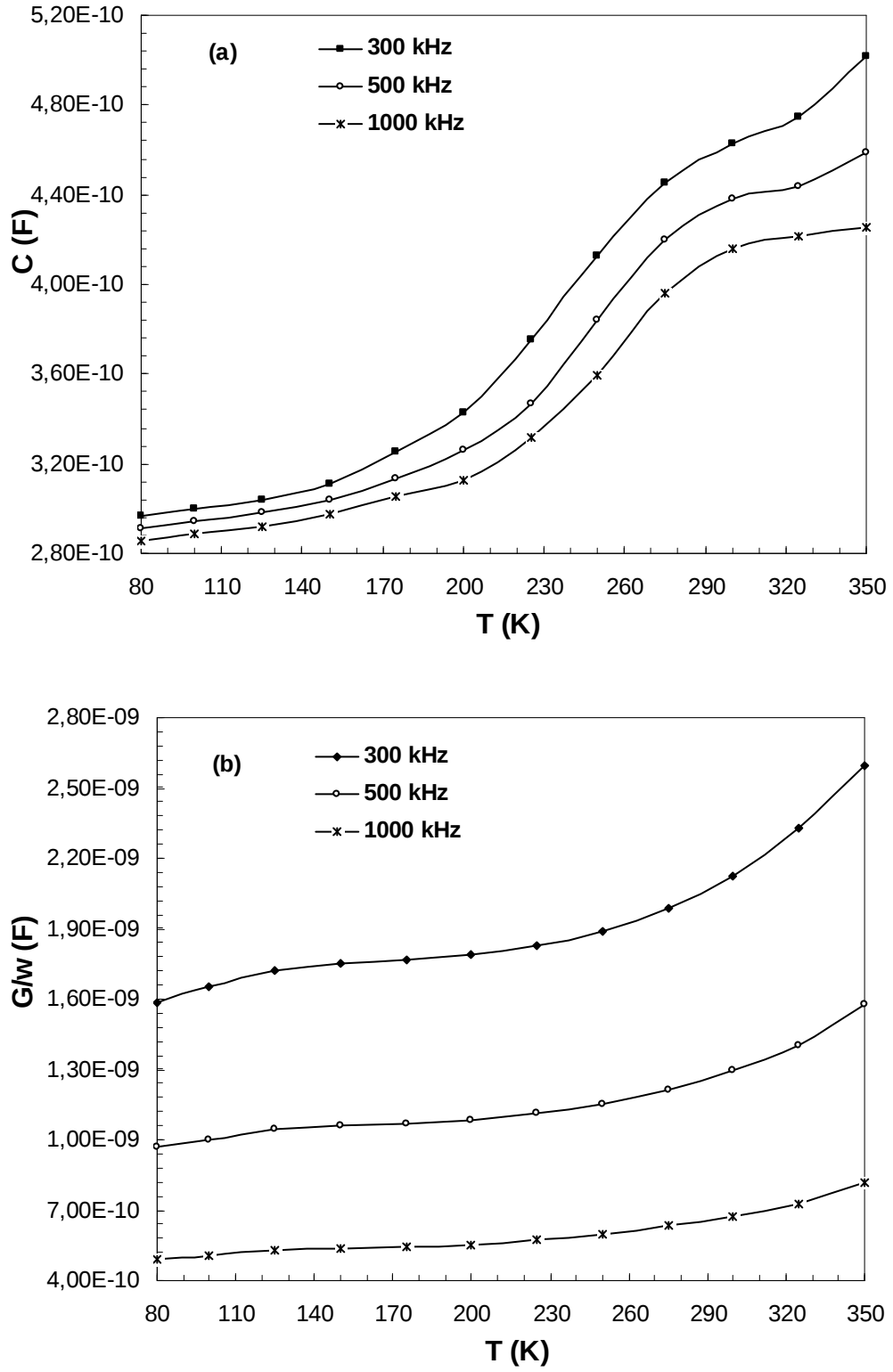
İkinci olarak, her bir gerilim için verilen bu Arrhenius eğrilerinin iki lineer bölgesi farklı baskınlıktaki aktivasyon enerjilerine atfedilebilir. Bu aktivasyon enerjileri 0,2 voltta Eş. 6.6 kullanılarak; 1. bölge (80 -175 K) için 0,41 eV, 2. bölge (225-325 K) için 5,69 eV bulunmuştur.



Şekil 6.8. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz’de ki farklı voltajlar için (a) σ_{ac} -T (b) $\ln \sigma$ -1000/T (Arrhenius) karakteristikleri

Buradaki gibi Arrhenius eğrilerindeki birden fazla lineer bölge dolayısıyla birden fazla aktivasyon enerjisi saf olmayan (extrinsic) durumdan öz durum (intrinsic) iletkenlik mekanizmasına bir geçiş olduğunu gösterir [51]. Aktivasyon enerjisinin her bir voltaj eğrisi için yüksek sıcaklıklarda ($T > 225$ K) çok yüksek olmasına karşın sıçrama mekanizmasıyla uyumlu olarak düşük sıcaklıklarda ($T \leq 150$ K) küçük olduğu açıktır.

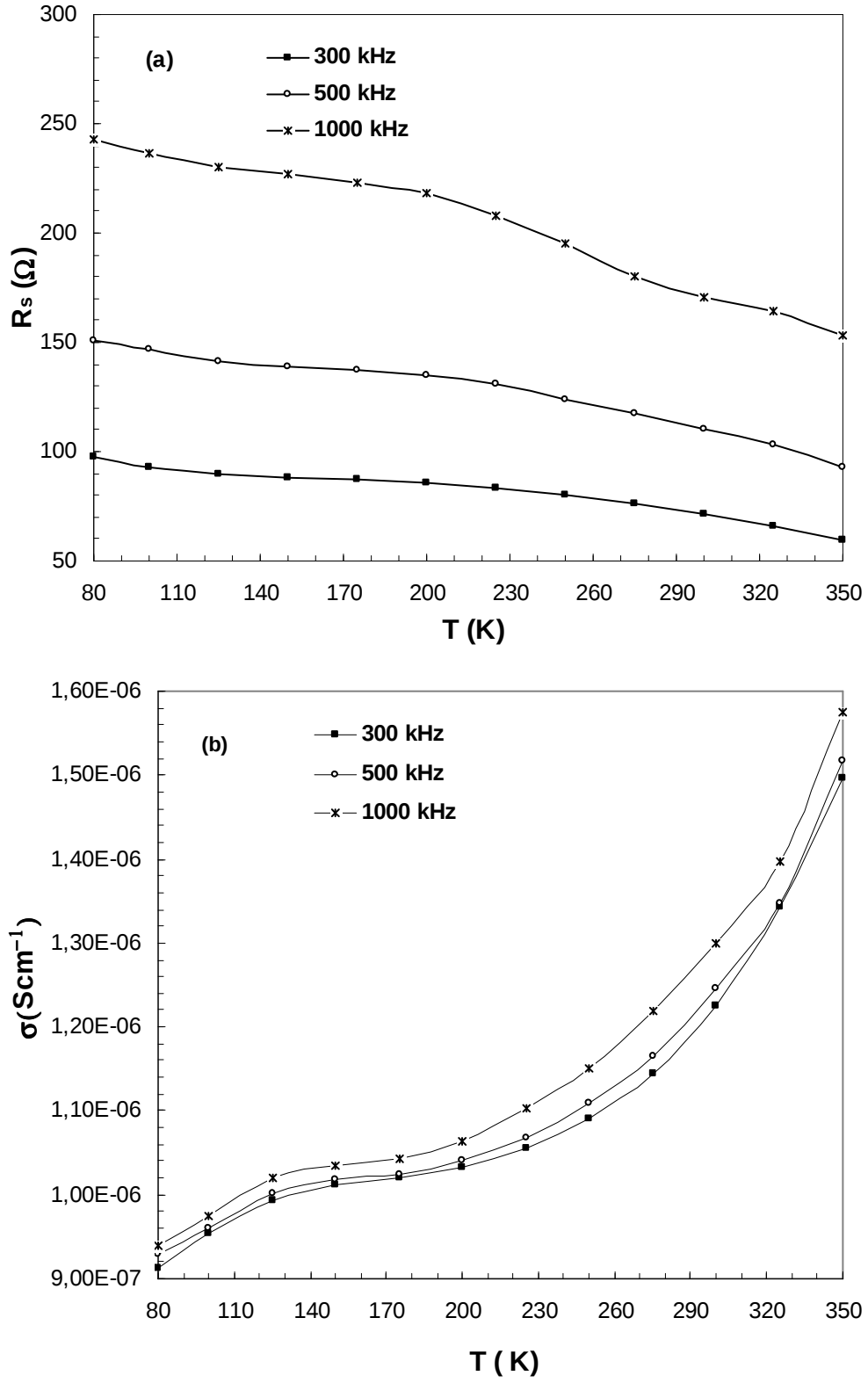
Aynı MOS yapının üç farklı frekans için sıcaklık bağımlılığı 80-350 K aralığında araştırılmıştır. Şekil 6.9(a) ve (b) sırasıyla bu kapasitörün farklı frekanslar için akümülyasyon bölgesindeki (0,8 V) kapasitans-sıcaklık ve kondüktans-sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Kapasitans ve kondüktans hem frekansa hem de sıcaklığa karşı oldukça duyarlıdır. Hem frekans hem de sıcaklık duyarlılığı özellikle yüksek sıcaklıklarda daha belirgindir. Düşük sıcaklıklarda ise her bir frekans için hem C ve hem de G/w değerleri hemen hemen sıcaklıktan bağımsız hale gelmekte olup sabit bir değere sahip olmaktadır. C ve G/w değerleri artan sıcaklıkla artarken, artan frekansla azalmaktadır. Yarıiletken/oksit arayüzeyindeki homojen olmayan bir tabakanın kapasitansı, oksit kapasitansı ile birlikte bir frekans dağılımına sebep olur. Çünkü düşük frekanslarda, arayüzey durumları ac sinyal frekansını takip edebilirler ve dolayısıyla frekansa bağlı olarak ilave bir kapasitans oluştururlar. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının ac sinyali takip edememesinden dolayı, bu durum arayüzey durum kapasitansını toplam kapasitans yanında ihmal edilebilecek kadar azaltır [11]. Bu durum hem C-T hem de G/w-T eğrilerinde her bir frekans eğrisi için bir yarılmaya sebep olmuştur. Sıcaklık artarken, termal enerjileri artan çoğunluk taşıyıcılar ve arayüzey durumları kapasitans ve kondüktansta bir artışa sebep olmaktadır. Bu durumda C ve G/w artarken MOS yapısının seri direncinin artan sıcaklıkla düşmesi beklenir. Bu yüzden M3 MOS yapısının seri direncinin bu üç farklı frekans için sıcaklık bağımlılığı, Eş. 6.2 den elde edilerek Şekil 6.10(a) da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. M3 (240 Å) MOS yapısının (a) kapasitans (C) (b) kondüktansının (G/w) 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı

Şekil 6.10(a) ve (b) sırasıyla, M3 MOS yapısının seri direnç ve iletkenliğinin farklı frekanslardaki sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. Seri direnç hem frekans değişimine hem de sıcaklık değişimine karşı hassasiyet göstermektedir. M3 MOS yapısının seri direnci artan frekansla artarken artan sıcaklıkla azalmaktadır. Artan sıcaklıkla hem yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıların hem de arayüzey durumlarının iletme katkısının dolayı iletkenliğin artması seri direncin artan sıcaklıkla azalmasına sebep olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ki frekans dağılımı yüksek sıcaklıklara göre daha belirgindir. Bu durum arayüzey durumları üzerinde düşük sıcaklıklarda frekansın, yüksek sıcaklıklarda ise termal uyarmanın yani sıcaklığın daha etkili bir mekanizma olduğunu göstermektedir.

MOS yapısının iletkenliği ise hem artan frekansla hem de artan sıcaklıkla artmaktadır. İletkenlik eğrilerinin sıcaklık bağımlılığı 125 K den küçük ve 200 K den büyük sıcaklıklar için daha belirgin iken ara sıcaklıklarda ise bağımlılık daha küçüktür. İletkenliğin frekans bağımlılığı ise orta sıcaklık bölgesinde daha belirgindir. Bu durum yeterince düşük ve yüksek sıcaklıklarda iletkenlik üzerinde sıcaklığın, yaklaşık 175-325 K aralığında ise frekansın daha etkili olduğunu göstermektedir.



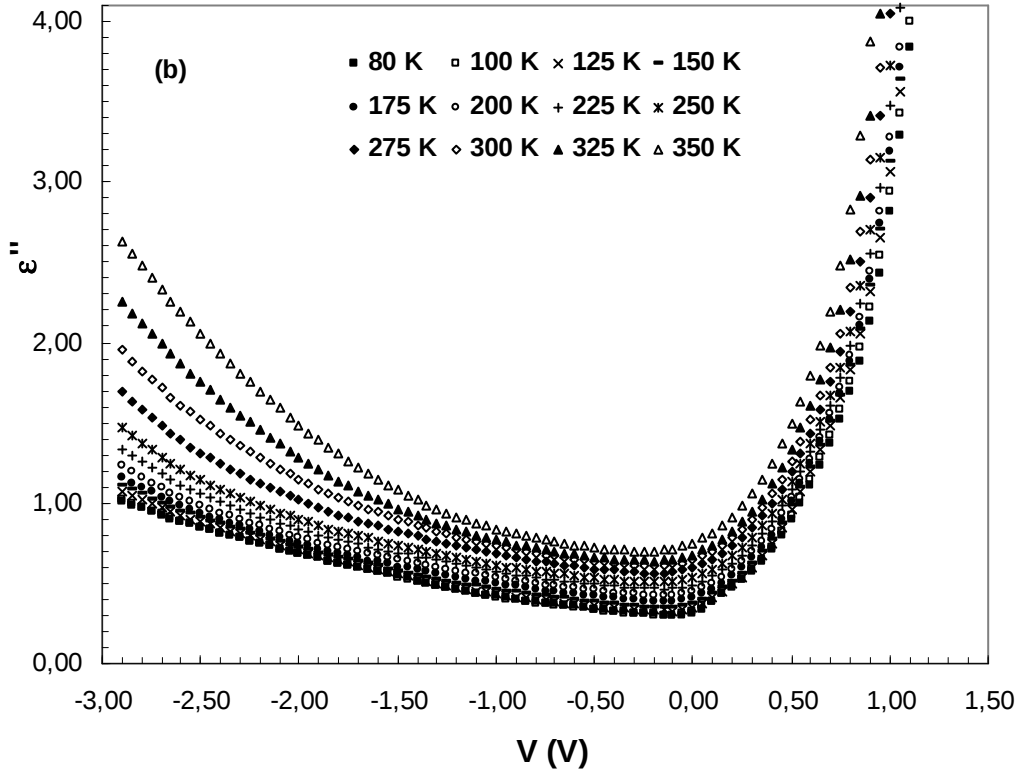
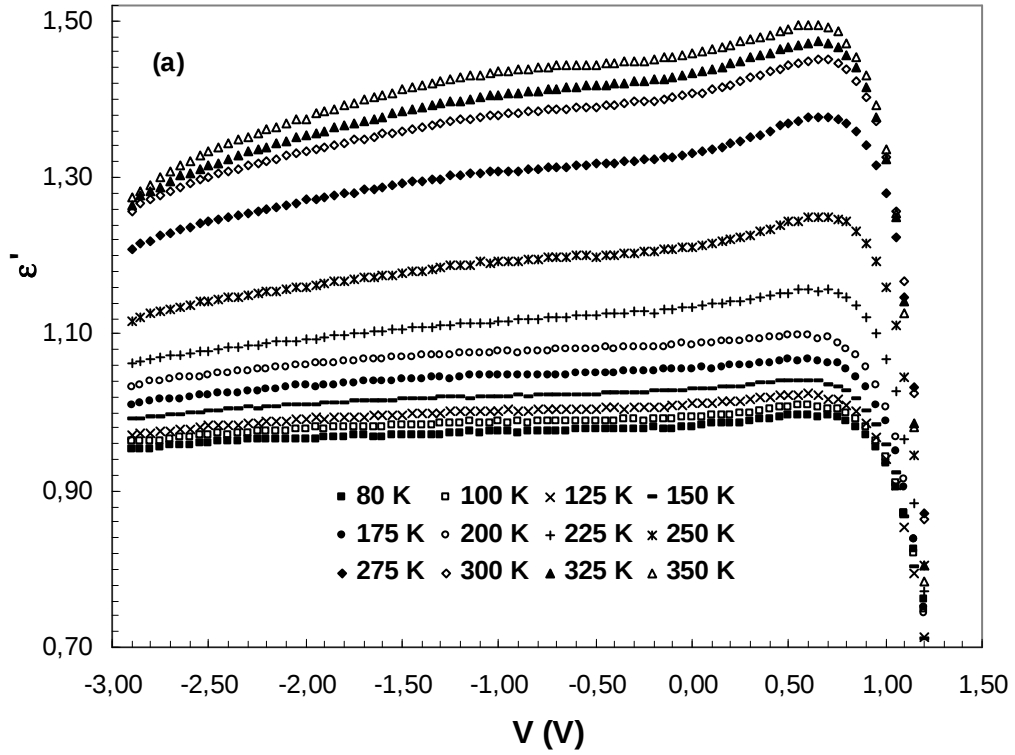
Şekil 6.10. M3 (240 Å) MOS yapısının (a) seri direnç (R_s) (b) iletkenliğinin (σ_{ac}) 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı

6.2.2. Dielektrik karakteristikler

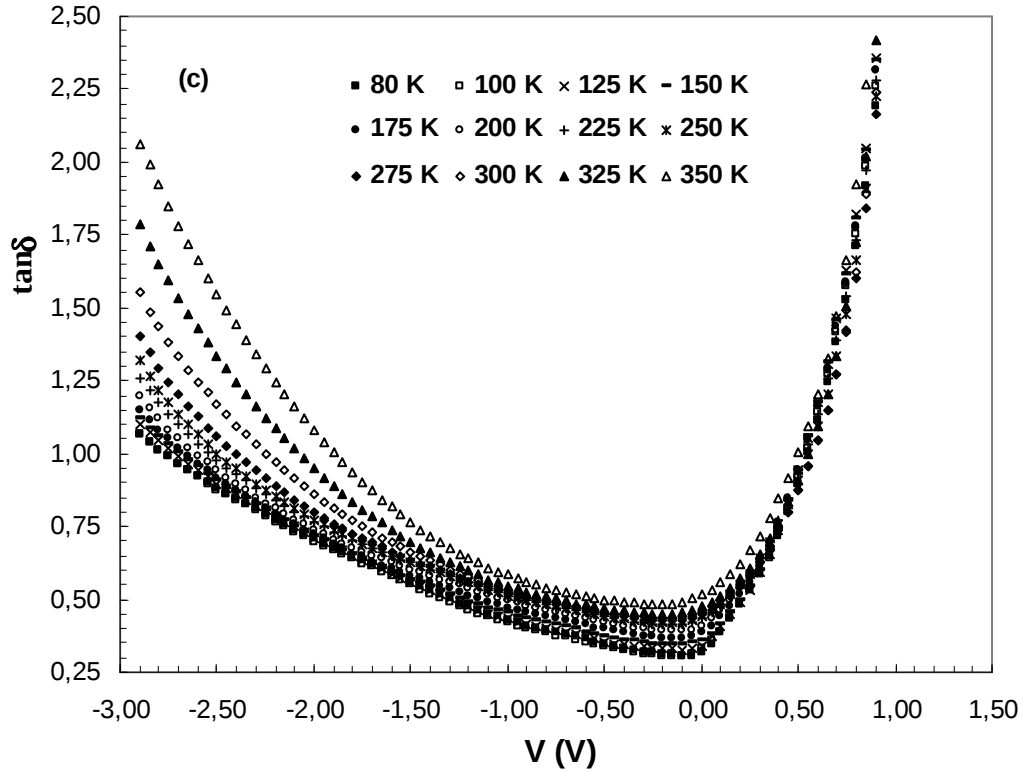
Şekil 6.11 M3 MOS yapısının dielektrik sabiti-voltaj (ϵ' -V), dielektrik kayıp-voltaj (ϵ'' -V) ve dielektrik kayıp tanjantı-voltaj ($\tan\delta$ -V) karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. Şekil 6.11(a)'dan görüleceği üzere ϵ' artan sıcaklıkla belirgin şekilde artarken, artan gerilim voltajına zayıfça bağlıdır. Bu voltaj bağımlılığı yüksek sıcaklıklarda artarken düşük sıcaklıklarda daha da zayıflamaktadır. Dielektrik sabitinin (ϵ') büyük değerleri, yüksek sıcaklıklarda ve düşük pozitif gerilimlerde gözlenmektedir. Dar bant aralıklı yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları tuzaklanmış olup, harekette serbest değildir. Bu durum bir arayüzey potansiyeline sebep olur. Sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artar ve böylece daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşur. Bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olur [52].

ϵ'' ise artan sıcaklıkla artarken bu artış özellikle ileri pozitif gerilimlerde daha belirgindir. Bu durum termal olarak aktive olmuş dielektrik gevşemenin göstergesidir [9,53,54]. Her bir sıcaklık için elde edilen ϵ'' -V ve $\tan\delta$ -V eğrileri 0 Voltta bir minimuma sahiptir. Bu noktadan hem büyük hem de küçük gerilim değerleri için ϵ'' ve $\tan\delta$ artmaktadır. Pozitif bölgedeki artış negatif bölgeye göre daha hızlı olmasına karşın negatif bölgedeki sıcaklık dağılımı daha belirgindir ve pozitif bölgede sıcaklık dağılımı giderek daralmaktadır.

Artan gerilim voltajıyla artan ϵ' yaklaşık 1 V civarında arayüzeydeki yalıtkan SiO_2 tabakasının kırılma gerilimine yaklaşması ve yarıiletken tabakasındaki dielektrik gevşeme dolayısıyla dielektrik sabitinde çok hızlı bir düşüş gözlenirken buna dielektrik kayıptaki hızlı yükseliş eşlik etmektedir. İleri pozitif gerilimlerde M3 MOS yapısında ki arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonuyla, ϵ' hızlı bir şekilde düşürken ϵ'' hızlı bir artmaktadır.

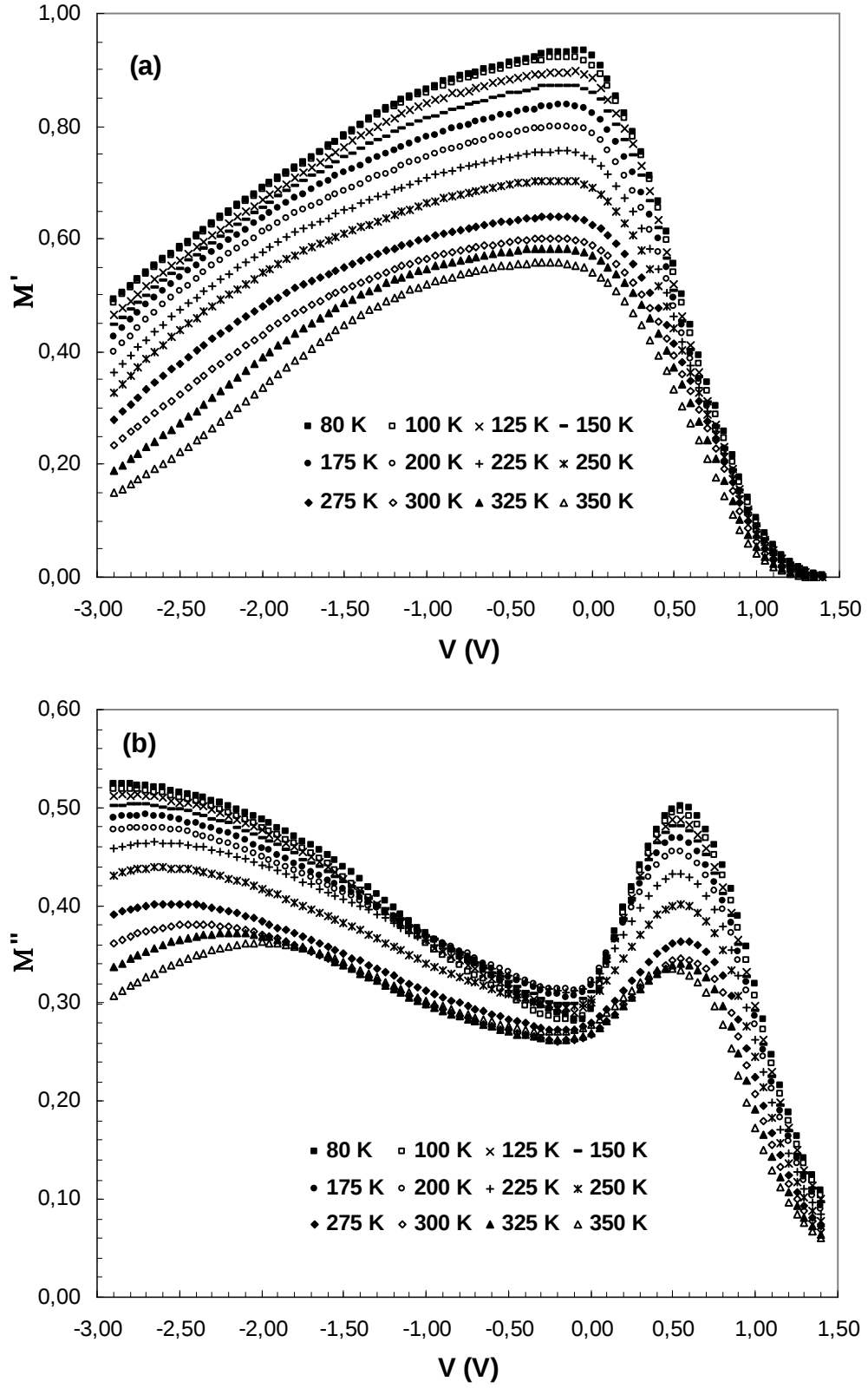


Şekil 6.11. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz’de ki (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı



Şekil 6.11 (Devam). M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz’de ki (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı

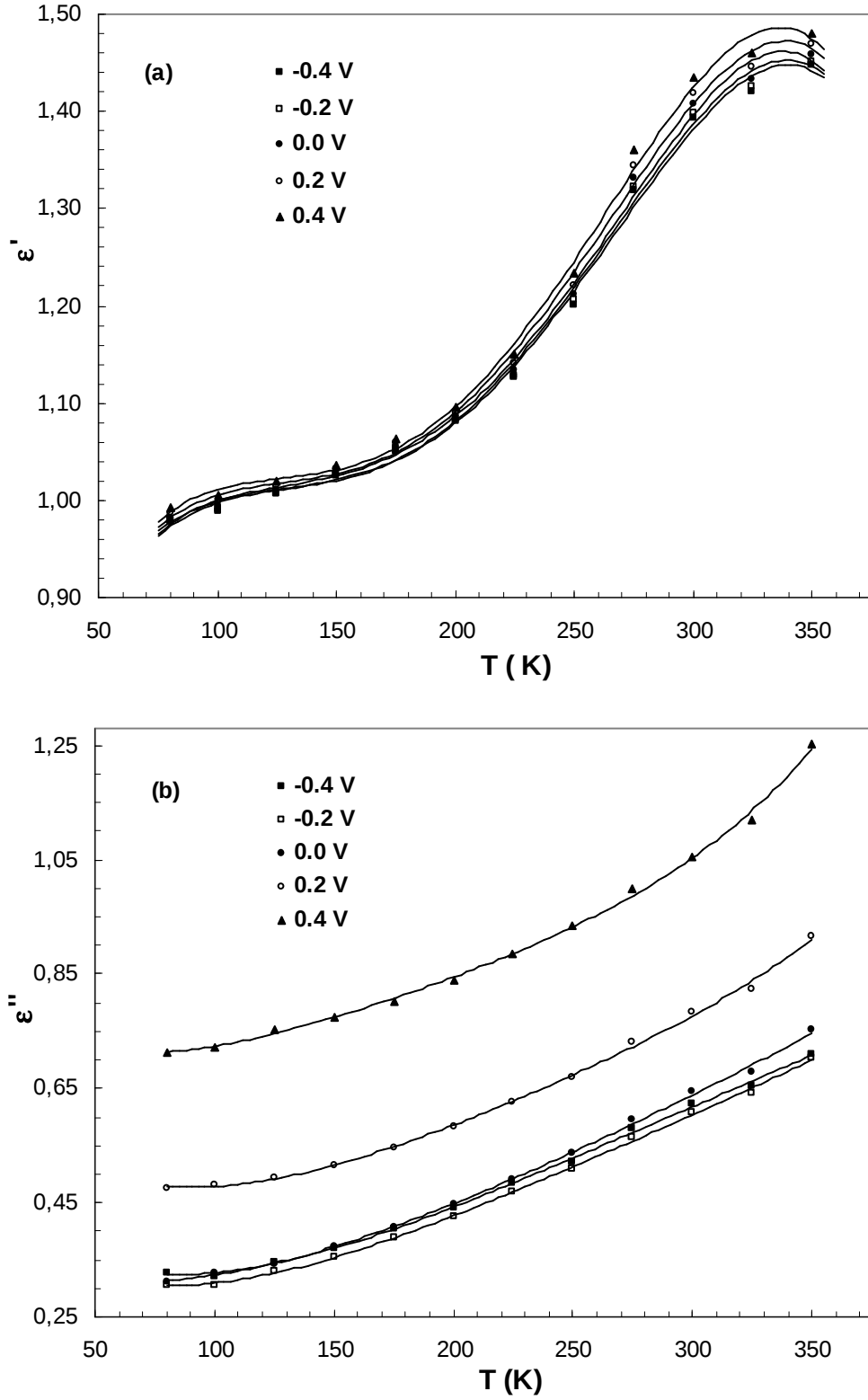
Şekil 6.12’de ise yine bu MOS yapısına ait elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M'') değerlerinin sıcaklık bağımlılığı gösterilmiştir. M' ve M'' değerlerinin her ikisi de artan sıcaklıkla azalırken gerilime karşı davranışları birbirinden farklıdır. Reel elektrik modülü M' , 0 Voltta bir maksimuma sahip olup, bu değerden itibaren hem negatif bölgede hem de pozitif bölgede azalmaktadır. Bu azalma pozitif bölgede hızlı bir düşüş şeklindedir. İmajiner elektrik olan M'' ise 0 Voltta yerel bir minimuma ve yaklaşık 0,6 Voltta ise bir maksimuma sahiptir. Her iki elektrik modülü için ortak olan, her bir sıcaklığa karşılık gelen eğrilerin negatif bölgedeki dağılımı pozitif bölgeye göre daha belirgin olmasıdır.



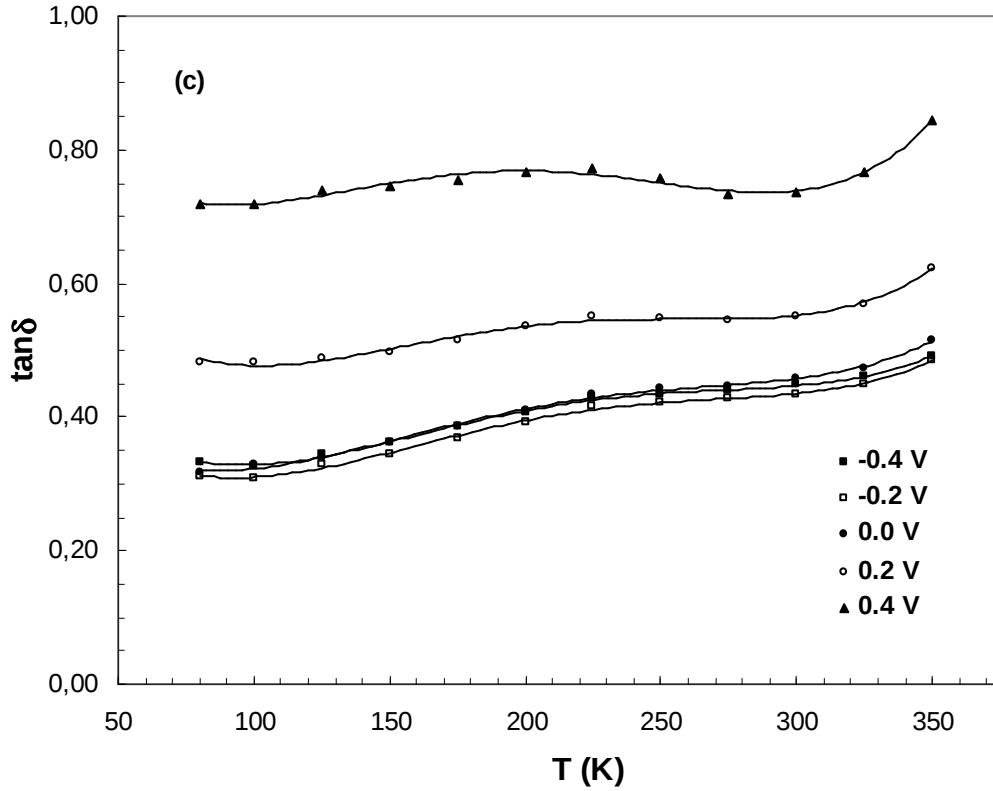
Şekil 6.12. M3 (240 Å) MOS yapısının 1 MHz'de ki (a) M' -V (b) M'' -V karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığı

Şekil 6.13 M3 MOS yapısının farklı voltajlar için 1 MHz'de ki dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') ve dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. Dielektrik sabiti (ϵ') değerleri 150-300 K sıcaklık aralığında artan sıcaklıkla hızla artarken bu aralığın dışındaki düşük ve yüksek sıcaklıklarda ise sıcaklık bağımlılığı azalmaktadır. Yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları tuzaklanmış olup, harekette serbest değildirler. Bu durum bir arayüzey potansiyeline sebep olmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artar ve böylece daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşur. Bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olmaktadır. Bu mekanizma M3 MOS yapısı için özellikle 150-300 K sıcaklık aralığında etkindir. Ayrıca ϵ' -T eğrilerinin voltaja bağlı dağılımı yüksek sıcaklıklarda daha belirginken düşük sıcaklıklarda daralmaktadır.

ϵ'' değerleri genel olarak hem artan sıcaklıkla hem de artan gerilim voltajıyla artmaktadır. Sıcaklığa bağlı artış pozitif gerilimlerde parabolik olurken negatif gerilimlerde bu artış yaklaşık lineerdir. Ayrıca ϵ'' -T eğrilerinin voltaja bağlı dağılımı pozitif gerilimler için belirgin olup negatif voltajlarda bu dağılım kaybolmakta ve düzensizleşmektedir. $\tan\delta$ -sıcaklık eğrileri ise özellikle verilen negatif gerilimlerde yatay bir seyir izlemekte olup bu eğrilerin dağılımı pozitif gerilimler için daha belirgindir. Bu da pozitif gerilimlerdeki artışın daha hızlı olduğunun göstergesidir.

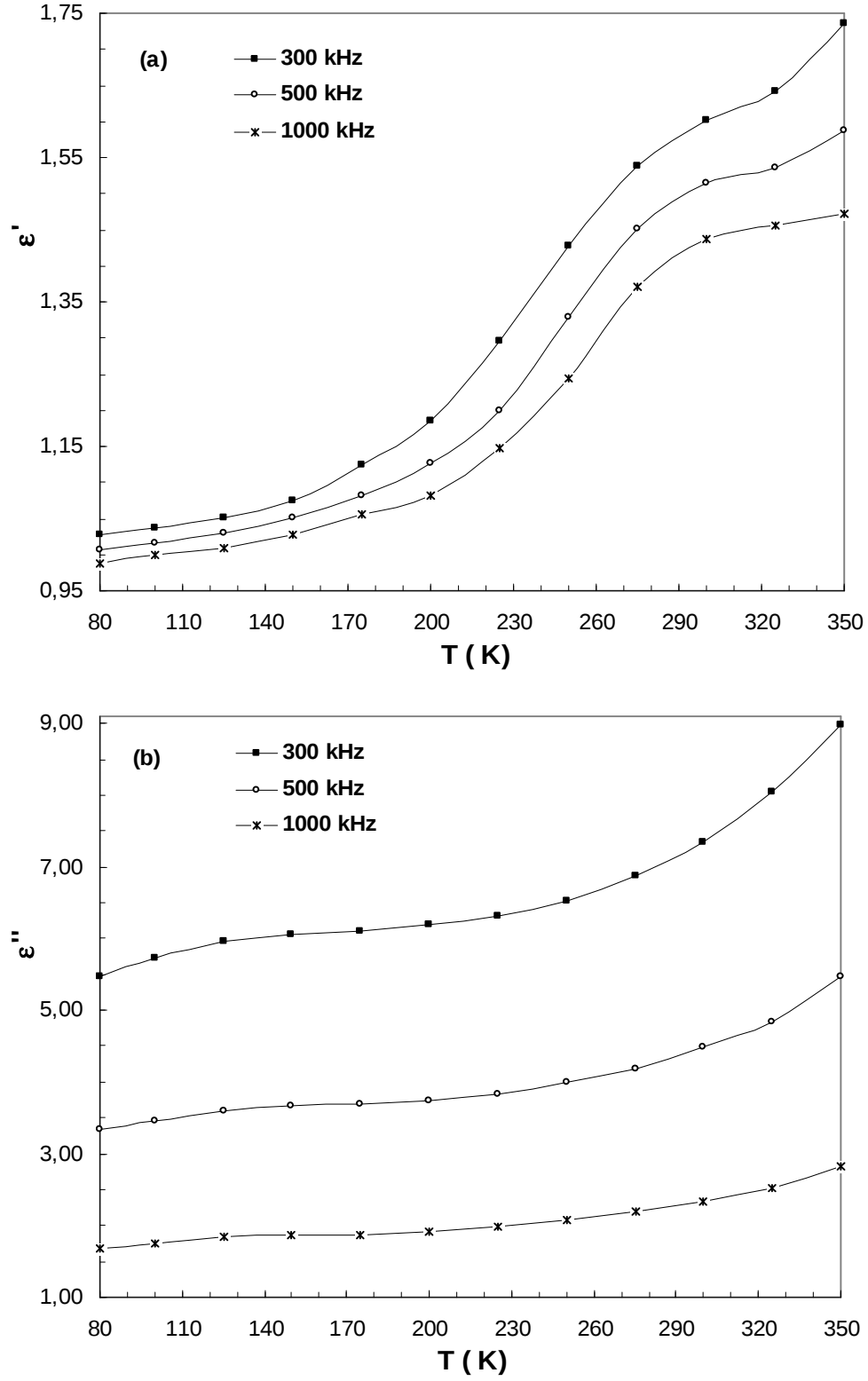


Şekil 6.13. M3 (240 Å) MOS yapısının farklı voltajlar için (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 1 MHz'de ki sıcaklık bağımlılığı

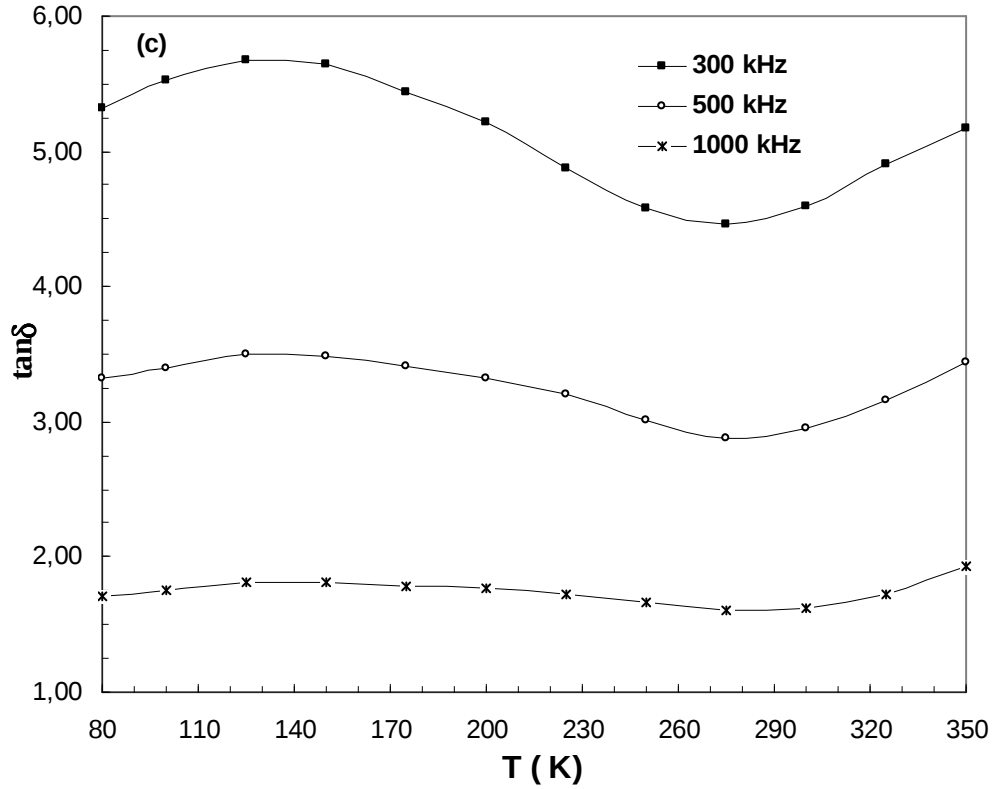


Şekil 6.13 (Devam). M3 (240 Å) MOS yapısının farklı voltajlar için (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 1 MHz'de ki sıcaklık bağımlılığı

Şekil 6.14 M3 MOS yapısının dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') ve dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. Şekilden görüldüğü üzere ϵ' ve ϵ'' değerleri artan sıcaklıkla artarken, artan frekansla azalmaktadırlar. Sıcaklık artarken örgüdeki kusurlar ve düzensizlikler artmakta ve ayrıca yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıların mobilitesi de artmaktadır. Ayrıca rijit yapının bozulmasına sebep olan sıcaklık, dipol yöneliminde bir artışa yol açmaktadır. Bu etkilerin toplamı ϵ' ve ϵ'' değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Diğer taraftan $\tan\delta$ artan frekansla azalırken, özellikle yüksek frekanslarda (1 MHz) çoğunlukla sıcaklıktan bağımsızdır. Bu durum göstermektedir ki, bazı eksik yönleri olmasına rağmen oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklar dielektrik özellikleri daha iyi yönde etkilemektedir.

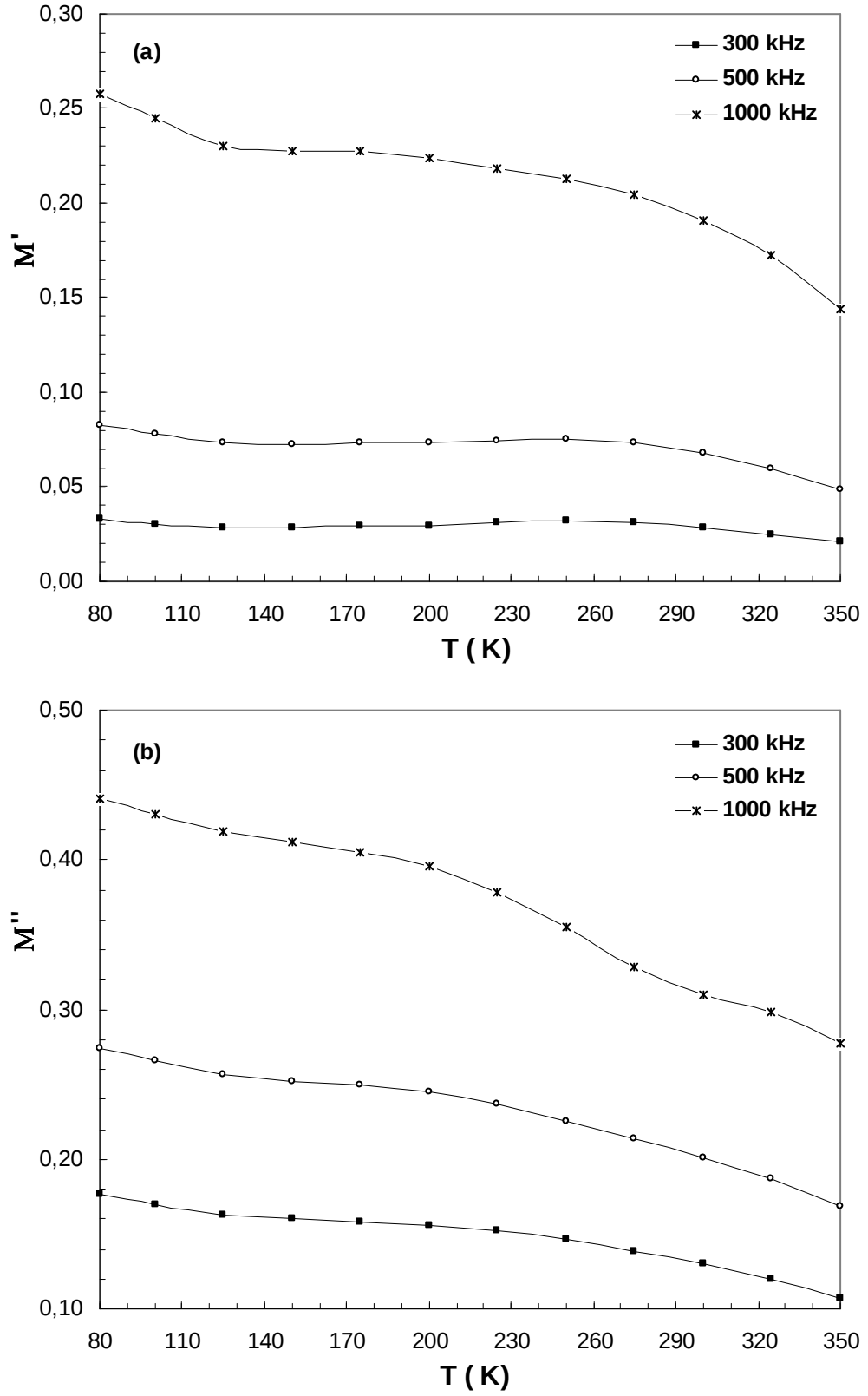


Şekil 6.14. M3 (240 Å) MOS yapısının (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı



Şekil 6.14 (Devam). M3 (240 Å) MOS yapısının dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'') (c) dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) karakteristiklerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı

Şekil 6.15 M3 MOS yapısının elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M'') değerlerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığını göstermektedir. M' ve M'' artan frekansla artarken genel olarak artan sıcaklıkla azalmaktadır. Özellikle reel elektrik modülü M' 500 kHz ve 1 MHz için yaklaşık olarak sıcaklıktan bağımsızdır. Her bir frekans için M' -T ve M'' -T eğrileri bir frekans dağılımına sahiptir. Bu dağılım ϵ' ve ϵ'' dağılımdan farklı olarak düşük sıcaklıklarda daha fazladır.



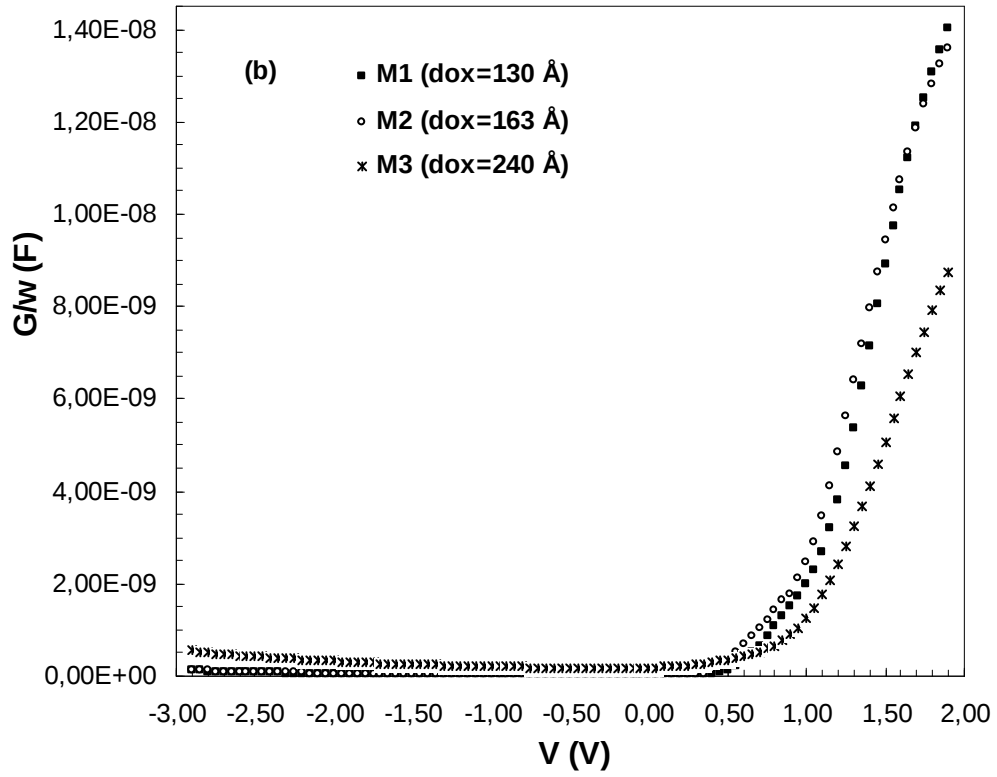
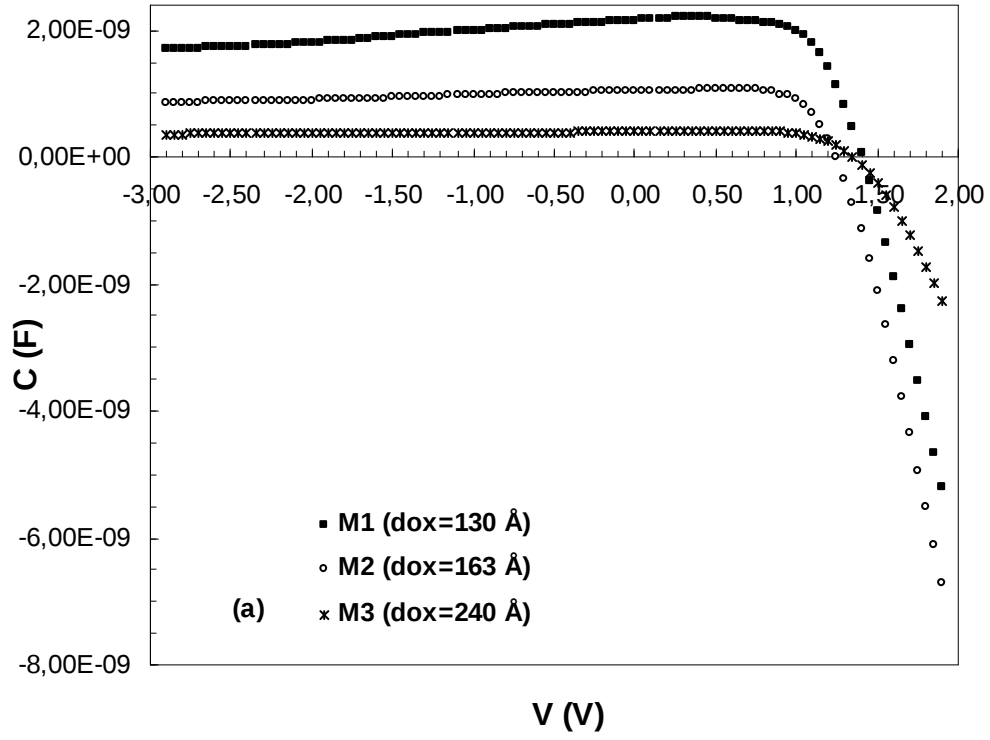
Şekil 6.15. M3 (240 Å) MOS yapısının elektrik modülünün (a) reel (M') (b) imajiner (M'') değerlerinin 0,8 voltta farklı frekanslar için sıcaklık bağımlılığı

6.3. Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerin Oksit Tabaka kalınlığı Bağımlılığı

6.3.1. Elektrik karakteristikler

Şekil 6.16(a) ve (b) farklı arayüzey oksit tabaka kalınlığına sahip M1, M2 ve M3 MOS yapılarının kapasitans-voltaj ve kondüktans-voltaj karakteristiklerinin 1 MHz için oda sıcaklığındaki değişimini göstermektedir. Kapasitans ve kondüktans eğrileri kırılma bölgesi haricinde gerilim voltajına zayıfça bağlıken; M1, M2 ve M3 için yarılmalar gözlenmektedir. Bu dağılımın sebebi her bir MOS yapının benzer şartlarda oluşturulmuş olmasına rağmen oksit tabaka kalınlıklarının birbirinden farklı olmasıdır. Özellikle kapasitans eğrilerinde bu dağılım her bölgede açıkça gözlenmektedir. Kapasitans değerleri M1 MOS yapısı için en büyükken M3 MOS yapısı için en küçüktür. Bu durum, artan oksit kalınlığıyla MOS kapasitörün kapasitesinin azaldığının açık bir göstergesidir. G_m/w eğrilerinde de oksit tabaka kalınlığı için yarılmalar gözlenmesine rağmen bu dağılım kapasitanstaki kadar belirgin değildir.

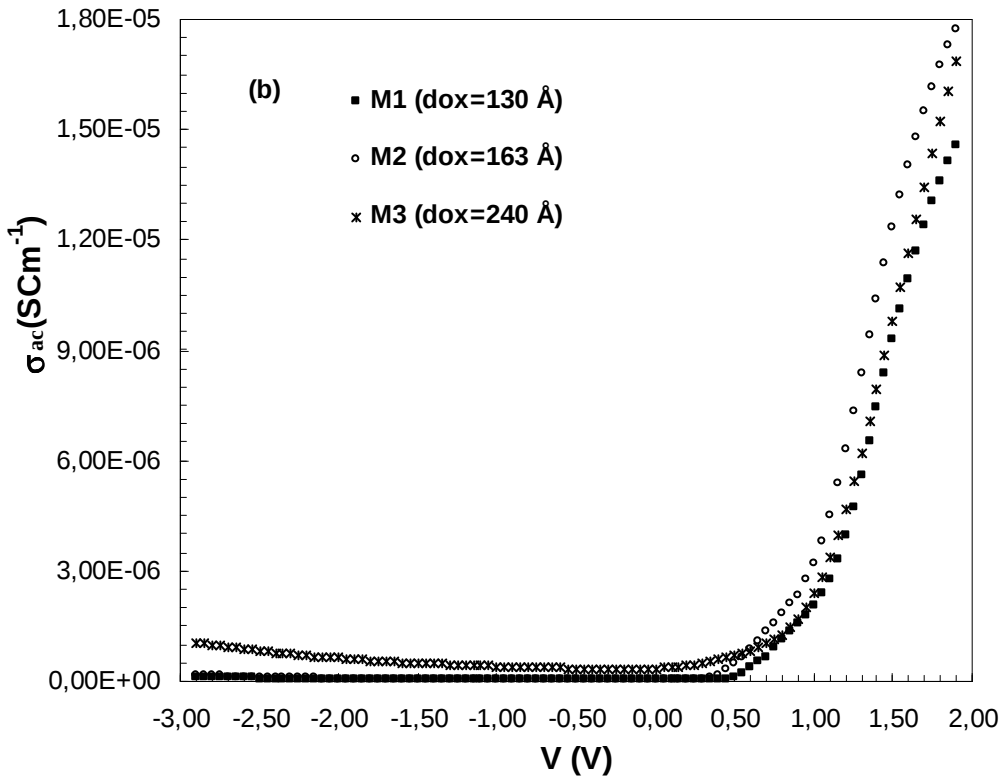
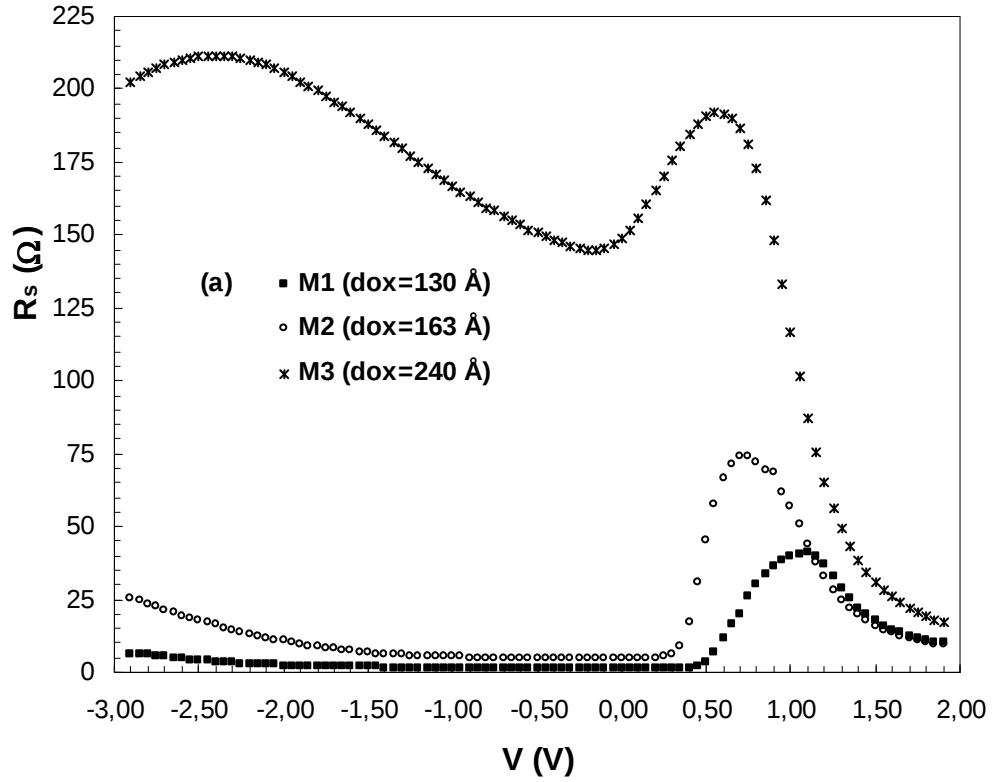
Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1'den büyük olduğu düşünülür fakat gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($\tau_d \gg \tau_0$) birçok farklı mekanizma yardımıyla kapasitansın hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür [39,40]. Arka yüzeyinde omik bir metal kontak ile ön yüzeyinde yalıtkan bir oksit tabakası büyütülmüş GaAs yarıiletkenli MOS yapıların, arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile kapasitans yaklaşık 1,5 volttan sonra negatif olarak artarken, kondüktans ise hızlıca artmaktadır (Şekil 6.16(a) ve (b)).



Şekil 6.16. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) C-V (b) G/w-V karakteristikleri

Şekil 6.17 M1, M2 ve M3 MOS yapılarının R_s -V ve σ_{ac} -V karakteristiklerini göstermektedir. Seri direnç; özellikle kalınlığı M3'e göre küçük olan M1 ve M2 MOS yapıları için negatif bölgede voltaja pek bağımlılık göstermemesine rağmen M3 için bu bağımlılık belirgindir. Her üç MOS yapısı için R_s -V eğrileri pozitif bölgede birer pik vermekte ve bu pik maksimumları artan oksit tabaka kalınlığıyla negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. M1, M2 ve M3 MOS yapıları için seri direnç pik değerleri ve bunlara karşılık gelen voltaj değerleri sırasıyla (40,92 Ω ; 1,10 V), (73,86 Ω ; 0,70 V) ve (191,86 Ω ; 0,55 V)' tur. Bu yarıiletken/oksit arayüzeyindeki arayüzey durumlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Artan oksit kalınlığıyla daha küçük bir gerilim bölgesine kayan seri direnç maksimumu bu arayüzey durumlarının da artan kalınlıkla arayüzeyin daha sıkı bölgelerine kaydığının göstergesidir.

İletkenlik eğrilerinde de seri dirence benzer şekilde oksit tabaka kalınlığı için yarılmalar gözlenmektedir. İletkenlik değerleri yaklaşık -3 Volttan 0,5 Volt değerine kadar olan bölgede artan oksit kalınlığıyla artmakta iken bu değerden sonra M3 iletkenlik eğrisi bir çaprazlama yaparak bu durumu değiştirmektedir.



Şekil 6.17. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) R_s -V (b) σ_{ac} -V karakteristikleri

M1, M2 ve M3 MOS yapılarının, oda sıcaklığında ki 1 MHz ve 0,8 volt için bazı elektriksel parametrelerinin değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Artan oksit kalınlığına bağlı olarak MOS yapıların kapasitesi azalırken, seri direnci artmaktadır.

Çizelge 6.2. M1, M2 ve M3 MOS yapılarının oda sıcaklığında ki 1 MHz ve 0,8 volt için ölçülen ve hesaplanan bazı elektriksel parametreleri

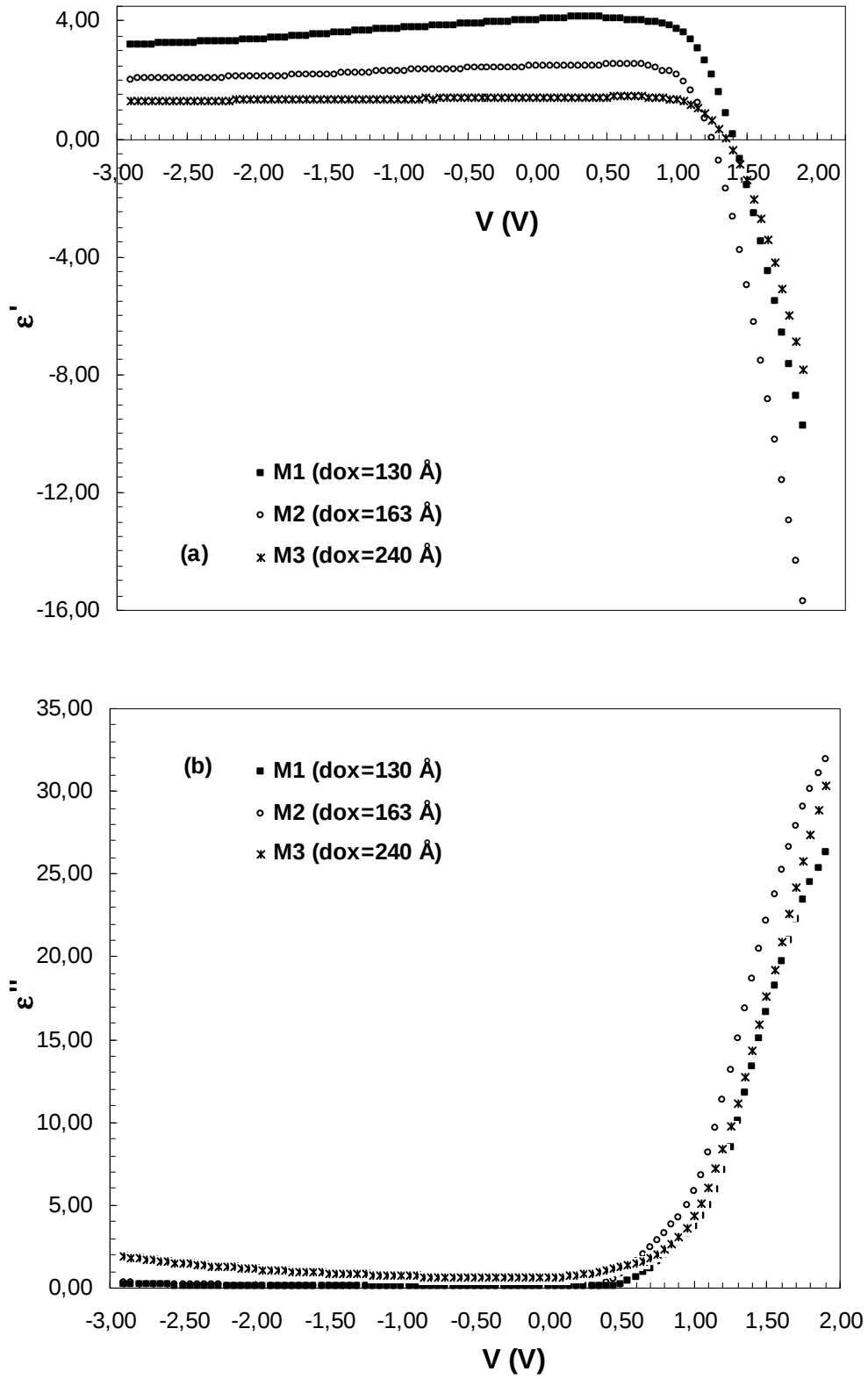
Örnekler	$C (F)$	$G/w (F)$	$R_s (\Omega)$	$\sigma_{ac} (S\text{cm}^{-1})$
M1 ($d_{ox}=130 \text{ \AA}$)	$2,13 \times 10^{-09}$	$1,08 \times 10^{-09}$	30,28	$1,13 \times 10^{-06}$
M2 ($d_{ox}=163 \text{ \AA}$)	$1,06 \times 10^{-09}$	$1,42 \times 10^{-09}$	72,16	$1,85 \times 10^{-06}$
M3 ($d_{ox}=240 \text{ \AA}$)	$4,12 \times 10^{-10}$	$6,64 \times 10^{-10}$	173,02	$1,28 \times 10^{-06}$

6.3.2. Dielektrik karakteristikler

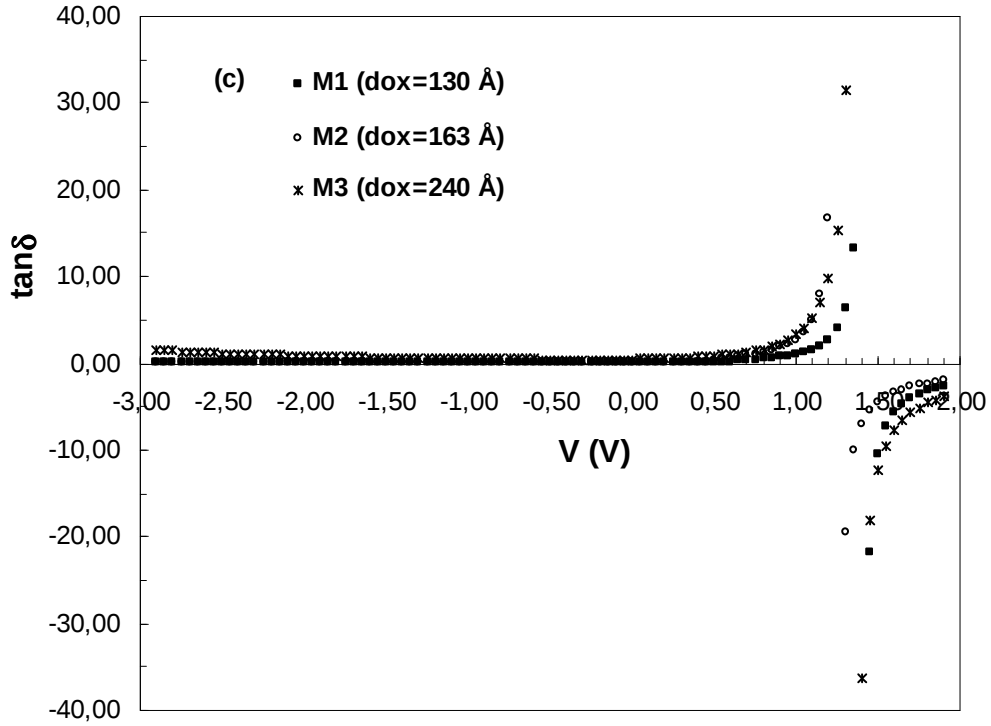
Şekil 6.18 M1, M2 ve M3 MOS yapılarının 1 MHz’de ki ϵ' -V, ϵ'' -V ve $\tan\delta$ -V karakteristiklerini göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, negatif bölgede ϵ' artan gerilimle zayıfça artarken, ϵ'' ise azalmaktadır. Pozitif bölgede ise genel olarak bunun tersi gerçekleşmekte ve artan gerilimle ϵ' azalırken ϵ'' artmaktadır. ϵ' -V eğrilerinden en kalın oksit tabakasına sahip M3 MOS yapısı için olan eğrinin, negatif gerilim bölgesinde gerilim voltajına bağımlılığı neredeyse yok gibidir. Yani bu durumda kalın oksit tabakası neredeyse kararlı bir dielektrik malzemedir ve gerilimden çok fazla etkilenmez denilebilir. Ayrıca bir MOS yapının kapasitansı, metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakanın kalınlığına bağlı olduğu kadar yarıiletken/yalıtkan (GaAs/SiO₂) arasında lokalize olmuş arayüzey durumlarının büyüklüğüne ve dağılımına da bağlıdır. Mevcut literatürde bir MS yapıdaki arayüzey durumları MIS yapıdan yaklaşık bir merteye daha büyüktür. Yani yalıtkan arayüzey

tabaka hem metal ile yarıiletken arasında bir izolasyon hem de pasivasyon görevi yapmaktadır. Öyleyse dielektrik sabiti kalınlıktan ziyade GaAs/SiO₂ arasında lokalize olmuş arayüzey durumlarının büyüklüğüne ve homojenliğine bağlıdır.

ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin her üçü de oksit tabaka kalınlığına karşı hassasken bu hassasiyet dielektrik sabiti ϵ' için daha da belirgindir. Her üç MOS yapısı için de ϵ' değerleri 1 volttan sonra hızlıca azalarak negatife gitmektedir. MOS yapıda kullanılan GaAs'da oluşan, gerek arayüzey durumları ve gerekse kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile bu MOS yapıların kapasitansı ve dielektrik sabitinde hızlı bir azalma ile negatif kapasite ve negatif dielektrik sabitine yol açmaktadır. Şekil 6.18'de açıkça görüldüğü gibi her üç MOS yapısı için de dielektrik sabiti yaklaşık 1,5 volt civarında negatife gitmektedir. Bu gerilim değerinden sonra, artan pozitif gerilimle dielektrik sabiti negatif olarak artmaktadır. Bu duruma dielektrik kayıptaki hızlı artış eşlik etmektedir. Bu bölgede dielektrik gevşeme zamanı (τ_d), taşıyıcıların oluşma-yeniden birleşme zamanından (τ_0) daha büyüktür. Yani GaAs yarıiletkeni relaxation durumuna geçmiştir.

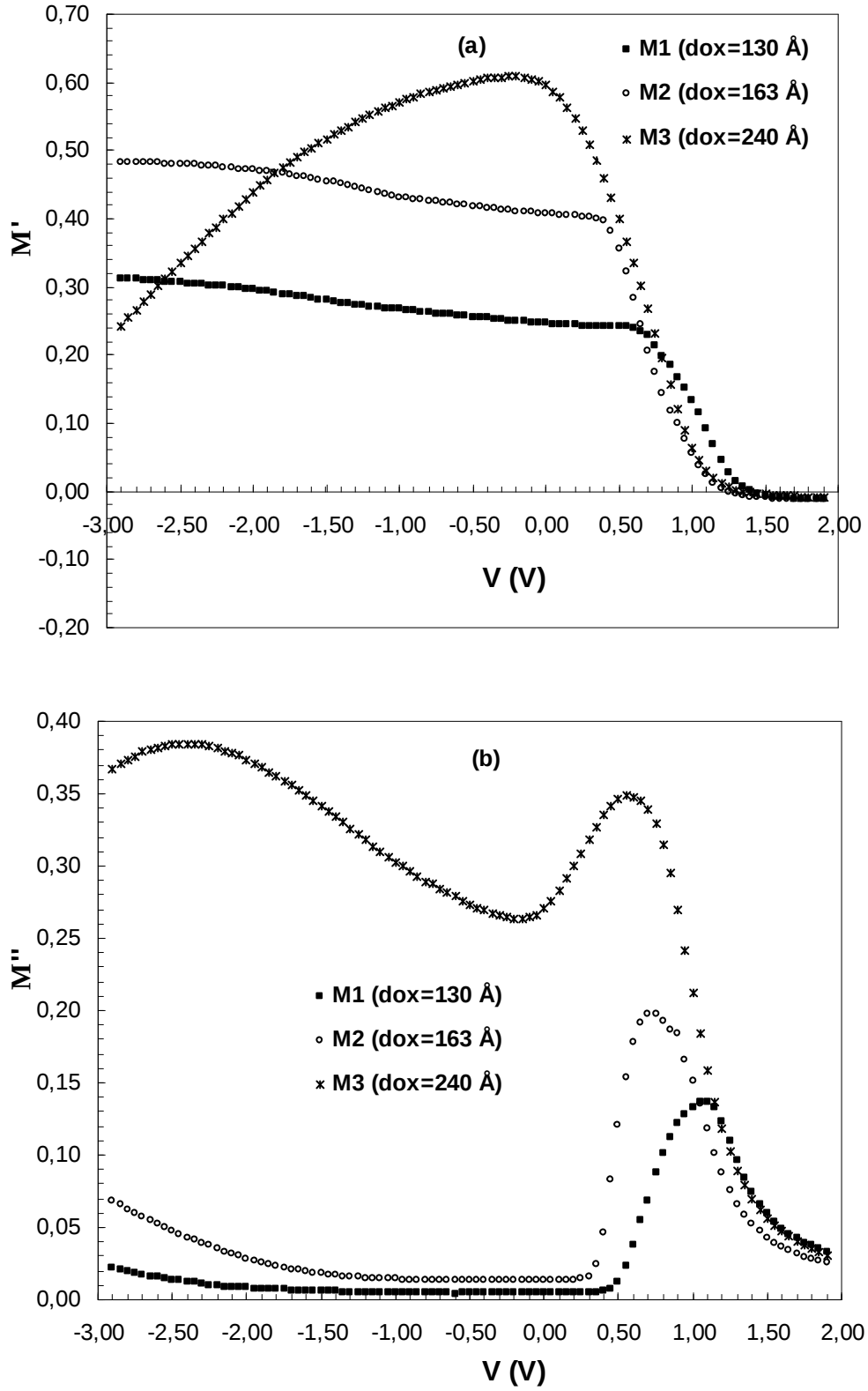


Şekil 6.18. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristikleri



Şekil 6.18 (Devam). M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) ϵ' -V (b) ϵ'' -V (c) $\tan\delta$ -V karakteristikleri

Şekil 6.19 M1, M2 ve M3 MOS yapılarının 1 MHz’ de ki M' -V ve M'' -V karakteristiklerini göstermektedir. M1 ve M2 MOS yapılarına ait M' değerleri artan gerilim voltajıyla azalmakta olup bu azalış belli bir voltajdan sonra yerini ani bir düşüşe bırakmakta ve yaklaşık 1,5 volttan sonra da her üç MOS yapısının reel elektrik modülü negatife gitmektedir. M3 MOS yapısının reel elektrik modülü M' ise yaklaşık 0 Volt civarında bir pik vermektedir. Ve bu pik değerinden sonra M1 ve M2 eğrileri gibi o da ani bir düşüşle negatif değerler almaktadır. M' değerleri yaklaşık olarak -2 V-0,5 V aralığında artan oksit kalınlığıyla artmaktadır. M'' değerleri; özellikle kalınlığı küçük olan M1 ve M2 MOS yapıları için negatif bölgede voltaja pek bağımlılık göstermemesine rağmen M3 için bu bağımlılık belirgindir. Her üç MOS yapısı için M'' -V eğrileri pozitif bölgede birer pik vermekte ve bu pik maksimumları artan oksit tabaka kalınlığıyla negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. M1, M2 ve M3 MOS yapıları için M'' pik değerleri ve bunlara karşılık gelen voltaj değerleri sırasıyla (0,137;1,10 V), (0,198;0,70 V) ve (0,348; 0,55 V)’tur.



Şekil 6.19. M1 (130 Å), M2 (163 Å) ve M3 (240 Å) MOS yapılarının 1 MHz’de ki (a) M' -V (b) M'' -V karakteristikleri

M1, M2 ve M3 MOS yapılarının, oda sıcaklığında ki 1 MHz ve 0,8 volt için bazı dielektrik parametrelerinin değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Artan oksit kalınlığına bağlı olarak MOS yapıların dielektrik sabiti azalırken, dielektrik kayıp tanjantı ve elektrik modülünün sanal bileşeni artmaktadır.

Çizelge 6.3. M1, M2 ve M3 MOS yapılarının oda sıcaklığında ki 1 MHz ve 0,8 volt için hesaplanan bazı dielektrik parametreleri

Örnekler	ϵ'	ϵ''	$\tan\delta$	M'	M''
M1 ($d_{ox}=130 \text{ Å}$)	3,98	2,03	0,51	0,20	0,10
M2 ($d_{ox}=163 \text{ Å}$)	2,48	3,32	1,34	0,14	0,19
M3 ($d_{ox}=240 \text{ Å}$)	1,43	2,30	1,61	0,20	0,31

7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada; farklı oksit kalınlıklarına sahip (M1: d_{ox} =130 Å, M2: d_{ox} =163 Å ve M3: d_{ox} =240 Å) Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) yapılarının C-V ve G/w-V ölçümleri 100 kHz-1MHz frekans ve 80 K-350 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ölçümlerden MOS yapılara ait seri direnç (R_s), arayüzey durumları (N_{ss}), iletkenlik (σ_{ac}) gibi elektriksel karakteristiklerle; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjant ($\tan\delta$) ve elektrik modülü (M' ve M'') gibi dielektrik karakteristikleri hesaplanarak frekans, sıcaklık, gerilim voltajı ve oksit kalınlığına bağımlılıkları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar MOS yapıların hem elektrik hem de dielektrik karakteristikleri frekans, sıcaklık ve oksit kalınlığına kuvvetli bir bağımlılık göstermektedir.

MOS yapıların, elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekansa bağlı incelenmesinde; özellikle yığılım bölgesinde belirgin olarak kapasitans ve kondüktansın azalan frekansla arttığı ve düşük frekanslardaki kapasitans ve kondüktans değerlerindeki bu artışın, GaAs/SiO₂ arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dolup boşalma zamanının frekans bağımlılığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda C-V eğrileri, MOS yapının seri direncinin varlığından dolayı yığılım bölgesinde anormal bir pik vermektedir. Bu C-V piklerinin konumu artan frekansla negatif gerilim bölgesine doğru kaymakta ve büyüklüğü azalarak gözden kaybolmaktadır. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının ac sinyali takip edebilmesi sonucu frekansa bağlı olarak hem bir ilave kapasitans hem de kondüktans meydana gelmektedir. Buna karşın yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumları ac sinyali takip edememesi (periyot, M/S arayüzeyinde lokalize olan arayüzey durumlarının ömründen daha kısa olduğu için) arayüzey kapasitansını ihmal edilebilecek kadar küçültmektedir. C-V ve G/w-V eğrilerinin frekansa karşı bu davranışı numunenin diğer elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekansa bağımlılığının da bir göstergesidir. Şöyle ki, artan frekansla; arayüzey durum yoğunluğu, seri direnç ve iletkenlik azalmaktadır. 100 kHz – 1 MHz aralığında oda sıcaklığında hesaplanan seri direnç değerlerinin pozitif

gerilim bölgesinde bir pik verdiği; bu pikin konumunun artan frekansla negatif gerilim bölgesine kaydığı ve artan frekansla bu pik değerinin küçülerek yüksek frekanslarda hemen hemen gözden kaybolduğu bulunmuştur. Seri direncin bu davranışı, Au/n-GaAs arasındaki yalıtkan bir tabakanın varlığı (SiO_2) ve GaAs/ SiO_2 arayüzeyindeki arayüzey durum yoğunluğunun özel dağılım profiline atfedilmiştir. Bu durum, aynı zamanda MOS yapının dielektrik karakteristiklerini de benzer yönde etkilemiştir. Artan frekansla aynı şekilde; dielektrik sabiti, dielektrik kayıp ve dielektrik kayıp tanjantı da azalmaktadır. İleri pozitif gerilimlerde MOS yapının kapasitans ve dielektrik sabiti hızla düşerken iletkenlik ve dielektrik kayıp hızla artmaktadır. Bu durum, genel olarak GaAs yarıiletkenli elektronik cihazlarda görülen negatif kapasitans ve negatif dielektrik sabiti oluşumunun bir göstergesidir. Yarıiletken/yalıtkan arayüzeyindeki arayüzey durumları ve yarıiletkenin omik kontağından azınlık taşıyıcıların ileri pozitif gerilimlerdeki enjeksiyonu sonucu kapasitans ve dielektrik değerleri hızlıca düşerek negatife gitmektedir. Tüm frekanslar için gerçekleşen bu düşüş, dielektrik gevşemem zamanının azınlık taşıyıcıların birleşme ömründen daha uzun olmasından kaynaklanmaktadır. Reel ve imajiner elektrik modülü-voltaj eğrileri hem ileri negatif gerilim hem de ileri pozitif gerilimde bir frekans dağılımı göstermektedirler. Orta gerilim bölgesinde ise her iki değerde yaklaşık sabit kalmakta olup gerilim ve frekans bağımlılığı ihmal edilecek kadar azalmaktadır. Reel elektrik modülünün frekans dağılımı negatif ve pozitif gerilim bölgeleri için aynı sırada iken, imajiner elektrik modülünün dağılımı pik değerinden sonra sıra değiştirmektedir. Reel elektrik modülü artan frekansla artan bir dağılım sergilemekte iken imajiner elektrik modülü negatif bölgede artan frekansla azalan, pozitif bölge de ise artan bir dağılım sergilemektedir. İmajiner elektrik modülü frekansa bağlı olarak yaklaşık 0,5-1 V aralığında her bir frekans eğrisi için bir pik vermektedir. Bu pikin maksimumu artan frekansla pozitif gerilim bölgesine doğru kaymaktadır. Bu davranış M/S arayüzeyinde ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının özel bir dağılımına atfedildi.

MOS yapının oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı incelendikten sonra, bu numunelerin 80 K-350 K aralığındaki sıcaklık bağımlılığı incelendi. Öncelikle M3 MOS yapısının 1 MHz'de her bir sıcaklık değeri için C-V ve G/w-V eğrileri elde

edilmiş ve bu eğrilerden bu yapıya ait elektrik ve dielektrik karakteristikler hesaplanmıştır. Kapasitans eğrilerinin, dielektrik kırılma bölgesi hariç genellikle uygulanan gerilime bağımlılıkları az olup, buna karşın büyük bir sıcaklık bağımlılığı göstermektedirler. Kondüktans değerleri hem uygulanan gerilime hem de sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Her bir sıcaklık için elde edilen G/w -V eğrileri 0 V civarında bir minimuma sahiptir. Bu noktadan hem büyük hem de küçük gerilim değerleri için kondüktans artmaktadır. Pozitif bölgedeki artış negatif bölgeye göre daha hızlı olmasına karşın negatif bölgedeki sıcaklık dağılımı daha belirgindir ve pozitif bölgede sıcaklık dağılımı giderek daralmaktadır. Bu durum hem gevşeme durumundaki GaAs yarıiletkeninde azınlık taşıyıcı enjeksiyonuyla iletkenliğin sıcaklıktan bağımsız olarak artmasından hem de arayüzeydeki yalıtkan SiO_2 tabakasının kırılma gerilimine yakın bölgeler olup taşıyıcı iletkenliğinin sağlanması için gerekli enerjinin zaten uygulanan gerilimle elde edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu noktadan sonra hem kapasitans hem de kondüktans için sıcaklıktan çok uygulanan gerilim önemli hale gelmektedir. Seri direnç-voltaj eğrileri yaklaşık 0,6 V civarında bir pik vermekte olup bu pikin değeri artan sıcaklıkla azalırken konumu da negatif voltaj bölgesine kaymaktadır. Her bir sıcaklık için elde edilen σ_{ac} -V eğrileri 0 Volttan bir minimuma sahiptir. Bu noktadan hem büyük hem de küçük gerilim değerleri için iletkenlik artmaktadır. Pozitif bölgedeki artış negatif bölgeye göre daha hızlı olmasına karşın negatif bölgedeki sıcaklık dağılımı daha belirgindir ve pozitif bölgede sıcaklık dağılımı giderek daralmaktadır. Yaklaşık 1 V gerilim değerinden sonra seri direncin hızlı düşüşü ile birlikte iletkenlikte çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Seri direnç hem uygulanan gerilime hem de sıcaklığa bağlı olarak bölgeden bölgeye (yığılım, tükenim ve tersinim) değişmektedir. Artan sıcaklıkla kapasitans ve kondüktansta meydana gelen azalma hem arayüzey durumlarının sıcaklık (termal uyarma) bağımlılığıyla hem de seri direncin bu davranışıyla açıklanabilir. Akümülayon bölgesinde bir pik veren seri direnç bu enerji aralığında bir arayüzey durum yoğunluğunun varlığının göstergesidir.

Dielektrik sabiti ϵ' , artan sıcaklıkla belirgin şekilde artarken, artan gerilim voltajına zayıfça bağlıdır. Bu voltaj bağımlılığı yüksek sıcaklıklarda artarken düşük sıcaklıklarda daha da zayıflamaktadır. Dielektrik sabitinin (ϵ') büyük değerleri, yüksek sıcaklıklarda ve düşük pozitif gerilimlerde gözlenmektedir. Dar bant aralıklı yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları tuzaklanmış olup, harekette serbest değildirler. Bu durum bir arayüzey potansiyeline sebep olur. Sıcaklığın artmasıyla yüklü taşıyıcıların sayısı üstel olarak artar ve böylece daha fazla uzay yükü polarizasyonu oluşur. Bu durum dielektrik sabitinin hızlıca artmasına sebep olur. ϵ'' ise artan sıcaklıkla artarken bu artış özellikle ileri negatif gerilimlerde daha belirgindir. Bu durum termal olarak aktive olmuş dielektrik gevşemenin göstergesidir. Her bir sıcaklık için elde edilen ϵ'' -V ve $\tan\delta$ -V eğrileri 0 Voltta bir minimuma sahiptir. Bu noktadan hem büyük hem de küçük gerilim değerleri için ϵ'' ve $\tan\delta$ artmaktadır. Pozitif bölgedeki artış negatif bölgeye göre daha hızlı olmasına karşın negatif bölgedeki sıcaklık dağılımı daha belirgindir ve pozitif bölgede sıcaklık dağılımı giderek daralmaktadır. M' ve M'' değerlerinin her ikisi de artan sıcaklıkla azalırken gerilim voltajına karşı davranışları birbirinden farklıdır. Reel elektrik modülü M' , 0 voltta bir maksimuma sahip olup, bu değerden itibaren hem negatif bölgede hem de pozitif bölgede azalmaktadır. Bu azalma pozitif bölgede hızlı bir düşüş şeklindedir. İmajiner elektrik olan M'' ise 0 Voltta yerel bir minimuma ve yaklaşık 0,6 Voltta ise bir maksimuma sahiptir. Her iki elektrik modülü için ortak olan, her bir sıcaklığa karşılık gelen eğrilerin negatif bölgedeki dağılımı pozitif bölgeye göre daha belirgin olmasıdır.

Daha sonra ise yine bu M3 MOS yapısının yığılm bölgesindeki 0,8 volt için değişik frekanslardaki sıcaklık bağımlılığı araştırılmıştır. C ve G/w değerleri artan sıcaklıkla artarken, artan frekansla azalmaktadır. Yarıiletken/oksit arayüzeyindeki homojen olmayan bir arayüzey tabakanın kapasitansı, oksit kapasitansı ile birlikte bir frekans dağılımına sebep olur. Çünkü düşük frekanslarda, arayüzey durumları ac sinyali frekansını takip edebilirler ve dolayısıyla frekansa bağlı olarak ilave bir kapasitans oluştururlar. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının ac sinyali takip edememesinden dolayı, bu durum arayüzey durum kapasitansını toplam kapasitans

yanında ihmal edilebilecek kadar küçültür. Bu durum hem C-T hem de G/w-T eğrilerinde her bir frekans eğrisi için bir yarılmaya sebep olmuştur. Sıcaklık artarken, termal enerjileri artan çoğunluk taşıyıcılar ve arayüzey durumları kapasitans ve kondüktansta bir artışa sebep olmaktadır. Bu durumda C ve G/w artarken MOS yapısının seri direncinin artan sıcaklıkla düşmesi beklenir. Bu nedenle hesaplanan seri direncin, artan frekans ve artan sıcaklıkla azalmakta olduğu görülmüştür. Artan sıcaklıkla hem yarıiletkendeki çoğunluk taşıyıcıların hem de arayüzey durumlarının iletme katkısından dolayı iletkenliğin artması, seri direncin artan sıcaklıkla azalmasına sebep olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ki frekans dağılımı yüksek sıcaklıklara göre daha belirgindir. Bu durum arayüzey durumları üzerinde düşük sıcaklıklarda frekansın, yüksek sıcaklıklarda ise termal uyarmanın daha etkili bir mekanizma olduğunu göstermektedir.

ϵ' ve ϵ'' değerleri artan sıcaklıkla artarken, artan frekansla azalmaktadırlar. Artan sıcaklıkla gerek yarıiletkendeki taşıyıcıların üstel olarak artışı ve gerekse arayüzey durumlarının artan sıcaklıkla yük geçişleri sonucu iyonize olması toplam polarizasyonu artırmaktadır. Bu etkilerin toplamı ϵ' ve ϵ'' değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Diğer taraftan $\tan\delta$ artan frekansla azalırken, özellikle yüksek frekanslarda çoğunlukla sıcaklıktan bağımsızdır. Bu durum göstermektedir ki, bazı eksik yönleri olmasına rağmen oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklar dielektrik özellikleri daha iyi yönde etkilemektedir. M' ve M'' artan frekansla artarken genel olarak artan sıcaklıkla azalmaktadır. Özellikle reel elektrik modülü M' 500 kHz ve 1 MHz için yaklaşık olarak sıcaklıktan bağımsızdır.

Ayrıca üç farklı oksit kalınlığına sahip M1, M2 ve M3 MOS yapıları için 1 MHz'de C-V ve G/w-V ölçümleri yapılarak, MOS yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin arayüzey oksit tabaka kalınlığına bağımlılığı araştırılmıştır. Kapasitans ve kondüktans eğrileri kırılma bölgesi haricinde gerilim voltajına zayıfça bağlıken; M1, M2 ve M3 için yarılmalar gözlenmektedir. Bu dağılımın sebebi her bir MOS yapının benzer şartlarda oluşturulmuş olmasına rağmen oksit tabaka kalınlıklarının birbirinden farklı olmasıdır. Özellikle kapasitans eğrilerinde bu

dağılım her bölgede açıkça gözlenmektedir. Kapasitans değerleri M1 MOS yapısı için en büyükken M3 MOS yapısı için en küçüktür. Bu durum, artan oksit kalınlığıyla MOS kapasitörün kapasitesinin azaldığının açık bir göstergesidir. G_m/w eğrilerinde de oksit tabaka kalınlığı için yarılmalara gözlenmesine rağmen bu dağılım kapasitanstaki kadar belirgin değildir. Seri direnç; özellikle kalınlığı M3'e göre küçük olan M1 ve M2 MOS yapıları için negatif bölgede voltaja pek bağımlılık göstermemesine rağmen M3 için bu bağımlılık belirgindir. Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1'den büyük olduğu düşünülür fakat gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($\tau_d \gg \tau_0$) birçok farklı mekanizma yardımıyla kapasitansın hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür. Arka yüzeyinde omik bir metal kontak ile ön yüzeyinde yalıtkan bir oksit tabakası büyütülmüş GaAs yarıiletkenli MOS yapıların, arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile kapasitans yaklaşık 1,5 volttan sonra negatif olarak artarken, kondüktans ise hızlıca artmaktadır.

Her üç MOS yapısı için R_s-V eğrileri pozitif bölgede birer pik vermekte ve bu pik maksimumları artan oksit tabaka kalınlığıyla negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. M1, M2 ve M3 MOS yapıları için seri direnç pik değerleri ve bunlara karşılık gelen voltaj değerleri sırasıyla (40,92 Ω ; 1,10 V), (73,86 Ω ; 0,70 V) ve (191,86 Ω ; 0,55 V)' tur. Bu yarıiletken/oksit arayüzeyindeki arayüzey durumlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Artan oksit kalınlığıyla daha küçük bir gerilim bölgesine kayan seri direnç maksimumu bu arayüzey durumlarının da artan kalınlıkla arayüzeyin daha sık bölgelerine kaydığının göstergesidir. İletkenlik eğrilerinde de seri dirence benzer şekilde oksit tabaka kalınlığı için yarılmalara gözlenmektedir. İletkenlik değerleri yaklaşık -3 Volttan 0,5 Volt değerine kadar olan bölgede artan oksit kalınlığıyla artmakta iken bu değerden sonra M3 iletkenlik eğrisi bir çaprazlama yaparak bu durumu değiştirmektedir.

ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin her üçü de oksit tabaka kalınlığına karşı hassasken bu hassasiyet dielektrik sabiti ϵ' için daha da belirgindir. Her üç MOS yapısı için de ϵ'

değerleri 1 Volttan sonra hızlıca sıfıra düşmektedir. Arka yüzeyinde omik bir metal kontak ile ön yüzeyinde yalıtkan bir oksit tabakası büyütülmüş GaAs yarıiletkenli MOS yapıların, arayüzey durumları ve kontak enjeksiyonu ile azınlık taşıyıcıların kontak arayüzeyine ve yarıiletken içine enjeksiyonu ile dielektrik sabiti yaklaşık 1,5 volttan sonra negatif olarak artarken, dielektrik kayıp ise hızlıca pozitif olarak artmaktadır. Buna ilaveten; arayüzeye oluşturulan SiO_2 yalıtkan tabakasının dielektrik sertliği 10^6 - 10^7 V/cm aralığında olup özellikle CVD ve PECVD benzeri sistemlerde büyütülen SiO_2 tabakasının dielektrik sertliğinin 10^6 V/cm civarına kadar düşebilmesi diğer bir etkidir. Bu durumda SiO_2 tabakası artık bir yalıtkan vazifesi göremez ve dolayısıyla ϵ' hızla sıfıra düşerken ϵ'' ve $\tan\delta$ 'nın artması beklenir. M1 ve M2 MOS yapılarına ait M' değerleri artan gerilim voltajıyla azalmakta olup bu azalış belli bir voltajdan sonra yerini ani bir düşüşe bırakmaktadır. M3 MOS yapısının reel elektrik modülü M' ise yaklaşık 0 Volt civarında bir pik vermektedir. M'' değerleri; özellikle kalınlığı küçük olan M1 ve M2 MOS yapıları için negatif bölgede voltaja pek bağımlılık göstermemesine rağmen M3 için bu bağımlılık belirgindir. Her üç MOS yapısı için M'' -V eğrileri pozitif bölgede birer pik vermekte ve bu pik maksimumları artan oksit tabaka kalınlığıyla negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. M1, M2 ve M3 MOS yapıları için M'' pik değerleri ve bunlara karşılık gelen voltaj değerleri sırasıyla (0,137; 1,10 V), (0,198; 0,70 V) ve (0,348; 0,55 V)'tur.

Bir MOS yapının C-V ve G/w-V eğrileri o yapının hem elektrik hem de dielektrik özelliklerinin davranışı hakkında önemli bilgiler içermektedir. Bu nedenle MOS yapılar için, değişik frekans, sıcaklık ve oksit tabaka kalınlıklarına bağlı olarak yapılan C-V ve G/w-V ölçümleri yapılarak bu ölçümlerden MOS yapıların temel elektrik ve dielektrik parametreleri hesaplanmıştır. Yapılan tüm bu ölçüm ve hesaplamalar göstermiştir ki bu yapıların hem elektrik hem de dielektrik özellikleri bu üç parametreye kuvvetlice bağımlıdır. İdeal olmayan bir MOS yapıdaki arayüzey durumları, diğer safsızlıklar ve yüklü durumlar bu yapının; uygulanan gerilime, frekansa ve sıcaklığa karşı farklı tepkiler vermesine sebep olmaktadır. Arayüzey durumları değişen gerilim voltajıyla arayüzeyde değişken bir arayüzey potansiyeli oluşturmakta ve uyarma frekansına bağlı olarak ilave bir kapasitansa sahip

olmaktadır. Artan sıcaklıkla, arayüzey durumlarının bazıları yüklü hale geçip iletkenliğe katkıda bulunurken bazıları da pasivize olabilmektedir. Böylece artan sıcaklıkla gerek arayüzey ve gerekse yarıiletken yüzeyi değişen sıcaklıkla yeniden yapılanmaktadır. Arayüzeyde artan bir oksit kalınlığı metal-yarıiletken arasındaki yük geçişini ve kaçak akımları engellemesine rağmen artan oksit kalınlığıyla MOS yapısının kapasitansı azalmaktadır. Bu nedenle gerekli optimum kalınlık değerinin sağlanması gerekmektedir.

Yukarıda yapılan tartışmalar ışığında sonuçlar şu şekilde toparlanabilir:

Arayüzey yalıtkan SiO_2 tabakası oluşturulurken kullanılabilecek; termal buharlaştırmayla oksit biriktirme, püskürtme, sol-gel ve spray birikim (spray deposition) v.b. gibi diğer birçok yöntem olmasına karşın bu çalışmada PECVD yöntemi kullanılmıştır. Tek bir çip/işlemci üzerine milyonlarca devre elemanının yerleştirildiği teknolojinin (ULSI) geliştiği son yıllarda, geleneksel yöntemlerle termal olarak SiO_2 büyütmek yerine, dielektrik tabakaların daha düşük sıcaklıklar altında oluşturulmasına odaklanılmıştır. Bu da oldukça düşük işlem sıcaklığı (300-350 $^{\circ}\text{C}$) ile PECVD tekniğini oldukça çekici hale getirmiştir. Ayrıca kullanılan yalıtkan SiO_2 tabakasının kalınlığı, gerekli yüksek kapasitans değerini ve sürücü akımını elde etmek için sürekli olarak azalmaktadır [55]. PECVD teknikle arayüzeyde oluşturulan SiO_2 tabakası diğer tekniklere göre oldukça homojen olmaktadır. SiO_2 tabakasının yüksek iyon yoğunluğu ve düşük basınç altında oluşturulması, büyüyen SiO_2 üzerinden hidrojenin kaldırılması için idealdir [56]. Bu nedenlerle kullanılan PECVD yöntemi, oluşturulan MOS yapıların yalıtkan arayüzeylerinin daha pürüzsüz ve homojen olmasını sağlarken daha düşük bir arayüzey durum yoğunluğu oluşturmuştur.

GaAs üzerine PECVD yöntemiyle farklı kalınlıklarda yalıtkan SiO_2 tabakası oluşturularak elde edilen MOS yapıların elektrik ve dielektrik karakteristikleri sırasıyla frekans, sıcaklık ve oksit kalınlığına bağlı olarak incelenmesi bize bu yapılar hakkında oldukça detaylı bilgiler vermiştir. Mevcut literatüre ilaveten GaAs yarıiletkeniyle oluşturulmuş MOS yapıların kapasitans ve dielektrik sabitinin;

frekans, sıcaklık ve oksit kalınlığından bağımsız olarak ileri pozitif gerilimlerde negatif değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, benzer yapıdaki MOS kapasitörlerde negatif bir kapasitans ve dielektrik sabiti elde etmek için uygulanan doğru beslem voltajının en önemli parametre olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

MOS yapıları kullanılarak yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, özellikle oda sıcaklığının altındaki sıcaklıkların bu yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin güvenilirliği ve kararlılığı için daha uygun olduğu bulunmuştur.

Bu MOS yapıların, hem arayüzeyde bir SiO_2 yalıtkan tabakası içermesi hem de gerek yarıiletken (GaAs) ve gerekse yarıiletken/yalıtkan (GaAs/SiO_2) arayüzeyinde yasak enerji aralığında arayüzey durumları içermesi uygulanan ac sinyalin frekansına duyarlı olmasına sebep olmaktadır. Özellikle düşük frekanslarda bu duyarlılık çok daha belirgindir ve MOS kapasitörde kararsızlıklara sebep olmaktadır. Bu nedenle kararlı bir kapasitör için özellikle büyük frekansların tercih edilmesi gerekmektedir.

Ayrıca farklı kalınlıklarda yalıtkan SiO_2 tabakası içeren MOS yapılardan, oksit kalınlığı en küçük olan M1 MOS yapısının en yüksek kapasitansa ve dielektrik sabitine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek kaliteli bir MOS kapasitör oluşturmak için arayüzeye oluşturulan yalıtkan SiO_2 tabakasının mümkün olduğunca ince olması, fakat tabakalar arasında kayda değer bir tünelleme akımına izin vermeyecek kadar kalın olması gerektiği bulunmuştur.

Sonuç olarak, metal ile yarıiletken arasına büyütülen bir yalıtkan tabakanın hem kalınlığı ve homojensizliği hem de yarıiletken/yalıtkan arayüzeyindeki yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumları yapının elektriksel ve dielektrik özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu etkiler özellikle düşük frekans ve yüksek sıcaklıklarda daha da belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle bir MOS yapıda, C-V ve G/w-V ölçüm sonuçlarını oldukça etkileyen yapının seri direnci, arayüzey durumları ve yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığı ölçümlerde mutlaka dikkate alınmalı ve gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Sze, S.M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd Ed.", **Wiley**, New York, 1-16, 245-300, 362-390 (1981).
2. Bardeen, J. and Brattain, W. H., "The Transistor, a Semiconductor Triode," **Phys. Rev.**, 71: 230-236 (1948).
3. Moll, J. L., "Variable capacitance with large capacitance", **Ire Wescon (Western Convention and Show) Record**, 3: 32-36 (1959).
4. Gökçen, M., "MOS Yapılarda Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/W-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi", Y.Lisanas Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-30 (2003).
5. E.H. Rhoderick, R.H. Williams, "Metal-Semiconductor Contacts 2nd Ed.", **Oxford University Press**, Oxford, 257-300 (1988).
6. Nicollian, E.H., Brews, J.R., "MOS Physics and Technology", **John Wiley and Sons**, New York, 40-175, 222-226, 423-439 (1982).
7. Tataroğlu, A., "Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures", **Microelectron. Eng.**, 83: 2551-2557 (2006).
8. Yücedağ, İ., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., "On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure", **Microelectron. Eng.**, 84: 180-186 (2007).
9. Tataroğlu, A., Altındal, Ş. Bülbül, M.M., "Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure" **Microelectron. Eng.**, 81 (1): 140-149 (2005).
10. Bülbül, M.M., "Frequency and temperature dependent dielectric properties of Al/Si₃N₄/p-Si(100) MIS structure", **Microelectron. Eng.**, 84: 124- 128 (2007).
11. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., "MOS conductance technique for measuring surface states parameters", **Appl. Phys. Lett.**, 7: 216-219 (1965).
12. Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H. and Cardon, F., "Electrical characteristics of Al/SiO₂/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation", **Solid State Electron.**, 37(3): 433-441 (1994).
13. Altındal, Ş., "Al-SiO_x-pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri.", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 52-74 (1993).

14. Sharma, B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications", **Plenum Press**, New York and London, 49-118 (1984).
15. Marıl, Elif, "(Al-Tiw+Ptsi)/N-Si Schottky Diyotlarının Sıcaklığa Bağlı Temel Parametreleri", Y.Lisanas Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4-10 (2005).
16. Cova P., Sign A., "Temperature dependence of I - V and C - V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes", **Solid State Electron.**, 33(1):11-19 (1990).
17. Milness A.G., Feucht D.L., "Heterojunctions and Metal-Semiconductor Contacts", **Academic Press**, New York and London, 156-165 (1972).
18. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", **Mc Graw-Hill**, New York, 420-450, 517-523 (1997).
19. Grove, A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", **John Wiley and Sons**, New York, 91-106, 334-357 (1967)
20. Ghandhi, S. K., "VLSI Fabrication Principles", **John Wiley & Sons**, New York, 401-405 (1983).
21. Hung, K. K. and Cheng, Y. C., "Determination of Si- SiO₂ interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurement", **Appl. Surf. Sci.**, 30 : 114-119 (1987).
22. Schroder, D. K., "Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.", **John Wiley & Sons**, New York, 337-379 (1998).
23. Hofstein, S. R. and Warfield, G., "Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer", **Solid State Electron.**, 8(3): 321-341 (1965).
24. Ulrich, B. and Kuchar, F., "Capacitance-voltage measurements on a p-type InSb metal/insulator/semiconductor structure with Si₃N₄ as the insulator", **Thin Solid Films**, 168(2): 157-168 (1989).
25. Haddara, S. H. and. El-Sayed, M., "Conductance technique in MOSFETs: study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes", **Solid State Electron.**, 31(8): 1289-1298 (1988).
26. Narsale, A. M. and Arora, B. M., "C-V-w and G-V-w characteristics of native oxide-GaAs interfaces of $\langle \bar{1} \bar{1} \bar{1} \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ orientations", **Phys. Stat. Sol. (a)**, 95: 743-748 (1986).

27. Cooke, M. J., "Semiconductor Devices", **Prentice Hall**, New York, 294-308 (1990).
28. Ong, D. G., "Modern MOS Technology", **Mc Graw-Hill**, New York, 49-62 (1986).
29. Terman, L. M., "An investigation of surface states at a silicon-silicon dioxide interface employing metal-oxide-silicon diodes", **Solid State Electron.**, 5(5): 259-285 (1962).
30. Berglund, C. N., "Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces", **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, Ed-13(10): 701-705 (1966).
31. Goetzberger, A., Klausmann, E. and Schulz, M. J., "Interface states on semiconductor/insulator surfaces", **CRC Critical Reviews in Solid State Sciences**, 6(1): 226-233 (1976).
32. Hill, W. A., Coleman C. C., "A single-frequency approximation for interface-state density determination", **Solid State Electron.** 23 (9): 987-993 (1980).
33. Goetzberger, A., "Ideal MOS curves for silicon", **Bell Syst. Tech. J.**, 45: 1097-1122 (1966).
34. Oral, M., "Elektrostatik", **Ege Ün. Matbaası**, İzmir, 221-252 (1983).
35. Tareev, B., "Physics of Dielectric Materials", **Mir Publishers**, Moscow, 67-95, 140-156 (1979)
36. Tataroğlu, Adem, "MOS yapılar da temel fiziksel parametrelerin frekans ve radyasyon miktarına bağılı incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 38-53 (2004).
37. Von Hippel, A. R., "Dielectrics and Waves", **John Wiley & Sons**, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234 (1959).
38. Popescu , M., Bunget, I., "Physics of Solid Dielectrics", **Elsevier**, Amsterdam, 206-245, 282-291 (1984).
39. Champness C. H. and Clark, W. R., "Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes", **Appl. Phys. Lett.**, 56(12):1104–1106 (1990).
40. Roosbroeck, W. Van and Jr. Casey, H. C., "Transport in relaxation semiconductors" **Phys. Rev. B.**, 5 (6): 2154-2175 (1972).
41. Jones, B. K., Santana, J., McPherson, M., "Negative capacitance effects in semiconductor diodes", **Sol. Stat. Com.**, 107(2):47-50 (1998)

42. Daniel, Vera V., "Dielectric Relaxation", **Academic Press**, London, 1-19, 79-87 (1967)
43. Symth, C. P., "Dielectric Behaviour and Structure", **McGraw-Hill**, New York, 52-61, 202-215 (1955).
44. Von Hippel, A. R., "Dielectric Materials and Applications", **John Wiley & Sons**, New York, 3-9, 18-24, 36-39, 63-122 (1954).
45. S. Kar and R. L. Narasimhan, "Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures", **J. Appl. Phys.**, 61(12): 5353-5359 (1987).
46. 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: 219-228 (2000).
47. Dökme, İ., Altındal, Ş., "The $C-V-f$ and $G/\omega-V-f$ characteristics of Au/SiO₂/n-Si capacitors", **Physica B.**, 391: 221 (2007).
48. Pissis P, Kyritsis A "Electrical conductivity studies in hydrogels", **Solid State Ionics.**, 97(1-4): 105-113 (1997).
49. Prabakar, K., Narayandass, S. K., Mangalaraj, D., "Dielectric studies on Cd_{0.4}Zn_{0.6}Te thin films" **Mater. Chem. and Phys.**, 78(3): 809-815 (2003).
50. Chattopadhyay, P., Daw, A. N., "On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode", **Solid State Electron.**, 29: 555-560 (1986).
51. Nakada, I., Ariga, K. And Ichimaya, A., "The electrical conductivity of anthrance", **J. Appl. Phys. Soc. Jpn.**, 19: 1587-1591 (1964).
52. Yücedağ, İbrahim, "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik ve dielektrik özelliklerin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 81-90 (2007).
53. Gould, R.D., Awan, S.A., "Dielectric properties of AlN_x thin films prepared by RF magnetron sputtering of Al using a N₂/Ar sputtering gas mixture", **Thin Solid Films**, 469: 184-189 (2004).
54. Ozaki, T., Ogasawara, T., Kosugi, T., Kamada, T., "Dielectric dispersion of SiO₂ glass at low temperatures", **Physica B.**, 263: 333-335 (1999).
55. Albertin, K.F., Pereyra, I., "Correlation of PECVD SiO_xN_y dielectric layer structural properties and Si/SiO_xN_y/Al capacitors interface electrical properties", **J. Non-Cryst. Sol.**, 352: 1438-1443 (2006)

56. Pecora, A., Maiolo, L., Fortunato, G., Caligiora, C., “A comparative analysis of silicon dioxide films deposited by ECR-PECVD, TEOS-PECVD and Vapox-APCVD”, *J. Non-Cryst. Sol.*, 352:1430-1433 (2006)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖKÇEN, Muharrem
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.08.1980 Niksar/TOKAT
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (505) 266 87 17
 e-mail : mgokcen20@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fizik Bölümü	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2001
Lise	Danışmend Gazi Lisesi (Niksar/Tokat)	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-	T. C. Sayıştay Başkanlığı	Memur
2002-2006	Dershane	Fizik Öğretmeni

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI Dergilerde

- Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., “The effect of ^{60}Co (γ -ray) irradiation on the electrical characteristics of Au/SnO₂/n-Si (MIS) structures”, *Rad. Phys. and Chem.*, 77 (1): 74-78 (2008).
- Dökme, İ., Altındal, Ş., Gökçen, M., “Frequency and gate voltage effects on the dielectric properties of Au/SiO₂/n-Si structures”, *Microelectron. Eng.*, 85: 1910-1914 (2008).

3. Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş., “Electrical and Dielectric properties of Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) Structures with different oxide layer thickness”, *Optoelectron. Adv. M.*, 2(12): 833-837 (2008).
4. Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş., “Temperature Dependence of Electrical Characteristics of Au/SiO₂/n-GaAs(MOS) Structures”, *Optoelectron. Adv. M.*, 2(12): 838-841 (2008).

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

5. Altındal, Ş., Gökçen, M., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., “Effects of Gamma Radiation Stress on Electrical Characteristics of Au/SnO₂/n-Si (MIS) diodes”, *Balkan Physics Letters*, special issue (2008)
6. Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Yücedağ, İ., “Effects of Gamma Radiation Stress on Dielectric properties of Au/SnO₂/n-Si (MIS) Diodes”, *Balkan Physics Letters*, special issue (2008)
7. Yücedağ, İ., Altındal, Ş., Gökçen, M., “On the profile of Interface states and their relaxation time in Au/SnO₂/n-Si diodes”, *Balkan Physics Letters*, special issue (2008)
8. Yücedağ, İ., Gökçen, M., Altındal, Ş., “Frequency Dependence of Forward and Reverse Bias Capacitance-Voltage Characteristics of MIS Structures”, *Balkan Physics Letters*, special issue (2008)

Kongre Tebliğleri (Proceedings ve Poster Sunumlar)

9. Gökçen, M., Altuntaş, H., “On the anomalous peak in the forward bias C-V curves of in Au/SiO₂/n-GaAs structures”, *Condensed Matter Physics Conference of Balkan Countries*, Muğla (26-28 Mayıs 2008)
10. Altuntaş, H., Gökçen, M., Özçelik, S., “Current-Voltage Characteristics in Au/n-GaAs Schottky Barrier Diodes in Wide Temperature Range”, *Condensed Matter Physics Conference of Balkan Countries*, Muğla (26-28 Mayıs 2008)
11. Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş., “Temperature Dependence of Electrical Characteristics of Au/SiO₂/n-GaAs (MOS) Structures”, 25. *Uluslararası Fizik Kongresi*, Bodrum (2008)
12. Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Yücedağ, İ., “Effects of Gamma Radiation Stress on Dielectric properties of Au/SnO₂/n-Si (MIS) Diodes”, 24. *Uluslararası Fizik Kongresi*, Malatya (28-31 Ağustos 2007)

13. Altındal, Ş., Gökçen, M., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., “Effects of Gamma Radiation Stress on Electrical Characteristics of Au/SnO₂/n-Si (MIS) diodes”, **24. Uluslararası Fizik Kongresi**, Malatya (28-31 Ağustos 2007)
14. Yücedağ, İ., Altındal, Ş., Gökçen, M., “On the profile of Interface states and their relaxation time in Au/SnO₂/n-Si diodes”, **24. Uluslararası Fizik Kongresi**, Malatya (28-31 Ağustos 2007)
15. Yücedağ, İ., Gökçen, M., Altındal, Ş., “Frequency Dependence of Forward and Reverse Bias Capacitance-Voltage Characteristics of MIS Structures”, **24. Uluslararası Fizik Kongresi**, Malatya (28-31 Ağustos 2007)
16. Gökçen, M., Tataroğlu, A., Altındal, “Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapıların Elektriksel Karakteristiklerine Frekans ve Radyasyonun Etkisi”, **XI. Yoğun Madde Fiziği**, Ankara (2004)

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Masa tenisi, Sinema, Tiyatro, Müzik,