

**METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILARDA
ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
SICAKLIK VE FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

İbrahim YÜCEDAĞ

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2007
ANKARA**

İbrahim YÜCEDAĞ tarafından hazırlanan METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILARDA ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE FREKANSA BAĞLI İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Tez Yöneticisi

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

Başkan: : Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA

Üye : Prof. Dr. H.Güçlü YAVUZCAN

Üye : Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

Üye : Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL (Danışman)

Üye : Doç. Dr. Osman GÜRDAL

Tarih : 23 / 01 / 2007

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



TEZ BİLDİRİMİ

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

İbrahim YÜCEDAĞ

**METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILARDA ELEKTRİK VE
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIK VE FREKANS BAĞLI
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

İbrahim YÜCEDAĞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2007**

ÖZET

Bu çalışmada, termal oksidasyon yoluyla büyütülmüş, 32 Å kalınlıklı bir yalıtkan/oksit arayüzey tabakasına sahip metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) MIS yapı, (100) yönelimli, 280 µm kalınlıklı ve 8 Ω.cm öz dirençli bor katkılı (p-tipi) tek kristal silikon üzerine oluşturuldu. Doğru ve ters beslem kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri, oda sıcaklığında, seri direnç (R_s), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) dikkate alınarak 10 kHz–10 MHz frekans, (-5 V) - (+5 V) voltaj aralığında incelendi. Deneysel sonuçlar hem elektrik hem de dielektrik parametrelerin oldukça güçlü bir şekilde frekans ve voltaja bağımlı olduğunu göstermektedir. Her frekans için, C-V eğrileri bir pik vermekte ve bu pikin büyüklüğü ve yeri frekansa bağlı olarak değişmektedir. Aynı zamanda R_s-V dağılım profili tüketim bölgesinde düşük frekanslar için bir pik vermekte ve bu pik artan frekansla kaybolmaktadır. Dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp ε'' değerleri artan frekansla azalırken ac elektriksel iletkenlik σ_{ac} ise artmaktadır. Arayüzey durumları, özellikle düşük frekanslarda ac sinyali rahatlıkla takip edebildiğinden dolayı ilave bir kapasitans ve iletkenlik değeri sağlamakta ve bu katkı gevşeme zamanı ve uygulanan ac sinyalinin frekansına bağlıdır.

İlaveten, 53 Å kalınlıklı yalıtkan arayüzey tabakasına sahip MIS yapının, dielektrik ve elektriksel özellikleri frekans ve sıcaklığa bağı olarak 10 kHz-1 MHz frekans ve 300-400 K sıcaklık aralığında incelendi. Dielektrik sabiti ϵ' , dielektrik kayıp ϵ'' ve kayıp açısı $\tan\delta$ değerlerinin artan sıcaklıkla arttığı fakat artan frekansla azalmakta olduğu gözlemlendi. AC elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) ise hem frekans hem de sıcaklıkla artmakta olduğu gözlemlendi. Aktivasyon enerjisi değerleri hesaplandı ve elektriksel ölçümlerden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleriyle iyi uyum içinde olduğu gözlemlendi. Sonuç olarak, C-V ve G/ ω -V ölçüm sonuçları, N_{ss} ve R_s değerlerinin MIS yapının hem elektriksel hem de dielektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 510.10.20

Anahtar Kelimeler : MIS yapı, elektriksel ve dielektrik özellikler, yalıtkan tabaka arayüzey durumları, seri direnç, ac elektriksel iletkenlik, elektrik modülleri

Sayfa Adedi : 104

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

**THE INVESTIGATION OF FREQUENCY AND TEMPERATURE
DEPENDENT ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES IN
METAL-INSULATOR-SEMICONDUCTOR (MIS) STRUCTURES
(Ph. D. Thesis)**

İbrahim YÜCEDAĞ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
January 2007**

ABSTRACT

In this study, metal-insulator-semiconductor (Al/SiO₂/p-Si) MIS structure with insulator layer thick 32 Å, which growth by thermal oxidation have been fabricated on boron doped (p-type) single crystal silicon wafer with (100) surface orientation, 280 µm thick and 8 Ω.cm resistivity. The forward and reverse bias capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) characteristics of these structures have been investigated taking into account the effect of the series resistance (R_s) and surface states (N_{ss}) over a wide frequency and the voltage range of 10 kHz-10 MHz and (-5 V) - (+5 V), respectively, at room temperature. Experimental results show that both electrical and dielectric parameters were strongly frequency and voltage dependent. For each frequency, the C-V plots show a peak and the change in frequency has effect on both the intensity and position of the peaks. Also the distribution profile of R_s-V plot gives a peak in the depletion region of low frequencies and disappears with increasing frequencies. The dielectric constant (ε') and dielectric loss (ε'') are found to decrease with increasing frequency while ac electrical conductivity (σ_{ac}) is increased. The surface states can easily follow the ac signal especially at low frequencies and yield an excess capacitance and conductance, which depends on the relaxation time of N_{ss} and frequency of the applied ac signal.

In addition, dielectric properties and electrical conductivity the MIS structure with insulator layer thick 53 Å were studied in the frequency and temperature range of 10 kHz-1 MHz and 300-400K, respectively. The values of ϵ' , ϵ'' and $\tan\delta$ were found to increase with increasing temperature and decrease with increasing frequency. Also the electrical conductivity (σ_{ac}) is found to increase frequency and temperature. The activation energy values were evaluated and a good agreement between than activation energy values obtained from conductivity measurements. In conclude that, both frequency and temperature dependent C-V and G/ ω -V characteristics confirm that the N_{ss} and R_s of the MIS structure are important parameters that strongly influence both the electrical and dielectric properties of MIS structures.

Science Code : 510.10.20

Key Words : MIS structures; Electrical and dielectric properties; Insulator layer, Surface states, Series resistance; ac electrical conductivity; electric modulus

Page Number: 104

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve engin tecrübelerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez çalışmalarım boyunca yönlendirmeleriyle yaptıkları katkılardan dolayı hocalarım, saygıdeğer Prof. Dr. H.Güçlü YAVUZCAN, Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA ve Doç. Dr. Osman GÜRDAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer Dr. Adem TATAROĞLU'na, Bülent ÖZDEMİR'e ve Ali YÜCEDAĞ'a teşekkür ederim.

Ayrıca manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR.....	5
2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapısı.....	5
2.1.1. İdeal MIS yapısı.....	6
2.1.2. Gerçek MIS yapısı.....	15
2.1.3. MIS yapılarında arayüzey durum yoğunluğu teorisi.....	23
2.2. Dielektrikler.....	29
2.2.1. Dielektriklerdeki statik elektrik alan yetkisi.....	29
2.2.2. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.....	29
2.2.3. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....	31
2.2.4. Dielektrik kutuplanma.....	32
2.2.5. Kutuplanma mekanizmaları.....	38
2.2.6. Dielektriklerde elektrik alan ve dielektrik kayıp.....	41
2.2.7. Dielektrik sabiti ölçme yöntemi.....	49
2.2.8. Dielektrik kayıplar.....	52

Sayfa

3. DENEYSEL YÖNTEM.....	53
3.1. Silisyum Kristalin Bazı Temel Özellikleri.....	53
3.2. MIS Yapıların Hazırlanması.....	54
3.2.1. Kristal temizleme.....	54
3.2.2. Omik kontağın oluşturulması.....	56
3.2.3. Yalıtkan oksit tabakasının oluşturulması.....	58
3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması.....	59
3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....	60
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	62
4.1. Oda Sıcaklığında Frekansa Bağlı C-V ve G/ω -V Ölçümler.....	62
4.1.1. Elektriksel karakteristikler.....	62
4.1.2. Dielektrik özellikleri.....	74
4.2. Farklı Sıcaklık ve Frekansa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Özellikleri.....	78
4.2.1. Kapasitans ve iletkenlik özellikleri.....	78
4.2.2. Dielektrik özellikleri ve ac elektriksel iletkenlik ölçümleri.....	81
5. SONUÇ.....	91
KAYNAKLAR.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	104

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı özellikleri...	3
Çizelge 4.1. MIS yapısı için oda sıcaklığındaki farklı frekanslardaki C-V ve G/ω -V karakteristiklerinden belirlenen çeşitli parametrelerin değerleri.....	85
Çizelge 4.2. Farklı frekans aralıkları için aktivasyon enerjisi(E_a) ve bileşik dielektrik sabiti(σ_o).....	102

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) yapının şematik gösterimi.....5	
Şekil 2.2. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı. a) p-tipi yarıiletken b) n-tipi yarıiletken.....6	
Şekil 2.3. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının enerji bant diyagramı (n-tipi yarıiletken için).....8	
Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının eşdeğer devresi.....10	
Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması. a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....12	
Şekil 2.6. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması. a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....14	
Şekil 2.7. İdeal olmayan MIS/MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin Sınıflandırılması.....15	
Şekil 2.8. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.....17	
Şekil 2.9. Pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenı boyunca C-V eğrisinin değişimi: a) p-tipi b) n-tipi yarıiletken için.....19	
Şekil 2.10. a) Yük olmadığında düz bant gerilim kayması (a eğrisi), yük enjekte edildiğinde (b eğrisi), hareketli yük durumunda (c eğrisi) b) Enjekte olmuş yüke göre C-V eğrisi c) Hareketli yüke göre C-V eğrisi.....21	
Şekil 2.11. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre.....25	
Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi.....27	
Şekil 2.13. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.....30	
Şekil 2.14. Dielektrikli Kondansatör.....31	
Şekil 2.15. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri.....33	
Şekil 2.16. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu.....35	

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. D'nin zamanla değişim grafiği ($E=\text{sabit}$).....	43
Şekil 2.18. Elektrik alanın (E) zamanla değişim grafiği ($D=\text{sabit}$).....	44
Şekil 2.19. Dielektrik sabitinin gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı Değişimi.....	47
Şekil 2.20. Dielektrikli bir kondansatördeki ac akım.....	50
Şekil 2.21. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki.....	51
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği.....	57
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....	58
Şekil 3.3. Oksit büyütmede kullanılan fırın sistemi.....	59
Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske	60
Şekil 3.5. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının şematik gösterimi.....	61
Şekil 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek.....	61
Şekil 4.1. Al/SiO ₂ /p-Si(MIS) yapının farklı frekanslardaki C-V karakteristikleri.....	66
Şekil 4.2. Al/SiO ₂ /p-Si(MIS) yapının farklı frekanslardaki G/ ω -V karakteristikleri.....	67
Şekil 4.3. Al/SiO ₂ /p-Si(MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri.....	68
Şekil 4.4. Oda sıcaklığında, Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının farklı doğru beslem voltaj değerleri için seri direnç-frekans (R_s -V) eğrileri.....	71
Şekil 4.5. Oda sıcaklığında, Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının üç farklı yüksek frekans için ölçülen ve düzeltilmiş C _c -V eğrileri.....	72
Şekil 4.6. Oda sıcaklığında, Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının üç farklı yüksek frekans için ölçülen ve düzeltilmiş G/ ω -V eğrileri.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki; (a) dielektrik sabiti (ϵ') (b) dielektrik kayıp (ϵ'')'nın frekans bağlı eğrileri.....	76
Şekil 4.8. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki kayıp açısı ($\tan\delta$)'nın frekans bağlı eğrileri.....	77
Şekil 4.9. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki dc elektriksel iletkenliğin frekans bağlı eğrisi.....	78
Şekil 4.10. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapının için farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı olarak kapasitans (C) değişimi.....	79
Şekil 4.11. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda G/ω değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	80
Şekil 4.12. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda ϵ' 'nin sıcaklığa bağlı değişimi.....	84
Şekil 4.13. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda a) ϵ'' ve b) $\tan\delta$ 'nin sıcaklığa bağlı değişimi.....	85
Şekil 4.14. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda ac elektriksel İletkenliğin (σ_{ac}) sıcaklığa bağlı değişimi.....	86
Şekil 4.15. MIS Schottky diyotu için ac elektriksel iletkenliğin Arrhenius çizimi.....	87
Şekil 4.16. Al/SiO ₂ /p-Si (MIS) yapı için 10 kHz-1 MHz frekans aralığında sıcaklığa bağlı M^* elektrik modülünün a) gerçek kısmı M' ve b) sanal kısmı M''	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
σ_f	Serbest yüzey yük yoğunluğu
σ_b	Bağlı yüzey yük yoğunluğu
D	Elektrik yerdeğiştirme vektörü
V	Uygulanan gerilim
Ω	Açısal frekans
χ_e	Dielektriğin elektrik iletkenliği
R	Dielektrik dayanıklılık
E	Elektrik alan şiddeti
Q	Elektrik yükü
$\tan\delta$	Dielektrik tanjant (Kayıp açısı)
$\vec{P}$	Elektrik dipol momenti
$\text{\AA}$	Angström
C_{ox}	Oksit kapasitansı
A_{ox}	Oksit tabakasının alanı
d_{ox}	Oksit kalınlığı
ψ_s	Arayüzeydeki bant gerilimi
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
τ	Arayüzey tuzaklarının ömrü
Ψ_s	Yüzey potansiyeli
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_{ox}	Oksit tabakasının dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Dielektrik kayıp

Simgeler**Açıklama**

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

Kısaltmalar**Açıklama**

MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MIS	Al/SiO ₂ /p-Si Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
C-V	Kapasitans-gerilim
G/ω-V	İletkenlik-gerilim
ac	Alternatif gerilim
dc	Doğru gerilim
HF	Yüksek frekans
LF	Düşük frekans
C_{HF}	Yüksek frekans kapasitansı
C_{LF}	Düşük frekans kapasitansı

1. GİRİŞ

Metal–Yalıtkan–Yarıiletken (MIS) yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasında yalıtkan bir tabakanın doğal ya da yapay bir oksidasyon yöntemi kullanılarak oluşturulur. Metal olarak genelde altın (Au), alüminyum (Al) gibi yüksek saflıktaki metaller kullanılırken yalıtkan olarak silisyum-dioksit (SiO_2), kalay-dioksit (SnO_2) gibi yalıtkanlar kullanılır. Metal ile yarıiletken arasına oluşturulan yalıtkan tabaka, hem metal ve yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de yük geçişlerini düzenler [1]. Bu yapıların hazırlamasında, yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi olmasına göre uygun iş fonksiyonu metaller seçilir. Yani, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları öyle seçilmelidir ki metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşsun.

1950’li yıllarda başlayan mikro elektronik ile ilgili araştırmalar daha çok temel devre elemanları üzerine yapılmıştır. Bu dönemde yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak zaman içinde silisyum kullanımı hakim olmuştur. Ayrıca galyum-arsenik (GaAs) gibi yarıiletkenler de kullanılmaktadır. Silisyumun doğada bol miktarda bulunmasının yanı sıra diğer önemli bir özelliği kristal yüzeyinde SiO_2 gibi tabii yalıtkan tabakanın kolayca elde edilebilmesidir [2]. Yarıiletken üzerine bir yalıtkan tabaka büyütmenin birçok yöntemi vardır. Fakat bunlardan en çok kullanılan Si üzerine termal oksidasyon yoluyla, belirli sıcaklıklarda ortamdan belirli hızlarda kuru O_2 geçirilerek, SiO_2 büyütülmesidir. Özellikle SiO_2 seçilmesinin sebebi; silisyum üzerine kolay büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmastır. Dolayısıyla SiO_2 birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde çok sayıda enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar. Genelde 1960’lardan sonra silisyum dioksit kullanılarak alan etkili transistörler, kapasitörler ve entegre devrelerin yapılması mümkün olmuştur [3].

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar, metal ile yarıiletken arasına yalıtkan bir tabaka içerdiğinden dolayı kapasitörlere benzemektedir. Bu yapılar ilk olarak 1959

yılında J.L.Moll tarafından deneyleri de içeren çok sayıda makaleler yayınlayarak oluşturulmuştur [3]. Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılır [4]. Söz konusu yapı, termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmuştur. Daha sonra Terman, metal-yalıtkan-yarıiletken kapasitörün, yalıtkan/silisyum arayüzeyinde bağ durumlarının özelliklerini araştırmıştır [5]. Terman, metal-yalıtkan-yarıiletken kapasitöre d.c. gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağlılığını ölçmüştür. Deneysel kapasitans-voltaj (C-V) ile teorik kapasitans-voltaj verilerini karşılaştırmıştır. Daha sonra termal olarak oksitlenmiş silisyumun arayüzey tuzaklarının, elektron vedeşik tuzaklarının zaman sabitlerini elde etmiştir. Terman, yüksek frekans C-V (C_H -V) verilerinin, arayüzey tuzaklarının toplam yoğunluğunu verdiğini göstermiştir. H_F -V metodu 1970'den beri transistörlerde ve devrelerin üretim yöntemlerini gözlemekte kullanılmaktadır. Bu metot Terman metodu yada Terman-Moll metodu olarak bilinir. Transistörlerde çalışmak üzere kullanılan metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitör C-V verilerinin ilk detaylı gösterimi ve okside edilmiş silisyum yüzeyleri üzerinde oksit büyültülmesi Grove, Deal, Snow ve Sah tarafından verilmiştir [6].

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıdaki yalıtkan tabakanın dielektrik özelliğinden dolayı MIS yapılar, paralel levhalı bir kondansatöre benzer. Aradaki yalıtkan tabakanın 100 Å'dan büyük olması durumunda MIS yapılar MOS olarak adlandırılır. Eğer bu yalıtkan tabaka çok ince ise (~ 10 -40 Å), bu yapılar MIS tipi Schottky diyotu olarak adlandırılır ve bu yapıların elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri ile kapasitans-voltaj (C-V) ölçümlerinden belirlerler. Kalın yalıtkan tabakalı MIS veya MOS yapılarda, kalın yalıtkan tabakadan dolayı I-V ölçümleri kullanılmadığından dolayı, elektriksel ve dielektriksel parametreleri genelde sıcaklık ve frekansa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümlerinden hesaplanır. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Yalıtkan SiO_2 birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. SiO_2 yarıiletkeni düşük elektriksel özdirenci ve yüksek optik

geçirgenliği nedeniyle opto-elektronik devre elemanlarında, ince filmlerde, güneş pillerinde, anti statik tabakalarda ve gaz algılayıcılarında kullanılmaktadır [7,8].

Dielektrikler yani yalıtkanlar, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildir. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda olabilecek tek hareket, pozitif ve negatif yüklerin oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerdeki küçük yer değiştirmeleridir. Bunun sonucunda dipol momentleri oluşur. İçinde böyle küçük yer değiştirmelerin olduğu dielektriklere kutuplanmış dielektrikler denir. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alan içine konmadan içerisinde bu yük ayrışımı vardır. Bu maddeler net bir dipol momente sahiptir. Bunlara polar dielektrikler denir. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğu maddelerde bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlıdır [9].

Bu çalışmada, Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların hem frekansa hem de sıcaklığa bağlı doğru ve ters beslem kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri geniş bir frekans (10 kHz-10 MHz) ve sıcaklık aralığında (300-400 K) incelendi. Bu ölçümler seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltildi. Hazırlanan çok sayıdaki MIS yapının C-V ve G/ω-V ölçümleri çok benzer davranış gösterdiğinden dolayı sadece yalıtkan tabaka kalınlıkları farklı olan örnek iki MIS yapıyla ilgili tüm grafikler ve tablolar verildi. Bu ölçümlerden MIS yapının hem elektriksel karakteristikleri hem de dielektriksel özellikleri frekans ve sıcaklığa bağlı olarak mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi. Deneysel sonuçlar, hem elektriksel hem de dielektriksel özelliklerin frekans ve sıcaklığa oldukça bağlı olduğunu gösterdi. C-V-f ve G/ω-V-f ölçümlerinden dielektrik sabitinin (ε') ve dielektrik kaybın (ε'') frekansa bağlı tepkisi, özellikle düşük frekanslarda etkin olduğu gözlemlendi. Dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp ε'' artan frekansla azalırken elektriksel iletkenliğin σ_{ac} artmakta olduğu gözlemlendi. C-V-T ve G/ω-V-T ölçümlerinden ise ε', ε'' ve σ_{ac} değerlerinin artan

sıcaklıkla artmakta olduğu gözlemlendi. Ayrıca iletkenlik ölçümlerinden aktivasyon enerjisi hesaplandı.

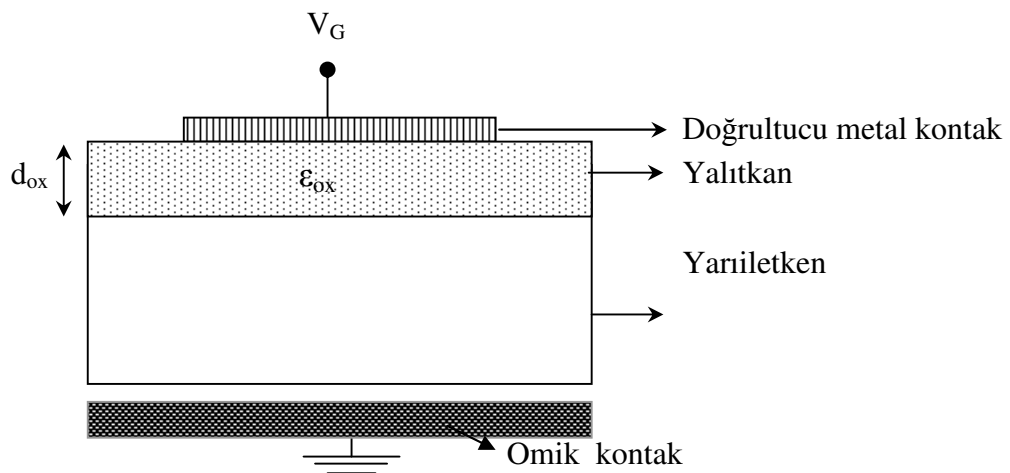
Bu tez çalışması beş bölümden altında toplanmıştır. Birinci bölümde bu çalışmanın içeriği ve bu konudaki benzeri çalışmalar tarihi gelişimi hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıların elektrik ve dielektrik teorisi detaylıca verildi. Üçüncü bölümde metal-yalıtkan-yarıiletken ($Al/SiO_2/p-Si$) yapıların hazırlanması aşama aşama anlatıldı ve deneysel ölçüm sistem ile kullanılan ölçüm cihazları tanıtıldı. Dördüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili gerekli tüm grafik ve tablolar verilerek mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi. Beşinci bölümde ise, elde edilen tüm deneysel sonuçlarla ilgili yorumlar yapıldı.

2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Bu bölümde, önce Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MYY) veya orijinal adıyla Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) yapılar anlatılacak ve daha sonra metal ile yarıiletken arasında büyütülen yalıtkan (dielektrik) tabakanın temel fiziksel özellikleri detaylıca anlatılacaktır. Yalıtkan arayüzey tabakası, metal ile yarıiletken arasına doğal yada termal oksidasyon gibi yöntemlerle oluşturulur. Bu yalıtkan arayüzey tabakasına SiO_2 , SnO_2 ve Si_3N_4 örnek verilebilir.

2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapısı

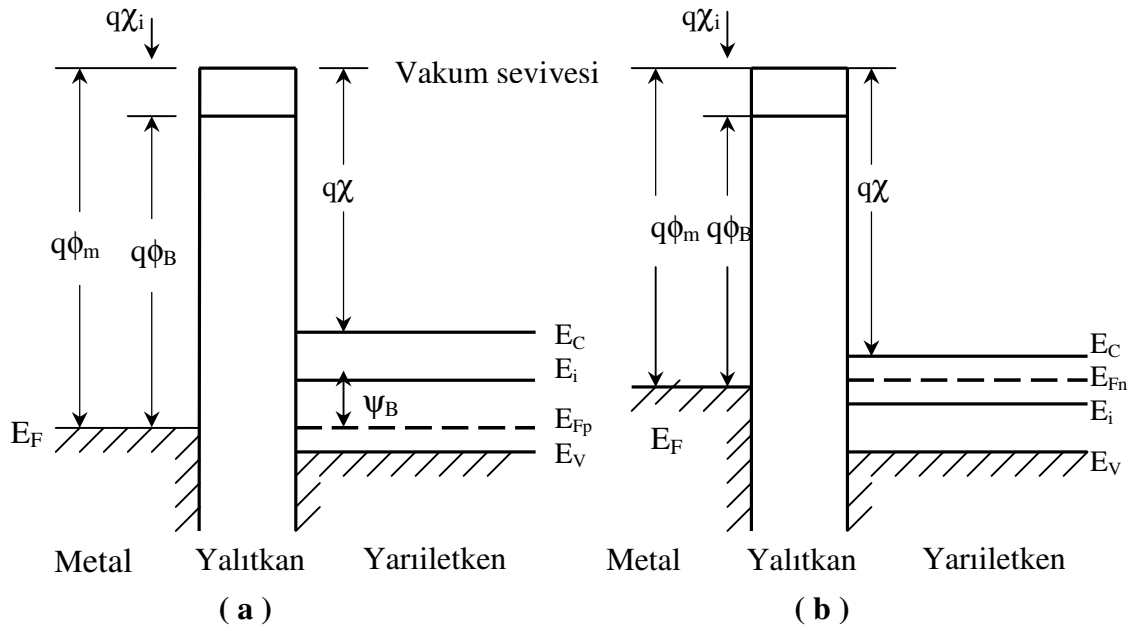
Bir MIS yapının şematik gösterimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu yapılar, levhalardan birisinin metal, diğerinin yarıiletken olmasından dolayı paralel plakalı bir kondansatöre benzer [11]. Burada d_{ox} yalıtkan kalınlığı, ϵ_{ox} yalıtkan dielektrik sabiti ve V_G metal plakaya uygulanan gerilimdir. V_G gerilimi, metal plaka omik kontağa göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [10].



Şekil 2.1. Bir MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) yapının şematik gösterimi.

2.1.1. İdeal MIS yapısı

İdeal bir MIS yapının, gerilim uygulanmadığı durum için enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’de hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletkenler için gösterilmiştir.



Şekil 2.2. V=0’da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı a) p-tipi yarıiletken
b) n-tipi yarıiletken

Şekil 2.2. de verilen tüm fiziksel simgelerin açık ifadesi aşağıdaki gibidir:

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_B : Metal ve yalıtkan arasındaki potansiyel engeli

χ : Yarıiletkenin elektron alınganlığı

χ_i : Yalıtkanın elektron alınganlığı

E_V : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_C : İletkenlik bandı enerji seviyesi

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

E_F : Fermi enerji seviyesi

ψ_B : Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark [12].

Şekil üzerinde gösterilen bazı temel yarıiletken sembolleri tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bunlardan *Fermi enerjisi*, iletkenlerde 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 bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviyeye *Fermi enerji* olarak tanımlanır. Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı *Vakum seviyesi* olarak bilinir. Buna göre *metalın iş fonksiyonu* (ϕ_m); bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Benzer şekilde *Yarıiletkenin iş fonksiyonu* (ϕ_s) ise, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve bu enerji seviyesi, yarıiletkene katkılanan katkı atomlarının (alıcı veya verici) yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı değişen bir niceliktir. Diğer değişken bir parametre olan *elektronun yakınlığı* (χ), vakum seviyesi ile yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkıdır.

İdeal bir MIS yapısı aşağıdaki verilen özellikleri ile tanımlanabilir [11-13]:

i) Sıfır beslem durumunda metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasındaki fark sıfırdır. Diğer bir deyişle metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı sıfırdır ($\phi_{ms}=\phi_m-\phi_s=0$) ve n-tipi ile p-tipi yarıiletken için şu şekilde verilir [14,16]:

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

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

İdeal bir MIS yapıda, doğrultucu metal kontağa bir gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükleri (Q_{sc}) oluşur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yük yoğunluğu potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, yarıiletkende metallere göre serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan gerilime bağlı olarak yük, ya uzay yükü bölgesinde ya da arayüzey bölgesinde yığılmalara neden olur. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşer. Bu yüzden,

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

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim, ψ_s ise arayüzeydeki bant gerilimidir [11]. Sistemdeki toplam yük, kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki denklem ile verilebilir.

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_n + qN_A W = Q_s \\ Q_m + Q_{sc} &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Burada Q_n tersinim bölgesinde birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük, $qN_A W$ ise W genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş alıcı katkı atomlarının sayısıdır. Q_s yarıiletkendeki toplam yük, Q_m metal yüzeyindeki toplam yük ve Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür [15].

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Kondansatörlerin özelliklerini metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasitans arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer

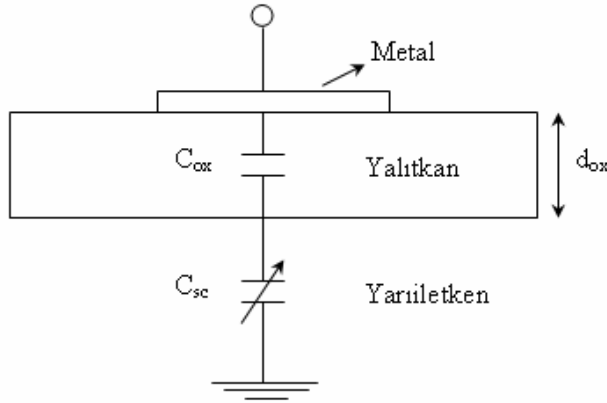
devre Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir. Uygulanan gerilimde çok küçük diferansiyel değişimlerin olduğunu varsayarak sırasıyla MIS, yalıtkan ve uzay yükü bölgesi kapasitanslarını sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$C = \frac{dQ_m}{dV_G} A_{ox} \quad (2.5a)$$

$$C_{ox} = \frac{dQ_m}{dV_{ox}} A_{ox} \quad (2.5b)$$

$$C_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} A_{ox} \quad (2.5c)$$

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



Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının eşdeğer devresi

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi MIS yapının eşdeğer kapasitansı, yüzey yük kapasitansı C_{sc} ile yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} in seri bağlanmasına eşdeğerdir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.6)$$

Yalıtkan oksit kapasitansı C_{ox} ,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.7)$$

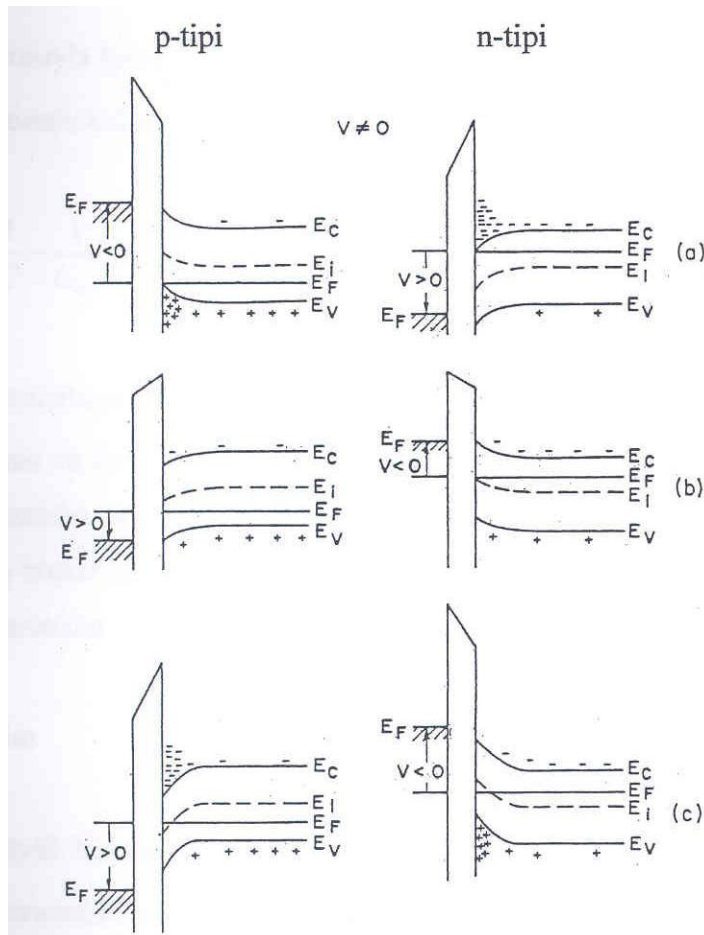
eşitliği ile verilir. Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox} değeri de uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapısının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen durumları Şekil 2.5’de gösterilen bir p-tipi yarıiletken için tanımlanabilir [11,14,16].

Yığılım

Metal plakaya bir negatif gerilim ($V_G < 0$) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olandeşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru çekecektir (Şekil 2.5a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_F - E_V$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olandeşiklerin yığılmasına sebep olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletkenlik bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmelerinden dolayı “yığılım” adı verilir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

Tükenim

Metal plakaya küçük bir pozitif gerilim ($V_G > 0$) uygulandığı zaman, yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindekideşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındakideşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen ω genişliğinde bir bölgede,deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Deşiklerin azaldığı bu bölgeye tükenim bölgesi, bu olaya “tükenim” olayı denir (Şekil 2.5b).



Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması a) Yığılım
b) Tükenim c) Tersinim

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

$$Q_{sc} = qwN_a^- = Q_a \quad (2.8)$$

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

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.9)$$

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

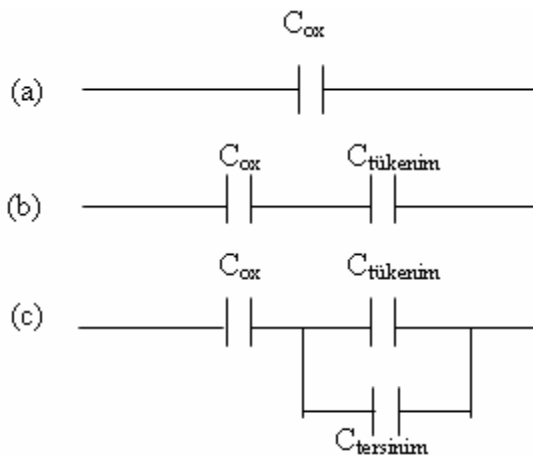
Tersinim

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

$$Q_{sc} = Q_n + Q_a \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_a birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Şekil (2.5c)'de enerji bant şeması gösterilmiştir. Bu durumda MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu a.c. sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasitans artan gerilimle yalıtkan kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasitans C_{min} 'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'un altında değerler almasına sebep olur.

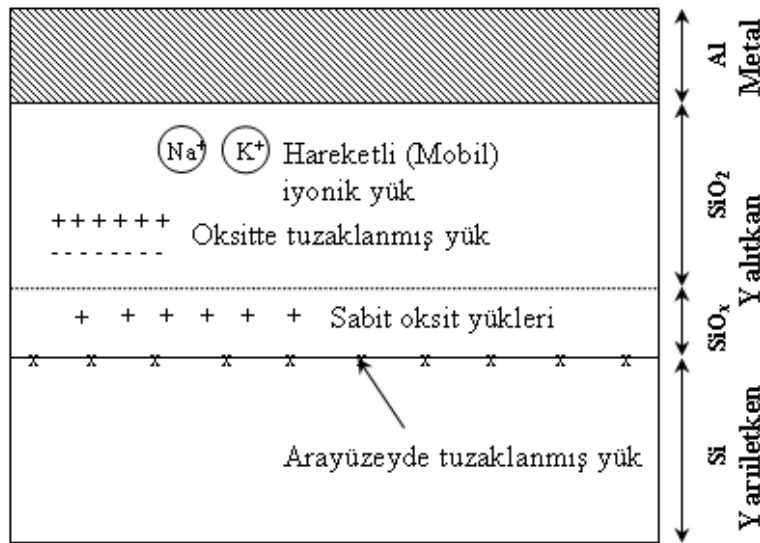
İdeal bir durumda yükler yarıiletken ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde bulunur. Dc gerilim altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez. İdeal bir MIS yapıda üç yük sistemi için devre şeması Şekil 2.6'deki gibidir [14]. Bu sistemler; yığılım, tükenim ve tersinim adını alır.



Şekil 2.6. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2.1.2. Gerçek MIS yapısı

İdeal bir yalıtkanın kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir boşluk yükü veya hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda Yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağı olarak ortaya çıkan, hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MIS yapısının özelliklerini değiştirmekte, böylece MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına sebep olmaktadır [17]. Gerçek bir MIS yapısında birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Bu durumların ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 2.7’de gösterilmiştir [14].



Şekil 2.7. İdeal olmayan MIS/MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Bunlar sırayla;

- i) Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları.
- ii) Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri.

- iii) Yalıtkan içindeki hareketli iyonlar.
- iv) Numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşan tuzaklar.

Arayüzey durumları

Arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Bir arayüzey durumu verici veya alıcı tipinde olabilir. Bir verici arayüzey tuzağı (seviyesi) dolu ise nötr ve bir elektron vermesiyle pozitif yüklü olur. Bir alıcı arayüzey tuzağı boş ise nötr ve bir elektron almasıyla negatif yüklü olur. 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 tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Bu yükün değişimi MIS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS eğrisini değiştirir. Arayüzey durumları genelde arayüzeye çok yakın bulunurlar. Arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu Q_{ss} , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve yalıtkan kalınlığından etkilenmez. Arayüzey durumları uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptıklarından temel eşdeğer devre Şekil 2.8’de gösterildiği gibidir.

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şu niceliklere ayrılabilir:

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.

Arayüzey potansiyeli: yukarıda ifade edilen kapasite ve iletim a.c. etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir d.c. 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.

İletim: Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. 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 R_{ss} arayüzey direncidir [12].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} ,

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.11)$$

ile verilir. Arayüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına sebep olur.

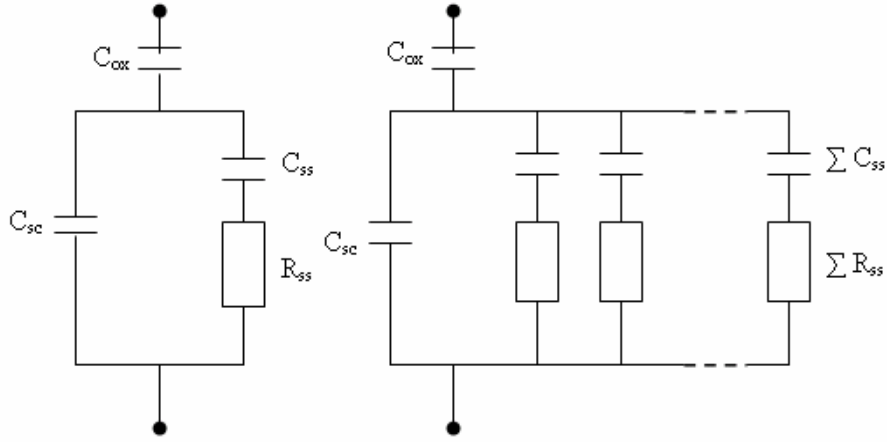
Arayüzey durumlarının birim enerji ve birim alan başına durum yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.12)$$

ile verilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır. Burada E enerji olup $E = q\psi_s$ ile verilir. Bu eşitliğin diferansiyeli alınırsa $dE = dq\psi_s$ elde edilir. Eş. 2.12 tekrar düzenlenirse durum yoğunluğu,

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (2.13)$$

elde edilir [18].

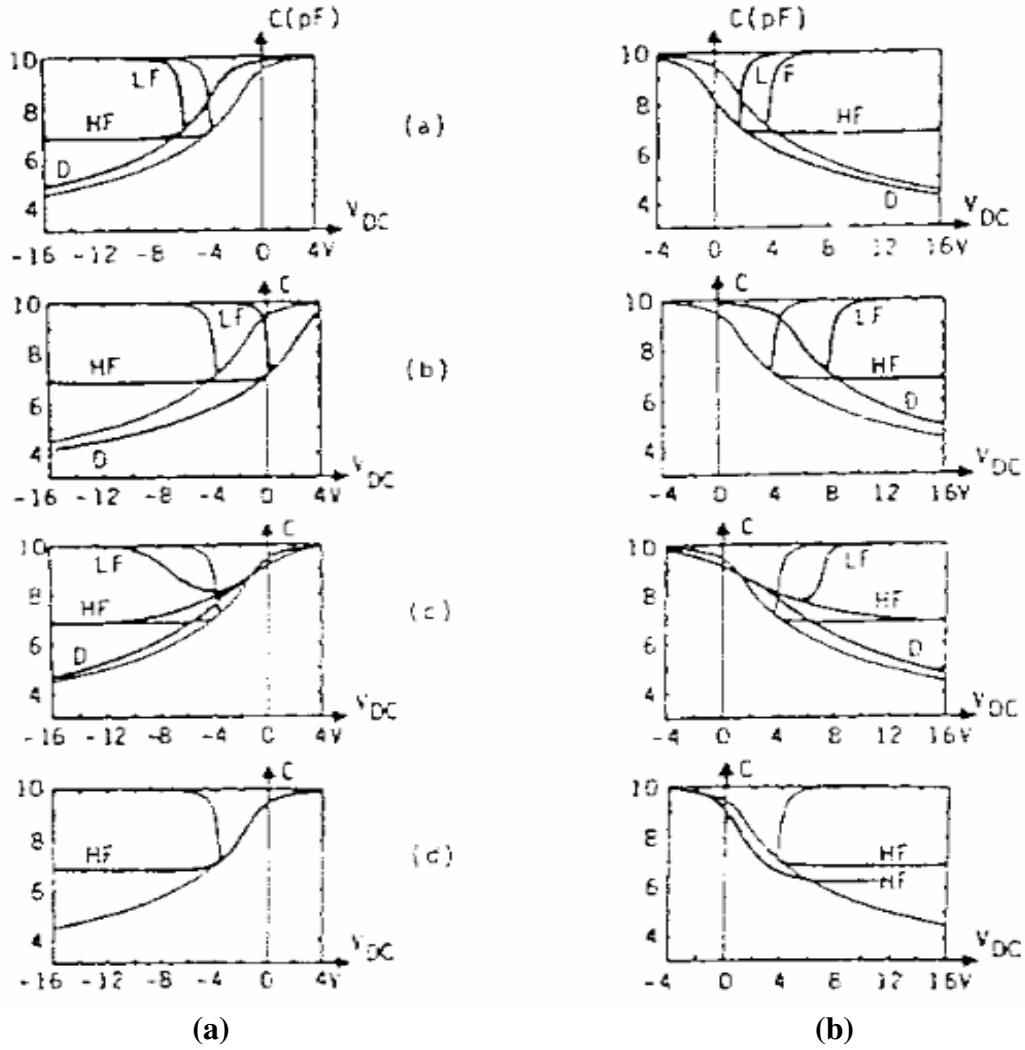


Şekil 2.8. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için
b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

Bir elektron veya deşik tarafından bir arayüzey durumunun işgal edilme olasılığı, bu yüzey durumunun safsızlık enerji seviyelerindeki gibi fermi seviyesiyle belirlenir. Bu şekilde yüzey potansiyeli değiştikçe arayüzey durumun enerji seviyesi de onunla hareket eder. Sonuçta fermi seviyesinin bu bağlı değişikliği bir elektron tarafından bu arayüzey durumunun işgal edilme olasılığının değişimine sebep olur. Bantlar aşağı doğru eğildiğinde yüzey potansiyeli artar ve daha fazla arayüzey durumları fermi seviyesinin altına iner. Yüzey potansiyelindeki değişikliklerle ilgili olan tuzaklanmış arayüzey yükteki bu değişim yarıiletken kapasitansında ek bir katkı meydana getirir.

Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit yükleri sabittir ve ψ_s 'in geniş değişimine karşı değişmezler. Bu yükler yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuşlardır. Sabit oksit yükünün yoğunluğu (Q_{fc}), silisyumdaki kirlilik konsantrasyonundan ve oksit kalınlığından etkilenmezler [14]. Sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönüne bağlıdır. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuş yükler gibi görülebilir. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri mevcut olduğu zaman yüksek frekans C-V eğrilerinin gerilim eksenini boyunca değişimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenı boyunca C-V eğrisinin değışimi: a) p-tipi b) n-tipi yarıiletken için

n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için, ideal C-V eğrisine göre, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru C-V eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_f$), C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ($-Q_f$) sebep olurlar [13].

MIS kapasitansı eğrisinde sabit yükün etkisi, gerilim eksenı boyunca C-V eğrisinin paralel kaymasıdır ve ΔV kayma miktarı,

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (2.14)$$

ile verilir. Sabit oksit ve arayüzey yüklerinin sebep olduğu, C-V eğrisi ile ideal C-V eğrisi arasındaki kaymadan yararlanarak yalıtkan içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu ΔQ_{eff} ve arayüzey durum yük yoğunluğu ΔQ_{ss} hesaplanır. ΔQ_{ox} , ΔQ_{eff} ve ΔQ_{ss} aşağıdaki bağıntılarla verilir:

$$\Delta Q_{ox} = \frac{\Delta V_{MG} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.15)$$

$$\Delta Q_{eff} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.16)$$

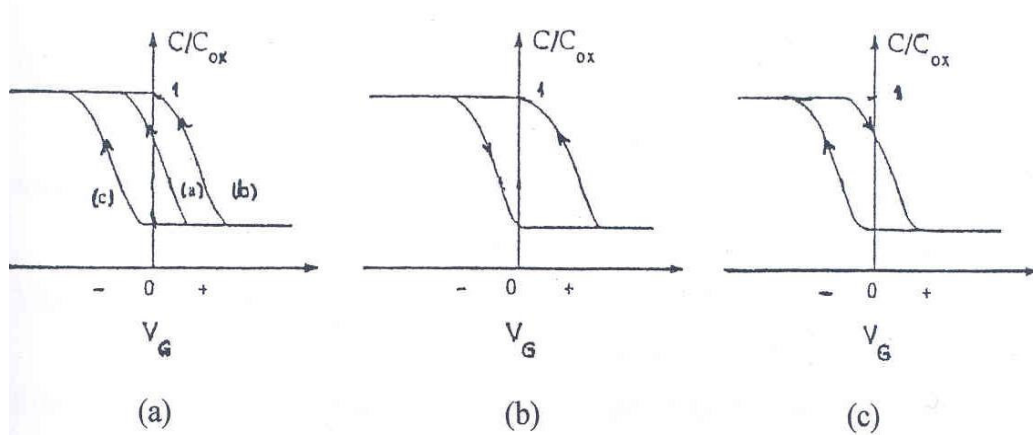
$$\Delta Q_{ss} = \Delta Q_{eff} - \Delta Q_{ox} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.17)$$

Burada, ΔV_{MG} gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve ΔV_{FB} düz bant durumunda gerilim kaymasını göstermektedir. Düz bant gerilim kaymasına, yalıtkan içine enjekte olmuş yükler yada yalıtkan içindeki hareketli yükler neden olabilir. p-tipi yarıiletken ile yapılmış bir MIS kapasitör göz önüne alalım. Şekil 2.10a'daki a eğrisi orta uygulama gerilimiyle elde edilmiştir. Daha sonra büyük bir pozitif gerilim uygulayalım. Bu durumda iki etki olabilir:

- i) Elektronlar yalıtkan içine enjekte olabilir.
- ii) Yalıtkan boyunca dağılmış pozitif yüklü hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenebilir.

Oksit içine enjekte olmuş negatif yük birinci işlem için pozitif ΔV_{FB} 'ye sebep olur (b eğrisi). İkinci işlem için ters etki gözlenir, çünkü yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde pozitif yük negatif ΔV_{FB} 'ye sebep olur (c eğrisi). Bu tip davranışlar Şekil 2.10b ve Şekil 2.10c'deki C-V eğrileriyle ayrıca gösterilmiştir. Şekil 2.10b'de pozitif V_G ,

yalıtkan içine elektron enjeksiyonuna neden olur ve $+V_G \rightarrow -V_G$ değişimi sola doğru ok işareti ile gösterilir. Büyük uygulama geriliminden dolayı tuzaklanmış elektronlar oksitten enjekte olunabilirler ve hatta oksit içine deşikleri enjekte etmek bile mümkündür. Ters taramada ($-V_G \rightarrow +V_G$) okun yönü sola doğru gösterilir. Eğer hareketli yük C-V eğrilerini kaydırılmışsa, Şekil 2.10c eğrisi elde edilir. Büyük pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Büyük negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal-yalıtkan arayüzeyine çekilir ve C-V eğrisini değiştirmez.



Şekil 2.10. a) Yük olmadığında düz bant gerilim kayması (a eğrisi), yük enjekte edildiğinde (b eğrisi), hareketli yük durumunda (c eğrisi)
 b) Enjekte olmuş yüke göre C-V eğrisi
 c) Hareketli yüke göre C-V eğrisi

Hareketli (Mobil) iyonik yük

Yalıtkan yükünün bir başka türü hareketli (Mobil) iyonik yüküdür. Bu yüke çoğunlukla, sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur. Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde yada yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde lokalize olmuşlardır. Böyle iyonlar nispeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Oksitte sabitleşmiş yükün yoğunluğu bu işlem esnasında değişebilir. Bununla beraber hareketli iyonik yük, metal-yalıtkan ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyi arasında ileri geri gidip gelebilir ve

bunun neticesinde iyonik akım gözlenebilir. Hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [19]. Bunlardan H^+ ve H_3O^+ oda sıcaklığında geri kalanlar da 100°C ' de hareketlikleri gözlenir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alan altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar. Hareketli yükleri C-V eğrisindeki düz bant kaymasından yararlanarak,

$$Q_m = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (2.18)$$

denklemini ile hesaplanabilir.

Oksitte tuzaklanmış yük

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan oksit içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan oksit ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakasında elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan yalıtkan tuzaklanabilir. Bunun dışında, elektronlar ve deşikler yalıtkan tabakasına enjekte edildiğinde (tünelleme yoluyla) bunların bazıları da oksitte tuzaklanabilir. Bu tuzaklar yüksek enerjili foton veya parçacıklarla bombardıman edildiğinde de ortaya çıkabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan 550°C üzerindeki sıcaklıklarda tavlama ile kaldırılabilir [19]. Oksitte tuzaklanmış yük, okside doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmezler. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük (Q_{ot}),

$$Q_{ot} = -\Delta V_{FB} C_{ox} \quad (2.19)$$

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

İyonlaşmış tuzaklar kapasitans-voltaj eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklardan dolayı kapasitans-voltaj eğrisinde histeresis etkisi gözlenir [20]. MIS yapıya silisyum yüzeyinde deşik yığılmasını oluşturan negatif gerilim yeterince uzun süre uygulanırsa oksit içindeki tuzaklar boşalır. Bu boşalma, tuzaklarda bulunan elektronların deşikler tarafından yakalanmasıyla olur. Metal elektrota pozitif gerilim uygulanırsa Fermi düzeyi iletim bandına doğru kayacak ve yalıtkan tuzakları dolmaya başlayacaktır. Eğer uygulanan gerilim azalırsa Fermi düzeyi tekrar valans bandına kayar ve tuzakların elektronları deşikler tarafından yakalanırlar. Bunun sonucunda tuzaklar tekrar boşalır. Dolum-boşalım sırasında tuzaklarda bulunan elektron sayıları arasındaki fark, C-V eğrisinin kaymasına sebep olan histeresis yüküdür. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla histeresis yük yoğunluğu aşağıdaki formülle verilir:

$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (\text{cm}^{-2}) \quad (2.20)$$

Burada ΔV_{HisFB} düz banttaki kayma miktarıdır.

2.1.3. MIS yapılarda arayüzey durum yoğunluğu teorisi

Bir MIS yapıda arayüzey tuzaklar ve yalıtkan yüklerinin varlığı ideal MIS karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar. Bir MIS yapılışı sırasında silisyum yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [14,15].

Yüzey durumları yoğunluğu için kuramsal tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani 10^{15} cm^{-2} civarında fakat deneysel sonuçlar bunun sadece 10^{11} - 10^{12} cm^{-2} mertebesinde olduğunu göstermektedir [14]. Yüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyinde bulunur. Bunlar yalıtkan yapısındaki hareketsiz yükler ihtiva eden bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan altında yalıtkan içerisinde göç etmeye yatkın, hareketli iyonlar tarafından meydana getirilir. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile hemen hemen giderilebilir. Yavaş yüzey durumları MIS kapasitesini etkilemez.

Hızlı yüzey durumları yalıtkanla yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi ile yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da bükülmeyen Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alışverişi yapar. Arayüzeyde bulunan ve yasak enerji bölgesi dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit yüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit yüzey yükü veya oksit yükü denir.

Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede silisyumdaki iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alış verişi yapabildiklerinden dolayı bu yüzey durumlarına yüzey rekombinasyon (yeniden birleştirme) merkezleri de denir. Temiz yüzeylerde ve yüksek vakum altındaki ölçümler, yüzey atomlarının yoğunluğunun mertebesini çok yüksek yapar. Arayüzey tuzaklar için dağılım fonksiyonu; verici arayüzey tuzaklar için,

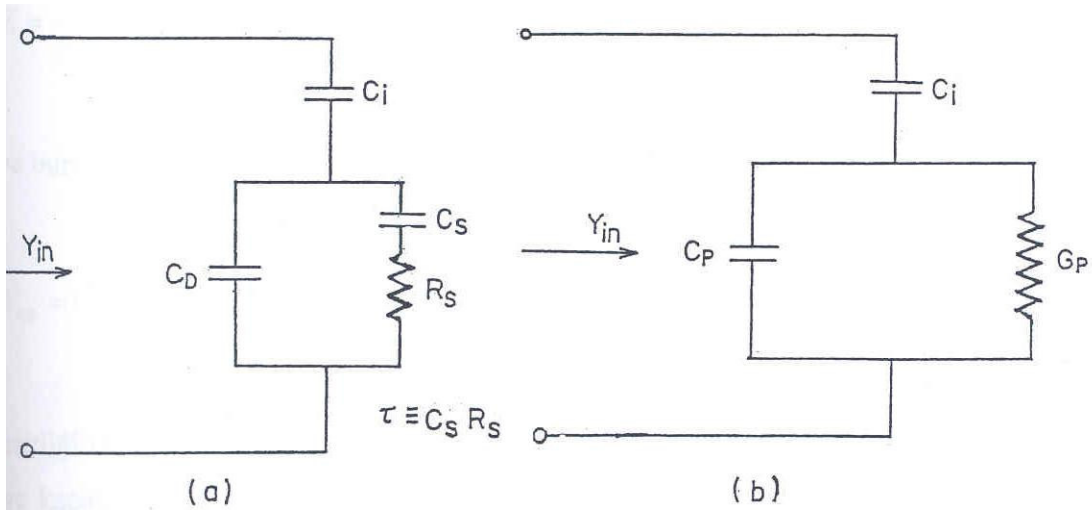
$$f_{SD}(E_t) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right)} \quad (2.21)$$

ve alıcı arayüzey tuzaklar için ise,

$$f_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.22)$$

şeklindedir. Burada E_t , arayüzey tuzak seviyesi enerjisi, E_F Fermi enerji seviyesi ve g ise termal durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için 4'dür [21].

Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket eder. Bu değişme MIS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur. Arayüzey tuzaklarının etkisini kapsayan eşdeğer devre Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre

Burada C_i ve C_D sırası ile yalıtkan oksit tabakasının kapasitansı ve yarıiletken tükenim tabaka kapasitansıdır. $C_S R_S$ çarpanı arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanmış ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını belirler. Şekil 2.11a'nın paralel kolu, Şekil 2.11b'deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_P ve ona paralel bağlı frekans bağımlı iletkenlik G_P şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_S + \frac{1}{j\omega C_S}} = G_P + j\omega C_P \quad (2.23)$$

şeklindedir. Burada iletkenlik G_P ve kapasitans C_P ,

$$G_P = \frac{1}{R_P} = \frac{C_S \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.24a)$$

$$C_P = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.24b)$$

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans Z ise,

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_P + j\omega C_P} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_P}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2}\right) + \frac{G_P}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2} \quad (2.25)$$

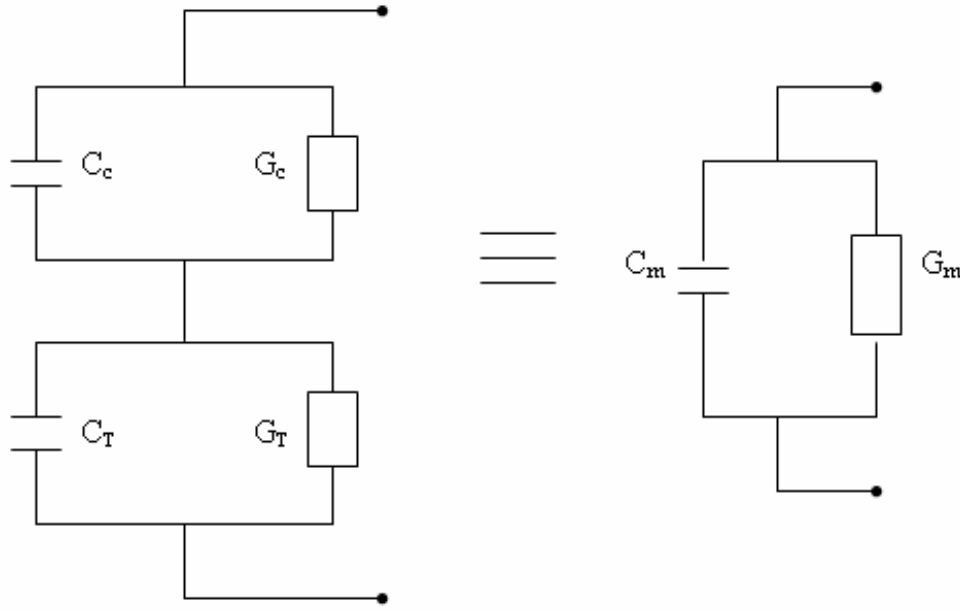
ve buradan toplam admittans Y_{top} için,

$$Y_{top} = \left(\frac{G_P^2 + \omega^2 C_P^2}{G_P}\right) + j\omega\left(\frac{(G_P^2 + \omega^2 C_P^2)C_i}{G_P^2 + \omega^2 C_P^2 + \omega C_P}\right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.26)$$

eşitliği elde edilir [14,22]. Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik G_m ve kapasitans C_m gerçek değerler değildir [23]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.27)$$

şeklindedir.



Şekil 2.12. MIS 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,

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

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (2.28)$$

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

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.29)$$

elde edilir. Burada seri direnç R_s , Şekil 2.12b'deki devrenin empedansı Z 'nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir [13].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.30)$$

den,

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.31)$$

elde edilir. Eş. 2.28'in düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı yani düzeltilmiş kapasitans,

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.32)$$

şeklindedir. Eş. 2.29 ve Eş. 2.32 denklemlerini yeniden düzenlersek (13),

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2)C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.33a)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2)a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.33b)$$

elde edilir. Burada,

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2)R_s \quad (2.34)$$

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

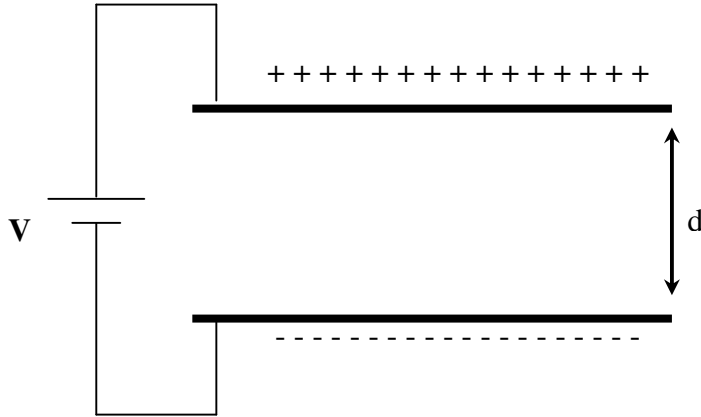
2.2. Dielektrikler

2.2.1. Dielektriklerdeki statik elektrik alan etkisi

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

2.2.2. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

A yüzey alanına sahip ve aralarında d uzaklığı bulunan iki paralel plakalı bir kondansatör Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

Plakalardan birinin yükü $+Q$, diğerinin yükü $-Q$ olsun. Eğer plakalar arasına bir yalıtkan madde (dielektrik madde) konulursa, yüklerin bir plakadan diğerine geçişi sınırlanır. Bu plakalar bir üretcin uçlarına bağlanırsa kondansatör kolayca yüklenebilir. Plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.35)$$

ifadesi ile verilir. Burada, ϵ_0 boşluğun geçirgenlik sabiti, σ ise her bir plaka üzerinde birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğudur. Aralarında d uzaklığı bulunan plakalar arasında oluşan potansiyel farkı,

$$V = E \cdot d \quad (2.36)$$

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

$$C = Q/V = \epsilon_0 A/d \quad (2.37)$$

olarak ifade edilir.

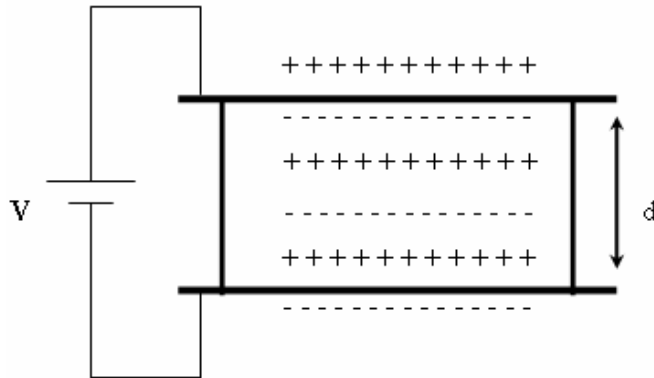
Ayrıca σ yüzey yük yoğunluğu, plakalar arasındaki bölgede elektrik yerdeğiştirme kaynağı olarak düşünülebilir. Buna göre elektrik yerdeğiştirme;

$$D = \sigma = \epsilon_0 E \quad (2.38)$$

ile ifade edilir [26].

2.2.3. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Bir kondansatörün plakaları arasındaki boşluk tamamen bir yalıtkan (dielektrik) madde ile doldurulursa, kondansatörün sığası birimsiz ϵ' çarpanı kadar artar. Bu ϵ' çarpanına yalıtkanın dielektrik sabiti denir. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti (ϵ_0) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır.



Şekil 2.14. Dielektrikli Kondansatör

Bir dielektrik yokken paralel plakalı kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 ve elektrik alanı E_0 olsun.

$$V = V_0 / \epsilon' \quad (2.39)$$

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

$$E=E_0/\epsilon' \quad (2.40)$$

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

$$C=Q_0/V= \epsilon'Q_0/ V_0= \epsilon'C_0 \quad (2.41)$$

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

$$C=\epsilon'\epsilon_0A/d \quad (2.42)$$

olarak ifade edilebilir.

2.2.4. Dielektrik kutuplanma

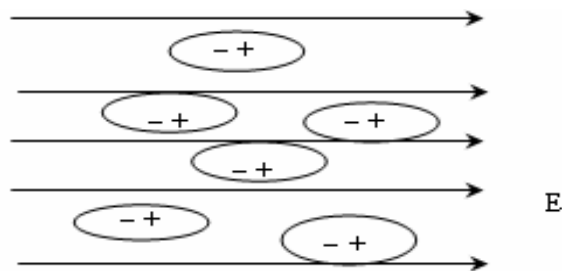
Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik (yalıtkan) yerleştirildiği zaman potansiyelin azalması, elektrik alan şiddetinin ($E=V/d$) azalmasını gerektirir. Elektrik alan şiddetinin ($E=\sigma/\epsilon_0$) azalması ile birim yüzeydeki net yük azalır. Bu da ancak, dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yüklerin meydana gelmesiyle mümkündür. Bir iletken elektrik alan içine yerleştirildiğinde alan tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisi altında serbest yükler yer değiştirir. Elektrostatik denge kurulduğunda etkiyle meydana gelen yüklerin elektrik alanı bütün noktalarda dış alanı nötrleştirir ve iletken içinde elektrik alan sıfır olur [9].

Bir dielektrik kondansatörün levhaları arasına konulunca, dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde yükler meydana gelir. Bazı dielektriklerin molekülleri daimi dipol ihtiva ederler. Polar denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz yani yükler birbirinden çok az miktarda ayrılırlar. N_2O ve H_2O moleküllerinin her ikisinde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alırlar; bu moleküller polardırlar. Polar olmayan bir molekülde ise

pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi ile elektronların ağırlık merkezi normal olarak çakışır. H_2 , N_2 , O_2 gibi simetrik moleküller polar değildir. Bir dielektrik elektrik alan içine yerleştirildiği zaman, bir yük hareketi olmamakla beraber, elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük (atomik) dipolar haline geçerler ve dielektrik kutuplanır. Böylece dipolar hale geçen molekül dipol momenti elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığı zaman atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur.

Polar olmayan molekül kutuplandığı zaman yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur. Dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet geri çağırıcı kuvvetlere eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle değişir, bu nedenle verilen bir alan için yüklerin yer değiştirmesi yani kutuplanma farklı olur. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam bir yöneliş olmaz. Fakat uygulanan elektrik alan şiddeti artıkça ve sıcaklık küçüldükçe yönelme derecesi artar [9].

Bir dielektrik polar moleküllerden (daimi dipollerden) meydana gelmiş ise bir dış alan mevcut olmadığı zaman dipoller rasgele doğrultularda yönelirler. Bir dış alanın etkisi altında bulundukları zaman P dipol momentleri Şekil 2.15'teki gibi alana paralel olacak şekilde yönelirler [25]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar. Dielektriğin molekülleri daimi dipol momentine sahip değilse, bu durumda dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.



Şekil 2.15. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri

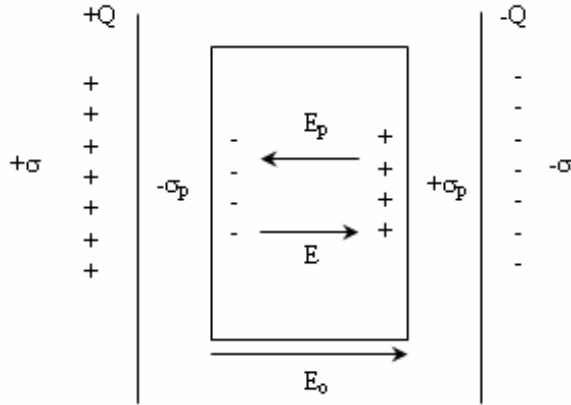
Kutuplanma yükleri

Bir dielektrik madde kondansatörün levhaları arasında bulunduğu zaman, yönelme ile olan kutuplanma, bütün dielektriğin pozitif yüklerinin merkezini, negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak şekildedir. Dielektrik bütün olarak yük bakımından nötr olmakla beraber polarize olmuştur. Net etki dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yük meydana getirecek tarzdadır. Dielektriğin içinde herhangi bir hacim elemanında bir yük fazlalığı yoktur. Dielektrik bütün olarak, elektrik bakımından nötr olduğuna göre, yüzeyde meydana gelen negatif ve pozitif kutuplanma yükleri eşit olmalıdır. Bu olayda dielektriğin kondansatörün levhalarına bakan yüzlerinde meydana gelen yükler son derece ince bir tabaka içindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır. Bunlara bağlı yükler denir. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Bir iletken serbest yükler bulunduğu halde, polarize bir yalıtkanda meydana gelen yükler bağlıdır [9].

Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yükleri nedeniyle levhalar üzerindeki serbest yüklerden ileri gelen alana ters yönde bir alan meydana gelir. Bu durum Şekil 2.16'daki gibi açıklanabilir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi düzgün bir E_0 elektrik alan içindeki bir dielektrik maddede moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Böylece uygulanan elektrik alan, dielektrik madde tümü ile nötr olmasına karşın dielektriği polarize eder. 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 ile dielektrik bulunmadığı zamanki alan şiddetini ve E_p ile polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti gösterilirse, bileşke alan bunların vektörel toplamına eşit olur.



Şekil 2.16. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_p \quad (2.43)$$

E_o polarize eden alan ile, polarize yüklerden ileri gelen E_p alanı zıt yönlüdürler. O halde "Eş. 2.43" denklemi,

$$\vec{E} = \vec{E}_o - \vec{E}_p \quad (2.44)$$

yazılabilir. E_p alanı kutuplanmayı önlemeye çalışan alandır. Bileşke alan daima E_o yönündedir. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ , dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu σ_p ise, etkili yük yoğunluğu $(\sigma - \sigma_p)$ olur. σ serbest yük yoğunluğu, E_o elektrik alanına,

$$E_o = \frac{\sigma}{\epsilon_o} \quad (2.45)$$

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

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (2.46)$$

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

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (2.47)$$

olur.

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

$$V = \frac{V_o}{\epsilon'} \quad (2.48)$$

$$E = \frac{E_o}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_o} \quad (2.49)$$

$$C = \epsilon' C_o \quad (2.50)$$

ifadeleriyle verilir. Burada C_o , E_o ve V_o , dielektrik yokken kondansatörün kapasitesi, potansiyel farkı ve elektrik alanıdır. Eş. 2.50 denkleminde C_o ($C_o = \epsilon_o A/d$) yerine konulursa kondansatörün kapasitesi,

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_o A}{d} \quad (2.51)$$

olarak elde edilir. Eş. 2.50, Eş. 2.47'de yerine konulursa,

$$\frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_o} = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (2.52)$$

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (2.53)$$

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 Eş.2.44'den $E_o = E_p$ 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 [14].

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

$$P = \epsilon_o \chi E \quad (2.54)$$

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

$$\chi = (\epsilon' - 1) \quad (2.55)$$

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

$$D = \epsilon_o E + P \quad (2.56)$$

ifadesiyle verilir. Eş. 2.54, Eş. 2.56'de yerine konulursa,

$$D = \epsilon_o (1 + \chi) E = \epsilon_o \epsilon' E \quad (2.57)$$

olarak elde edilir [9,26,27].

2.2.5. Kutuplanma mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayanlar diye genelde iki kısma ayrılırlar. Polar maddeler içerdikleri moleküllerindeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadıklarından kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift-kutup momentleridir ve bunlara çift kutuplu maddeler denir. Dielektriklerde temelde üç tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik ve yönelme kutuplanmalarıdır [27,28].

Elektronik kutuplanma

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

İyonik yapılı olmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ($n^2 = \epsilon$). Buna Maxwell ilişkisi denmektedir. 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. Hlbuki elektronlar bu bölgede de yanıt verebilirler ve elektronik kutuplanmayı oluştururlar. Sürekli yn değiştiren bu çift-kutuplar uyarıldığı frekansın aynısıyla ışırlar. Bu yüklerin varlığı ve elektromanyetik alan ile etkileşimi herhangi bir enerji kaybına neden olmaz, yalnızca geçişini geciktirir. Bu materyal, elektromanyetik dalganın hızını azaltarak, kendi içindeki dalganın hızının boşluktakine oranı biçiminde bilinen kırılma indisine sahip olur. Optiksel kırılma indisinin elektronik kutuplanmadan türediği görülür. Daha büyük kutuplanma daha fazla geciktirici davranışa neden olacağından bu da kırılma indisinin büyümesi demektir. Bu, manyetik olmayan materyaller için elektromanyetik teorisinin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin (ϵ') değeri “1” olacak ve gecikme olmayacağından $n = 1$ olur.

İyonik kutuplanma

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

Yönelme kutuplanması

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

Bu üç kutuplanmada dielektrik içinde yerel olarak bağlı yüklerle oluşmaktadır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü; her ikisinde de yüklerin dönmeyip birbirlerinden uzaklaşmalarıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirler. Düşük frekanslarda her üç kutuplanma da oluşur. Frekans arttıkça önce kalıcı, sonra iyonik ve en sonunda da elektronik çift-kutuplar ki, son ikisi etkileşmeli çift-kutuplar olup, dış alanın değişmesini izleyemez duruma gelirler ve ϵ_r “1” değerine ulaşır [25].

Arayüzey-uzay yük kutuplanması

Elektronik, iyonik ve çift-kutup yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, materyalin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelme etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü veya arayüzey kutuplanması diğerlerinden farklı olarak hareketli yüklerden oluşur. Diğerlerinde atom ve moleküller; kendilerini, çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde ise uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Arayüzey kutuplanmasında ise materyalin hacmindeki uzay

yüklerinin veya dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikmesine sebep olan büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır.

Polikristal materyallerde birleşme yüzeylerinde serbest yükler birikebilir, bu da kristalin arayüzey kutuplanmasını doğurur. Bu birikmiş yükler, elektrotlardaki görüntü yükleri etkiler ve diğer kutuplanmalara olumlu etkide bulunurlar. Arayüzey kutuplanması üzerine temel düşünce; kristaller arası ayırıcı arayüzeylerle bağlantılıdır. Bu arayüzeyler, serbest yüklerin bir kristalden diğerine hareketini engelleyici rol oynarlar. Yani kristalleri birbirinden izole ederler. Bu engeller, herhangi bir hava katmanından veya yüzey katmanının bir yalıtkan ile kaplanmasından kaynaklanabilir. Bu konuda çalışanlardan bir kısmı arayüzey kutuplanmasının nedeninin, tek bir kristaldeki kusurlar (boşluklar, safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde boşluk yüklerinin birikimi olduğunu söylemişlerdir [25,27,28]. Bu kutuplanma, materyalin içinde herhangi bir şekilde yerleşmiş uzay yüklerinin elektrotlar üzerindeki görüntü yükleri etkilemesinin bir sonucudur. Bu kutuplanma mekanizması, düşük ve orta düzey frekanslardaki dielektrik yapıların tasarımında büyük rol oynamaktadır [28].

2.2.6. Dielektriklerde elektrik alan ve dielektrik kayıp

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

Elektrostatikte elektrik yer değiştirmenin ifadesi,

$$D = \epsilon E \quad (2.58)$$

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

$$D + a \frac{dD}{dt} = bE + c \frac{dE}{dt} \quad (2.59)$$

elde edilir. a, b, c'nin eklenen terimlerdeki düzeltme sabitleri olduğunu düşünelim. Zamana göre ikinci, üçüncü vs. türev terimleri eklenebilir. Ancak orta şiddetli elektrik alanlar için yüksek dereceli türevlerin ihmal edildiğini düşünelim. Aşağıda verilen koşullar ele alınarak dielektrik davranış incelenecek olursa, a, b ve c sabitlerinin numuneye özgü oldukları ortaya çıkar [89].

a: Numunenin, sabit bir elektrik alan etkisinde bırakıldığını düşünelim. Bu statik bir durumdur ve bu koşulda elektrik alan ve dolayısıyla elektrik yerdeğiştirme niceliğinin zamanla değişimi görülmez ($\frac{dE}{dt} = 0$, $\frac{dD}{dt} = 0$).

Bu durumda Eş. 2.59 bağıntısı,

$$D = bE \quad (2.60)$$

olur. Buradaki b, statik dielektrik geçirgenlik (ϵ_s) sabitidir. Yani Eş. 2.59 bağıntısı yeniden yazılırsa,

$$D + a \frac{dD}{dt} = \epsilon_s E + c \frac{dE}{dt} \quad (2.61)$$

şeklinde ifade edilebilir.

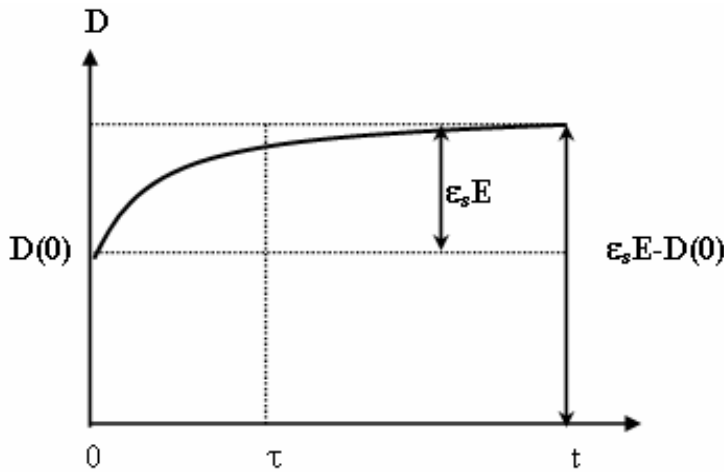
b: Numunenin ani olarak bir elektrik alan etkisinde bırakıldığı durumu ele alalım. Elektrik alan, uygulandığı süre boyunca sabit değerde kalsın. Bu durumda numunenin elektrik yerdeğiştirmesi (D), ani olarak karakteristik bir değere ulaştıktan sonra dipoller belli bir düzene gelene kadar zamana bağlı bir şekilde artma eğilimi gösterir. $\frac{dE}{dt} = 0$ durumu için, Eş. 2.61 bağıntısı,

$$D + a \frac{dD}{dt} = \epsilon_s E \quad (2.62)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemin çözümü, “ $\ln (D - \epsilon_s E) = -t/a + \text{sabit}$ ” ile verilir. $t=0$ ’da $D=D(0)$ olsun. Buna göre,

$$D = \epsilon_s E - [-D(0) + \epsilon_s E] e^{-t/a} \quad (2.63)$$

olur. Yukarıdaki denklem göz önüne alınarak D ’nin zamanla değişimi Şekil 2.17.’te verilmiştir. Elektrik yer değiştirmenin ilk değerinin $D(0)$, son değerinin de $\epsilon_s E$ ile geldiği ($\epsilon_s E$) maksimum değer olduğu görölmektedir.



Şekil 2.17. D ’nin zamanla değişim grafiği ($E=\text{sabit}$)

Bu incelemenin Eş. 2.59 bağıntısında yer alan a sabiti, bu exponansiyel davranışta görülen τ zaman sabitidir (durulma zamanı). Buna göre Eş. 2.61 bağıntısının son hali,

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \epsilon_s E + c \frac{dE}{dt} \quad (2.64)$$

olur.

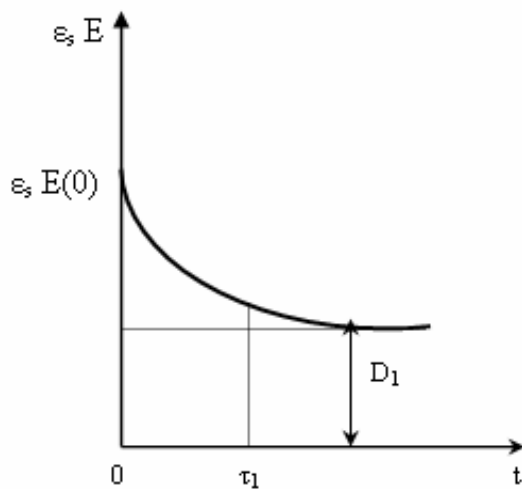
c : Numune bu defa, $t=0$ anında $E(0)$ değerine sahip bir elektrik alan etkisinde kalmış olsun. Bu etki altında, numune içinde meydana gelen elektrik yerdeğiştirme değerinin D_1 olduğunu düşünelim. D 'nin D_1 değerinde sabit kalması için elektrik alan zamana göre değişir ve Eş. 2.64 denklemi,

$$D_1 = \epsilon_s E + c \frac{dE}{dt} \quad (2.65)$$

olur. Yukarıdaki denklemin integrali alındığında,

$$\epsilon_s E = D + [\epsilon_s E(0) - D_1] e^{-\epsilon_s t / c} \quad (2.66)$$

elde edilir. Bu ifadeye karşılık gelen grafik Şekil 2.18.'de verilmiştir.



Şekil 2.18. Elektrik alanın (E) zamanla değişim grafiği (D =sabit)

Şekil 2.18., exponansiyel azalmanın farklı bir zaman sabiti ile olduğunu gösterir ($\tau_1 = c/\epsilon_s$). Bu nedenle Eş. 2.64 bağıntısının son hali,

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \epsilon_s E + \epsilon_s \tau_1 \frac{dE}{dt} \quad (2.67)$$

olarak ifade edilir. Sonuç olarak, bu diferansiyel denklemde numuneye özgü sabitlerinde yer aldığı zamana bağlı türev terimleri ve E ile D arasındaki ilişkiyi ifade eden bir diferansiyel denklemi elde edildi.

Dielektrik numuneye Δt süresince ΔE artırımları ile elektrik alan uygulanırsa D'de ΔD kadar bir artış meydana gelir. Eş. 2.67 denkleminde, bu değişimin etkisi diferansiyel formda Δt üzerinden terim integral alınarak anlaşılabilir.

$$\int_0^{\Delta t} D dt + \tau \int_0^{\Delta D} dD = \epsilon_s \int_0^{\Delta t} E dt + \epsilon_s \tau_1 \int_0^{\Delta E} dE \quad (2.68)$$

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

$$\tau \Delta D = \epsilon_s \tau_1 \Delta E \quad \text{yada} \quad \frac{\Delta D}{\Delta E} = \frac{\epsilon_s}{\tau} \tau_1 \quad (2.69)$$

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

$$\Delta D = \epsilon_\infty \Delta E \quad (2.70)$$

Buradaki ϵ_{∞} , numunedeki sürekli dipoller hareket etmeden önce, ΔD ve ΔE 'deki ani bir değişime karşılık gelen geçirgenlik (permittivite) değerini ifade eder. Buna göre, Eş. 2.69;

$$\tau \epsilon_{\infty} = \epsilon_s \tau_1 \quad (2.71)$$

olur. Eş. 2.67 denkleminin, son hali,

$$D + \tau \frac{dD}{dt} = \epsilon_s E + \tau \epsilon_{\infty} \frac{dE}{dt} \quad (2.72)$$

olarak elde edilir.

Dipol yöneliminin en ilginç yanı Eş. 2.72 denkleminde görülebilir. Buna göre dielektrik numunedeki bir dipol yönelimi, frekansı ω olan periyodik bir elektrik alan uygulandığında meydana gelir. Periyodik alan,

$$E = E_1 e^{i\omega t} \quad (2.73)$$

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

$$D = \epsilon^* E \quad (2.74)$$

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.75)$$

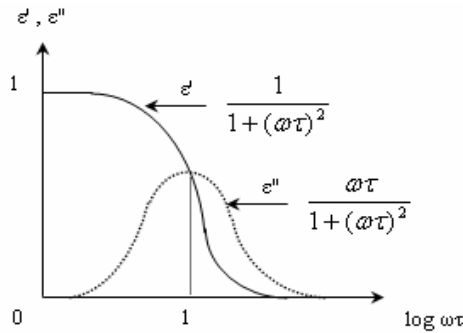
(Not: Uygulamalarda gerçel bileşen ϵ' ve sanal bileşen de ϵ'' ile ifade edilmektedir.) ϵ' ve ϵ'' değerlerini bulmak için Eş. 2.73 ve Eş. 2.74 denklemleri Eş. 2.72'de kullanıldığında,

$$\varepsilon^* = \left[\varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] + j \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \right] \quad (2.76)$$

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

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.77)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (2.78)$$



Şekil 2.19. Dielektrik sabitinin gerçel (ε') ve sanal (ε'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

τ , numuneye özgü bir niceliktir ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. ω ise sıcaklıktan bağımsızdır [89].

Eş. 2.76'in sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfıra yaklaşır. Bu terim şekil 2.19.'da dolu çizgi ile verilmiş olan $\log \omega \tau$ 'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Çok düşük frekanslarda ($\omega \ll 1/\tau$), dielektrik sabitin gerçel bileşeni, statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ($\omega \gg 1/\tau$) ise, gerçel bileşen ε_{∞} değerine yaklaşır. Yüksek ve alçak frekans arasında kalan bölgede ise düzgün geçişler (iki faz bölgesi arasında) olur. Dielektrik sabitin sanal bileşeni ile ilgili eğri

yine şekil 2.19.'da (kesik çizgili olan) verilmektedir. Eğride bu terimin $\omega=1/\tau$ olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir. Elektrik yer değiştirme (D) ifadesindeki, elektrik alan ile farklı fazda olan terim, dielektrikteki enerji kaybını gösterir. Birim hacimdeki güç kaybı P,

$$P = J.E \quad (2.79)$$

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

$$J = \frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt}(\epsilon' E - \epsilon'' E) = (j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'')E \quad (2.80)$$

Buna göre güç kaybı,

$$P = \omega |\epsilon''| E^2 \quad (2.81)$$

Güç kaybı elektrik yer değiştirmenin faz farkı bileşeni ile orantılıdır ve şekil 2.19.'da verilen frekansın bir fonksiyonu olarak, ϵ'' bileşene yakın bir davranış sergiler. Alçak ve yüksek frekanslarda değeri düşer. Bunun dışında ara frekanslarda ise " $\omega=1/\tau$ " bir maksimum verir. Benzer şekilde enerji kayıp değeri, kayıp açısı δ ile tanımlıdır ve

$$\tan \delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{\epsilon_s + \epsilon_\infty \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (2.82)$$

ile ifade edilir. P güç kaybı ϵ' ve $\tan\delta$ cinsinden,

$$P = \omega E^2 \epsilon' \tan \delta \quad (2.83)$$

ifade elde edilir [89].

2.2.7. Dielektrik sabiti ölçme yöntemi

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 ödeşirilir. Dielektrik madde ile doldurulmuş bir paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ile karakterize edilebilir. Admittans Y ile gösterilir. Buna göre,

$$Y = G + j\omega C \quad (2.84)$$

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

$$Y = G + j\omega(C_0 \epsilon^*) \quad (2.85)$$

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

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.86)$$

olarak ifade edilmektedir. Admittansın son hali,

$$\begin{aligned} Y &= G + j\omega C_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \\ Y &= (G + \omega \epsilon'' C_0) + j\omega C_0 \epsilon' \end{aligned} \quad (2.87)$$

olur [27,69].

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

$$Z = \frac{1}{j\omega C + G} = \frac{1}{j\omega C_0 \epsilon^*} \quad (2.88)$$

ifade edilir. Eş. 2.86, Eş. 2.88'da yerine yazılırsa gerçel ve sanal kısımların çözümleri;

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad \text{ve} \quad \epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (2.89)$$

olarak elde edilir [68].

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

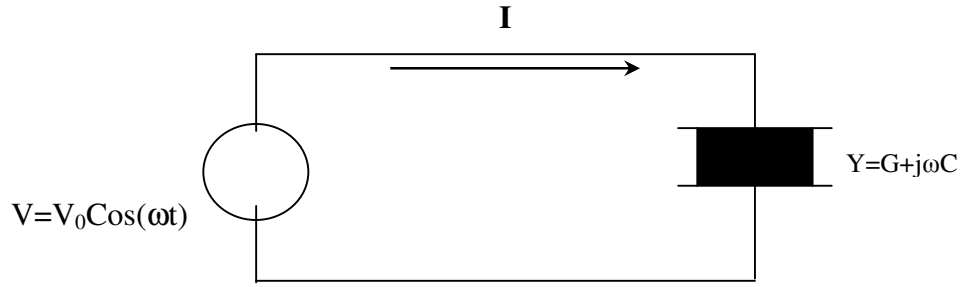
$$I = (\epsilon^* C) \frac{dV}{dt} \quad (2.90)$$

olarak ifade edilir. Numuneden geçen akım,

$$I = I_R + jI_C \quad (2.91)$$

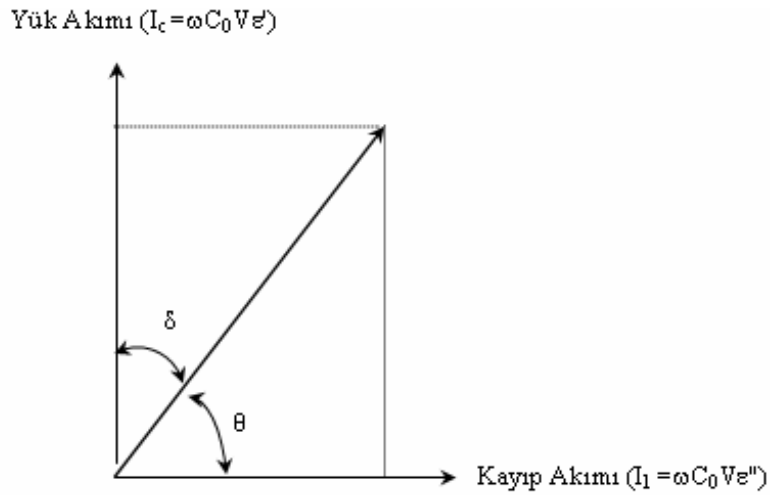
olarak ifade edilir

I_R ; sürücü gerilim ile aynı fazda olan, gerçel yada dirençsel bileşen olarak adlandırılır. I_C ; sürücü gerilim ile farklı fazda olan, sanal yada sıgasal bileşen olarak adlandırılır.



Şekil 2.20. Dielektrikli bir kondansatördeki a.c. akım

Numuneden geçen akım, bileşenleri ile birlikte Şekil 2.21.'de verilen fazör diyagramında görülmektedir.



Şekil 2.21. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akımı (I_l) arasındaki ilişki

Bu diyagramda görülen δ terimi, numune üzerindeki ac sürücü gerilim etkisi nedeniyle, dielektrik bir maddenin davranışında ifade edilmiş olan periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan \delta$ 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,

$$\tan \delta = \left| \frac{I_R}{I_C} \right| = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.92)$$

kayıp açı faktörünü ifade eder [2,69].

2.2.8. Dielektrik kayıplar

Bir dielektrik ihtiva eden kondansatörün plakaları arasına yüksek bir gerilim uygulanırsa (yalıtkanlığını koruyabildiği maksimum gerilimin altında) dielektrik ısınır. Yalıtkanı teşkil eden atomların dış tabakalarındaki elektronların ait oldukları atomları terk etmeleri sonucu meydana gelen bu iletkenlik, yabancı madde karışması ve özellikle nem ile artar. Eğer alternatif bir gerilim uygulanırsa, önemli bir ısınma olur ve açığa çıkan ısı frekansı ile artar. Buna sebep dış alanın değişen yönüne göre yönelecek olan moleküllerin birbirlerine sürtünmeleridir. Bu sürtünmelere karşı yaptıkları iş ısıya dönüşür. Komşu moleküllerle olan sürtünmeler nedeniyle molekülün alanının değişimini takip edişi gecikmeli olur. Bu olaylarla dielektrikte ısıya dönüşen enerji “dielektrik kayıp” olarak tanımlanır. Sıcaklık artıkça dielektrik kayıplarda artar [9].

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Silisyum Kristalin Bazı Temel Özellikleri

Silisyum doğada bol miktarda, silikat ve silisyum dioksit (kum) bileşikleri halinde bulunur. Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Silisyum dioksitin (SiO_2) elektrik arkında redüklenmesi ile elde edilen silisyum saf olmaması nedeniyle, silanli (SiH_4) bir bileşiğe dönüştürülür. Sıvı olan bu bileşik, kademeli distilasyon yöntemi ile ayrılır ve silisyumu içeren kısım kendi başına veya hidrojen atmosferinde ısıtılarak saf silisyuma ulaşılır. Bu yöntemlerle kimyasal saflığa getirilen silisyum yarıiletkeni henüz elektronik aygıt yapımı için yeterli saflıkta değildir.

Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden yararlanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır [30]. Bu yöntemle saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bundan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülmesi ve içine arzu edilen özdirenci sağlayacak safsızlık (katkı) maddelerinin katkılanması gerekir. Katkılanan safsızlığın cinsi yarıiletkenin tipini belirler ve miktarı (n) ise iletkenlik veya özdirencini ($\rho = 1/\sigma = 1/\mu q$) tayin eder. Katkılanan alıcı atomların (N_A) veya verici atomların (N_D) sayısı 10^{14} cm^{-3} ’ten küçükse yarıiletken “düşük katkı”, 10^{15} - 10^{16} cm^{-3} civarında ise “orta katkı” ve 10^{16} cm^{-3} ’ten büyükse “yüksek katkı” yarıiletken denir. Düşük katkı yarıiletkenlerde Fermi enerjisi yasak bandın artasına doğru kayar ve artan sıcaklıkla bu kayma daha da artar.

Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı özellikleri

Özellikleri	
Atom/cm ³	$5,0 \times 10^{22}$
Atom ağırlığı (kg/mol)	28,09
Kırılma alanı (V/cm)	3×10^5
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N_c (cm ⁻³)	$2,8 \times 10^{19}$
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N_v (cm ⁻³)	$1,04 \times 10^{19}$
Saf taşıyıcı yoğunluğu n_i (cm ⁻³)	$1,45 \times 10^{10}$
Saf öz direnci ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$2,3 \times 10^5$
Örgü sabiti (Å)	5,43095
Elektronların etkin kütlesi, m^*/m_0	$m_l^*=0,98, m_t^*=0,19$
Deşiklerin etkin kütlesi, m^*/m_0	$m_{hh}^*=0,16, m_{lh}^*=0,49$
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4,05
Yasak enerji aralığı (eV)	1,12
Hareketliliği (cm ² /V.s)	1500 (elektron için) 450 (deşik için)
Erime sıcaklığı (°C)	1415
Azınlık taşıyıcı yaşam süresi (s)	$2,5 \times 10^{-3}$
Termal iletkenlik (W/cm-°C)	1,5

3.2. MIS Yapıların Hazırlanması

3.2.1. Kristal temizleme

İdeale yakın bir metal-yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar yada diğer adıyla Schottky diyotları yapabilmek için kullanılacak yarıiletken kristalin yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Bu çalışmada kullanılan kristal fabrikasyon olarak parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Ancak kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini gidermek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için bir dizi kimyasal temizleme işlemi ultrasonik banyoda yapıldı. Bu çalışmada, MIS yapıları oluşturmak için, (100) yüzey yönelimli, 8 Ω .cm özdirençli, 280 μ m kalınlıklı, 2" (5,08 cm) çapında bor katkılı (p-tipi) Si tek kristal yapraklar kullanıldı. Kullanılan Si kristalleri, yurt dışından CrysTec firmasından fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi parlatılmış olarak satın alınmıştır. P-tipi Si yapraklar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya (çeyrek yaprak) bölündü. Bu çeyrek Si yapraklardan iki tanesi üzerine farklı yalıtkan arayüzey tabakasına sahip (SiO_2) MIS yapılar oluşturuldu. Metal ile yarıiletken arasına doğal yada yapay olarak büyütülen bir yalıtkan tabaka, MIS yapının hem elektriksel hem de dielektrik özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu nedenle Si yaprakların üzerine homojen bir oksit tabakanın büyütülmesi en önemli fabrikasyon adımlarından biridir. Bundan dolayı üzerine oksit büyütülecek yüzey ve onun üzerine oluşturulacak yalıtkan tabaka son derece temiz ve homojen olmalıdır. Kimyasal temizleme için çeşitli metotlar kullanılabilir. Bu çalışmada silisyum tabakanın temizlenmesinde kullanılan kimyasal temizleme işlemi aşağıda verilmiştir.

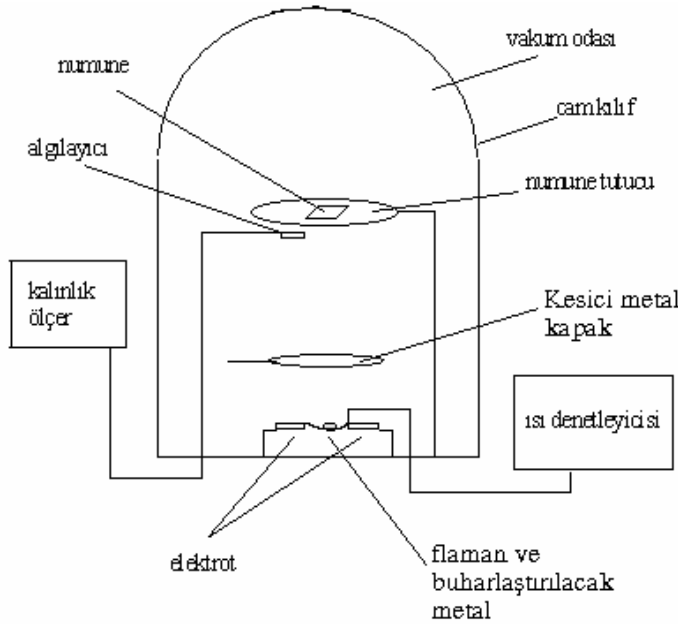
Temizleme işleminde, yüksek dirençli (~16-18 M Ω) deiyonize su kullanıldı. Ro&Up Water Purification System ile elde edilen bu deiyonize su, saf suyun Sybran sistemi içerisinden geçirilmesi ile elde edildi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri, ~60 kHz ses dalgaları ile titreştirilen ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan beherler, cımbız v.b araçlar önce yüksek saflıktaki

aseton ile deiyonize su karışımında ultrasonik banyoda temizlenip deiyonize suda iyice durulandıktan sonra bir etüv fırınında yaklaşık 80 °C de 30 dak. ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra yarıiletken kristallerin temizlenmesi için aşağıdaki işlemler sırasıyla uygulandı:

1. Yarıiletken kristaller önce aseton su içerisinde ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika kadar yıkandıktan sonra deiyonize su ile durulandı.
2. Kristaller, 20 ml trikloretilen (C_2HCl_3), 20 ml aseton ve 20 ml metil alkol (CH_3OH) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlendi.
3. Kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
4. 30 ml sülfürik asit (H_2SO_4) ve 30 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
5. Deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
6. 30 ml %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
7. 30 ml nitrik asit (HNO_3), 10 ml hidroflorik asit (HF) ve 50 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) (3:1:5) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
8. Tekrar deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
9. 40 ml %38 saflıkta hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
10. Son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika durulandı.
11. Kimyasal olarak temizlenen bu p-tipi silisyum kristallerin yüzeyinin oksitlenmemesi için, kuru azot (N_2) ile kurulandı. Bu işlemten hemen sonra, omik ve doğrultucu kontakların oluşturulması için Si yapraklar hemen vakumda buharlaştırma sistemine yerleştirildiler.

3.2.2. Omik kontağın oluşturulması

MIS yapı hazırlanırken omik ve doğrultucu kontağın oluşturulması için yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Sistemin içinde diyot yapımını gerçekleştirilen kısmı Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.

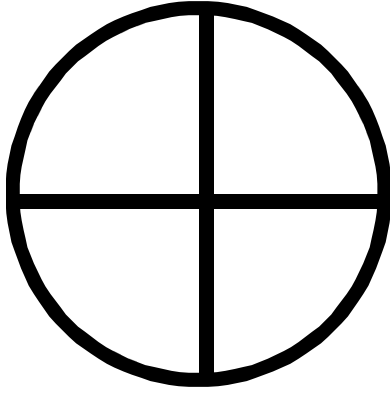


Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakumdan metalden buharlaştırma sistemi düzeneği

Bu kısımdaki parçalar, flaman (tungsten) ve ince bir bakır levhadan hazırlanan maskeler kimyasal olarak ultrasonik banyoda iyice temizlendi. Temizleme işlemi, karbonditetraklorür, trikloretilen ve aseton içerisinde 5 dakikalık süreler ile yapıldı ve daha sonra deiyonize su ile yıkandı. Fanus, NaOH çözeltisi ve deiyonize su kullanılarak temizlendi ve tüm parçalar yaklaşık 80 °C’de fırınlanarak kurutuldu. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Fanus hemen kapatılarak vakumlama işlemine geçildi (10^{-6} Torr).

Omik kontaklar için Şekil 3.2’de gösterilen 50 mm çaplı ve ≈ 500 μm kalınlıklı bakır maske kullanıldı. Vakum $\approx 10^{-6}$ Torr’a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek ($\approx 35\text{A}$) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş alüminyum metal parçacıklarının buharlaşması sağlandı. Buharlaşmanın başlamasından bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa çekilerek, silisyumun mat yüzeyine alüminyum (Al) kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine yapışmasını önlemektir. Arka yüzeye kaplanan Al tabaka Şekil 3.3’te verilen

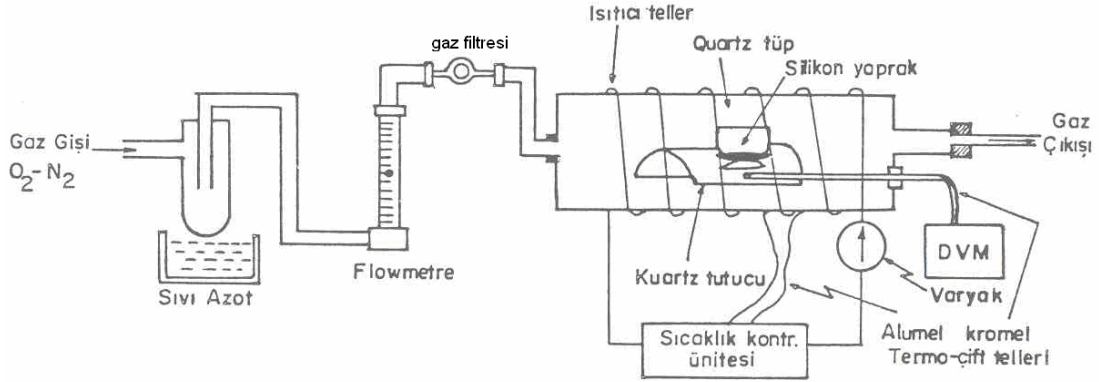
sistemde 650°C’de ortamdan ~ 2lt/dak. Hızında N₂ gazı 60 dak. süreyle geçirildi. Yarı iletken içerisine çöktürülmesiyle omik kontak oluşturuldu.



Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

3.2.3. Yalıtkan oksit tabakasının oluşturulması

Yalıtkan oksit tabakası büyütmenin birçok yöntemi vardır. Fakat bunlardan en çok kullanılan silikon üzerine termal olarak kuru O₂ büyütülmesidir. $Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ kimyasal reaksiyonu sonucu büyütülen d kalınlığındaki oksit tabakasının 0.45d kadar silikon yüzeyinden içeri, kalanı da dışarı doğru büyür (8). Kimyasal olarak temizlenen Si yaprakları üzerine oksit (SiO₂) büyütmek için en çok kullanılan yöntemlerden biri olan, fırında oksit büyütme yöntemi kullanıldı. Bu yöntem için kullanılan sistem Şekil 3.3’de verilmiştir. Kuartz tüp, direnç telinden geçen akım vasıtasıyla ısıtıldı ve ortamın sıcaklığı, ELİMKO 6000 kontrol ünitesi ile kontrol edildi. Ayrıca kuartz tüpün içindeki numunelerin olduğu bölgeye yerleştirilen kromel-alümel termo-çifti ile sıcaklık kontrol edildi. Oksitleme için gerekli gaz akış hızı bir flowmetre ile ölçüldü. Oksitleme işleminde kullanılan gazlar, nemin alınması için Şekil 3.3’de gösterildiği gibi, gazlar sıvı azot kabının üstünde tutturulmuş bir nem tutucudan (cam tüp) geçirildikten sonra oksidasyon fırınına gönderildi. Oksidasyon fırını farklı sürelerde farklı sıcaklıklara ayarlanarak ve numunenin bulunduğu ortamdan nitrojen (N₂) gazı geçirilerek farklı kalınlıklardaki yalıtkan oksit tabakası (SiO₂) oluşturuldu.



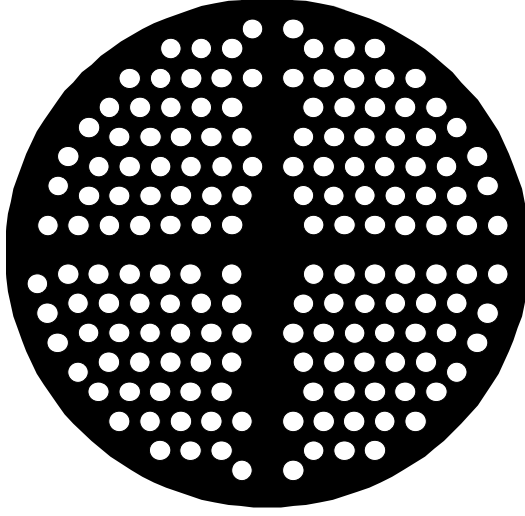
Şekil 3.3. Oksit büyütmede kullanılan fırın sistemi

Oluşturulan yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı kapasitans-voltaj ölçümlerinde kuvvetli akümülyasyon bölgesinden ($C \cong C_{ox}$) hesaplandı.

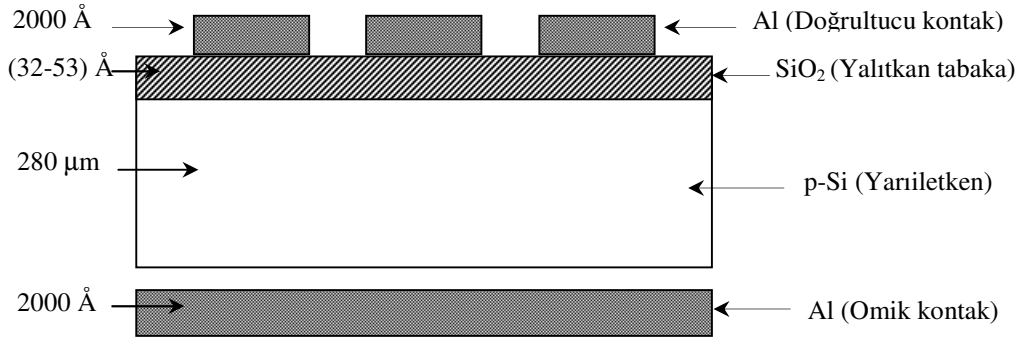
3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzeri SiO_2 kaplanmış yüzey üzeri çok sayıda 1mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske (Şekil 3.4) üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen alüminyum (Al) metal parçası $\approx 10^{-6}$ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1mm çaplı) şeklinde ve $\approx 2000 \text{ Å}$ kalınlığında alüminyum kaplanması sağlandı. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla Al/ SiO_2 /p-Si şeklinde MIS yapılar elde edildi. Oluşturulan MIS yapılar ışık tutucular üzerine iletken gümüş pasta ile yapıştırıldı. Yalıtkan oksit tabakası üzerindeki üst elektrotlara, (doğrultucu kontaklara) gümüş kaplamalı ince teller kullanılarak gümüş pasta yardımıyla elektriksel kontaklar yapıldı.

Soğuması için bir süre bekletilen kristal vakum ortamından çıkartılarak her bir dairecik (diyot) ortada kalacak şekilde, elmas kesici yardımıyla eşit dört parçaya bölündü. MIS yapının hazırlanış şeması Şekil 3.5' de verilmiştir.



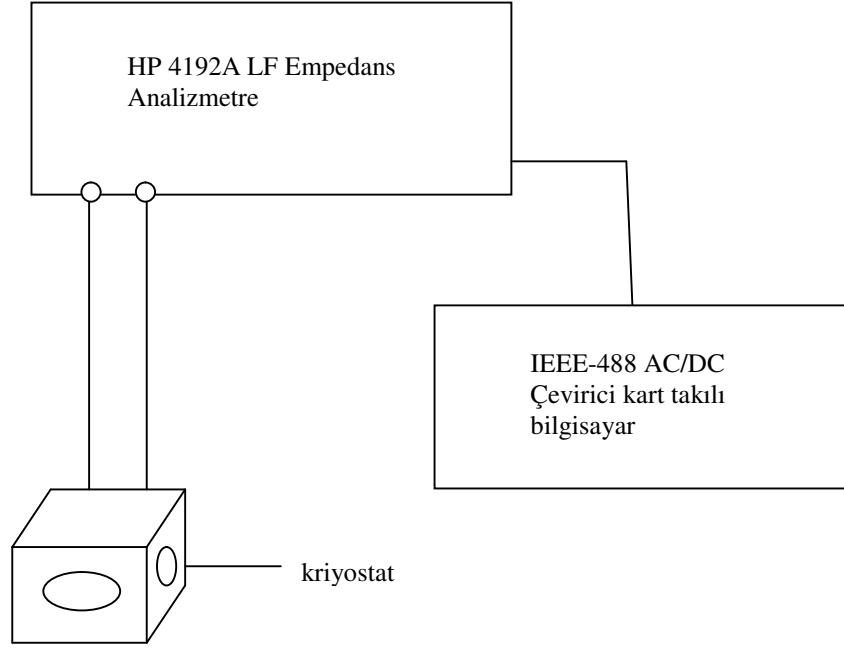
Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske



Şekil 3.5. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının şematik gösterimi

3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Elektriksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Katıhal Laboratuvarında yapıldı. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümlerinde Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analizmetre (5Hz–13MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.6’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Hazırlanan Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Al/SiO₂/p-Si yapıların bazı temel fiziksel özelliklerini geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında araştırmak için; kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri sırasıyla 10 kHz–10 MHz frekans (oda sıcaklığında) ve 300-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların C-V ve G/ω-V ölçümleri hem negatif hem de pozitif gerilimde geniş bir aralıkta (-5V ile +5V) ölçüldü. Böylece, C-V ve G/ω-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar (Tersinim, tükenim ve yığılım) elde edildi. Deneysel C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları kullanılarak MIS yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplandı. Elektriksel özelliklerden arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve elektriksel iletkenlik (σ) gibi temel parametreler frekansa bağlı hesaplandı. Dielektrik özelliklerden ise dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp açısı (tanδ) ile M' ve M'' dipol modülleri sıcaklığa bağlı hesaplandı. C-V ve G/ω-V ölçümleri Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre (5 Hz-13 MHz) ve bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kumanda edilerek gerçekleştirildi. Sıcaklık ölçümlerinde ise, Janes vpf-475 kırıyostat içinde yaklaşık 5x10⁻⁴ Torr basınç altında bir Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirildi.

4.1. Oda Sıcaklığında Frekansa Bağlı C-V ve G/ω-V Ölçümler

4.1.1. Elektriksel karakteristikler

MIS yapılarının seri direncini hesaplamak için literatürde çeşitli metotlar önerilmiştir [13,55,56]. Bu çalışmada, Nicollian ve Goetzberger tarafından sunulan admittans metodu kullanıldı [13]. MIS yapısının oda sıcaklığındaki frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verildi. MIS yapısının gerçek seri direnci yüksek frekansta ($f \geq 1$ MHz) çizilen C-V ve G/ω-V eğrilerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki kapasitans (C_{ma}) ve iletkenlik (G_{ma}) değerleri kullanılarak hesaplanabilir [13]. Ayrıca, seri direncin voltaj

bağlı değerleri de frekansa bağlı C-V ve G/ω-V datasının ölçümlerinden elde edilebilir. Yüksek frekansta, seri direnci belirlemek için, MIS yapılar 40mV_{rms} 'lik bir osilasyon voltajı ile uyarıldı. Daha sonra dc gerilim -5V değerinden +5V değerine kadar 50mV adımlarla değiştirilerek tersinim bölgesinden yığılım bölgesine kadar C-V ve G/ω-V eğrileri farklı frekanslar için elde edildi. Paralel RC devresini [13,46] kullanarak, aşağıda belirtildiği şekilde, kuvvetli yığılım altındaki eşdeğer devrenin toplam admittansı (Y_{ma}),

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

eşitliğiyle verilir. Admittansın gerçel ve sanal kısımları karşılaştırarak, R_s değeri aşağıdaki şekilde elde edilebilir [13,21].

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.2)$$

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

$$C_{ma} = \frac{C_{ox}}{(1 + \omega^2 R_s^2 C_{ox}^2)} \quad (4.3)$$

Eşitliği ile verilir. Eş 4.2 ve Eş 4.3 kullanılarak C_{ox} değeri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$C_{ox} = C_{ma} \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^2 \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (4.4)$$

Burada ε_i=3,8ε₀ [1] ve ε₀ (=8,85x10⁻¹⁴ F/cm) sırasıyla yalıtkan arayüzey tabaka ve boşluğun geçirgenlik sabitleridir. Son olarak, düzeltilmiş admittansın sanal ve gerçel

kısmını ($Y_c = G_c + j\omega C_c$) karşılaştırarak düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c) değerleri aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.5)$$

ve

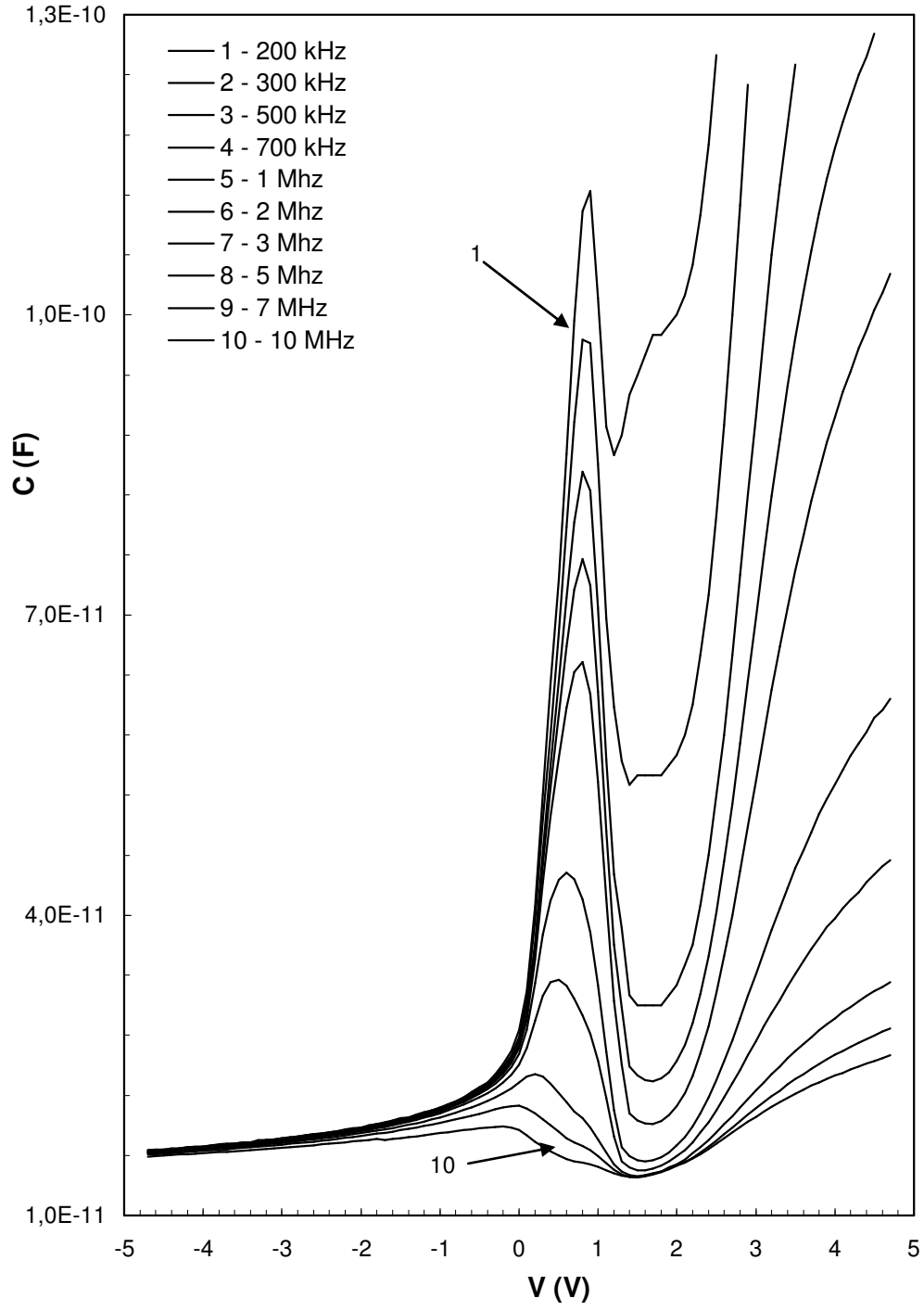
$$G_c = \frac{G_m^2 + (\omega C_m)^2 a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.6)$$

Burada;

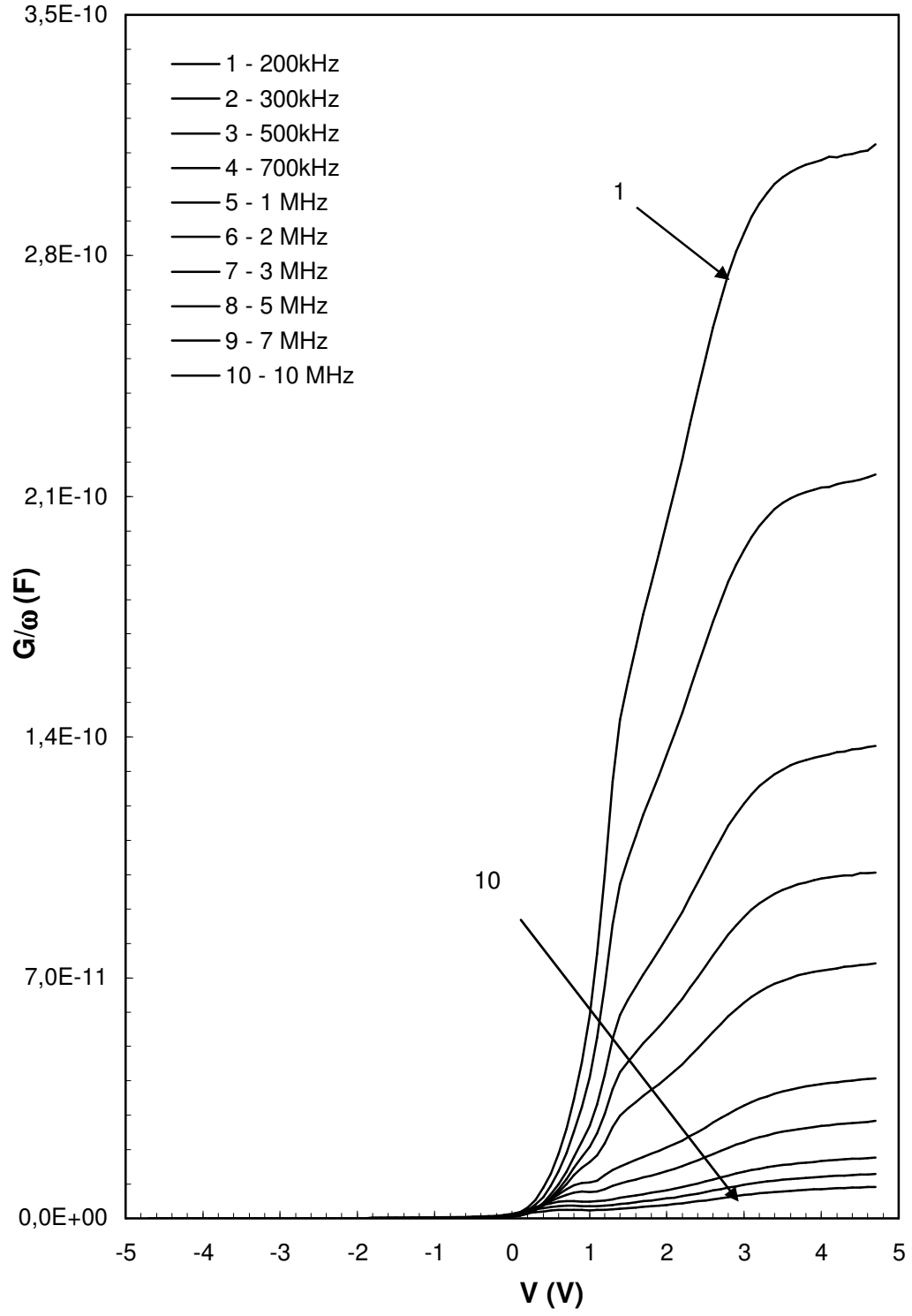
$$a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s \quad (4.7)$$

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, 40 mV_{rms} büyüklüğündeki küçük bir ac sinyali ile 10 kHz-10 MHz frekans aralığında ölçülen MIS yapısının oda sıcaklığında ölçülen C-V ve G/ω-V karakteristikleri -5V ile +5V aralığında verilmiştir. Böylece hem C hem de G/ω değerleri tersinim, tükenim ve yığılım bölgelerinde çizildi. Eş.4.4 ve MIS yapının doğrultucu kontak alanı 7.85x10⁻³cm² değeri kullanılarak yüksek frekans (f=1 MHz) C-V eğrisinden elde edilen yalıtkan tabakası (SiO₂) kalınlığı (d_{ox}) 32 Å olarak bulundu. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, ölçülen C değeri tüm frekanslar için tersinim bölgesinde (-5v ile -1v arasında) hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Ancak hem tükenim bölgesinde hem de yığılım bölgesinde C değerleri büyük ölçüde frekansa bağıllık göstermektedir. Yani bu bölgede her frekanstaki C değerleri azalan frekansla artmakta ve 0V ile 1V arasında bir pik vermektedir. Bu davranış veya diğer bir deyişle düşük frekanslardaki daha yüksek C değerleri, Si ile dengede olan arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilebilir [13,14,18,31-35]. Yani, düşük frekanslarda arayüzey durumları (N_{ss}) ac sinyali takip edebilir ve sonuç olarak MIS kapasitansına önemli ölçüde bu N_{ss}’lerden dolayı bir katkı gelmektedir. Bu katkıdan dolayı meydana gelen kapasitansa ilave kapasitans denir.

Frekans arttırıldıkça, MIS kapasitansı azalır ve daha sonra hemen hemen sabit olur. Yani yüksek frekanslarda ölçülen kapasitans değerlerine N_{ss} 'lerden dolayı meydana gelen katkı gittikçe azalır ve yaklaşık 1 MHz'den sonra bu katkı tamamen ortadan kalkar [13]. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, kapasitans pik değerinin R_s ve N_{ss} değerlerine kuvvetli şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Geniş bir frekans aralığında C-V ve G/ω -V ölçümleri bize hazırlanan aygıtın temel elektriksel ve dielektrik özellikleri hakkında çok önemli bilgiler verir. Son zamanlarda, metal-yalıtkan-yarıiletken MIS yapılarla ilgili literatürde bir çok deneysel sonuç bulunmaktadır[39,47,52,58]. Farklı frekanslardaki MIS yapısının G/ω -V karakteristikleri Şekil 4.2'de görüldüğü gibi C-V eğrilerine benzer biçimde artan voltajla artmakta, ancak artan frekanslarla azalmaktadır. Bu davranışlar düşük ve orta seviye frekanslarda, arayüzey durumlarının gevşeme zamanına ve ac sinyalin frekansına bağlı olarak farklı olabilir [13,31,34-36]. Yani düşük açısallık frekanslarda elde edilen C-V veya G/ω -V ölçümleri için periyot değeri ($T=1/2\pi f$), arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden (τ) büyük olacaktır. ($T>\tau$). Bu nedenle çok küçük frekanslarda ($f\leq 50$ Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyalini takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda ($f\geq 1$ MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyalini takip edemez [13,14,30-34,39-45]. Bu frekans değerleri arasında (orta frekanslarda) ise arayüzey durumlarının ac sinyalini takip etme gücü azalan frekansla artmaktadır. C-V ve G/ω -V ölçümlerinde; arayüzey durumları tersinim ve tükenim bölgesinde etken olurken seri direnç ise yığılma bölgesinde etkilidir [31-34] Yani kuvvetli yığılma bölgesinde C-V ölçümlerinde R_s 'den dolayı da pik görülmektedir [13].

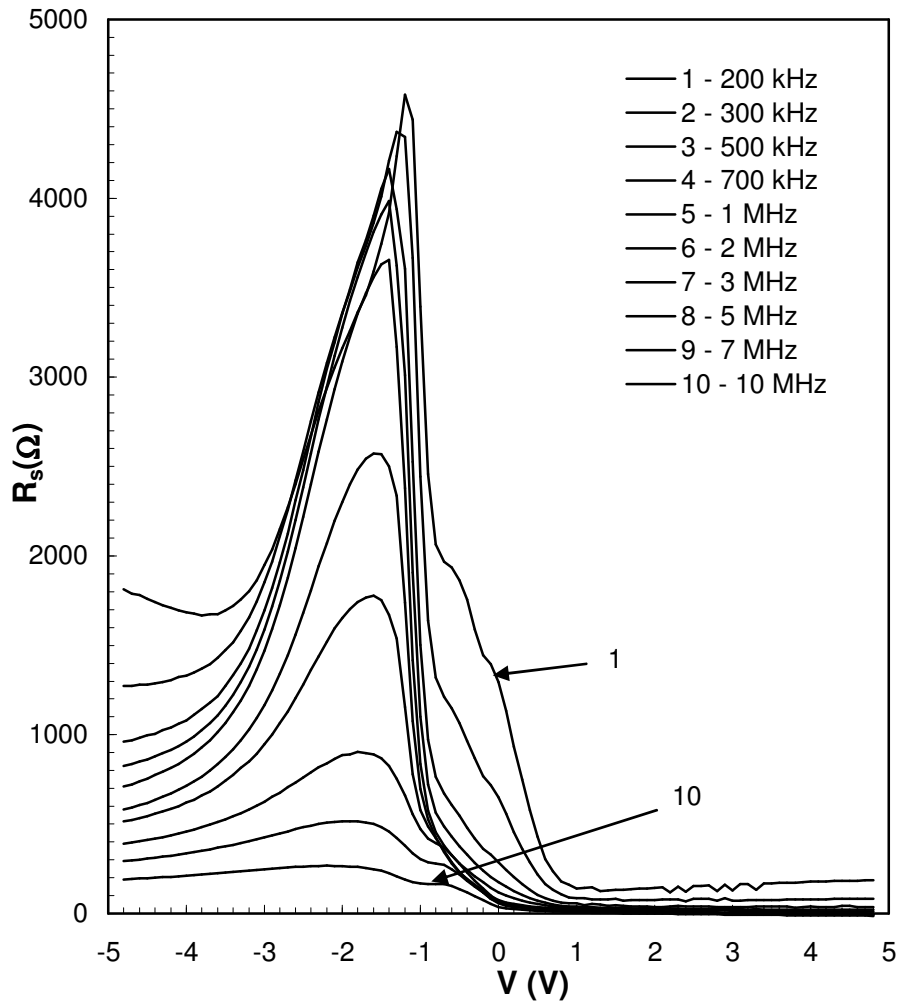


Şekil 4.1. Al/SiO₂/p-Si(MIS) yapının farklı frekanslardaki C-V karakteristikleri



Şekil 4.2. Al/SiO₂/p-Si(MIS) yapının farklı frekanslardaki G/ω -V karakteristikleri

Eş 4.2'den yararlanılarak MIS yapının voltaja bağlı seri direnç profili farklı frekanslar için elde edilerek şekil 4.1 ve şekil 4.2'de verildi. Bu deneysel sonuçlar, seri direncin C-V ve G/ω -V karakteristikleri üzerinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, seri direnç frekansa bağlı olarak aşağı yukarı -1,5 V civarında bir pik vermekte ve yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 5$ MHz) ise bu pik kaybolmaktadır. Şekil 4.3'den, açıkça görülmektedir ki; seri direnç, hem frekansa hem de voltaja kuvvetlice bağlıdır ve bölgeden bölgeye değişmektedir. Bu davranışlar, yük tuzaklarının Si yasaklı band aralığındaki metal/yarıiletken arayüzeyinde yerleşmiş tuzaklardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.3. Al/SiO₂/p-Si(MIS) yapının oda sıcaklığında farklı frekanslar için elde edilen seri direnç-voltaj (R_s -V) eğrileri

yarıiletken (Si) üzerine büyütülen yalıtkan tabaka (SiO₂) kalınlığı, Eş 4.4'ten yararlanarak ve $\epsilon_{\text{SiO}_2}=3,8\epsilon_0$ ve $A=7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ değerleri alınarak, 32 Å olarak hesaplandı. Si band aralığında Si/SiO₂ arasına yerleşmiş arayüzey durumları (N_{ss}), Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de farklı frekanslar için elde edilen C-V ve G_m/ω -V eğrilerinden faydalanılarak Hill-Coleman metodundan [54] farklı frekanslar için elde edilerek Çizelge 4.1'de verildi. Bu metoda göre, arayüzey durum yoğunluğu veren bağıntı;

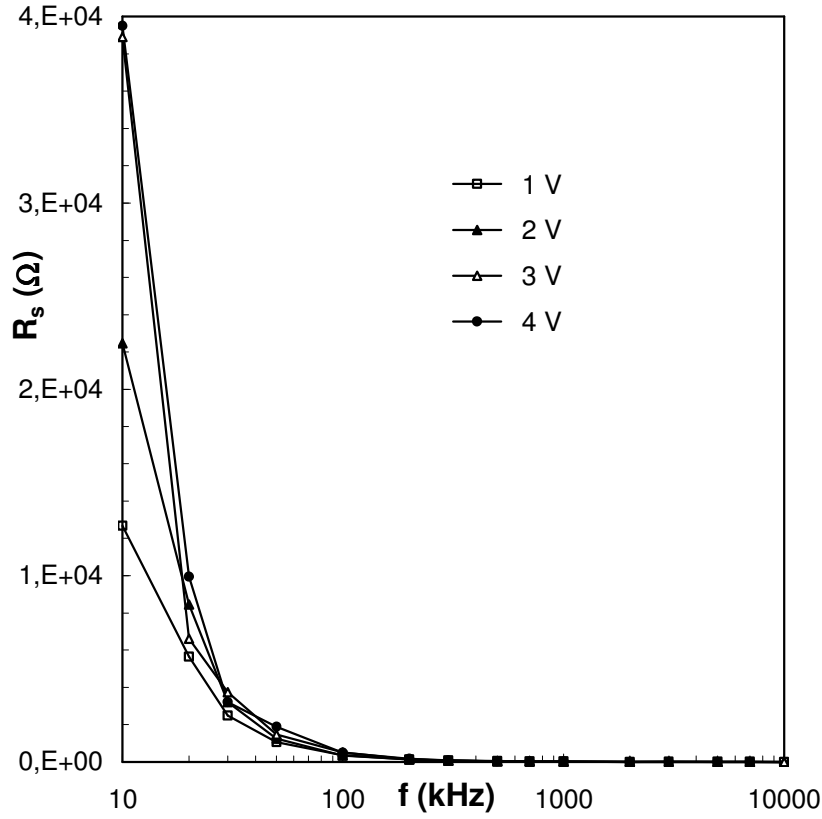
$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m / \omega)_{\max}}{((G_m / \omega)_{\max} C_{ox})^2 + (1 - C_m / C_{ox})^2} \quad (4.8)$$

eşitliği ile verilir [54]. Burada A, MIS yapının doğrultucu kontak alanı, ω açısıl frekans, $(G_m/\omega)_{\max}$ ise ölçülen kapasitansın pik değerine karşılık gelen iletkenlik ve C_{ox} ise yalıtkan tabakanın kapasitansıdır. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki farklı frekanslardaki C-V ve G/ω -V ölçümlerinden elde edilen temel bazı elektriksel parametreler ve İnce bir arayüzey tabakaya sahip MIS yapıları için çeşitli parametrelerin değerleri, oda sıcaklığındaki çeşitli frekanslarda karakteristiklerinden belirlenmektedir ve çizelge 4.1'de topluca verilmiştir.

Çizelge 4.1'de görülebileceği gibi, frekansın artırılmasıyla, kapasitansın (C_m) pik değeri ve buna karşılık gelen $(G_m/\omega)_{\max}$ değeri azalmaktadır. Bu deneysel sonuçlar, Chattopadhyay ve arkadaşları tarafından verilen teorik sonuçlar [47] ile iyi bir uyum içindedir. Sonuç olarak, yarıiletken ile dengede olan N_{ss} , ac sinyali düşük frekanslarda daha kolaylıkla takip edebilir ve ilave bir kapasitans üretebilir. Bu sebeple yüksek frekanslarda R_s etkisi azalır. Sonuç olarak, arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) MIS yapıların elektriksel karakteristiklerin önemli ölçüde etkilenmektedir. Düşük frekansların aksine yüksek frekans limitinde ($f \geq 1 \text{ MHz}$), N_{ss} , ac sinyali takip edemez. Bundan dolayı, arayüzey durumlarının kapasitansının toplam kapasitansa katkısını ihmal edilebilecek derecede küçük kalır [13,49,57]. Bu sebeple, yeterli derecede yüksek frekanslarda, R_s etkisi ihmal edilebilir ölçüde azalır.

Çizelge 4.1. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki farklı frekanslar için C-V ve G/ω-V karakteristiklerinden belirlenen bazı temel elektriksel parametre değerleri [90]

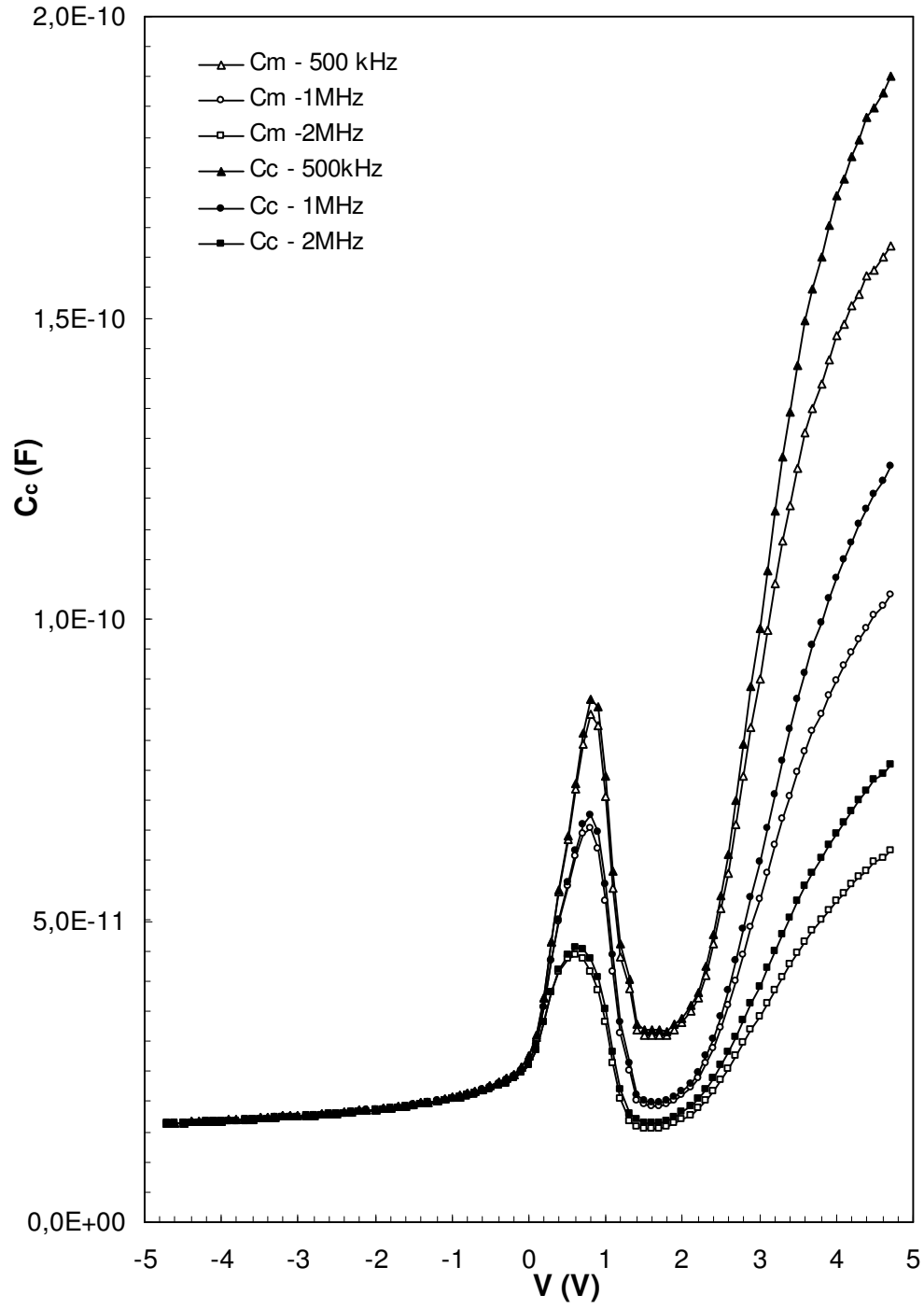
f (kHz)	V_m (V)	C_m (F)	(G_m/ω)_{max} (F)	N_{ss} (eV⁻¹cm⁻²)	R_s (Ω)
10	1,8	4,88x10 ⁻⁰⁹	1,6x10 ⁻⁰⁹	3,70x10 ¹²	1700
20	1,8	2,80x10 ⁻⁰⁹	1,11x10 ⁻⁰⁹	1,96x10 ¹²	986
30	1,9	1,86x10 ⁻⁰⁹	1,02x10 ⁻⁰⁹	1,68x10 ¹²	765
50	2,0	9,60x10 ⁻¹⁰	7,23x10 ⁻¹⁰	1,16x10 ¹²	674
100	2,0	3,23x10 ⁻¹⁰	4,00x10 ⁻¹⁰	6,36x10 ¹¹	599
200	0,9	1,12x10 ⁻¹⁰	4,53x10 ⁻¹¹	7,21x10 ¹⁰	2430
300	0,8	9,57x10 ⁻¹¹	2,52x10 ⁻¹¹	4,01x10 ¹⁰	2440
500	0,8	8,43x10 ⁻¹¹	1,79x10 ⁻¹¹	2,85x10 ¹⁰	1820
700	0,8	7,56x10 ⁻¹¹	1,48x10 ⁻¹¹	2,36x10 ¹⁰	1470
1000	0,8	6,53x10 ⁻¹¹	1,26x10 ⁻¹¹	2,01x10 ¹⁰	1200
2000	0,6	4,43x10 ⁻¹¹	7,07x10 ⁻¹²	1,13x10 ¹⁰	899
3000	0,5	3,35x10 ⁻¹¹	5,03x10 ⁻¹²	8,01x10 ⁰⁹	790
5000	0,2	2,41x10 ⁻¹¹	2,61x10 ⁻¹²	4,16x10 ⁰⁹	613
7000	0,0	2,09x10 ⁻¹¹	1,08x10 ⁻¹²	1,72x10 ⁰⁹	254
10000	-0,3	1,89x10 ⁻¹¹	4,61 x10 ⁻¹³	7,34x10 ⁰⁸	146



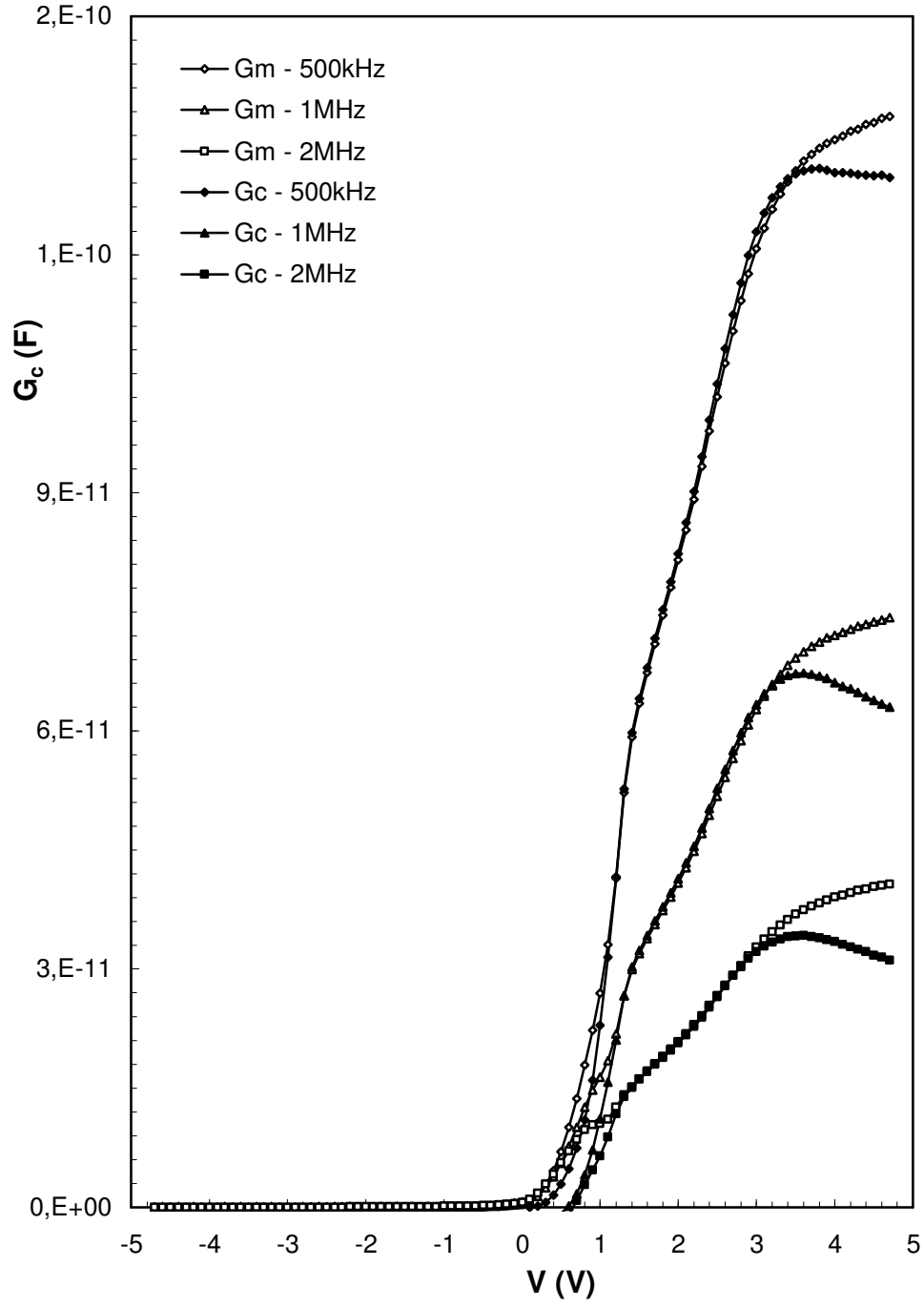
Şekil 4.4. Oda sıcaklığında, Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının farklı doğru beslem voltaj değerleri için seri direnç-frekans (R_s -V) eğrileri

Ayrıca farklı doğru beslem değerleri için frekansa bağlı elde edilen R_s değerleri Şekil 4.4'te gösterildi. Şekil 4.4'te açıkça görülmektedir ki; seri direnç yüksek frekanslarda ($f \geq 100$ kHz) voltajdan bağımsızdır. Yani, yeterince yüksek frekanslarda N_{ss} 'nin ac sinyali takip edemeyeceğini ve sonuç olarak MIS kapasitansına katkıda bulunamayacağını söyleyebiliriz.

Gerçek MIS kapasitans ve iletkenlik veya düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G/ω)'i elde etmek için, üç farklı yüksek frekansta, doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C_c -V ve hem de (G/ω) eğrileri Eş 4.5 ve Eş 4.6 kullanılarak Seri direnç için düzeltildi ve sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verildi. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitansın değerleri C-V Şekil 4.5'te görüldüğü gibi özellikle doğru beslem altında artan voltajla artarken, düzeltilmiş iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrileri (Şekil 4.6) ise azalmakta ve bir pik vermektedir.



Şekil 4.5. Oda sıcaklığında, Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının üç farklı yüksek frekans için ölçülen ve düzeltilmiş C_c -V eğrileri



Şekil 4.6. Oda sıcaklığında, Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının üç farklı yüksek frekans için ölçülen ve düzeltilmiş G_c/ω -V eğrileri

4.1.2. Dielektrik özellikleri

Hazırlanan metal-yalıtkan-yarıiletken [Al/SiO₂/p-Si] yapılarda metal ile yarıiletken arasına büyütülen yalıtkan tabakaların (SiO₂) dielektrik sabiti ϵ' , dielektrik kayıp ϵ'' , kayıp açısı $\tan\delta$ ve ac elektriksel iletkenliği σ_{ac} , oda sıcaklığında frekansa bağlı incelendi. C-V ve G/ ω -V, -5V'dan +5V'ta kadar 10 kHz-10 MHz aralığında gerçekleştirildi. Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), sırasıyla ölçülen kapasitans C_m ve iletkenlik G_m verilerinden yalıtkan tabaka kalınlığı, diyet alanı ve havanın dielektrik katsayısı ϵ_0 kullanılarak hesaplandı. Farklı voltajlarda frekansa bağlı elde edilen ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'ın değerleri sırasıyla Şekil 4.7.(a),(b) ve Şekil 4.8'de verildi. Deneysel sonuçlar, ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$ ve σ_{ac} 'nın frekans ve uygulanan voltaj oldukça kuvvetli bir bağımlılık gösterdiğini göstermektedir. Yığılım bölgesinde, yüksek frekanslardaki MIS yapısının kapasitansı temel olarak, yalıtkan tabakanın kalınlığı ve yapısal özellikleri tarafından kontrol edilmektedir [39]. Bu sebeple, kuvvetli yığılım bölgesinde farklı frekans altında dielektrik sabiti (ϵ')'in gerçel kısmını hesaplamak aşağıdaki denklemden mümkündür.

$$\epsilon' = \frac{C_{ox}}{C_o} \quad (4.9)$$

Burada $C_o = \epsilon_0(A/d_{ox})$; A MIS yapının doğrultucu kontak alanı, d_{ox} yalıtkan arayüzey tabaka kalınlığı ve ϵ_0 serbest uzayın (boşluğun) dielektrik geçirgenlik sabitidir ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm). kuvvetli yığılım bölgesinde, MIS yapısının maksimum kapasitansı oksit kapasitansa ($C_m = C_{ox}$) karşılık gelmektedir. Dielektrik kayıp ϵ'' 'in sanal kısmı aşağıdaki eşitlikten belirlenir.

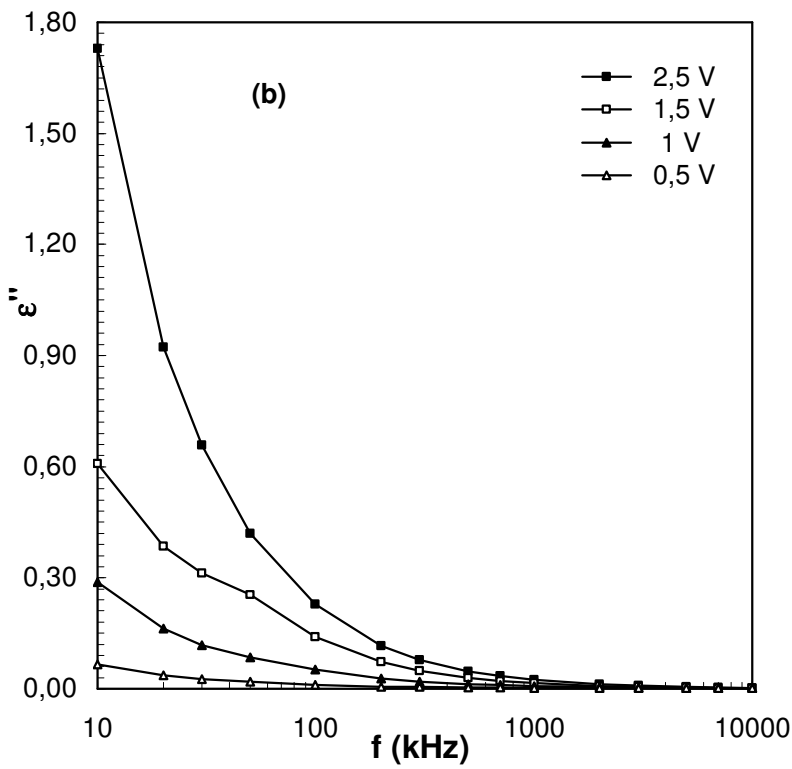
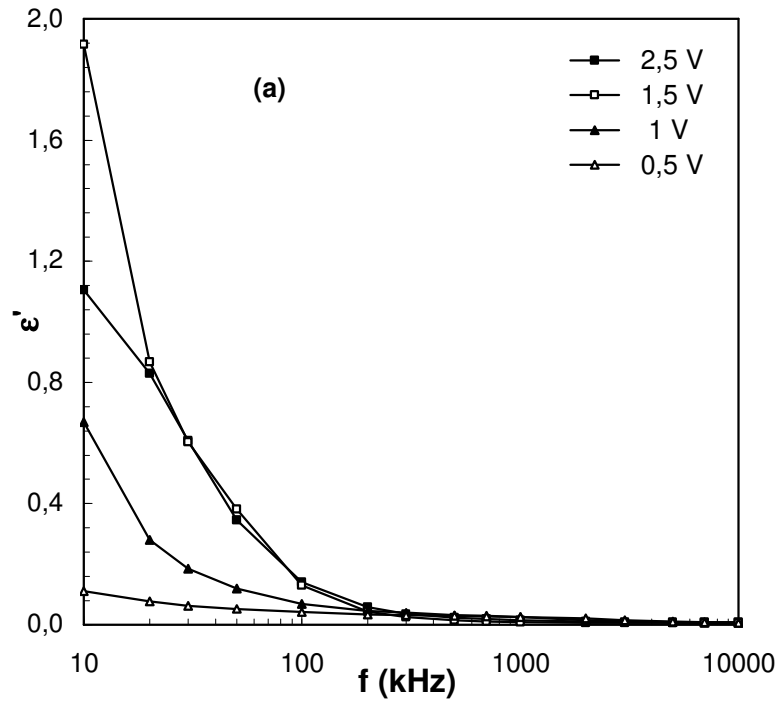
$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_o \omega} = \frac{d_{ox}}{A \epsilon_0} \frac{G_m}{\omega} \quad (4.10)$$

Burada G_m MIS yapının iletkenliği, ω ise açısal frekanstır. Kayıp açısı $\tan\delta$ aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır. Yani $\tan\delta$ değeri, ϵ'' değerinin ϵ' değerine oranıdır.

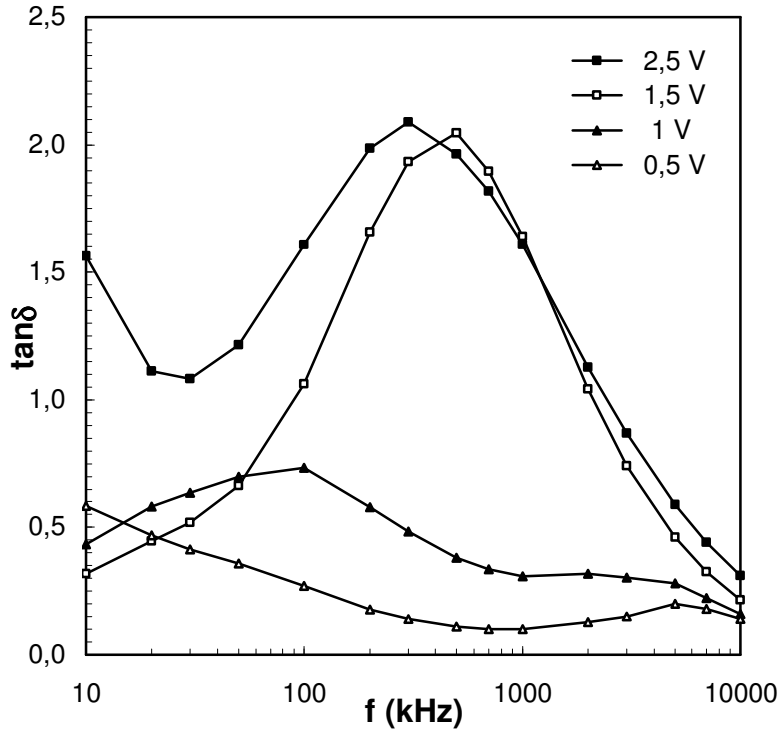
$$\tan\delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (4.11)$$

deneysel sonuçlar göstermektedir ki, hem ölçülen C ve G değerleri artan frekansla azalmakta (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) ve dolayısıyla dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') değerleri de artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru bu değerlerde meydana gelen artışlar, düşük frekansta etkili olabilecek arayüzeyssel kutuplaştırma mekanizmasının mevcudiyetine atfedilebilir [59].

Hesaplanan ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin frekansa bağlı değişimi, dört farklı gerilim değeri için sırasıyla Şekil 4.7(a), (b) ve Şekil 4.8'de oda sıcaklığındaki verilmiştir. Şekil 4.7(a), (b) ve Şekil 4.8'de açıkça görülmektedir ki; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') yüksek frekanslarda ($f \geq 200$ kHz) voltajdan bağımsızdırlar. Sonuç olarak şunu diyebiliriz ki; yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumları N_{ss} ac sinyali izleyemez ve herhangi bir arayüzeyssel kutuplaştırma mekanizmasının olmaması nedeniyle de; C, ϵ' ve ϵ'' ye ilave bir katkıda olamaz. Genel olarak, MIS ve MOS yapılarının düşük frekanstaki yalıtkan davranışına dört olası mekanizma katkıda bulunabilir. Bunlar; elektrotların arayüzeyi, dc iletkenlik, dipol yönelimi ve yük taşıyıcılarıdır [61].



Şekil 4.7. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki; a) dielektrik sabiti (ϵ')
b) dielektrik kayıp (ϵ'')'nın frekans bağlı eğrileri

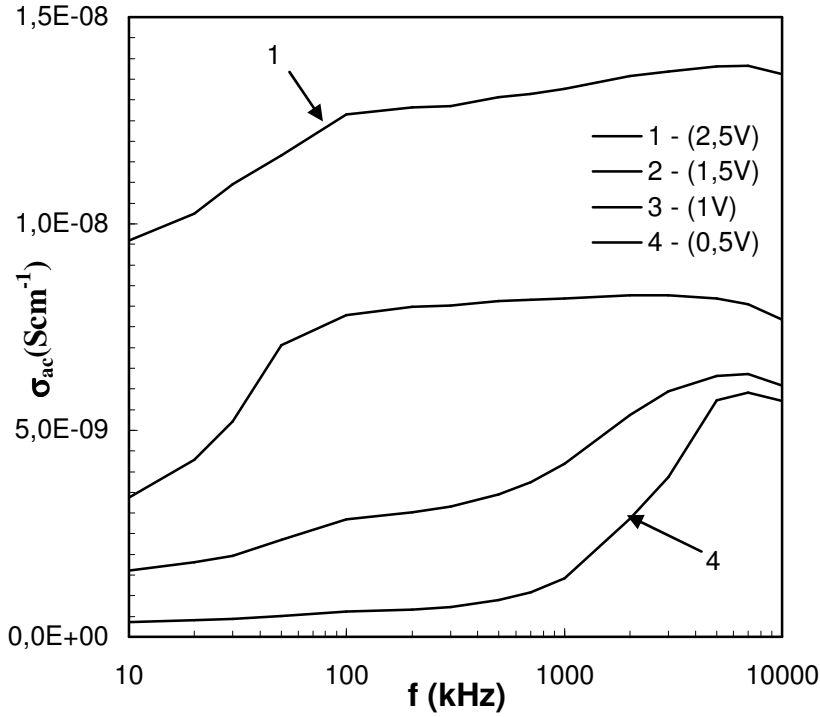


Şekil 4.8. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki kayıp açısı (tanδ)'nin frekans bağlı eğrileri

Bu çalışmada, ac elektriksel iletkenlik değerleri de frekansa bağlı olarak oda sıcaklığındaki dört gerilim değeri için, aşağıdaki denklem kullanılarak, ölçülen iletkenlik G_m değerlerinden hesaplandı;

$$\sigma_{ac} = \frac{G_m d_{ox}}{A} \quad (4.12)$$

Hesaplanan ac elektriksel iletkenlik değerleri Şekil 4.9'da verilmiştir. A.c. iletkenliğin artan frekans ile genellikle arttığı bilinmektedir. Bu a.c. iletkenlik yalnızca sıfır frekansta sonsuz ve yüksek frekanslarda önemli ölçüde dielektrik kayba katkıda bulunur [60]. Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, kayıp açısı (tanδ), artan frekans ile artmakta ve daha sonra artan frekans ile azalarak bir pik vermektedir. Ancak bu pik düşük doğru beslemde kaybolmaktadır. Bu pik davranışı, bu frekans ve uygulanan voltaj aralığı için $\epsilon'=\epsilon''$ olmasından kaynaklanmaktadır.

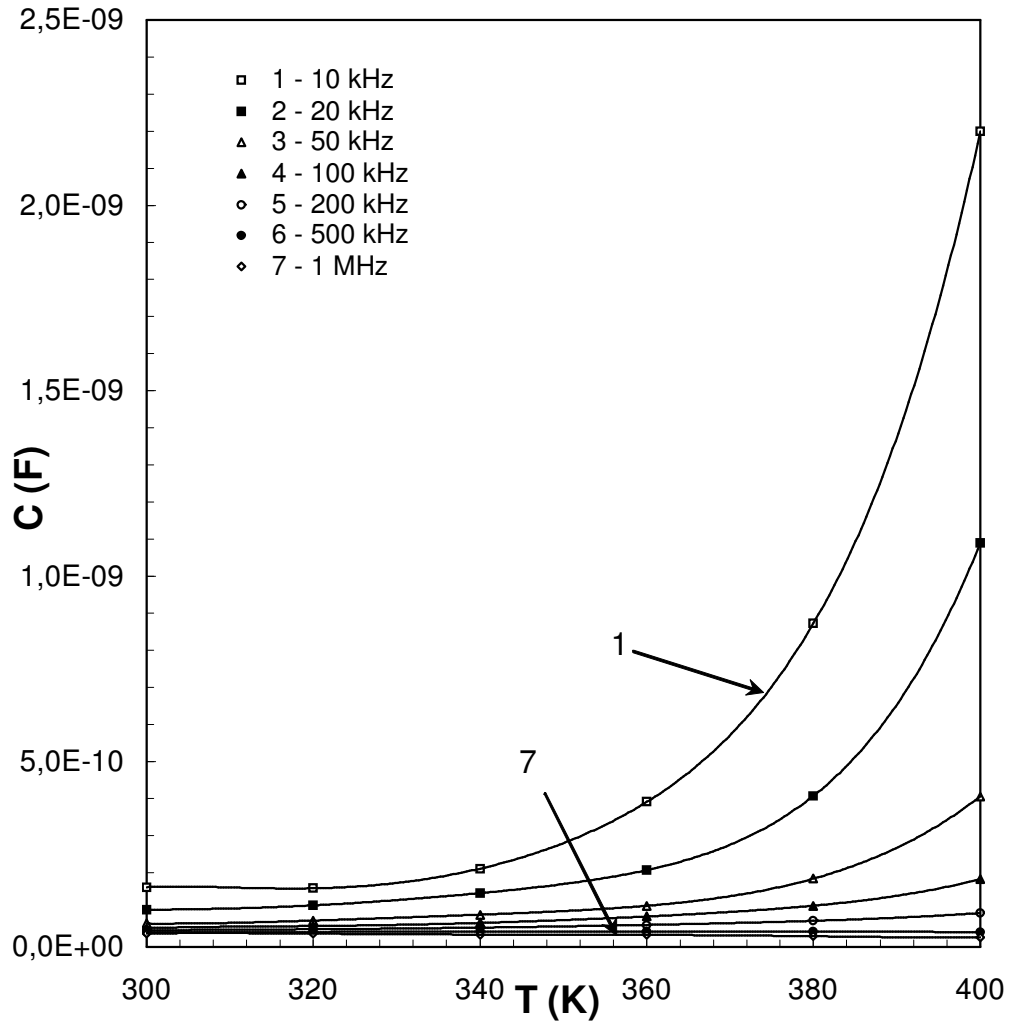


Şekil 4.9. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki dc elektriksel iletkenliğin frekans bağlı eğrisi.

4.2.Farklı Sıcaklıklarda Frekansa Bağlı C-V ve G/ω-V Ölçümleri

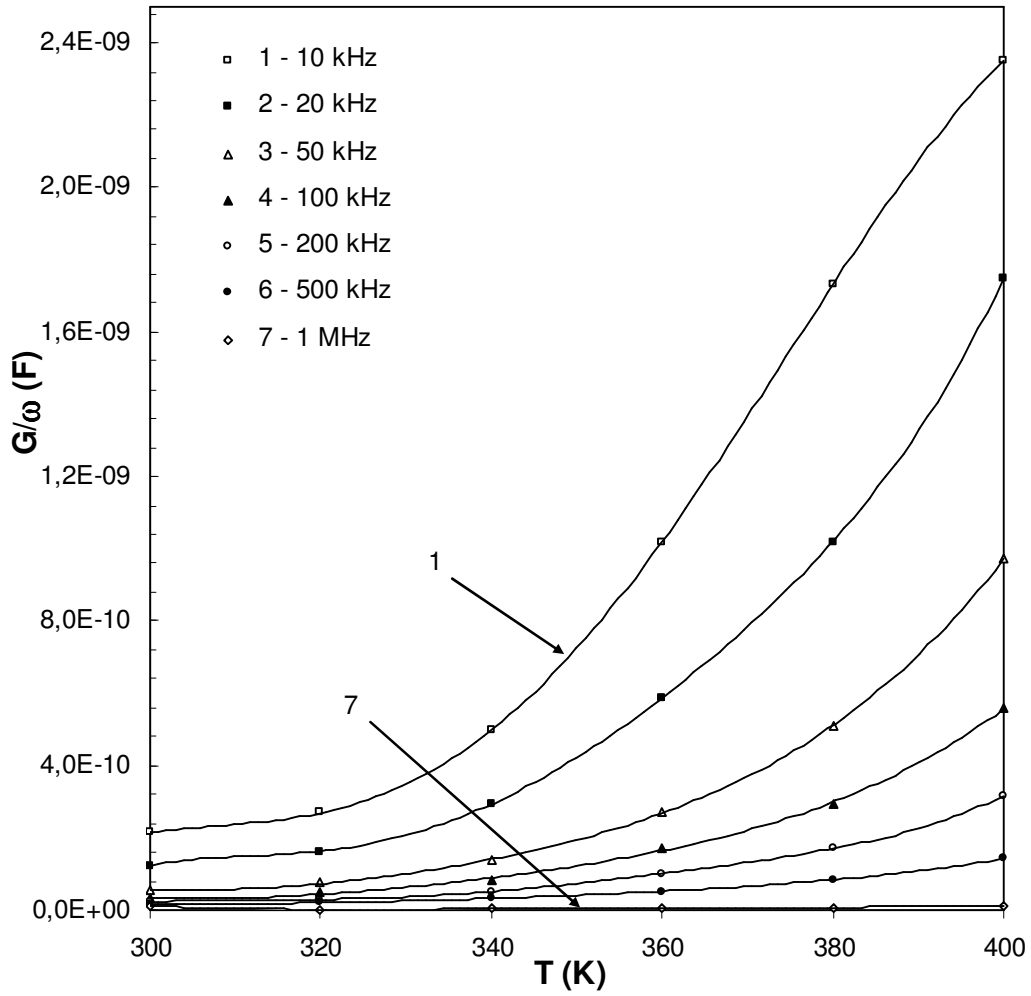
4.2.1. Kapasitans ve iletkenlik ölçümleri

İletkenlik metodu [14,13], metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısına dışarıdan küçük bir ac sinyal uygulandığında, yarıiletkenin arayüzey ve taşıyıcı bandındaki çoğunluk taşıyıcılarının değişiminden dolayı iletkenlik kayıpları olur. MIS yapısına tükenim bölgesinde olduğu zaman, uygulanan ac sinyalin sebep olduğu Fermi Seviyesi salınımının ortalama pozisyonu dc besleme ayarlandı. MIS yapısının oda sıcaklığının üstünde farklı frekanslarda kapasitans ve iletkenlik değişimi Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verildi.



Şekil 4.10. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapının için farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı olarak kapasitans (C) değişimi

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'den görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik yüksek sıcaklıklarda ve düşük frekanslarda frekansa karşı oldukça duyarlıdır. Tüm sıcaklıklar için artan frekans ile kapasitans ve iletkenlik değerleri azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru kapasitans ve iletkenlikte artma, düşük frekanslarda etkili olan ve arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanabilir [66]. Buna ilave olarak, kapasitans ve iletkenliğe meydana gelen katkı, uzay yükü değerlerinin artmasından kaynaklanır.



Şekil 4.11. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda G/ω değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Frekanstaki azalmayla kapasitans artar ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde homojen olmayan tabakanın kapasitans ile frekans dağılımının neden olduğu yalıtkan kapasitansı ile etkilenir. Bu frekansa bağımlılık arayüzey durumlarının düşük frekanslarda ac sinyali takip edebilmesinden dolayı hem C hem de G/ω değerlerinde ilave katkı meydana gelir. Ancak, yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumları ac sinyallerini takip edemez. Bu da arayüzey durumları kapasitansının, toplam kapasitansa katkısını dikkate alınamayacak kadar küçültür [67].

4.2.2. Dielektrik özellikleri ve ac elektriksel iletkenlik ölçümleri

Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülünün sıcaklık ve frekansa bağımlılığı MIS yapısı için, 10 kHz –1 MHz frekans ve 300-400 K sıcaklık aralığında incelendi.

Kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [68,69].

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4.13)$$

Burada ϵ' ve ϵ'' kompleks dielektrik geçirgenlik sabitinin gerçel ve sanal kısımları ve j -1'in değerine eşittir. Kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti formülü elektriksel ve dielektrik özellikleri tanımlamak için kullanılmaktadır. ϵ^* dielektrik geçirgenlik sabiti formülü admittans ölçümlerinden, aşağıdaki formüllerden hesaplanabilir:

$$\epsilon^* = \frac{Y^*}{j\omega C_o} = \frac{C}{C_o} - j \frac{G}{\omega C_o} \quad (4.14)$$

Burada Y^* , C ve G sırasıyla yalıtkanın ölçülen admittans, kapasitans ve iletkenliği; ω ise uygulanan elektrik alanının açısal frekansıdır ($\omega=2\pi f$) [70].

Kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti gerçel kısmı, yani dielektrik sabiti (ϵ'), farklı frekanslarda aşağıdaki denklem yolu ile, ölçülen kapasitans yığılma bölgesindeki değerlerinden Eş 4.15'ten hesaplanır [2, 28].

$$\epsilon' = \frac{C}{C_o} \quad (4.15)$$

Burada C_o metal ile yarıiletken arasında yalıtkan tabakanın olmadığı boş durum için kapasitörün kapasitansı, A (cm^2), MIS yapının doğrultucu kontak alanı, d ($\text{\AA}$)

yalıtkan arayüzey tabaka kalınlığı ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir. ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm). Kuvvetli yığılım bölgesinde, MIS Schottky diyotunun maksimum kapasitansı yalıtkan kapasitansına (C_{ox}) karşılık gelir ($C=C_{ox}$). Kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti sanal kısmı, yani dielektrik kayıp (ϵ''), çeşitli frekanslarda aşağıdaki denklem yardımı ile, ölçülen iletkenlik değerlerinin kullanılmasıyla hesaplanabilir;

$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_o} \quad (4.16)$$

Kayıp açısı ($\tan \delta$), ϵ' ve ϵ'' değerlerinin oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [2,28,68,69,71]

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.17)$$

Dielektrik malzemenin ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) aşağıdaki denklem ile verilebilir [66,68,72],

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta (d / A) = \epsilon'' \omega \epsilon_o \quad (4.18)$$

Kompleks empedans (Z^*) ve kompleks elektrik modülü, dielektrik malzemelerin analizine göre bazı yazarlarca tartışıldı [66,70]. Z^* formülü içindeki kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti (ϵ^*) verinin analizi ($Z^*=1/Y^*=1/i\omega C_o\epsilon$), yaygın olarak hacim ve yüzey olayları birbirinden ayırmak ve malzemenin dc iletkenliği belirlemek için kullanılır [70,72]. Kompleks empedans veya kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti ($\epsilon^*=1/M^*$) verisi aşağıdaki bağıntı kullanılarak M^* formülüne dönüştürülmüştür [66,70,73].

$$M^* = j\omega C_o Z^* \quad (4.19)$$

veya;

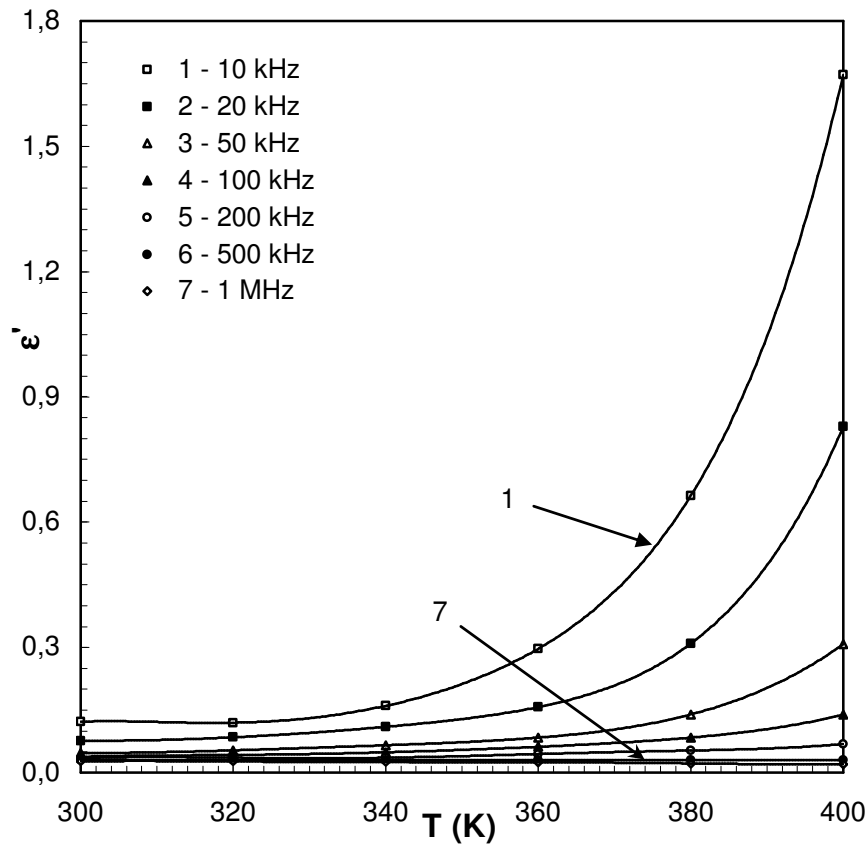
$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (4.20)$$

Gerçel bileşen M' ve sanal bileşen M'' , ϵ' ve ϵ'' den hesaplandı. MIS Schottky diyotu için farklı frekanslarda, dielektrik sabiti (ϵ') dielektrik kayıp (ϵ'') ve kayıp açının ($\tan\delta$) sıcaklık bağımlılığı sırasıyla Şekil 4.12 ve Şekil 4.13(a), (b)'de verildi. Frekans ile ϵ' ve ϵ'' nin değişimi düşük sıcaklıklarda ve yüksek frekanslarda küçüktür. Eğer bir elektrik alan yoksa, farklı lokalize ve durumlarda sınırlandırılan taşıyıcı yükler farklı dipol yönelimleri gösterebilir. Bir elektron ac alanın etkisi altında iki merkez arasında atlama yapabilir ve bu durum elektrik dipolunun yeniden yönelimine yol açar. Bu işlem dielektrik sabitinin değişmesine sebep olur. Bu sebeple azalan frekans ile dielektrik sabitinin artması dipolların etkisine atfedilebilir.

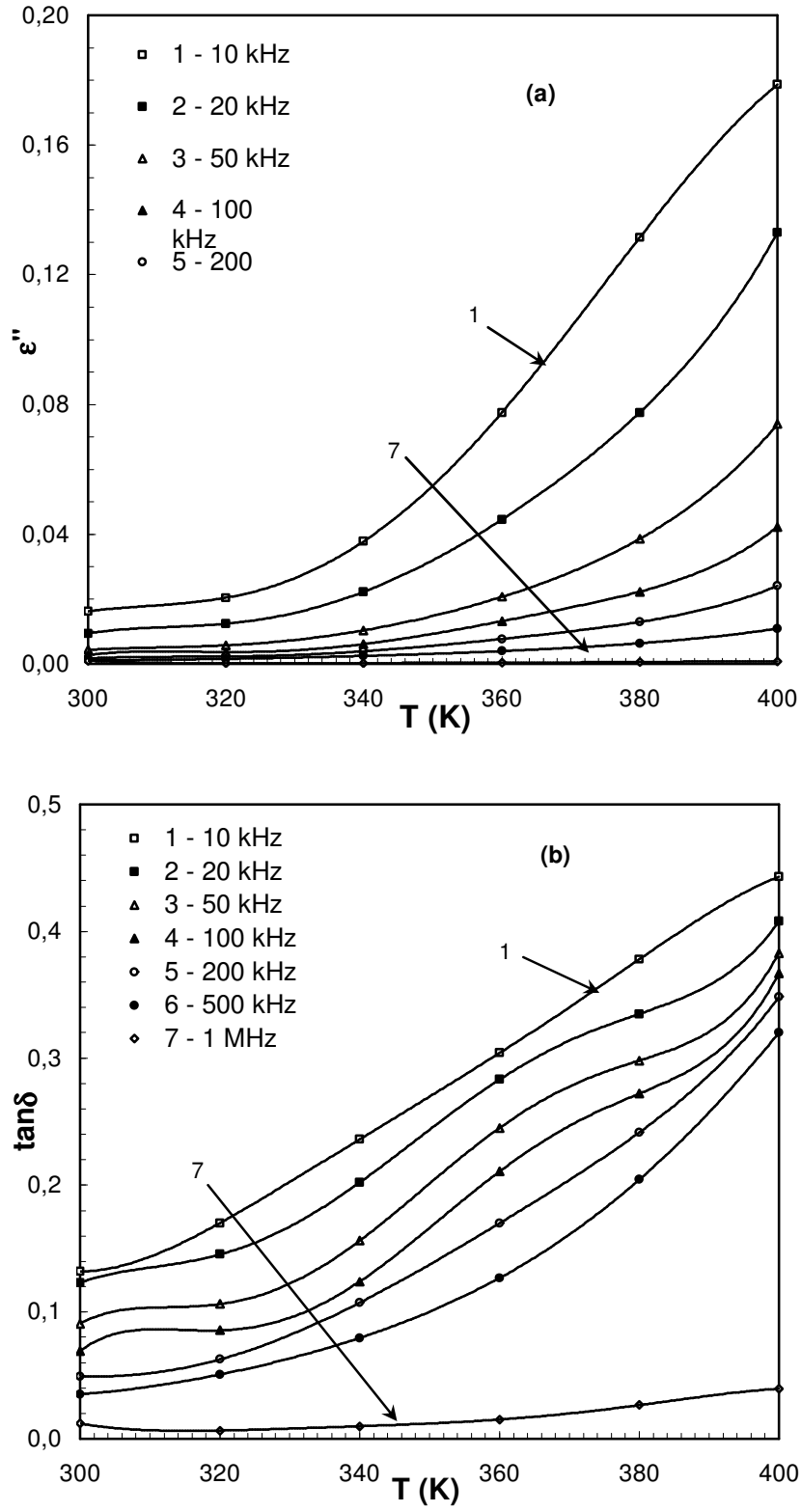
Şekillerden görüldüğü gibi, ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ artan sıcaklık ile artmaktadır. Sıcaklık arttıkça, örgüde kusurlar/düzensizlikler oluşur ve çoğunluk yük taşıyıcılarının (iyonlar ve elektronlar) hareketliliği (mobilitesi) artar [61,71,74-77]. Bileşik etki, sıcaklıkta bir artış ile ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinde bir artış vermektir. Bu belki hem iyon sıçraması, hem yönelim ve yük taşıyıcılarının konstrasyonlarının artmasından meydana gelen uzay yük etkisi nedeniyle olabilir. Ayrıca, sıcaklıktaki artma, elektronik polarizasyonda biraz artışa ve bu sayede de dielektrik malzemenin ϵ' ve ϵ'' değerlerinde bir artışa sebep olur. Yani dielektrik malzemenin ϵ' ve ϵ'' değerleri de bir artma moleküllerin sıcaklıkla genişlemesinden kaynaklanır [30-33].

Katı yapıda bir çözülmeye neden olan sıcaklıktaki artış oranı, dipol yöneliminde bir artış ve dolayısıyla da ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'da bir artış ile sonuçlanır. Bu sonuçlar, MIS Schottky diyotun, oda sıcaklığından daha düşük olan sıcaklıklarda en iyi dielektrik özelliklere sahip olduğunu gösterir.

Sıcaklık ile beraber ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'nin değişimi iyonik katılarda genel bir eğilimdir. Bu ise materyallerde safsızlık yada çatlaklar sebep olan uzay yükü polarizasyonu nedeniyle olabilir. Buna ilaveten, yasak enerji aralığı dar olan yarıiletkenlerde, yük taşıyıcıları hareketsiz ancak polarizasyon nedeniyle tuzaklanabilir. Sıcaklık artarsa, yük taşıyıcılarının sayısı üstel olarak artar ve bunun sonucunda daha fazla uzay yükü polarizasyonu meydana gelir ve bu da dielektrik sabiti ϵ' 'inde hızlı bir artışa sebep olur. Şüphesiz, hem n hem de p tipi yük taşıyıcıları sayısındaki artışa ϵ' ve ϵ'' değerlerine katkıda bulunur. Bununla birlikte, p-tipinde daha önceden gösterildiği gibi, baskın taşıyıcı yüklerin elektronlar olduğu yerde p-tipi katkı göz ardı edilebilir [61,66,74].



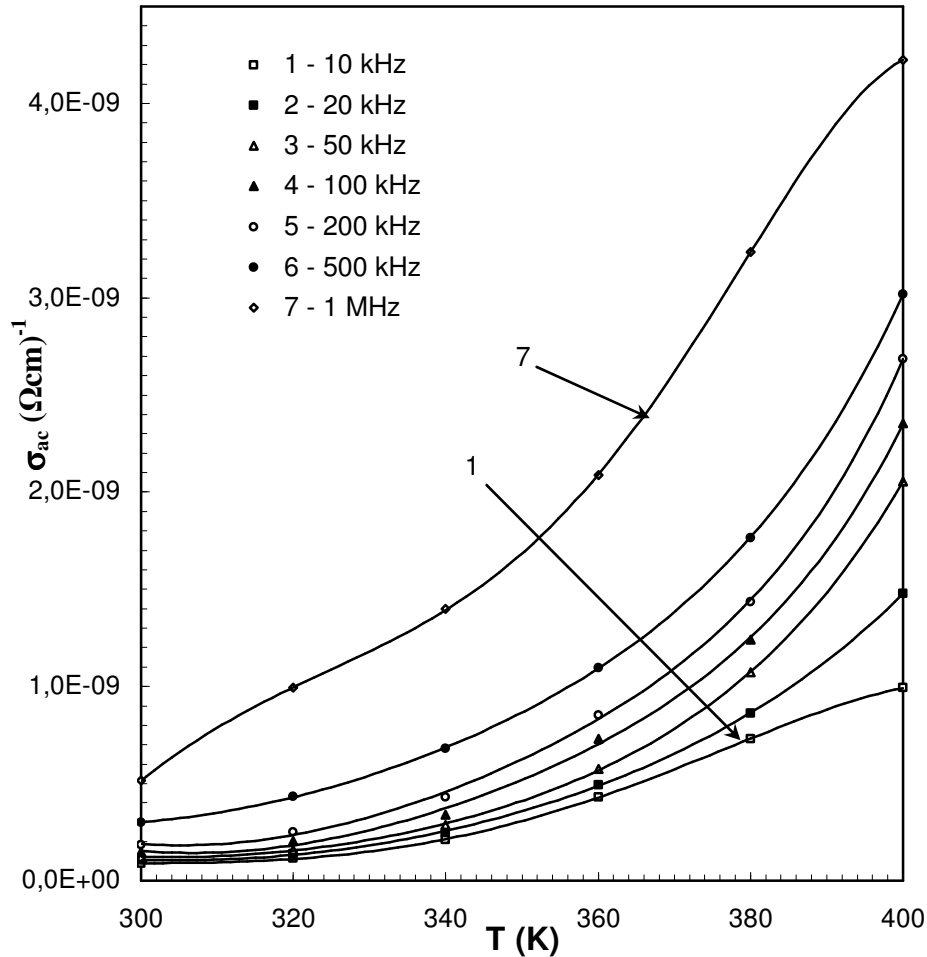
Şekil 4.12. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda ϵ' 'nin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.13. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda a) ϵ'' ve b) $\tan\delta$ 'nın sıcaklığa bağlı değişimi

Şekil 4.14'te, MIS yapı için farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac})'nin sıcaklığa bağlı bağımlılığını gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi elektriksel iletkenliğin sıcaklık ve frekansın artmasıyla neredeyse lineer olarak artmaktadır.

Benzer sonuçlar literatürde de verilmiştir [66,72,73,76,82-84]. MIS yapıdaki dielektrik polarizasyon yöntemi iletim yönetimine benzer bir mekanizmanın içinden yer aldığı literatürde önerilmiştir. Bu çalışmalarda [72,73,81,82], yüksek sıcaklıklarda elektriksel iletkenliğin artması sınırdaki yerleşmiş safsızlıklara atfedilmiştir.

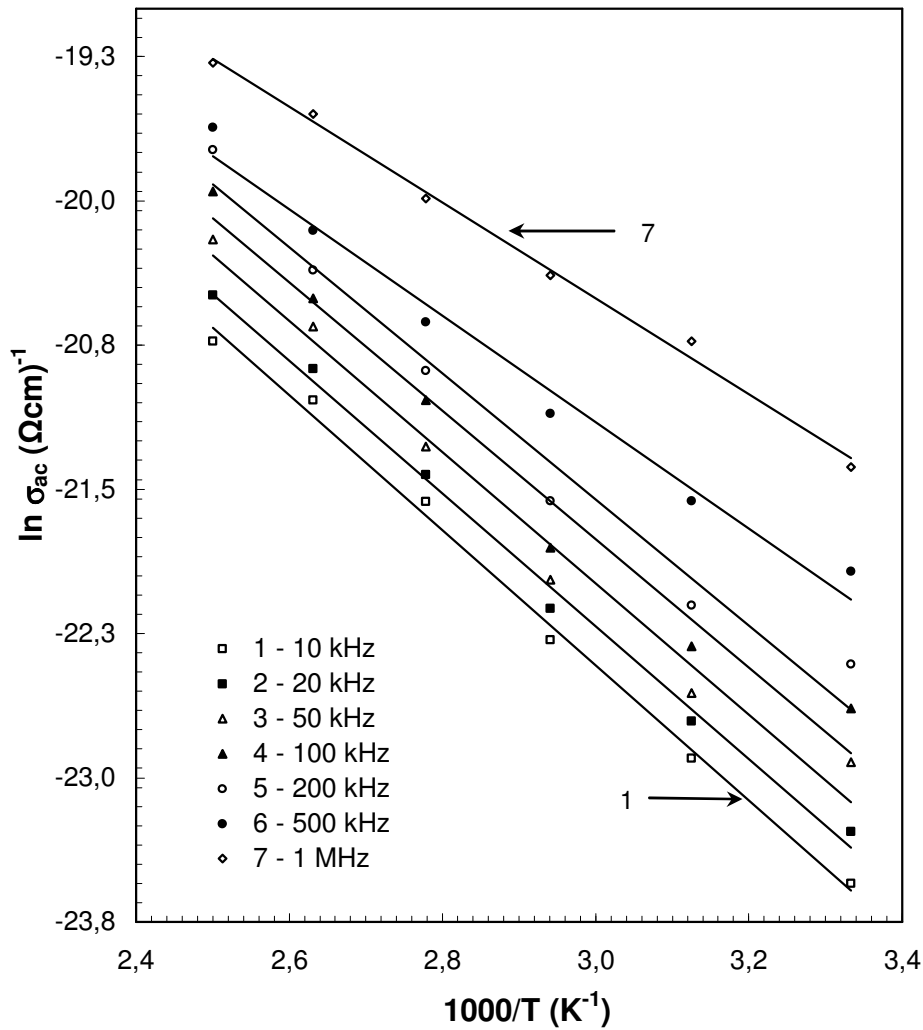


Şekil 4.14. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) sıcaklığa bağlı değişimi

Toplam iletkenlik ve mutlak sıcaklığın tersi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir [66,75,76,81,86]:

$$\sigma = \sigma_o \exp(-E_a / kT) \quad (4.21)$$

Burada σ_o bileşik sabiti, k Boltzmann sabitini ve E_a aktivasyon enerjisini gösterir. 300–400 K aralığında elde edilen ac iletkenlik verilerin sıcaklıkla değişim grafiğinden yararlanılarak ve Eş. 4.21 kullanılarak eğrileri farklı frekanslar için elde edilerek Şekil 4.15’de verildi.

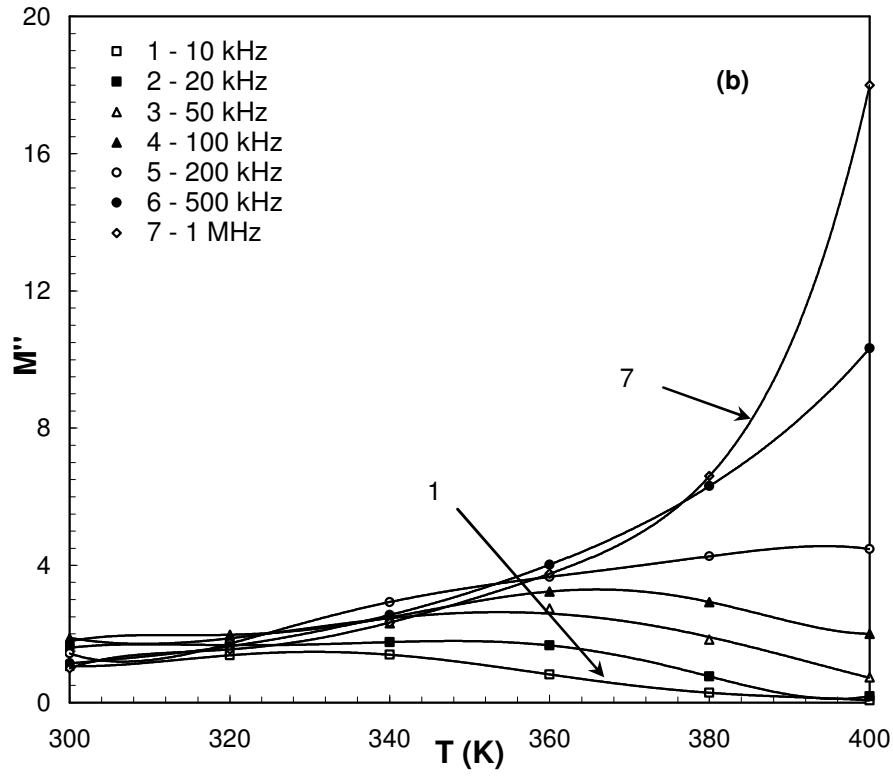
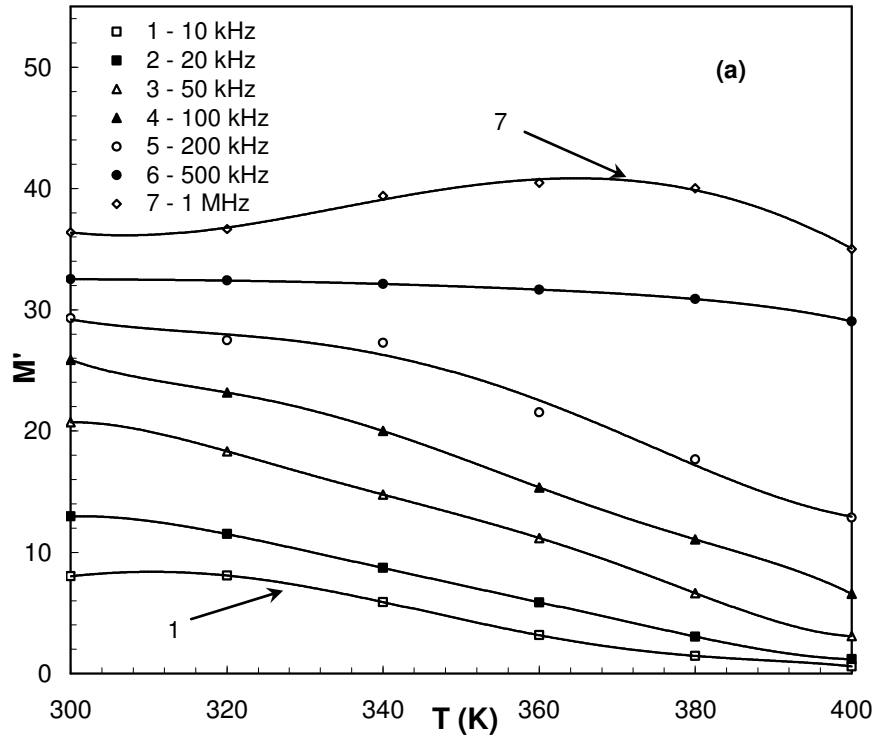


Şekil 4.15. MIS Schottky diyotu için ac elektriksel iletkenliğin Arrhenius çizimi

Şekil 4.15’da gösterildiği gibi $1000/T$ ’ye karşı $\ln\sigma$ ’nın bir çizimi lineer bir doğrudur. Farklı frekans aralıkları için eğimden elde edilen aktivasyon enerjisi (E_a) değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir [66,75,76,81,86]. Çizelge 4.2’den de görülebileceği gibi, artan frekans ile birlikte aktivasyon enerjisi azalmaktadır. Yüksek sıcaklık bölgesinde gözlemlenen daha yüksek aktivasyon enerjisi, yük taşıyıcılarının üretimi ve onların boşluklara doğru olan hareketleri için gerekli olan enerjilerin toplamı sebebiyle olabilir [87].

Çizelge 4.2. Farklı frekans aralıkları için aktivasyon enerjisi (E_a) ve bileşik sabiti (σ_0) [90]

f (kHz)	E_a (eV)	σ_0 (Ωcm)⁻¹
10	0.303	6.930×10^{-6}
20	0.298	7.164×10^{-6}
50	0.294	7.836×10^{-6}
100	0.288	7.918×10^{-6}
200	0.282	8.049×10^{-6}
500	0.238	2.592×10^{-6}
1000	0.215	2.194×10^{-6}



Şekil 4.16. Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapı için 10 kHz-1 MHz frekans aralığında sıcaklığa bağlı M^* elektrik modülünün a) gerçekte kısmı M' ve b) sanal kısmı M''

Şekil 4.16 (a) ve (b), MIS Schottky diyotu için farklı frekanslarda, sıcaklığa bağlı M^* elektrik modülünün gerçel kısmı M' ve sanal kısmı M'' 'yi göstermektedir. Şekil 4.16 a)'da görülebileceği üzere, M' artan sıcaklık ile azalır, artan frekans ile artmaktadır. Ancak M' değeri 200 kHz'den büyük değerler için hemen hemen değişmeyip sabit kalmaktadır. Öte yandan, Şekil 4.16 b) M'' 'nin artan frekans ile arttığını gösterir. Benzer çalışmalar literatürde rapor edilmiştir [66,70,73,88].

5. SONUÇ

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya daha kalın yalıtkan tabakaya sahip olan metal-okсит-yarıiletken (MOS) yapıların, sadece oda sıcaklığı ve tek frekansta veya dar bir sıcaklık ve frekans aralığında elektriksel ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi bize bu yapıların iletim mekanizmaları ve fiziksel davranışları hakkında detaylı bir bilgi vermektedir. Oysa bu yapıların elektrik ve dielektrik özelliklerinin geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında incelenmesi önemli bilgiler içermektedir. Bu yüzden bu çalışmada hazırlanan Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların dielektrik özellikleri ve ac elektriksel iletkenliği 10 kHz-1 MHz frekans ve 300-400 K sıcaklık aralığında C-V ve G/ω-V ölçümleri kullanılarak incelendi. Tüm ölçümler geniş bir voltaj aralığında (-5V ile +5V arasında) hem oda sıcaklığı, hem de farklı sıcaklıklarda farklı frekanslar için elde edildi. Bu geniş voltaj aralığındaki ölçümler, bize elektrik ve dielektrik özelliklerin voltaja bağlı dağılım profillerini elde etme imkanı sağladı. Dış etkenleri azaltmak için tüm ölçümler vpf-475 kırıyostat içinde ve 5x10⁻⁴ Torr'da gerçekleştirildi.

Ölçülen kapasitans (C) değeri tüm frekanslar için tersinim bölgesinde (-5V ile -1V arasında) hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Ancak hem tükenim bölgesinde hem de yığılım bölgesinde C değerleri büyük ölçüde frekansa bağlılık göstermektedir. Yani bu bölgede her frekanstaki C değerleri azalan frekansla artmakta ve 0V ile 1V arasında bir pik vermektedir. Ayrıca G/ω değerleri de, C değerleri gibi artan voltajla artmakta, ancak artan frekanslarla azalmaktadır. Bu davranışlar veya diğer bir deyişle düşük frekanslarda ölçülen yüksek C ve G/ω değerlerinin, R_s ve N_{ss} değerlerine kuvvetli şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Yani düşük açısal frekanslarda elde edilen C-V veya G/ω-V ölçümleri için periyot (T) değeri, arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden (τ) büyük olacaktır. Bu nedenle çok küçük frekanslarda (f≤50 Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyali takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda (f≥1 MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyali takip edememektedir.

Literatürde MIS ve MOS yapıların seri direnci farklı yöntemlerle hesaplanmış ancak geniş bir voltaj aralığında dağılım profili çıkarılmamıştır. Bu çalışmada R_s değerleri hem frekansa bağlı olarak hem de ters ve doğru beslem için hesaplandı. Yapının seri direnç dağılım profilli değerleri, hemen hemen tüm frekanslar için yaklaşık -1,5 V civarında bir pik vermektedir. Seri direnç, hem frekansa hem de voltaja kuvvetlice bağlıdır ve bölgeden bölgeye değişmektedir. Bu davranışlar, yük tuzaklarının Si yasak enerji band aralığındaki metal/yarıiletken arayüzeyinde yerleşmiş arayüzey tuzaklarından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, yarıiletken ile dengede olan N_{ss} , ac sinyali düşük frekanslarda daha kolaylıkla takip edebilir ve mevcut kapasitans değerine ilave bir katkı getirebilir. Bu sebeple yüksek frekanslarda R_s etkisi azalır. Sonuç olarak, arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) MIS yapıların elektriksel karakteristiklerin önemli ölçüde etkilenmektedir. Düşük frekansların aksine yüksek frekans limitinde ($f \geq 1$ MHz), N_{ss} , ac sinyali takip edemez. Bundan dolayı, arayüzey durumlarının kapasitansının toplam kapasitansa katkısını ihmal edilebilecek derecede küçük kalır. Ayrıca farklı doğru beslem değerleri için frekansa bağlı elde edilen R_s değerleri açıkça görülmektedir ki; seri direnç yüksek frekanslarda ($f \geq 100$ kHz) voltajdan bağımsızdır. Yani, yeterince yüksek frekanslarda N_{ss} 'nin ac sinyali takip edemeyeceği ve sonuç olarak MIS kapasitansına katkıda bulunamayacağı söylenebilir.

Gerçek MIS kapasitans ve iletkenlik veya düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/ω)'i elde etmek için, doğru ve ters beslem altında ölçülen hem C-V ve hem de (G/ω) eğrileri seri direnç için düzeltildi. Seri direncin etkisi için düzeltilmiş kapasitansın değerleri özellikle doğru beslem altında artan voltajla artarken, düzeltilmiş iletkenlik-voltaj (G/ω -V) eğrileri ise azalmakta ve bir pik vermektedir. Oysa mevcut literatürün çoğunda bu R_s etkisi pek dikkate alınmamakta ve dolayısıyla ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği azalmaktadır.

Farklı voltajlarda frekansa bağlı ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'ın değerleri açıkça görülmektedir ki; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') yüksek frekanslarda ($f \geq 200$ kHz) voltajdan bağımsızdırlar. Ayrıca, kayıp açısı ($\tan\delta$), artan frekans ile artmakta ve daha sonra

artan frekans ile azalarak bir pik vermektedir. Ancak bu pik düşük doğru beslemde kaybolmaktadır. Bu pik davranışı, bu frekans ve uygulanan voltaj aralığı için $\epsilon'=\epsilon''$ olmasından kaynaklanmaktadır. Yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumları N_{ss} ac sinyali izleyemez ve herhangi bir arayüzeyssel kutuplaştırma mekanizmasının olmaması nedeniyle de; C , ϵ' ve ϵ'' ye ilave bir katkıda bulunmaz. Genel olarak, MIS ve MOS yapılarının düşük frekanstaki yalıtkan davranışına dört olası mekanizma katkıda bulunabilir; elektrotların arayüzeyi, dc iletkenlik, dipol yönelimi ve yük taşıyıcılarıdır.

Farklı sıcaklık ve frekanslar için ölçülen kapasitans ve iletkenlik yüksek sıcaklıklarda ve düşük frekanslarda frekansa karşı oldukça duyarlıdır. Tüm sıcaklıklar için artan frekans ile kapasitans ve iletkenlik değerleri azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru kapasitans ve iletkenlikte artma, düşük frekanslarda etkili olan ve arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanmaktadır.

MIS yapı için farklı frekanslarda, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$) ve ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) artan sıcaklık ile artmaktadır. Sıcaklık arttıkça, örgüde kusurlar/düzensizlikler oluşur ve çoğunluk yük taşıyıcılarının (iyonlar ve elektronlar) hareketliliği (mobilitesi) artar. Bileşik etki, sıcaklıkta bir artış ile ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinde bir artış vermektir. Bu belki hem iyon sıçraması, hem yönelim ve yük taşıyıcılarının konstrasyonlarının artmasından meydana gelen uzay yük etkisi nedeniyle olabilir. Ayrıca, sıcaklıktaki artma, elektronik polarizasyonda biraz artışa ve bu sayede de dielektrik malzemenin ϵ' ve ϵ'' değerlerinde bir artışa sebep olur. Yani dielektrik malzemenin ϵ' ve ϵ'' değerleri de bir artma moleküllerin sıcaklıkla genişlemesinden kaynaklanır. Dielektriklerin davranış özellikleri sıcaklık, frekans, yalıtkan arayüzey tabakasının ve uzay yükü durumlarının sıklığına bağlıdır. Yalıtkan arayüzey tabaka durumları, arayüzey durumları, sabit yüzey yükleri ve seri direnç elektriksel ve dielektrik karakteristiklerinde sapmalara neden olmaktadır.

Ayrıca, artan frekans ile birlikte aktivasyon enerjisi azalmaktadır. Yüksek sıcaklık bölgesinde gözlemlenen daha yüksek aktivasyon enerjisi, yük taşıyıcılarının üretimi ve onların boşluklara doğru olan hareketleri için gerekli olan enerjilerin toplamı sebebiyle olmaktadır.

Sonuç olarak, seri direnç ve arayüzey durumlarının hem elektriksel hem de dielektrik özellikler üzerine etkisinin oldukça fazla olduğu gözlemlendi. Bu nedenle temel yapı parametrelerinin hesabında R_s ve N_{ss} değerlerinin etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu yapılmadığı takdirde, ölçülen ve bu ölçülerden hesaplanan hemen hemen tüm fiziksel parametrelerinin doğruluğu ve güvenilirliği azalır. Ayrıca R_s değerinin özellikle yüksek frekanslardaki yığılma bölgesinde ve N_{ss} değerleri ise düşük frekanslarda özellikle tükenim bölgesinde ve bazen de tersinim bölgesinde etkindir. Düşük sıcaklık ve frekans ölçümlerinde C-V ve G/ω -V 'deki dalgalanma oldukça fazladır.

Hazırlanan Al/SiO₂/p-Si yapısı için yapılan tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip aygıtlar için arayüzey durumlarının etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Hiçbir zaman %100 saflıkta bir malzeme ve arayüzey durumsuz kontak oluşturulamayacağından bu tür aygıtlar seçilirken kullanım alanına göre özellikleri belirlenerek, arayüzey durumlarının burada incelenen voltaj, frekans ve sıcaklığa bağlılığı göz önünde bulundurulmalıdır. Aksi takdirde elde edilen sonuçların doğruluğundan ve güvenilirliğinden emin olunamaz. Ayrıca, bir MIS yapının elektriksel özelliklerini oldukça etkileyen diğer iki parametre olan yalıtkan oksit tabakası ve seri direncin birkaç farklı yöntemle doğru olarak belirlenmesinde büyük yarar vardır. Çünkü, örnek numuneler hazırlanırken pratikte hiçbir zaman seri direnci sıfır yapmak mümkün değildir. Ayrıca, gerek doğal olarak gerekse yapay olarak oluşturulan yalıtkan tabaka her zaman homojen yapılamayabilir ve dolayısıyla yalıtkan tabaka kalınlığı bölgeden bölgeye farklılık gösterebilir. Bu homojensizlikleri kaldırmak, arayüzey durum yoğunluklarını ve seri direnci azaltmak için yarıiletken kristallerin son derece temiz bir ortamda hazırlanması, kontakların yüksek vakum ortamında (10^{-7} - 10^{-10}

Torr) oluşturulması ve numunenin alanının küçük tutulmasının önemi oldukça fazladır.

KAYNAKLAR

1. Northrop, D. C. and Rhoderick, E. H., "The Physics of Shottky barriers, in Impedance Devices", *Solid State Electron.* 4: 37-73 (1978).
1. Chelkowski, A., "Dielectric Physics", *Elsevier*, Amsterdam, 97-105 (1980).
2. Berger, L. I., "Semiconductor Materials", *CRC Press*, New York, 145-152 (1997).
3. Hahn B.R., Yoon D.Y., "Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide-Silicon Structure", *Journal Of Applied Physics*, 65(7): 2766-2771 (1989).
4. Terman, L. M., "An investigation of surface states at a silicon-silicon dioxide interface employing metal-oxide-silicon diodes", *Solid-State Electronics*, 5(5): 259-285 (1962).
5. Grove, A. S., Deal, B. E., Snow, E. H., Sah, C. T., "Investigation of thermally oxidized silicon surfaces metal-oxide-semiconductor structures", *Solid-State Electronics*, 8(2): 145-163 (1965).
6. Jarzebski, Z. M., "Physical properties of SnO₂ materials: 1. Preparation and defect structure", *J. Electrochem. Soc.*, 123(7): 199-205 (1976).
7. Maudes, J. S. and Rodriguez, T., "Sprayed SnO₂ films: Growth mechanism and film structure characterization", *Thin Solid Films*, 69(2): 183-189 (1980).
9. Oral, M., "Elektrostatik", *Ege Ün. Matbaası*, İzmir, 221-252 (1983).
10. Tataroğlu, B., "MIS Yapıların Frekans ve Radyasyona Bağlı Temel Elektriksel Parametreler", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-5 (2006).
11. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", *Mc Graw-Hill*, New York, 420-450, 517-523 (1997).
12. Gökçen, M., "MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-3, 13-14 (2005).
13. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., "MOS Physics and Technology", *John Wiley & Sons*, New York, 40-175, 222-226, 423-439 (1982).

14. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", *John Wiley & Sons*, New York, 362-390 (1981).
15. Grove, A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons*, New York, 91-106, 334-357 (1967).
16. Cooke, M. J., "Semiconductor Devices", *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
17. Ghandhi, S. K., "VLSI Fabrication Principles", *John Wiley & Sons*, New York, 401-405 (1983).
18. 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).
19. Schroder, D. K., "Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.", *John Wiley & Sons*, New York, 337-379 (1998).
20. Hofstein, S. R. and Warfield, G., "Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer", *Solid-State Electronics*, 8(3): 321-341 (1965).
21. Altındal, Ş., "Al - SiO_x - pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri.", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 52-74 (1993).
22. 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).
23. 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 Electronics*, 31(8): 1289-1298 (1988).
24. Moll, J. L., "Variable capacitance with large capacitance", *Ire Wescon (Western Convention and Show) Record*, 3: 32-36 (1959).
25. Tareev, B., "Physics of Dielectric Materials", *Mir Publishers*, Moscow, 67-95, 140-156 (1979).
26. Fröhlich, H., "Theory of Dielectrics", *Clarendon Press*, Oxford, 1-21, 70-78 (1958).
27. Von Hippel, A. R., "Dielectrics and Waves", *John Wiley & Sons*, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234 (1959).

28. Popescu , M., Bunget, I., “Physics of Solid Dielectrics”, *Elsevier*, Amsterdam, 206-245, 282-291 (1984).
29. Sah, C. H., “Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Ns-23(6): 1563-1568 (1976).
30. Sharma, B.L., “Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications”, *Plenum Press*, New York, 113-118 (1984).
31. Kar, S. and Dahlke, W. E., “Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si”, *Solid-State Electronics*, 15: 221-237 (1972).
32. Kar S., and Narasimhan R. L., “Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70-230 Å) oxide structures”, *J. Appl. Phys.*, 61(12): 5353-5359 (1987).
33. Schulz M., Klausmann E., Transient capacitance measurements of interface states on the intentionally contaminated Si-SiO₂ interface *Applied Pyssics A:Materials Science & Processing*, 18(2): 169-175,(1979).
34. 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 Electronics*, 37(3): 433-441 (1994).
35. Konofaos, N., McClean, I. P., Thomas,C. B., “Characterisation of the interface states between amorphous diamond-like carbon films and (100) silicon”, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 161: 111-123 (1997).
36. Bülbül M.M., Zeyrek S., Altındal Ş. and Yüzer H., “On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diyotes” *Microelectronic Engineering*, 83(3): 577-581 (2006).
37. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., “Au/SnO₂/n-Si (MOS) structures response to radiation and frequency”, *Microelectronic Journal*, 34(11): 1043-1049 (2003).
38. H. Kanbur, Ş. Altındal, A. Tataroğlu, “The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diyodes” *Applied Surface Science* 252(5): 1732-1738 (2005).
39. A. Tataroğlu, Ş. Altındal, M.M. Bülbül, “Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure”, *Microelectronic Engineering*, 81: 140-149 (2005).

40. 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).
41. Castagne, R. and Vapaille, A., "Description of the SiO₂-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements", *Surface Science*, 28(1): 157-193 (1971).
42. Kelberlau, U. and Kassing, R., "Theory of nonequilibrium properties of MIS capacitors including charge exchange of interface states with both bands" *Solid-State Electronics*, 22(1): 37-45 (1979).
43. Kuhn M., "A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements" *Solid State Electronics*, 13(6): 873-885 (1970).
44. Deuling, H., Klausmann, E., Goetzberger, A., "Interface states in Si-SiO₂ interfaces", *Solid-State Electronics*, 15(5): 559-571 (1972).
45. Varma S., Rao K.V., Kar S., "Electrical characteristics of silicon-tin oxide heterojunctions prepared by chemical vapor deposition" *Journal of Applied Physics*, 56(10): 2812-2822 (1984).
46. Kwa K.S.K, Chattopadhyay S., Jankovic N.D., Olsen S.H., Driscoll L.S., O'Neill A.G., "Thermal oxidation of strained Si/SiGe: impact of surface morphology and effect on MOS devices" *Materials Science and Engineering*, 109(1-3): 78-84 (2004).
47. Chattopadhyay P., Raychaudhuri B., "New technique for the determination of series resistance of Schottky barrier diodes" *Solid-State Electronics*, 35(7): 1023-1024 (1992).
48. Singh, A., "Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation" , *Solid-State Electronics*, 28(3): 223-232 (1985).
49. Ouennoughi Z., "On the Minimum in the Forward Capacitance in MIS Tunnel Diodes", *physica status solidi (a)*, 160(1): 127-132 (1997).
50. Konofaos N., Evangelau E.K., "Electrical characterization of the SiON/Si interface for applications on optical and MOS devices" *Semicon. Sci. Technol.* 18: 56-59, (2003).
51. Szatkowski, J. and Sieranski, K., "Simple Interface-Layer Model for the nonideal characteristics of the schottky-barrier diode", *Solid-State Electronics*, 35(7): 1013-1015 (1992).

52. Şahin B., Çetin H., Ayyıldız E., “The effect of series resistance on capacitance–voltage characteristics of Schottky barrier diodes”, *Solid-State Communications*, 135(8): 490-495 (2005).
53. Altındal Ş., Dökme İ., Bülbül M.M., Yalçın N. and Serin T., “The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range” *Microelektron Engineering*, 83(3): 499-505 (2006).
54. Hill W. A., Coleman C.C., “A single-frequency approximation for interface-state density determination” *Solid-State Electronics*, 23(9): 987-993(1980)
55. Norde H., A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance”, *Journal of Applied Physics*, 50(7): 5052-5053 (1979).
56. Cheung S.K., Cheung N.W., “Comparison of Parameter Extraction Techniques for SiC Schottky Diodes”, *Apply. Phys. Lett.* 49: 85-87 (1986).
57. Chattopadhyay P., Raychaudhuri B., “Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes” *Solid-State Electronics*, 36(4): 605-610 (1993).
58. Tataroğlu B., Altındal Ş., Tataroğlu A., “The $C-V-f$ and $G/\omega-V-f$ characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures”, *Microelectronic Engineering*, 83(10): 2021-2026 (2006).
59. Rajasekar K., Subbarayan A., Sathyamoorthy R., “AC and dielectric properties of thermally evaporated p-type (Sb₂Te₃)₇₀ (Bi₂Te₃)₃₀ thin films” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(15): 2515-2522 (2006)
60. M. Cutroni, A. Mandanici, A. Piccolo, C. Fanggao, G. A. Saunders and P. Mustarelli, “Frequency and temperature dependence of a.c. conductivity of vitreous silver phosphate electrolytes” *Solid State Electronics*, 90(1–4): 167-172 (1996).
61. Fanggao, C., Saunders, G. A. et al., “Temperature and frequency dependencies of the complex dielectric constant of poly under hydrostatic pressure”, *J. Polymer Sc. Part B: Polymer Phys.*, 34: 425-433 (1996).
62. Crowell C. R, Sze S. M., Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems”, *Journal of Applied Physics*, 36(10): 3212-3220 (1965).

63. Cova P., Singh A., Masut R.A., “A self-consistent technique for the analysis of the temperature dependence of current–voltage and capacitance–voltage characteristics of a tunnel metal-insulator-semiconductor structure” *Journal of Applied Physics*, 15(82): 5217–5226 (1997).
64. Kar, S. and Varma, S., “Determination of silicon-silicon dioxide interface state properties from admittance measurements under illumination”, *J. Appl. Phys.*, 58(11): 4256-4266 (1985).
65. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., “MOS conductance technique for measuring surface states parameters”, *Appl. Phys. Lett.*, 7: 216-219 (1965).
66. Prabakar K, Narayandass S K and Mangalaraj D “Dielectric properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te thin films” *physica status solidi (a)*, 199(3): 507-514 (2003).
67. Akkal B, Benamara Z, Gruzza B, Bideux L., “Characterization of interface states at Au/InSb/InP(100) Schottky barrier diodes as a function of frequency”, *Vacuum*, 57(2): 219-228 (2000).
68. Symth, C. P., “Dielectric Behaviour and Structure”, *McGraw-Hill*, New York, 52-61, 202-215 (1955).
69. Daniel, Vera V., “Dielectric Relaxation”, *Academic Press*, London, 1-19, 79-87 (1967).
70. Pissis P, Kyritsis A “Electrical conductivity studies in hydrogels”, *Solid State electronics*, 97(1–4): 105–113 (1997).
71. Tataroğlu A, Altındal Ş, Bülbül M. M. “Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure”, *Microelectronic Engineering*, 81: 140-149 (2005).
72. Mattsson, M. S., Niklasson, G. A., Forsgren, K. and Harsta, A., “A frequency response and transient current study of β -Ta₂O₅: Methods of estimating the dielectric constant, direct current conductivity, and ion mobility”, *J. Appl. Phys.*, 51: 3417-3421 (1980).
73. Migahed M.D, Ishra M, Fahmy T, “A Barakat Electric modulus and AC conductivity studies in conducting PPy composite films at low temperature”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(6): 1121-1125 (2004).
74. Nouh S.A, Gaafar S.A, Eissa H.M., “The Effect of alpha-Particle Dose on the Dielectric Properties of Solid State Nuclear Track Detectors”, *Physica Status Solidi (A)*, 175(2): 699-704 (1999).

75. Osman M A, Hefni M A, Mahfouz R M, Ahmad M M., “ γ -Irradiation effect on the electrical properties of LiKSO₄”, *Physica B*, 301(3–4): 318–325 (2001).
76. Rahman, A.S.Md S., Islam, M.H. and Hogarth, C.A., “AC electrical properties of vacuum-evaporated SiO/SnO₂ films”, *Int. J. Electronics*, 62(2): 167-179 (1987).
77. Kannan C V, Ganesamoorthy S, Subramanian C and Ramasamy P., “Dielectric properties of self-flux-grown RbTiOPO₄ single crystals”, *Physica Status Solidi A*, 196(2): 465-470 (2003).
78. Ranga Raju M R, Choudhary R N P and Ram S., “Dielectric and electrical properties of Sr[5]EuCr[3]Nb[7]O[30] nanoceramics prepared using a novel chemical route”, *Physica Status Solidi (B)*, 239(2): 480-489 (2003).
79. Singh V, Kulkarni A R, Rama Mohan T R., “Dielectric properties of aluminum-epoxy composites” *J. Appl. Polymer Science*, 90: 3602-3608 (2003).
80. Mazen S A and Zaki H M., “Effect of tetra ionic substitution on the dielectric properties of Cu-ferrite”, *Physica Status Solidi A*, 199(2): 305-320 (2003).
81. Maurya D, Kumar J, Shripal., “Dielectric-spectroscopic and a.c. conductivity studies on layered Na_{2- x} K _{x} Ti₃O₇ (X=0.2, 0.3, 0.4) ceramics”, *Journal of Physics and Chemistry Solids*, 66(10): 1614-1620 (2005).
82. Sattar A A, Rahman S A., “Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu-Zn Ferrites”, *Physica Status Solidi A*, 200(2): 415-422 (2003).
83. Riad A S, Korayem M T, Abdel-Malik T G., “AC conductivity and dielectric measurements of metal-free phthalocyanine thin films dispersed in polycarbonate”, *Physica B*, 270(1): 140-147 (1999).
84. Dixit M, Kumar A., “Effect of Photocrystallization on the Photoconductivity of a-Se₆₅Te₂₀Sb₁₅”, *Physica B*, 252(4): 286-294 (1998).
85. Suguna P, Mangalaraj D, Narayandass Sa K and Meena P., “Structure, Composition, Dielectric, and AC Conduction Studies on Tin Selenide Films”, *Physica Status Solidi (a)*, 155(2): 405-416 (1996).
86. Arora R, Kumar A., “Dielectric relaxation in glassy Se and Se_{100-x}Tex alloys”, *Physica Status Solidi A*, 115(1): 307-314 (1989).

87. Meena P., Balasubramanian C., Narayandass Sa.K. and Mangalaraj D., "Conduction Studies on Europium Oxide Thin Films", *Physica Status Solidi (a)*, 135(1): 207-214 (1993).
88. Szu S.P., Lin C.Y., "AC impedance studies of copper doped silica glass", *Materials chemistry and physics*, 82(2): 295-300 (2003).
89. Wert, C.A. and Thomson, R.M., "Physics of Solids 2nd ed.", *McGraw-Hill*, New York, 410-421, 388-403 (1970).
90. Yücedağ İ., Altındal Ş., Tataroğlu A., "On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure", *Microelectronic Engineering*, 84(1): 180-186 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YÜCEDAĞ, İbrahim
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 19.03.1973 - Mardin
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : yucedagi@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi - Elektrik Eğitimi	1998
Lisans	Gazi Üniversitesi - Elektrik Eğitimi	1995
Lise	Mardin Endüstri Meslek Lisesi	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1995-2006	Milli Eğitim Bakanlığı	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce, Arapça

Yayınlar

1. İ., Yücedağ, Ş. Altındal, A. Tataroğlu, "On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure", *Microelectronic Engineering*, 84(1): 180-186 (2007).
2. İ., Coşkun, İ., Yücedağ, "Plc ve plc ile rotoru sargılı asenkron motora yol verme", *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, SAÜ, 2: 121-128 (1998).

Hobiler

Tenis, Basketbol, Voleybol, Bilgisayar teknolojileri, İzcilik, Model Uçak Yapımı, Halk Oyunları, Kitap Okumak, Arama Kurtarma İzci Birliği Üyesi, İnsanlarla İletişim ve Grup Çalışmaları.

Teknik Beceri ve Yetenekler

İyi derecede bilgisayar (Office Programları, WEB Tasarımı (HTML-ASP)), Diğer Programlar (Basic, Direct Soft (KOYO plc), Mikro-Win (S7-200 SIEMENS plc), LOGO plc, OMRON plc), Mekanik ve Otomasyon Kumanda Sistemleri, Dijital Elektronik, Elektrik Makinaları, Devre Analizi, MOS-MIS-MS yapılar ve analizleri.