

**MIS YAPILARIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE
SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ**

Hilal ERBAŞ ARAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2010
ANKARA**

Hilal ERBAŞ ARAL tarafından hazırlanan MIS Yapıların Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi adlı bu tezin yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Adem TATAROĞLU
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

(Ünvanı, Adı ve Soyadı)**
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)
(Ünvanı, Adı ve Soyadı)***
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)
(Ünvanı, Adı ve Soyadı)
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)
(Ünvanı, Adı ve Soyadı)
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)
(Ünvanı, Adı ve Soyadı)
(Anabilim Dalı, Üniversite Adı)

Tarih****:/...../.....

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

Prof. Dr.Bilal Toklu
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Hilal ERBAŞ ARAL

MIS YAPILARIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hilal ERBAŞ ARAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2010

ÖZET

Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapıların; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektrik iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M' and M'') gibi dielektrik özelliklerinin frekans ve sıcaklık bağımlılığı, 100 Hz-1 MHz frekans ve 100-400 K sıcaklık aralığında deneysel kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri kullanılarak araştırıldı. Deneysel sonuçlar hem elektrik hem de dielektrik parametrelerin güçlü bir şekilde frekans ve sıcaklığa bağımlı olduğunu göstermektedir. ϵ' ve ϵ'' artan frekansla azalırken, artan sıcaklıkla artmaktadır. Aynı zamanda, ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) hem artan frekans hem de artan sıcaklık ile artmaktadır. Arayüzey kutuplanması düşük frekanslarda daha kolay gerçekleşebilmekte ve yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde arayüzey durum yoğunluğu sayısı, MIS yapının dielektrik özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bilim Kodu : 404.05.01

Anahtar Kelimeler : MIS yapılar; Dielektrik özellikler; Frekans ve sıcaklığa bağımlılık; Elektriksel iletkenlik

Sayfa Adedi : 67

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

**THE INVESTIGATION OF FREQUENCY AND TEMPERATURE
DEPENDENCE OF DIELECTRIC PROPERTIES OF MIS STRUCTURES**

(M.Sc. Thesis)

Hilal ERBAŞ ARAL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
JANUARY 2010**

ABSTRACT

The frequency and temperature dependence of dielectric properties such as dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), dielectric loss tangent ($\tan\delta$), ac electrical conductivity (σ_{ac}), real and imaginary part of electric modulus (M' and M'') of the Au/SnO₂/n-Si (MIS) structures have been investigated in the frequency range of 100 Hz-1 MHz and temperature range of 100-400 K by using experimental capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/w-V) measurements. Experimental results show that both electrical and dielectric parameters were strongly frequency and temperature dependent. The ϵ' and ϵ'' were decreasing with increasing frequency while increasing with increasing temperature. Also, the ac electrical conductivity increases both with increasing frequency and with increasing temperature. The interfacial polarization can be more easily occurred at low frequencies, and the number of interface states density between semiconductor/insulator interfaces, consequently, contributes to the improvement of dielectric properties of MIS structure.

Science Code : 404.05.01

Key Words : MIS structures; Dielectric properties; Frequency and temperature dependence; Electrical conductivity

Page Number: 67

Adviser : Assist.Prof. Adem TATAROĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren ve çok büyük yardımlarını gördüğüm Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer, hoşgörölü ve sabırlı hocam Yrd. Doç. Dr. Adem TATAROĞLU' na sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışma esnasında yardımlarını ve manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen aileme özellikle canım babam Muzaffer ERBAŞ'a ve sevgili eőime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR.....	3
2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapısı.....	3
2.1.1. İdeal MIS yapısı.....	4
2.2. Dielektrik Özellikler.....	13
2.2.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....	14
2.2.2. Dielektrik kutuplanma.....	16
2.2.3. Kutuplanma yüklerinin alanı.....	17
2.2.4. Kutuplanma mekanizmaları.....	21
2.2.5. Negatif dielektrik sabiti ve negatif kapasitans.....	25
2.2.6. Dielektrik sabitinin ölçülmesi.....	26
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	30
3.1. Diyot Yapımında Kullanılan Silisyum Kristali.....	30
3.2. MIS Yapıların Hazırlanması.....	32

	Sayfa
3.2.1. Kristal temizleme.....	32
3.2.2. Omik kontakın oluşturulması.....	33
3.2.3. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapının hazırlanması.....	34
3.2.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması.....	36
3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....	37
3.3.1. Oda sıcaklığında frekansa bağlı kapasitans-voltaj(C-V) ve iletkenlik-voltaj(G/w-V) ölçümleri.....	37
3.3.2. Sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj(C-V) ve iletkenlik-voltaj(G/w-V) ölçümleri.....	37
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	39
4.1. Oda Sıcaklığında Frekansa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Özellikler.....	39
4.1.1. Elektriksel özellikler.....	39
4.1.2. Dielektrik özellikler.....	42
4.2. Sıcaklığa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Özellikler.....	50
4.2.1. Elektriksel özellikler.....	50
4.2.2. Dielektrik özellikler.....	52
SONUÇ VE TARTIŞMA.....	59
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı özellikleri....	31
Çizelge 4.1. Farklı frekans değerleri için aktivasyon enerjisi (E_a) ve bileşik sabiti (σ_0).....	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bir MIS (<u>M</u> etal- <u>I</u> nsulator- <u>S</u> emiconductor) yapının şematik gösterimi.....	3
Şekil 2.2. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı. a) p-tipi yarıiletken b) n-tipi yarıiletken.....	4
Şekil 2.3. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının enerji bant diyagramı (n-tipi yarıiletken için).....	6
Şekil 2.4. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının eşdeğer devresi.....	8
Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması. a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....	10
Şekil 2.6. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması. a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim.....	12
Şekil 2.7. a)Dielektriksiz b)Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....	14
Şekil 2.8. Dipollerin dış elektrik alan etkisiyle yönelimleri.....	17
Şekil 2.9. Dielektrik üzerinde kutuplanma yük yoğunluğu.....	18
Şekil 2.10.Elektronik kutuplanma.....	21
Şekil 2.11.İyonik kutuplanma.....	23
Şekil 2.12.Yönelme kutuplanması	24
Şekil 2.13.Uzay yükü kutuplanması.....	25
Şekil 2.14.Dielektrikli bir kondansatördeki ac akım	28
Şekil 2.15.Dielektrik bir kondansatörde yük akımı ile kayıp akımı arasındaki ilişki.....	29
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği.....	33
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....	34
Şekil 3.3. SnO ₂ tabakanın oluşturulduğu püskürtme düzeneği.....	35
Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapının şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek.....	38
Şekil 4.1. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapının farklı frekanslardaki C-V Karakteristikleri.....	40
Şekil 4.2. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapının farklı frekanslardaki G/w-V Karakteristikleri.....	41
Şekil 4.3. MIS yapının oda sıcaklığındaki; a) dielektrik sabiti (ϵ') b) dielektrik kayıp(ϵ'') ve c) dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$)'nın frekansa bağlı değişim eğrileri.....	44
Şekil 4.4. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki ac elektriksel iletkenliğin frekansa bağlı eğrisi.....	45
Şekil 4.5. MIS yapının a) ϵ' -V b) ϵ'' -V c) $\tan\delta$ -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı.....	47
Şekil 4.6. MIS yapısının a) M' -V b) M'' -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı.....	49
Şekil 4.7. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapının farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı olarak kapasitans(C) değişimi.....	51
Şekil 4.8. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda G/w değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	52
Şekil 4.9. MIS yapı için farklı frekanslarda a) ϵ' b) ϵ'' ve c) $\tan\delta$ 'nın sıcaklığa bağlı değişimi.....	53
Şekil 4.10. Au/SnO ₂ /n-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) sıcaklığa bağlı değişimi.....	55
Şekil 4.11. MIS yapı için ac elektriksel iletkenliğin Arrhenius çizimi.....	56
Şekil 4.12. MIS yapı için farklı frekanslarda elektrik modülünün sıcaklığa bağlı değişimi a) reel kısmı M' ve b) imajiner kısmı M''	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
E_C	İletkenlik bandı enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_i	Saf Fermi enerji seviyesi $((E_C - E_V)/2)$
E_V	Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi
N_A	Katkılanan alıcı atomların (akseptör) yoğunluğu
N_D	Katkılanan verici atomların (dönör) yoğunluğu
N_{SS}	Arayüzey durum yoğunluğu
Q_A	Birim yüzeydeki akseptörlerin (alıcıların) yükü
Q_D	Birim yüzeydeki dönörlerin yükü
Q_M	Metal yüzeyindeki toplam yük
Q_{SC}	Uzay yükü bölgesinde biriken yük
Q_{SS}	Arayüzey yük yoğunluğu
V	Metal plakaya uygulanan gerilim
V_{OX}	Oksit üzerine düşen gerilim
W	Açısal frekans($=2\pi f$)
Y	Admitans
Z	Empedans (Rezistans)
ϵ_{OX}	Oksidin dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabiti (Dielectric constant)
ϵ''	Dielektrik kayıp (Dielectric loss)

Simgeler	Açıklama
$\tan\delta$	Dielektrik kayıp tanjantı
M'	Elektrik modülünün reel kısmı
M''	Elektrik modülünün imajiner kısmı
A_{ox}	Yalıtkan tabakanın alanı
d_{ox}	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
G	Kondüktans (İletkenlik)
C	Kapasitans
τ	Arayüzey tuzaklarının ömrü

Kısaltmalar	Açıklama
MS	Metal-yarıiletken
MIS	Metal-yarıiletken-yalıtkan
MOS	Metal-oksit-yarıiletken
C-V	Kapasitans-gerilim
G/w-V	İletkenlik-gerilim
ac	Alternatif gerilim
dc	Doğru gerilim

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, alüminyum 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, 2]. Bu yapıların hazırlanmasında, 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.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar, metal ile yarıiletken arasına yalıtkan bir tabaka içerdiğinden dolayı kapasitörlere benzemektedir. Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılır [3]. 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 [4]. Terman, metal-yalıtkan-yarıiletken kapasitöre dc gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağlılığını ölçmüştür.

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıdaki yalıtkan tabakanın dielektrik özelliğinden dolayı MIS yapılar, paralel levhalı bir kondansatöre benzer. Aradaki yalıtkan tabakanın 100 \AA 'dan büyük olması durumunda MIS yapılar MOS olarak adlandırılır. Eğer bu yalıtkan tabaka çok ince ise ($\sim 25\text{-}100 \text{ \AA}$), bu yapılar MIS tipi Schottky diyotu olarak adlandırılır ve bu yapıların elektriksel ve dielektrik parametreleri genelde sıcaklık ve frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-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 [5- 9].

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 [10- 12].

Bu çalışmada, Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının C-V ve G/w-V ölçümleri 100 Hz-1 MHz frekans ve 100-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlerden MIS yapının dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) ve elektrik modülü (M' ve M'') gibi dielektrik karakteristikleri hesaplanarak frekans ve sıcaklık bağımlılıkları incelenmiştir.

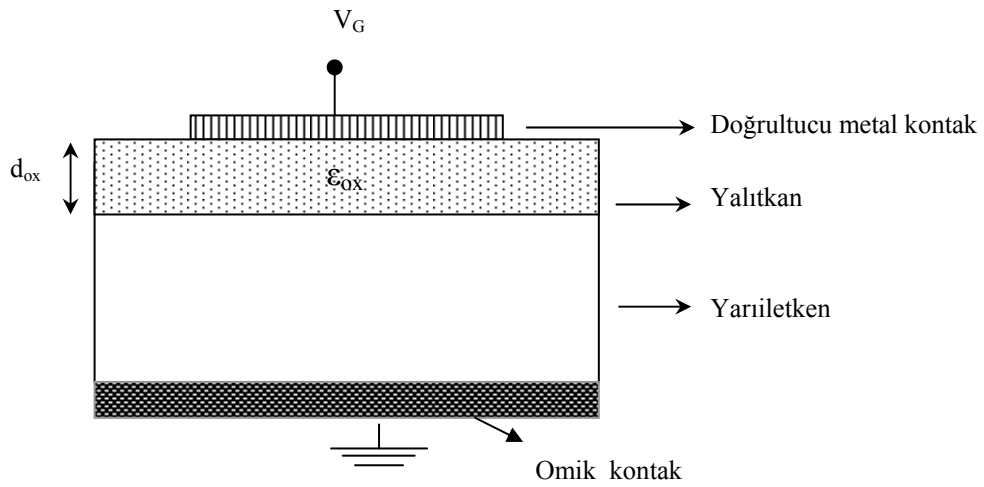
Bu tez çalışması beş bölümden altında toplanmıştır. Birinci bölüm, bu çalışmanın içeriği hakkında bilgi içermektedir. İkinci bölüm, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının ve dielektriksel özelliklerinin teorik bilgisini içermektedir. Üçüncü bölüm, numune hazırlama tekniği, deneysel sistem ve kullanılan araç ve gereçleri içermektedir. Dördüncü bölüm, deneysel ölçüm sonuçlarından elde edilen verileri ve bunlarla ilgili grafikleri içermektedir. Beşinci bölüm, elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili genel bir değerlendirme ve deneysel sonuçların tartışmasını içermektedir.

2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPILAR

Bu bölümde, önce Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) 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

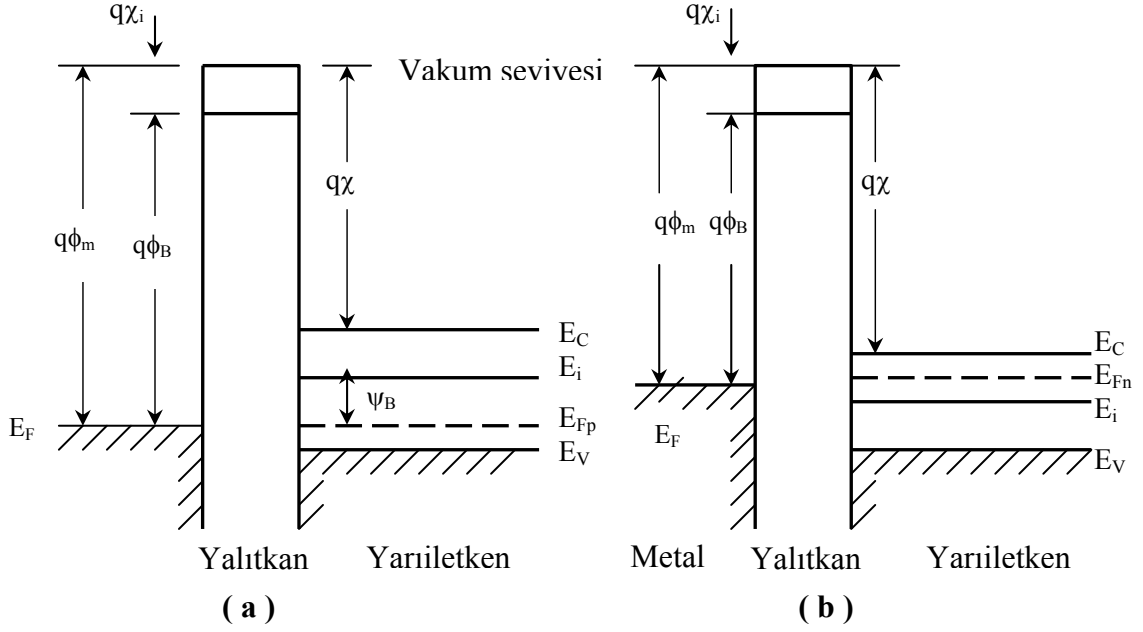
Bir MIS yapının şematik gösterimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu yapılar, levhalardan birisinin metal, diğerinin yarıiletken olmasından dolayı paralel plakalı bir kondansatöre benzer [13]. Burada d_{ox} yalıtkan kalınlığı, ϵ_{ox} yalıtkan dielektrik sabiti ve V_G metal plakaya uygulanan gerilimdir. V_G gerilimi, metal plaka omik kontakta göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhali kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [14].



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 metalin 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 katılan 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 [14- 16]:

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 [17- 19]:

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

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

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

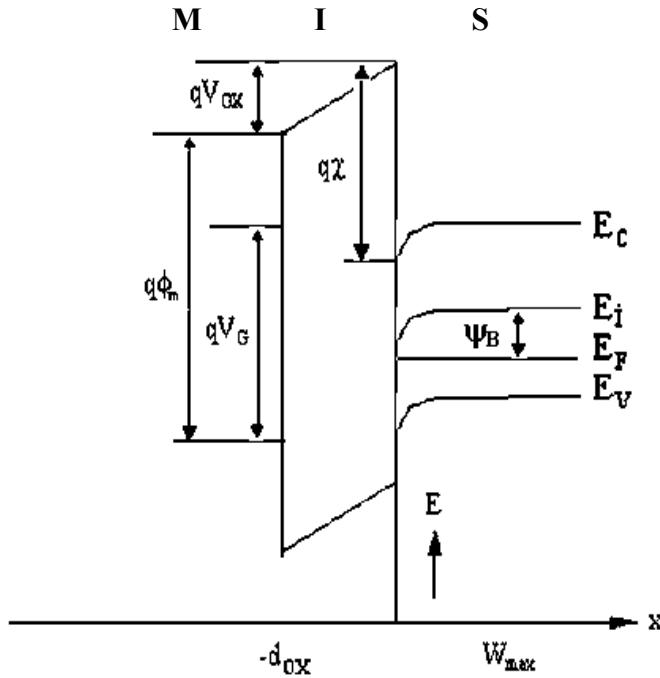
ii) Metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan, bant aralığı çok büyük olduğundan ideal bir dielektriktir. Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Aynı zamanda yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve arayüzey yükleri de bulunmaz.

iii) Yalıtkan bant aralığı o kadar büyüktür ki yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

iv) D.C. gerilim altında (belsem altında) yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.

v) Herhangi bir beslem altında yalıtkan tabaka ile bitişik olan metal yüzeyindeki yükler ile yarıiletkendeki yükler eşit fakat zıt yönlüdürler.

Bu durumun enerji bant diyagramı Şekil 2.3'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının enerji bant diyagramı(n-tipi yarıiletken için)

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 katkı 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 [14]. Sistemdeki toplam yük, kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki denklem ile verilebilir.

$$Q_m = Q_n + qN_A W = Q_s$$

$$Q_m + Q_{sc} = 0 \quad (2.4)$$

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 [18].

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

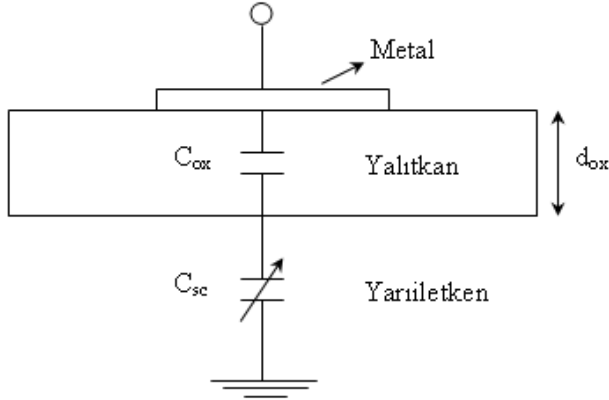
devre Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir. Uygulanan gerilimde çok 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} ,

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

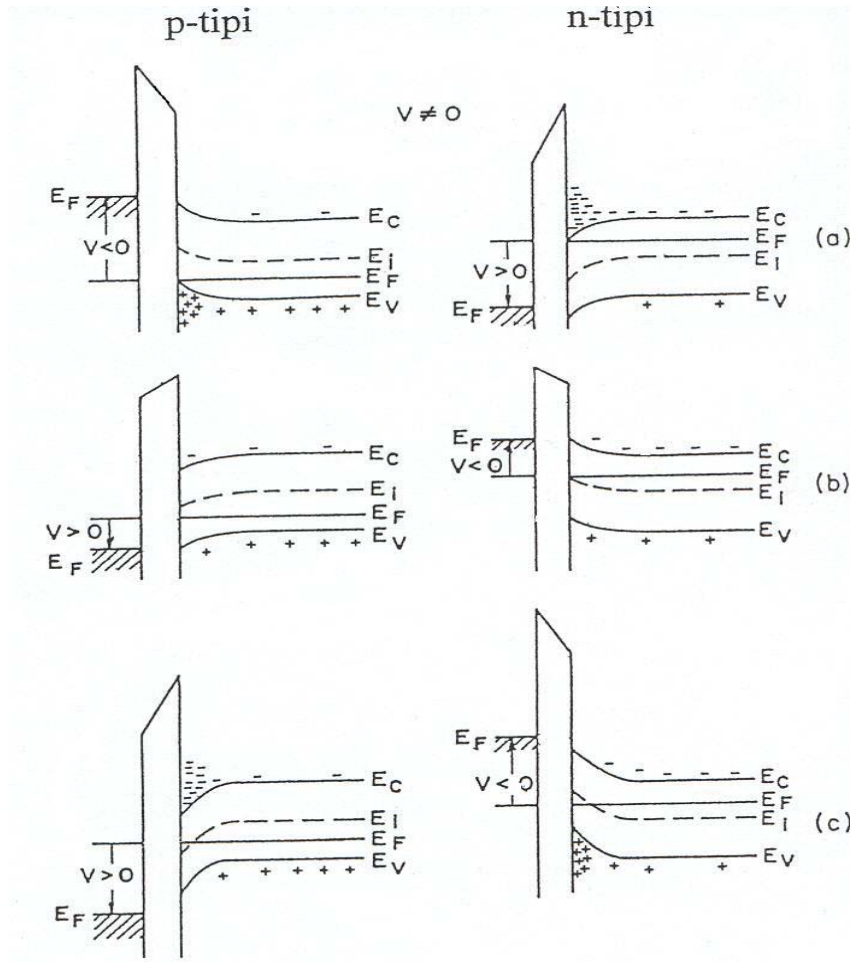
eşitliği ile verilir. Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı C_{ox} değeri de uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapısının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen durumları Şekil 2.5’de gösterilen bir p-tipi yarıiletken için tanımlanabilir [14, 17, 19].

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 arayüzündeki deşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki deşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki deşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen 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 katkı 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:

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

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.

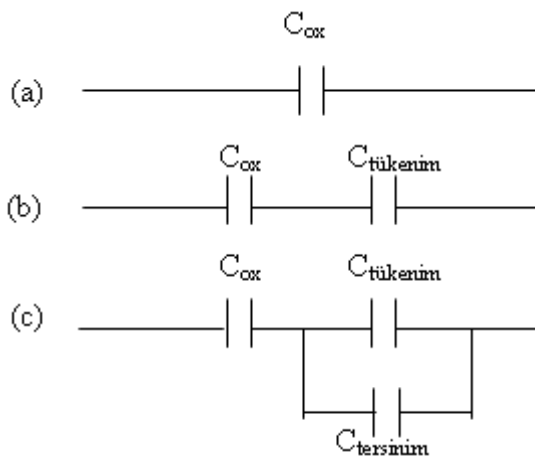
Tersinim

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 yalıtkan 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' daki gibidir [17]. Bu sistemler; yığılım, tükenim ve tersinim adını alır.



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

2.2. Dielektrik Özellikler

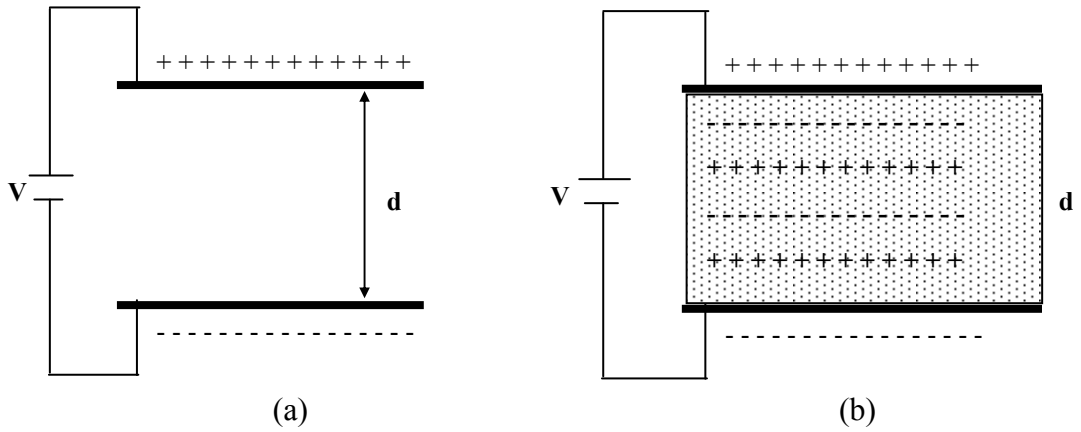
Dielektrikler, esasen bir dış elektrik alan etkisi altında içerisinde hareket edebilen serbest taşıyıcı bulundurmamalarından dolayı yalıtıcıdır. Dielektriklerde tüm yükler belirli atom veya moleküllere bağlıdır ve hareketleri molekül içiyle sınırlıdır. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda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

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

artacak hem de sürtünmeler artarak dış alanla yönelim gecikmeye uğrayacaktır. Bu nedenle artan sıcaklık genel olarak dielektrik kayıplarda artışa sebep olmaktadır [14].

2.2.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör

A yüzey alanına sahip ve aralarında d uzaklığı bulunan iki paralel plakalı bir kondansatörün plakaları arasında dielektrik bir malzeme yokken ve varken ki durumları Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. a) Dielektriksiz b) dielektrikli paralel plakalı kondansatör

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

$$E_0 = \sigma / \epsilon_0 \quad (2.11)$$

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,

$$V_0 = E_0 \cdot d \quad (2.12)$$

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

$$C_0 = Q_0/V_0 = \epsilon_0 A/d \quad (2.13)$$

olarak ifade edilir.

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

$$D = \sigma = \epsilon_0 E_0 \quad (2.14)$$

ile ifade edilir [14].

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

Bir dielektrik yokken paralel plakalı kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 ve elektrik alanı E_0 olsun, plakalar arasına bir dielektrik madde konulursa potansiyel farkı ve elektrik alan $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. Yani,

$$V = V_0/\epsilon' \quad (2.15)$$

$$E = E_0/\epsilon' \quad (2.16)$$

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

$$C=Q_0/V= \epsilon'Q_0/ V_0= \epsilon'C_0 \quad (2.17)$$

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

$$C=\epsilon'\epsilon_0A/d \quad (2.18)$$

olarak ifade edilebilir.

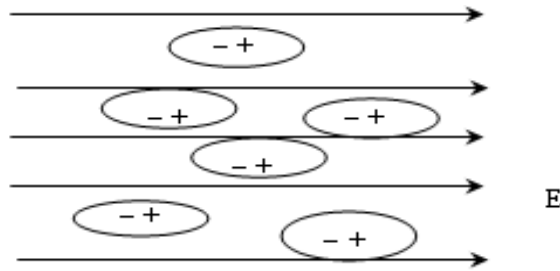
2.2.2. Dielektrik kutuplanma

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

Bazı dielektriklerin molekülleri daimi dipol ihtiva ederler. Polar denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz yani yükler birbirinden çok az miktarda ayrılırlar. N_2O ve H_2O moleküllerinin her ikisinde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alırlar; bu moleküller polardırlar. Polar olmayan bir molekülde ise pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi ile elektronların ağırlık merkezi çakışır. H_2 , N_2 , O_2 gibi simetrik moleküller polar değildirler. Fakat bir dielektrik elektrik alan içine yerleştirildiği zaman, bir yük hareketi olmamakla beraber elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğinden çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük boyutlarda (atomik) dielektrik kutuplanarak dipolar haline geçerler. Dipolar hale geçen bu moleküllerde dipol momenti elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığı zaman atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur.

Polar olmayan molekül kutuplandığı zaman yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur. Geri çağırıcı kuvvetler dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvete eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle değişir, bu nedenle verilen bir alan için yüklerin yer değiştirmesi yani kutuplanması farklı olur. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulduklarından tam bir yönelim olmaz. Fakat uygulanan elektrik alan şiddeti arttıkça ve sıcaklık azaldıkça yönelme derecesi artar [11].

Bir dielektrik, polar moleküllerden (daimi dipollerden) meydana gelmiş ise bir dış alan mevcut olmadığı zaman dipoller rasgele doğrultularda yönelirler. Bir dış alanın etkisi altında buldukları zaman P dipol momentleri Şekil 2.8'deki gibi alana paralel olacak şekilde yönelirler [20]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar.



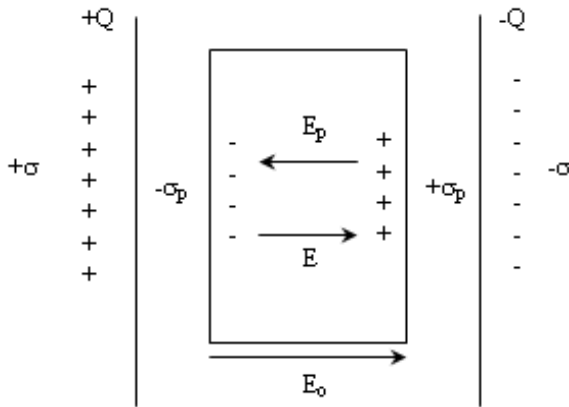
Şekil 2.8. Dipollerin dış elektrik alan etkisiyle yönelimleri

2.2.3 Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektriğin levhalara yakın olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yüklerinin oluşturduğu elektrik alan dış elektrik alana ters yönde olup, levhalar arasındaki toplam elektrik alanı azaltmaktadır. Bu durum Şekil 2.9'daki gibi açıklanabilir. Şekilde görüldüğü gibi düzgün bir E_0 elektrik alanı içindeki bir dielektrik maddede moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Böylece uygulanan elektrik alan, dielektrik madde tümü ile nötr olmasına karşın dielektriği polarize eder. Elektrik alanın etkisi sonucu, negatif yükler sol yüzeyde, pozitif yükler sağ yüzeyde birikmişlerdir. Dielektrik bütünü ile nötr

kalmasından dolayı, negatif yüzeyde oluşan yük miktarı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarına eşittir.

E_o , dielektrik bulunmadığı zamanki alan şiddetini ve E_p ise polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti gösterilirse, bileşke alan bunların vektörel toplamına eşit olur.



Şekil 2.9. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_p \quad (2.19)$$

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

$$E_o = \frac{\sigma}{\epsilon_o} \quad (2.20)$$

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

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (2.21)$$

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

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (2.22)$$

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

$$V = \frac{V_o}{\epsilon'} \quad (2.23)$$

$$E = \frac{E_o}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_o} \quad (2.24)$$

$$C = \epsilon' C_o \quad (2.25)$$

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

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_o A}{d} \quad (2.26)$$

olarak elde edilir. Eş. 2.24, Eş. 2.25'da yerine konulursa,

$$\frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_o} = \frac{\sigma}{\epsilon_o} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_o} \quad (2.27)$$

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (2.28)$$

elde edilir. $E_o > E_p$ olduğundan, dielektrik üzerindeki σ_p kutuplanma yük yoğunluğu, kondansatörün plakaları üzerindeki σ serbest yük yoğunluğundan küçüktür ($\sigma_p < \sigma$). Hiçbir dielektrik yoksa $\epsilon' = 1$ ve $\sigma_p = 0$ olur. Buna karşın, dielektrik yerine bir iletken yerleştirilirse $E = 0$ olur, o zaman $E_o = E_p$ elde edilir ki bu $\sigma_p = \sigma$ karşılık gelir. Yani, iletken üzerinde kutuplanan yük, plakalar üzerindeki yükle eşit ve zıt işaretli olacak, dolayısıyla iletkendeki net alan sıfır olacaktır [16].

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

$$P = \epsilon_o \chi E \quad (2.29)$$

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

$$\chi = (\epsilon' - 1) \quad (2.30)$$

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

$$D = \epsilon_o E + P \quad (2.31)$$

ifadesiyle verilir. Eş. 2.29, Eş. 2.31'de yerine konulursa,

$$D = \varepsilon_o(1 + \chi)E = \varepsilon_o\varepsilon' E \quad (2.32)$$

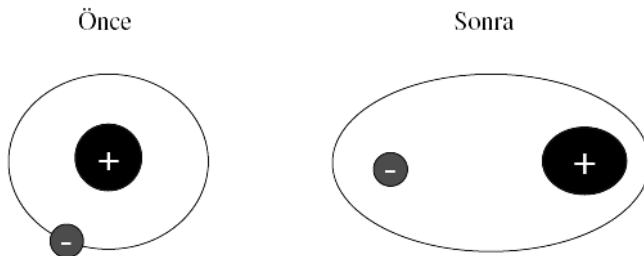
olarak elde edilir [10, 11, 21].

2.2.4. Kutuplanma mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayanlar diye ikiye ayrılabilir. Polar maddeler, moleküllerindeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezlerinin bir noktada çakışmamasından dolayı kalıcı bir elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift-kutup momentleridir ve bunlara çift kutuplu maddeler denir. Dielektriklerde temelde dört tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik, yönelme ve uzay yükü kutuplanmalarıdır [21, 22].

Elektronik kutuplanma

Bir dış elektrik alanın uygulanmasıyla bütün atomlar ve iyonlarda ortaya çıkar ve tüm dielektriklerde diğer tür kutuplanmalar olmazsa dahi gözlenebilir. Bunun nedeni, bir atomdaki elektronların oluşturduğu negatif yük dağılımının çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kaymasıdır (Şekil 2.10). Elektronun kütlesi oldukça küçük olduğundan uygulanan dış elektrik alanla kısa bir süre içinde oluşur (10^{-15} sn).



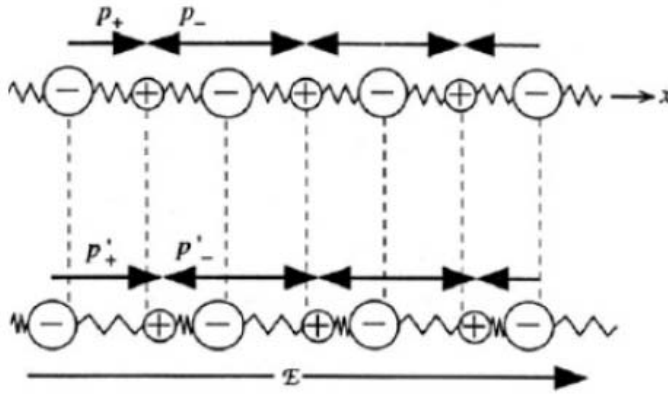
Şekil 2.10. Elektronik kutuplanma

İyonik yapılmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ($n^2 = \epsilon$). Buna Maxwell ilişkisi denilmektedir. Bunun fiziksel içeriği şöyle açıklanabilir: elektromanyetik dalganın elektrik vektörü madde içindeki yüklere, başlangıçtaki konumlarını değiştirecek kuvvet uygular ve sonuçta bir çift-kutup oluşturacaktır. Sıkı bağılı elektronlar oluşan bu kutuplanmaya daha az katkıda bulunurlar. Elektromanyetik dalganın elektrik vektörü devamlı değiştiğinden elektronlar bu değişmeyi izleyebildiği sürece etkileşmeli çift-kutup momentleri oluşacaktır. Ağır iyonlar elektromanyetik alanı kızıl ötesi bölgeye kadar izleyebildiklerinden görünür bölgede kutuplanmaya çok az katkıda bulunurlar. Hâlbuki elektronlar bu bölgede de yanıt verebilirler ve elektronik kutuplanmayı oluştururlar. Sürekli yön değiştiren bu çift-kutuplar uyarıldığı frekansın aynıyla ışıklar. 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

İyonik kutuplanmada, molekülleri farklı tip atomlar oluşturduğundan, bu atomlar elektronları simetrik olarak paylaşmayacaklardır. Yani, elektron bulutunun yük merkezi kayarak daha kuvvetli bağlayıcı atoma doğru yönelecektir. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler kazanırlar ve bu net yüklere etkiyen bir dış elektrik alan, atomların kendi aralarındaki denge konumlarını değiştirecektir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir tip etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelecektir (Şekil 2.11). Bu, dielektriğin iyonik

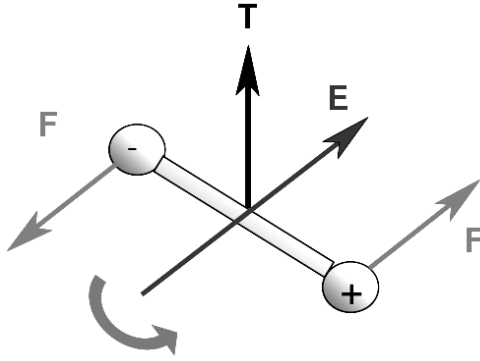
kutuplanmasıdır. Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü, her ikisinde de yüklerin alan doğrultusunda birbirlerine göre konum değiştirmesidir ve dolayısıyla bu iki kutuplanmaya etkileşmeli kutuplanma denmektedir. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma için de oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13} - 10^{-12} s). Bu kutuplanmanın varlığında Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağlı dielektrik katsayısı her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük olacaktır.



Şekil 2.11. İyonik kutuplanma

Yönelme kutuplanması

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift-kutup momentleri içeren, polar dielektriklerde oluşur (10^{-9} - 10^{-3} s). Bazı dielektriklerde kuadropol (dört kutuplu), oktopol (sekiz kutuplu) vb. çok kutuplular da bulunabilir. Fakat bunların kutuplanmaya katkısı oldukça azdır. Böyle elektrik momentlerine (çift-kutuplara) dış elektrik alan bir tork uygulayarak kendisiyle aynı yönelime zorlayacaktır ve sonuçta yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır (Şekil 2.12). Yönelim kutuplanmasında sıcaklık etkileri de göz önüne alınmalıdır. Yönelim kutuplanmasında çift-kutup momentli moleküllerin alan uygulanmadan önceki durumuna yeniden geçmesi için moleküllerin büyüklükleri ve ortamın viskozları ile doğru orantılı olan bir zamana ihtiyaç vardır.



Şekil 2.12. Yönelme kutuplanması

Bu üç kutuplanmada dielektrik içinde yerel olarak bağlı yüklerle oluşmaktadır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü; her ikisinde de yüklerin dönmeyip birbirlerinden uzaklaşmalarıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirler. Düşük frekanslarda her üç kutuplanma da oluşur. Frekans arttıkça önce kalıcı, sonra iyonik ve en sonunda da elektronik çift-kutuplar ki, son ikisi etkileşmeli çift-kutuplar olup, dış alanın değişmesini izleyemez duruma gelirler ve statik dielektrik sabiti ϵ_r “1” değerine ulaşır [20]

Uzay yükü (Space charge) kutuplanması

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

oluşmasına olanak sağlamaktadır. Bu kutuplanma mekanizması düşük ve orta frekanslarda etkin bir mekanizmadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13.Uzay yükü kutuplanması

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

2.2.5. Negatif dielektrik sabiti ve negatif kapasitans

Klasik olarak dielektrik sabitinin boşluk haricindeki maddeler için 1'den büyük olduğu düşünülür fakat negatif kapasitans ve negatif dielektrik sabiti olgusu, p-n eklemler, Schottky kontaklar gibi birçok elektronik cihazda gözlenmiştir. Gevşemiş (relaxation) materyal denen maddeler için ($\tau_d \gg \tau_0$) birçok farklı mekanizma yardımıyla kapasitansın hızlıca azalarak sıfıra düştüğü hatta negatif olarak arttığı durumlar mümkündür [23, 24]. Değişik cihazlardaki negatif kapasitansın mikroskobik boyuttaki fiziksel mekanizması; kontak enjeksiyonu, arayüzey durumları veya azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuna atfedilmektedir [23, 24]. Negatif kapasitansın oluşması, elektrotlardaki (tabakalar) yükün artan gerilim voltajıyla azalması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir. Negatif kapasitans, malzemenin indükleyici bir davranış gösterdiği anlamına gelmektedir [25]. Azınlık taşıyıcıların enjeksiyonuyla negatif kapasitans oluşumu sadece doğru beslemde ve düşük frekanslarda gözlenebilmektedir [23].

Dielektrik gevşeme zamanının ($\tau_d = \rho \epsilon \epsilon_0$) azınlık taşıyıcıların oluşma ve yeniden birleşme ömründen (τ_0) küçük veya büyük olup olmamasına göre yarıiletkenler

başlıca iki farklı gruba ayrılabilirler [24]. $\tau_d \gg \tau_0$ durumuna gevşeme durumu (relaxation case) ve bu tür yarıiletkenlere de gevşemiş yarıiletkenler (relaxation semiconductor) denir. Bu durumun tersi ise $\tau_0 \gg \tau_d$ olan uzun ömürlü durum (lifetime case) bu tür yarıiletkenlere de uzun ömürlü yarıiletkenler (lifetime semiconductor) denir. Bu gevşeme mekanizması kontak yapısındaki elektronik cihazlarda negatif kapasitans ve dolayısıyla negatif dielektrik sabitine neden olmaktadır. N tipi bir relaxation yarıiletken içeren kontakta ileri doğru beslemlerde,deşik enjeksiyonu oluşarak budeşikler kontak kenarındaki serbest dipol taşıyıcısı olan elektronlarla birleşirler. Bu nedenle kontak kenarındaki yük dipolü azalır. Bu durum büyük bir negatif kapasitans etkisine neden olur. Çünkü yeniden birleşme (recombination) mekanizması güçlüdür ve kontak yüklerinin çok yakınlarına kadar sokulabilirler. Bu negatif kapasitans etkisi yaratılma-yeniden birleşme (g-r) merkezlerinin yoğunluğu ve iyonize uzay-yükü tuzaklarının etkisiyle meydana gelmektedir [25].

2.2.6. Dielektrik sabitinin ölçülmesi

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

$$Y = G + j\omega C \quad (2.33)$$

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

$$Y = G + j\omega(C_0 \epsilon^*) \quad (2.34)$$

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

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.35)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu durumda admitans;

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

$$Y = (G + \omega\varepsilon''C_0) + j\omega C_0\varepsilon' \quad (2.36)$$

olur [10, 21, 26].

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

$$Z = \frac{1}{G + j\omega C} = \frac{1}{G + j\omega C_0\varepsilon^*} \quad (2.37)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eş. 2.35, Eş. 2.37'de yerine yazılırsa gerçel ve sanal kısımların çözümleri;

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad \text{ve} \quad \varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega RC_0} \quad (2.38)$$

olarak elde edilir [10,27].

Bir dielektrik maddeye ac uyarıcı gerilim ($V=V_0\cos\omega t$) uygulandığında (Şekil 2.14), numuneden geçen akım,

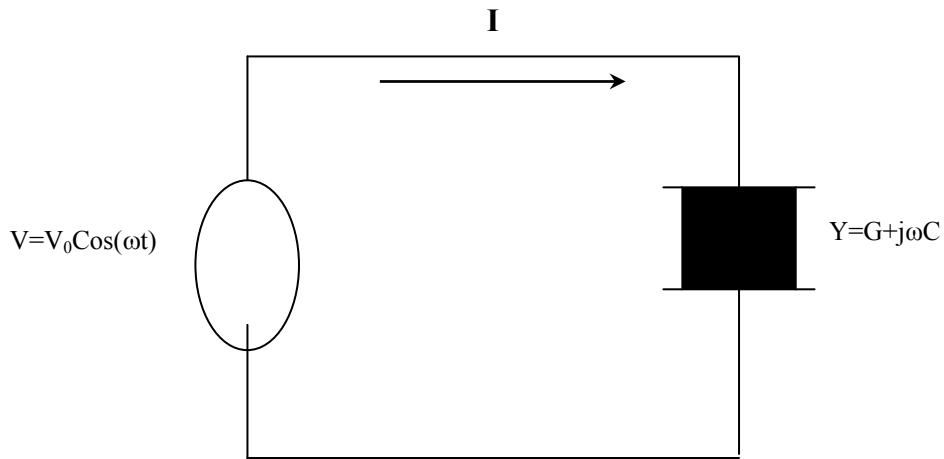
$$I = (\epsilon^* C_o) \frac{dV}{dt} \quad (2.39)$$

olarak ifade edilir. Numuneden geçen akım,

$$I = I_R + jI_C \quad (2.40)$$

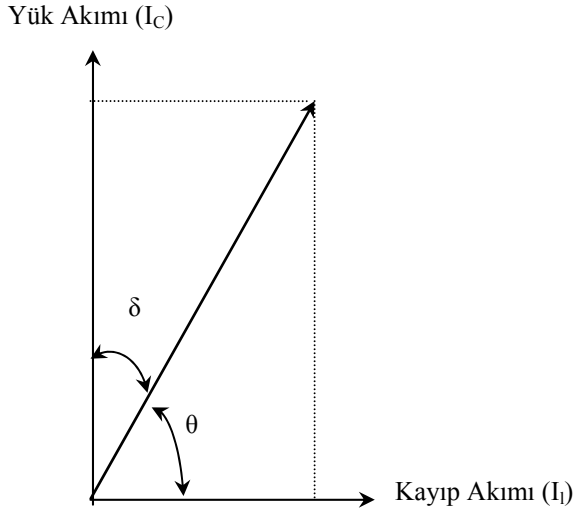
olarak ifade edilir.

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



Şekil 2.14. Dielektrikli bir kondansatördeki ac akım.

Numuneden geçen akım, bileşenleri ile birlikte Şekil 2.15.'de verilen fazör diyagramında görülmektedir.



Şekil 2.15. Dielektrikli bir kondansatörde yük akımı ile kayıp akımı arasındaki ilişki

Bu diyagramda görülen δ terimi, numune üzerindeki ac uyarıcı 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,

$$\tan \delta = \frac{|I_R|}{|I_C|} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (2.41)$$

kayıp açısı faktörünü ifade eder [26, 21].

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Diyot Yapımında Kullanılan Silisyum Kristali

Silisyum doğada bol miktarda, silikat ve silisyum dioksit (kum) bileşikleri halinde bulunur. Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 K) bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Silisyum dioksitin 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 eleman yapımı için yeterli saflıkta değildir.

Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden yararlanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır [7, 28]. Bu yöntemle saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bundan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülmesi ve içine arzu edilen öz direnci sağlayacak safsızlık maddelerinin katkılanması gerekir. Katkılanan safsızlığın cinsi yarıiletkenin tipini belirler ve miktarı ise öz direncini ($\rho = 1/\mu\epsilon N$) tayin eder.

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

Özellikleri	
Atom/cm ³	5,0 x 10 ²²
Atom ağırlığı (kg/mol)	28,09
Kırılma alanı (V/cm)	3x10 ⁵
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm ³)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N_c (cm ⁻³)	2,8 x 10 ¹⁹
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N_v (cm ⁻³)	1,04 x 10 ¹⁹
Saf taşıyıcı yoğunluğu n_i (cm ⁻³)	1,45 x 10 ¹⁰
Saf öz direnci (Ω .cm)	2,3x10 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	$m_{lh}^*=0,16$, $m_{hh}^*=0,49$
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)	2,5x10 ⁻³
Termal iletkenlik (W/cm-°C)	1,5

3.2. MIS Yapıların Hazırlanması

3.2.1. Kristal temizleme

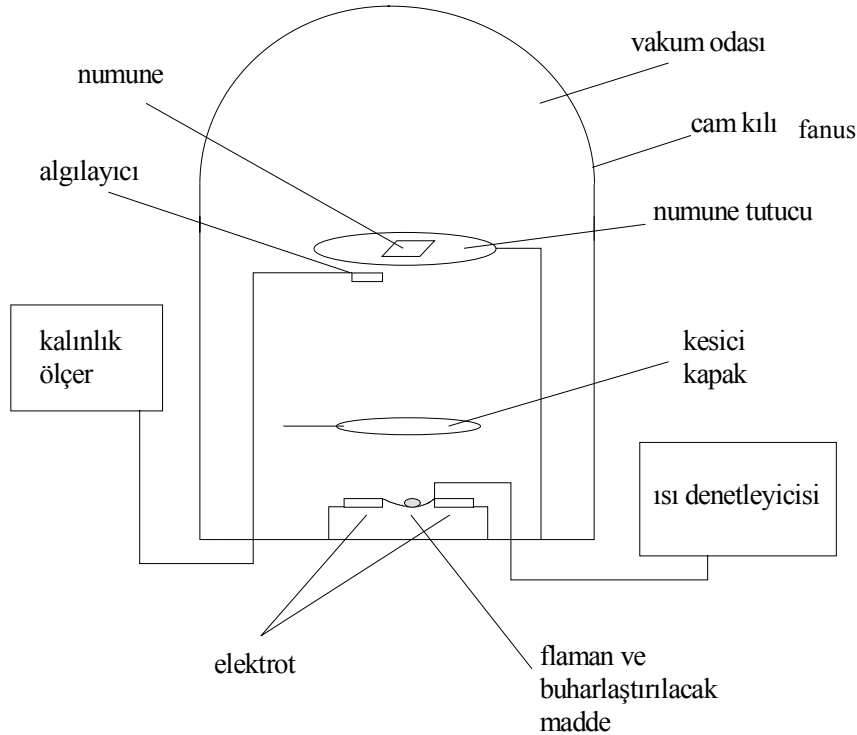
İdeale yakın bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapabilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Kullanılan kristal fabrikasyon olarak parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Ancak kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemi ultrasonik banyoda yapıldı. MIS yapıları oluşturmak için (111) yüzey yönelimli, 4,45 Ωcm öz dirençli, 280 μm kalınlıklı ve fosfor katkılı n-tipi Si tek kristal silisyum yapraklar kullanıldı. Temizleme işleminde kullanılan direnci yaklaşık 16-18 $\text{M}\Omega$ olan deiyonize su kullanıldı. Ro&Up Water Purification System ile elde edilen bu deiyonize su (saf su) Sybran sistemi içerisinde geçirilmesi ile elde edildi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız v.b araç ve kaplar fırında yaklaşık 100 $^{\circ}\text{C}$ ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra hidrojen peroksit (H_2O_2), aseton ve ardından da deiyonize su ile iyice durulandı. Kristaller önce deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak yaklaşık 10 dakika kadar yıkandı.

1. Kristaller sırasıyla 20 ml trikloretilen (C_2HCl_3), 20 ml aseton ve 20 ml metil alkol (CH_3OH) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlendi.
2. Kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
3. 30 ml sülfürik asit (H_2SO_4) ve 30 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
4. Deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
5. 30 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
6. 30 ml nitrik asit (HNO_3), 10 ml hidroflorik asit (HF) ve 50 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.

7. 40 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
8. Son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika temizlendi.
Kimyasal olarak temizlenmiş n-tipi silisyum kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kuru azot (N_2) ile kurutulduktan sonra hemen vakum ortamına alındı.

3.2.2 Omik kontakın oluşturulması

MIS yapı hazırlanırken omik ve doğrultucu kontakın oluşturulmasında buharlaştırma sistemi kullanıldı. Sistemin içinde diyot yapımını gerçekleştiren kısmı Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.

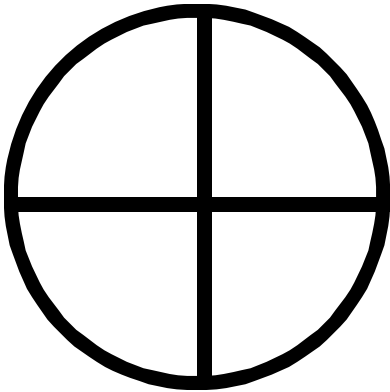


Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği

Bu kısımdaki parçalar, flaman (tungsten) ve ince bir bakır levhadan hazırlanan maskeler kimyasal olarak ultrasonik banyoda iyice temizlendi. Temizleme işlemi,

karbontetraklorür, 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 100 °C’de fırınlanarak kurutuldu. Omik kontaklı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Fanus hemen kapatılarak vakumlama işlemine geçildi(10^{-6} Torr).

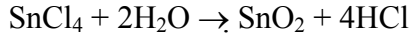
Omik kontaklar için Şekil 3.2’de gösterilen 50 mm çaplı ve ≈ 300 μ m kalınlıklı bakır maske kullanıldı. Vakum $\approx 10^{-6}$ Torr’a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek (≈ 35 A) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş altın (Au) metal parçacıklarının buharlaşması sağlandı. Buharlaşmanın başlamasından bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa çekilerek, silisyumun mat yüzeyine altın kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine yapışmasını önlemektir. Mat yüzeye saf altın kaplama işleminden sonra aynı vakum ortamında 900°C’de saf altın silisyum içerisine çöktürüldü.



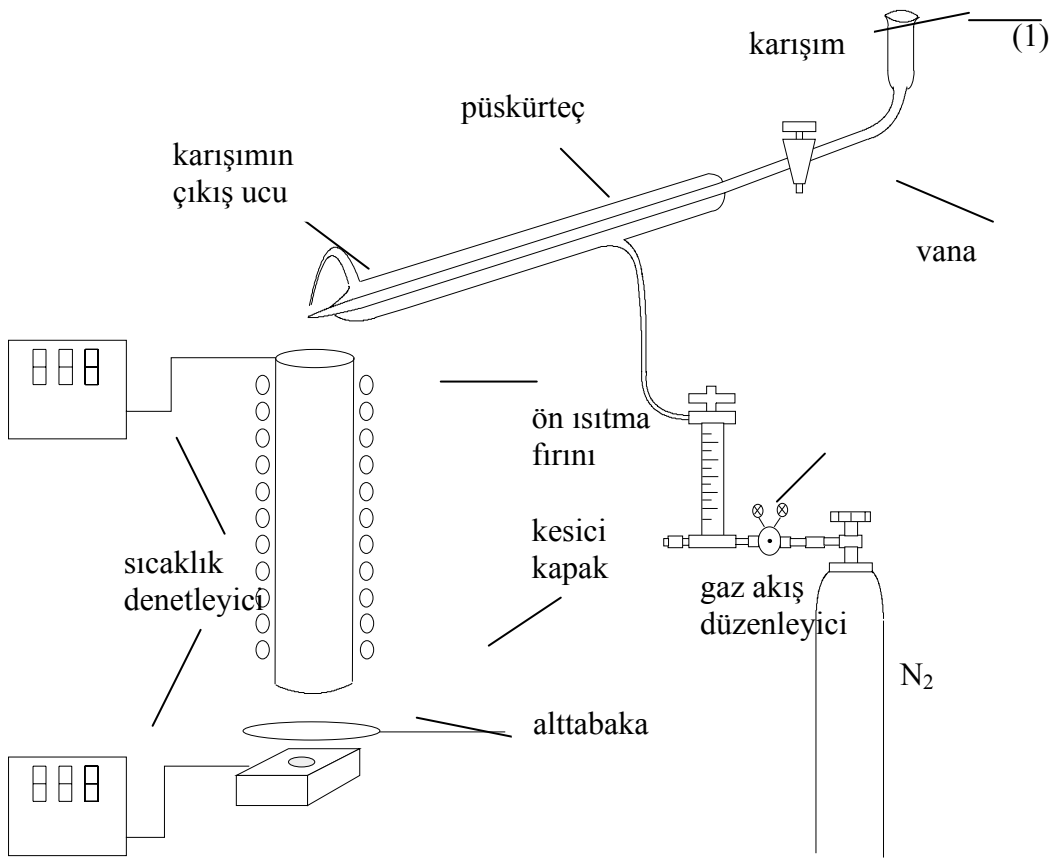
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

3.2.3. Au/SnO₂/n-Si MIS yapının hazırlanması

Kalay dioksit (SnO₂) tabaka püskürtme yöntemi ile oluşturuldu. Bu yöntemde ısı alan bir reaksiyon olan,



denkleminde yararlanılmıştır. Ağırlıkça %32,2 etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), %40,4 deiyonize su ve %27,4 kalay klorür ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) karışımı taşıyıcı kuru azot gazı (N_2) kullanılarak püskürtüldü. Öncelikle oluşturulan $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ karışımı Şekil 3.3' de belirtilen düzenek üzerinde belirtilen 1 nolu kısma yerleştirildi.



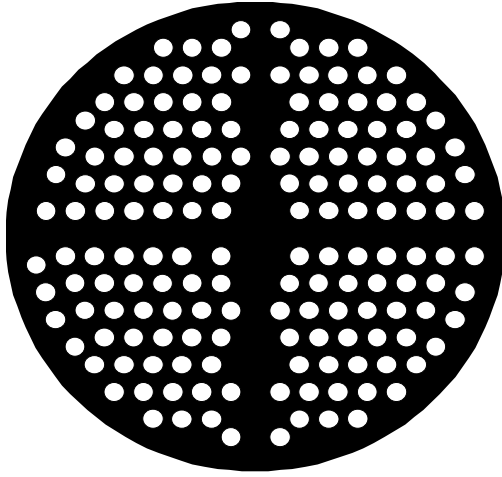
Şekil 3.3. SnO_2 tabakanın oluşturulduğu, püskürtme düzeneği

Sonra, gaz akış düzenleyicisi yardımıyla gaz akış oranı 3 lt/dak olarak ayarlandı. Böylece püskürteç, püskürtme işlemi için hazır hale geldi. Karışım vanası açılarak karışımın püskürtülmesi gerçekleştirildi. Püskürtülen karışım önce ön ısıtma fırınından geçirildi. Böylece karışımla alt tabaka arasındaki sıcaklık farkı ortadan kaldırıldı. İlk püskürtmede oluşabilecek safsızlıkları önlemek amacıyla kesici kapak

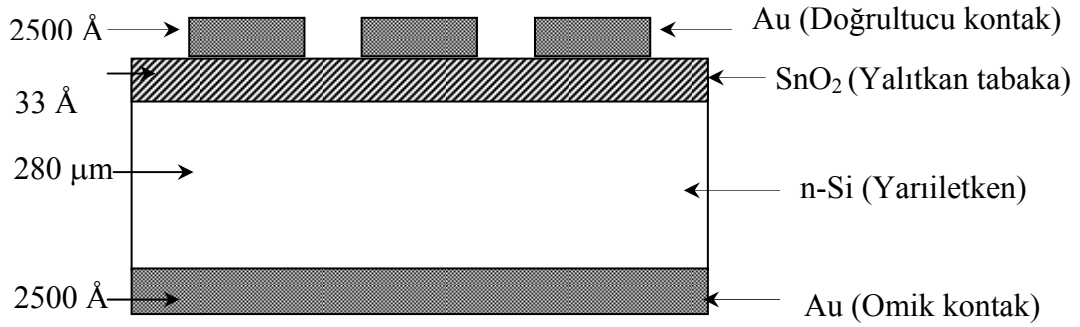
kullanılmıştır ve numune korunmuştur. Kısa bir süre sonra kesici kapak açılarak karışımın numune üzerine püskürtülmesi sağlandı ve kesici kapak tekrar kapatılarak püskürtme işlemine son verildi. SnO₂ tabakasının numune üzerine püskürtüldüğü sırada alt tabaka sıcaklığı 400 °C’de tutuldu [10].

3.2.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzeri SnO₂ kaplanmış yüzey üzeri çok sayıda 2mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske (Şekil 3.4) üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen altın (Au) metal parçası $\approx 10^{-6}$ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (2mm çaplı) şeklinde ve ≈ 2500 Å kalınlığında altın kaplanması sağlandı. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla Au/SnO₂/n-Si şeklinde MIS yapılar elde edildi. 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. Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının şematik gösterimi

3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

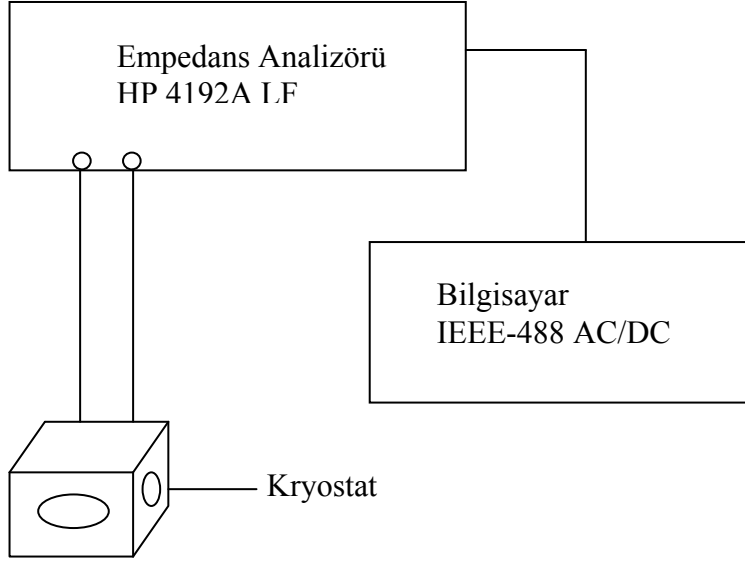
3.3.1. Oda sıcaklığında frekansa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik voltaj (G/w-V) ölçümleri

Elektriksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Starlab Yarıiletken Laboratuvarında yapıldı. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen C-V ve G/w-V ölçümleri, 100 Hz-1 MHz frekans aralığında, HP 4192A LF empedans analizörü (5 Hz-13 MHz) ve 50 mV_{rms} test sinyali ile bilgisayar kontrollü olarak elde edilmiştir. Ölçümler ters ve doğru beslem altında, karanlık ortamda bilgisayar kontrollü alınmıştır. Ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir. C-V ve G/w-V ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

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

Sıcaklığa bağlı C-V ve G/w-V ölçümleri, HP 4192A LF empedans analizörü (5 Hz-13 MHz) ve 50 mV_{rms} test sinyali ile bilgisayar kontrollü olarak elde edilmiş, 100-400 K sıcaklık aralığında ve 1 kHz-1 MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan MIS yapı için, Janes vpf-475 kryostat içinde, yaklaşık 5x10⁻⁴ Torr basınç altında bakır tutucuda konumlandırılmış ve bilgisayar kontrollü olarak, hassasiyeti ±

0.1 K olan Lakeshore model 321 Auto-tuning sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak, ters ve doğru dc geriliminde ölçümler gerçekleştirilmiştir.



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

4. DENEYSEL SONUÇLAR

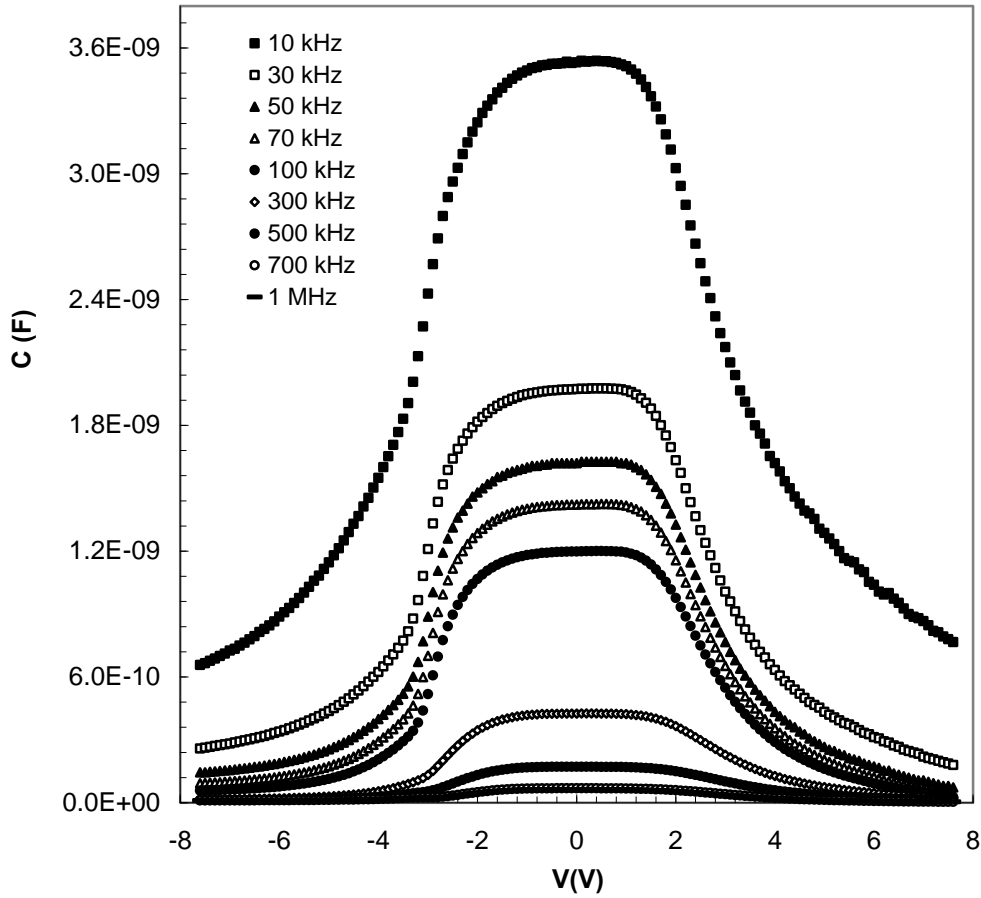
Hazırlanan Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapıların dielektrik özelliklerini incelemek için; kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümleri sırasıyla 100 Hz-1 MHz frekans (oda sıcaklığında) ve 100-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. MIS yapının C-V ve G/w-V ölçümleri, negatif gerilimden pozitif gerilime geniş bir voltaj aralığında ölçüldü. Böylece, C-V ve G/w-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar elde edildi. C-V ve G/w-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 5×10^{-4} Torr basınç altında bir Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Deneysel C-V ve G/w-V ölçüm sonuçları kullanılarak MIS yapının dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') ve dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$) ile M' ve M'' elektrik modülleri gibi dielektrik parametreleri frekansa ve sıcaklığa bağlı hesaplandı.

4.1. Oda Sıcaklığında Frekansa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Özellikler

4.1.1. Elektriksel özellikler

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, oda sıcaklığında ve 100 Hz-1 MHz frekans aralığında ölçülen MIS yapının C-V ve G/w-V karakteristikleri -8V ile +8V aralığında verilmiştir. Böylece hem C hem de G/w değerleri tersinim, tükenim ve yığılım bölgelerinde çizildi. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, ölçülen C değerleri tüm bölgelerde frekansa bağlılık göstermektedir. Yani bu bölgelerde her frekanstaki C değerleri azalan frekansla artmakta ve -4V ile 4V arasında bir pik vermektedir. Bu davranış veya diğer bir deyişle düşük frekanslardaki daha yüksek C değerleri, yarıiletken ile dengede olan arayüzey durumlarına atfedilebilir [13, 14, 18, 30-35]. Yani, düşük frekanslarda arayüzey durumları ac sinyali takip edebilir ve sonuç olarak MIS kapasitansına önemli ölçüde bu arayüzey durumlarından dolayı bir katkı

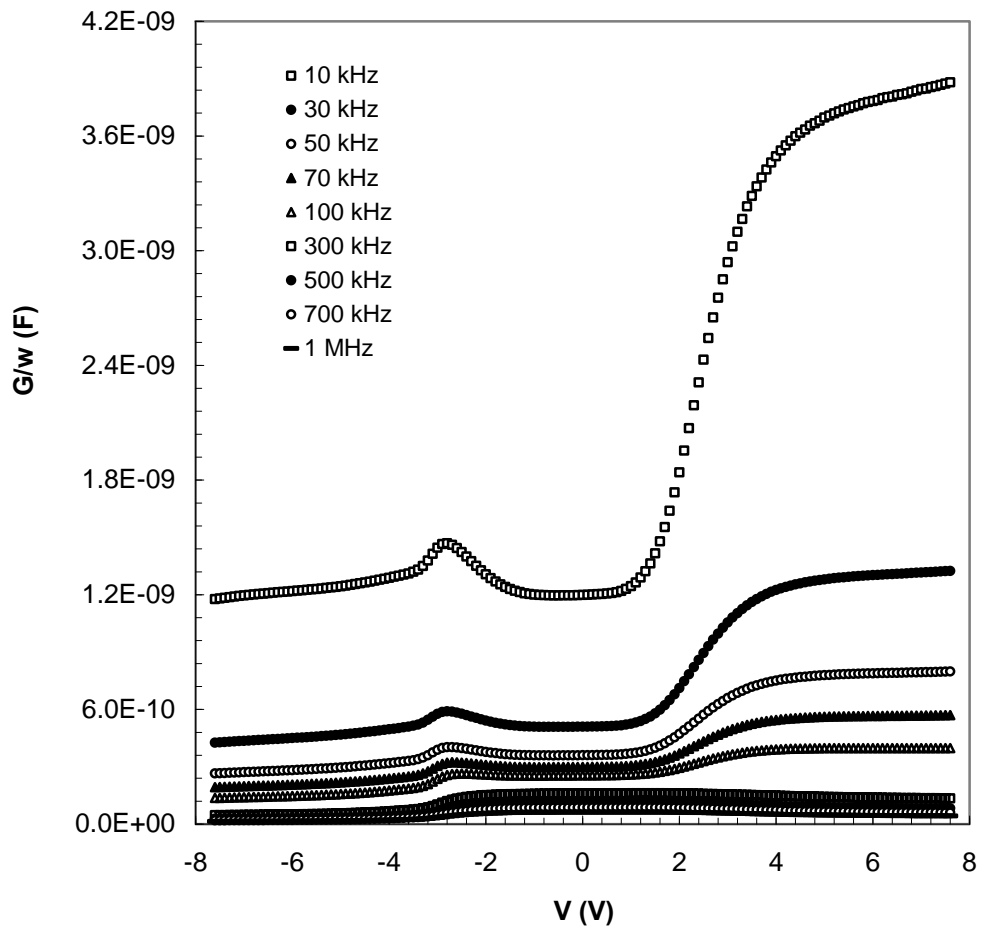
gelmektedir. Bu katkıdan dolayı meydana gelen kapasitansa ilave kapasitans denir. Frekans arttırıldıkça, MIS kapasitansı azalır ve daha sonra hemen hemen sabit olur. Yani yüksek frekanslarda ölçülen kapasitans değerlerine arayüzey durumlarından dolayı meydana gelen katkı gittikçe azalır ve yaklaşık 1 MHz'den sonra bu katkı tamamen ortadan kalkar [13].



Şekil 4.1. Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının farklı frekanslardaki C-V karakteristikleri

Farklı frekanslardaki MIS yapının G/w-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, 35]. Yani düşük açıl frekanslarda elde edilen C-V veya G/w-V ölçümleri için periyot değeri ($T=1/2\pi f$), arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam

süresinden (τ) büyük olacaktır. ($T > \tau$). Bu nedenle çok küçük frekanslarda ($f \leq 100$ Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyali takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 1$ MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyali takip edemez [7, 15, 16, 29-33]. Bu frekans değerleri arasında (orta frekanslarda) ise arayüzey durumlarının ac sinyali takip etme gücü azalan frekansla artmaktadır. C-V ve G/w-V ölçümlerinde; arayüzey durumları tersinim ve tükenim bölgesinde etken olurken seri direnç ise yığılma bölgesinde etkilidir [29, 33, 47, 48].



Şekil 4.2. Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının farklı frekanslardaki G/w-V karakteristikleri

4.1.2. Dielektrik özellikler

Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapılarında metal ile yarıiletken arasına büyütülen yalıtkan tabakanın (SnO₂) dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) elektrik modülleri oda sıcaklığında frekansa bağlı incelendi. Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), sırasıyla ölçülen kapasitans C_m ve iletkenlik G_m verilerinden yalıtkan tabaka kalınlığı, diyot alanı ve havanın dielektrik katsayısı ϵ_o kullanılarak hesaplandı.

Dielektrik sabiti (ϵ'), çeşitli frekanslarda, tüketim bölgesinde ölçülen kapasitans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve hesaplamalarda aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır [34].

$$\epsilon' = \frac{C_{ox}}{C_o} \quad (4.1)$$

Burada C_o kapasitörün yalıtkan tabaka konmadan önceki kapasitansı olup $C_o = \epsilon_o(A/d_{ox})$ ile verilmektedir. Burada, A MIS yapının doğrultucu kontak alanı ($A = 7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) d_{ox} yalıtkan arayüzey tabaka kalınlığı ($d_{ox} = 33 \text{ \AA}$) ve ϵ_o serbest uzayın (boşluğun) dielektrik geçirgenlik sabitidir ($\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$). Kuvvetli yığılım bölgesinde, MIS yapısının maksimum kapasitansı, yalıtkan tabakanın kapasitansına ($C_m = C_{ox}$) karşılık gelmektedir.

$$C_m = C_{ox} = \epsilon' \epsilon_o A / d \quad (4.2)$$

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

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_o \omega} = \frac{d_{ox}}{A \epsilon_o} \frac{G_m}{\omega} \quad (4.3)$$

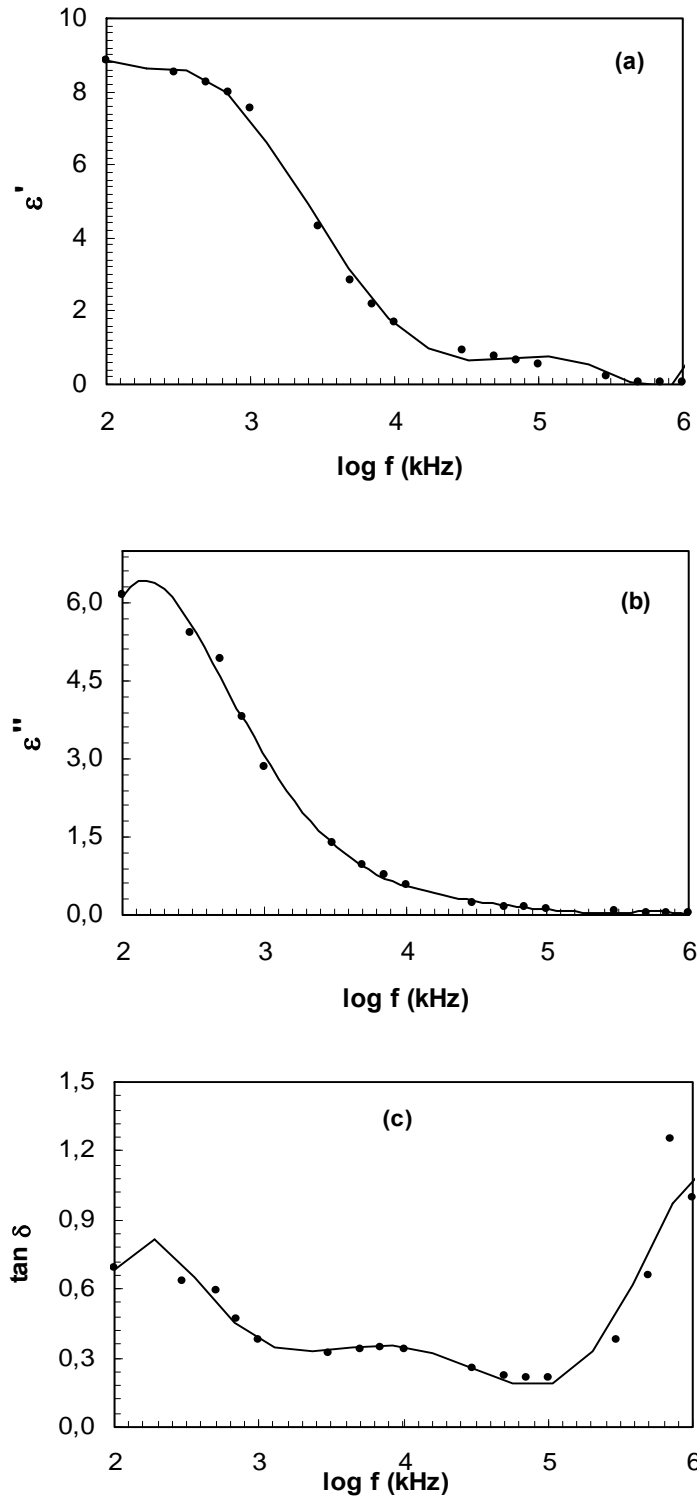
Burada G_m ; MIS yapının iletkenliği, ω ; açısai frekanstır. Dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), ϵ' ve ϵ'' değerlerinin oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [35]. Yani, $\tan\delta$ değeri, ϵ'' değerinin ϵ' değerine oranıdır.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.4)$$

Ayrıca, dielektrik malzemenin ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) aşağıdaki denklem ile verilebilir [27, 36, 37],

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan\delta (d_{ox} / A) = \epsilon'' \omega \epsilon_0 \quad (4.5)$$

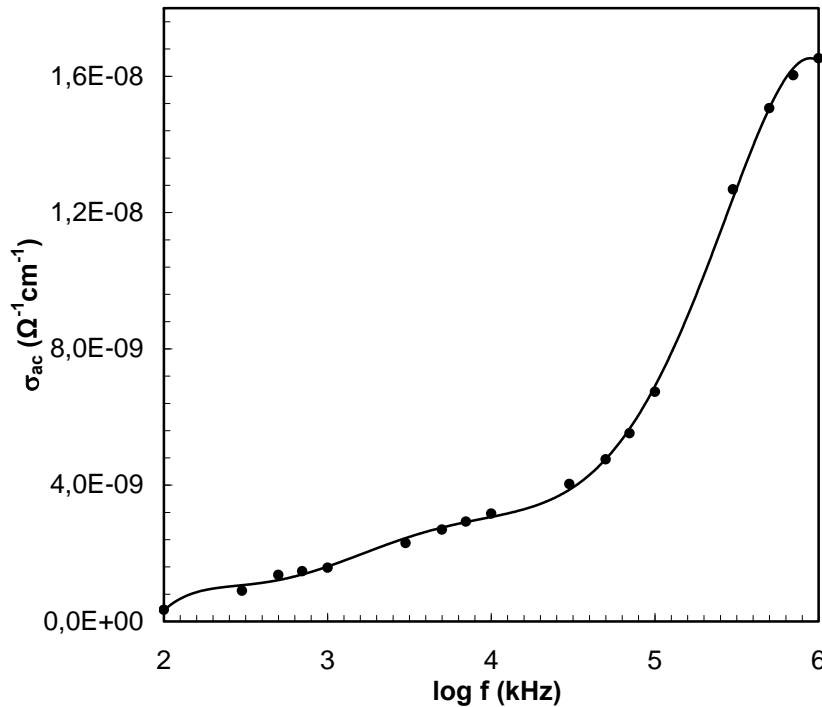
Ölçülen C_m ve G_m değerleri kullanılarak hesaplanan ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi sırasıyla şekil 4.3.a, b ve c'de verilmiştir. şekil 4.3.a ve b'de görüldüğü gibi; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ'') değerleri de artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru bu değerlerde meydana gelen artışlar, düşük frekansta etkili olabilecek arayüzeyel kutuplaştırma mekanizmasının mevcudiyetine atfedilebilir [38]. Sonuç olarak şunu diyebiliriz ki; yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumları ac sinyali izleyemez ve herhangi bir arayüzeyel kutuplaştırma mekanizmasının olmaması nedeniyle de; C , ϵ' ve ϵ'' ye ilave bir katkıda olamaz. Genel olarak, MIS yapıların düşük frekanstaki yalıtkan davranışına dört olası mekanizma katkıda bulunabilir. Bunlar; elektrotların arayüzeyi, dc iletkenlik, dipol yönelimi ve yük taşıyıcılarıdır [38- 40]. şekil 4.3.c'de gösterildiği gibi, kayıp açısı ($\tan\delta$), artan frekans ile azalmakta ve daha sonra artan frekans ile artarak 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 4.3. MIS yapının oda sıcaklığındaki; a) dielektrik sabiti (ϵ') b) dielektrik kayıp (ϵ'') ve c) dielektrik kayıp açısı ($\tan \delta$)'nin frekansa bağlı değişim eğrileri

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

Hesaplanan ac elektriksel iletkenlik değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir.

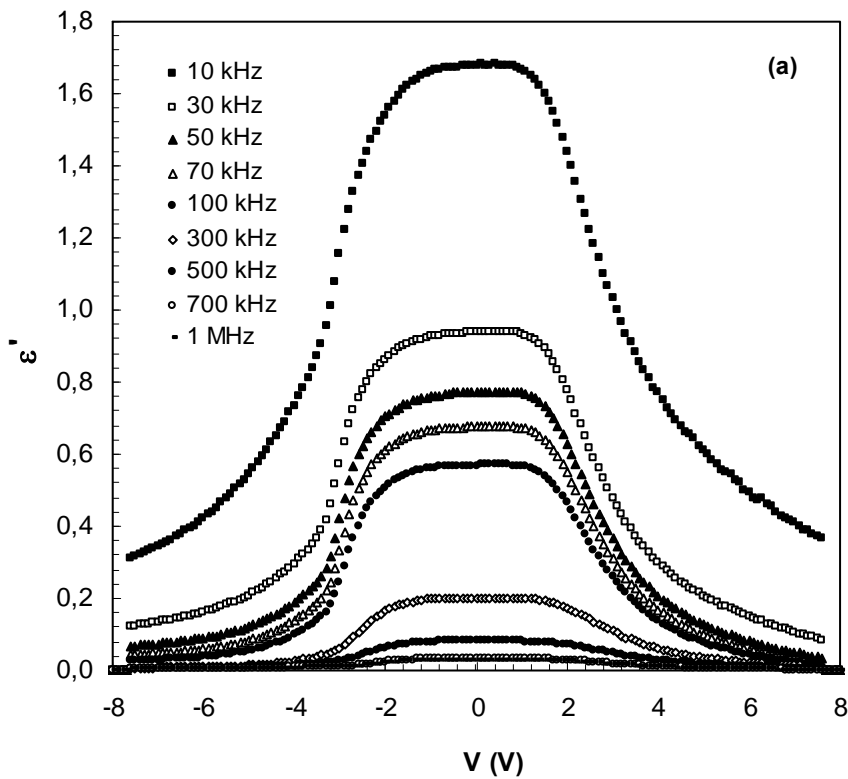


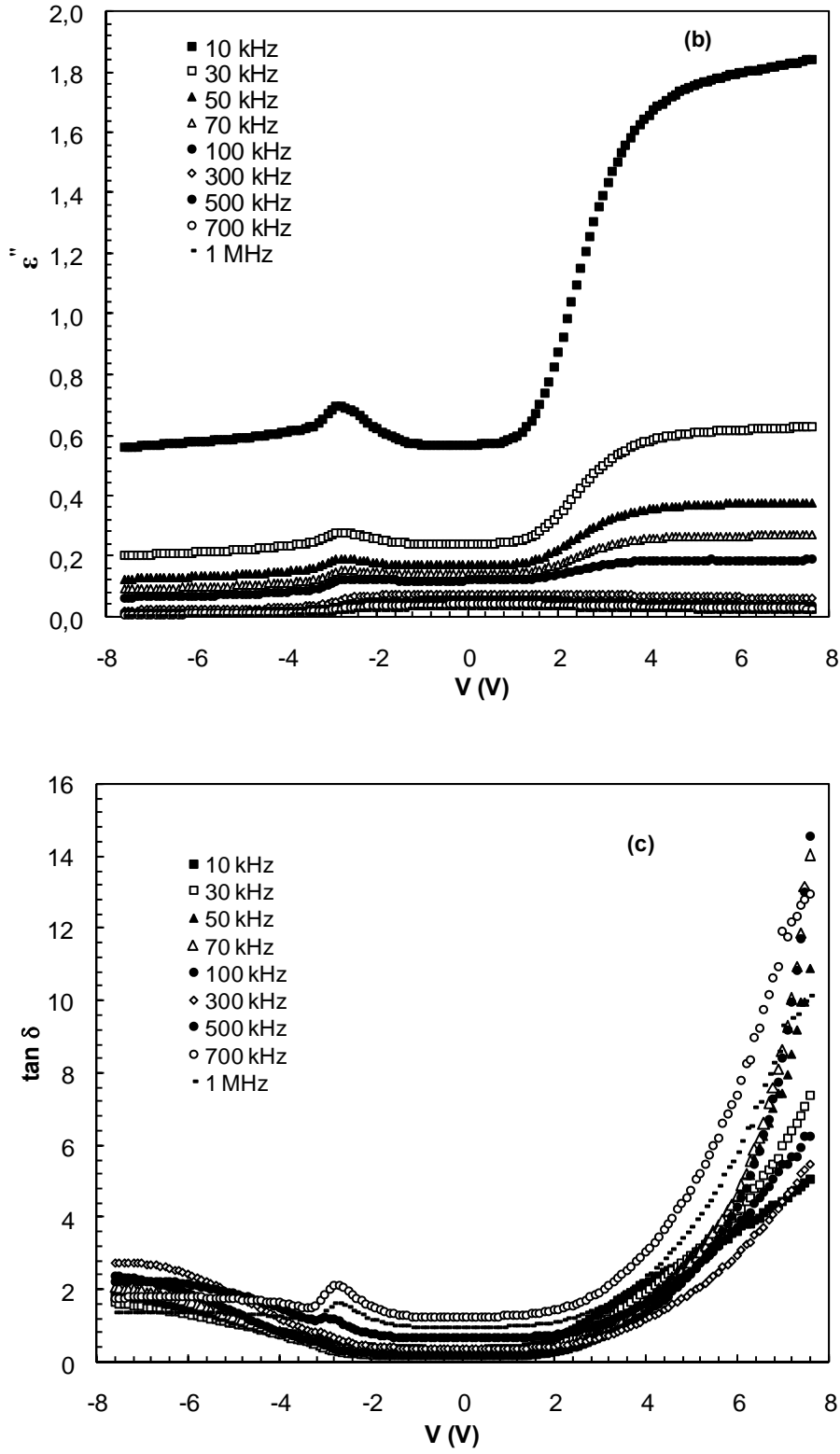
Şekil 4.4. Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının oda sıcaklığındaki ac elektriksel iletkenliğin frekansa bağlı eğrisi.

A.c. iletkenliğin artan frekans ile genellikle arttığı bilinmektedir. Bu ac iletkenlik yalnızca sıfır frekansta sonsuz ve yüksek frekanslarda önemli ölçüde dielektrik kayba katkıda bulunur [35].

C-V ve G/w-V eğrilerinin frekansa karşı davranışı numunenin diğer elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekansa bağımlılığının da bir göstergesidir. Bu durum, Au/n-Si arasındaki yalıtkan bir tabakanın varlığı (SnO_2) ve Si/ SnO_2 arayüzeyindeki arayüzey durum yoğunluğunun özel dağılım profiline atfedilmiştir. Aynı zamanda MIS yapının dielektrik karakteristiklerini de benzer yönde etkilemiştir.

Şekil 4.5.a'da görüldüğü gibi, dielektrik sabiti-voltaj eğrileri incelendiğinde hem negatif hem de pozitif gerilimlerde artan frekansla dielektrik sabiti hızla azalmaktadır. Dielektrik sabitindeki bu düşme artan frekansla azalan polarizasyona atfedilebilir ve belirli bir yüksek frekansın üstünde elektron sıçramalarının, bu dış elektrik alanı takip edememesinden kaynaklanmaktadır [41].





Şekil 4.5. MIS yapının a) ϵ' -V b) ϵ'' -V c) $\tan \delta$ -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı

Şekil 4.5.b ve c'de görüldüğü üzere ϵ'' ve $\tan\delta$ negatif ve pozitif gerilim bölgelerinde hem uygulanan gerilime hem de frekansa oldukça duyarlıdır. Artan frekansla dielektrik kayıp azalırken ve dielektrik kayıp açısı artmaktadır. Orta gerilim bölgesinde ise hem uygulanan gerilimden hem de frekanstan hemen hemen bağımsız olup yaklaşık sabit bir değer vermektedir. ϵ'' -V ve $\tan\delta$ -V eğrilerinin hem yığılım hem de tersinim bölgesinde bir frekans dispersiyonu göstermesinin nedeni arayüzey durumlarının ve tersinim yüklerinin yüksek ve düşük frekansa tepki sürelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır [42, 31, 44]

Kompleks (imajiner) dielektrik geçirgenliği verilerinin Z^* formalizasyonu ile incelenmesi ($Z^*=1/Y^*=1/i\omega C_0\epsilon^*$) genellikle yüzey ve bulk (hacim, tüm numune) olgularını ayırt etmek ve yapının bulk dc iletkenliğini elde etmek için kullanılır [45]. Genellikle dielektrik gevşeme spektroskopisi hakkında daha detaylı bir bilgi elde etmek için, elektrik modülü formülasyonu kullanılmaktadır. Elektrik modülünün gerilime bağlı değişik frekanslardaki profili bu yapının dielektrik gevşeme mekanizması hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Kompleks empedans veya kompleks permitivity (dielektrik geçirgenlik) ($\epsilon^*=1/M^*$) aşağıdaki denklem kullanılarak M^* formuna dönüştürülebilir [36, 45].

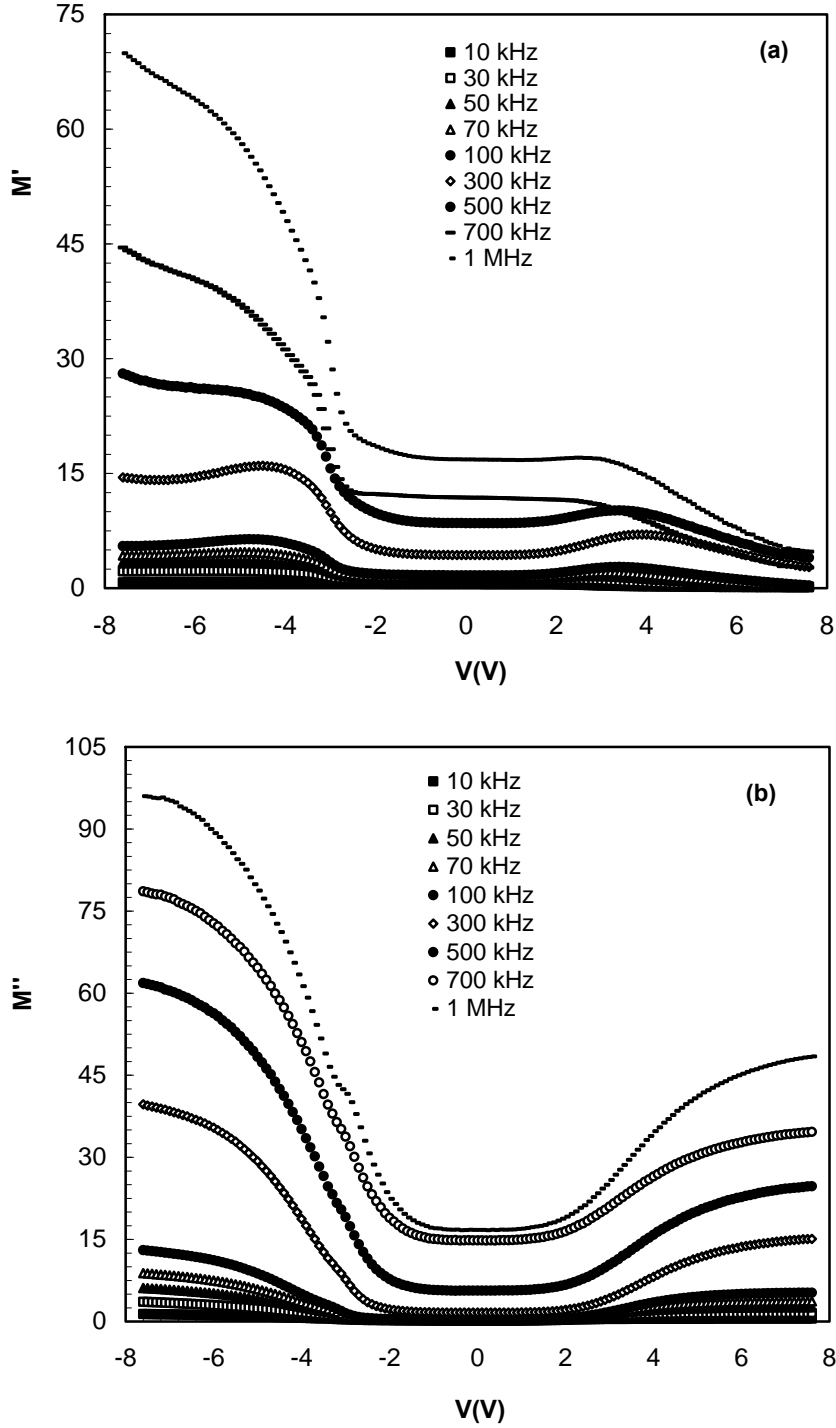
$$M^* = j\omega C_0 Z^* \quad (4.6)$$

veya

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (4.7)$$

Elektrik modülünün reel (M') ve imajiner (M'') kısmı ϵ' ve ϵ'' değerlerinden hesaplanarak Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Reel ve imajiner elektrik modülü-voltaj eğrileri hem negatif gerilim hem de ileri pozitif gerilimde bir frekans dağılımı

göstermektedirler. Reel elektrik modülü artan frekansla artarken artan voltajla azalan bir dağılım sergilemektedir.



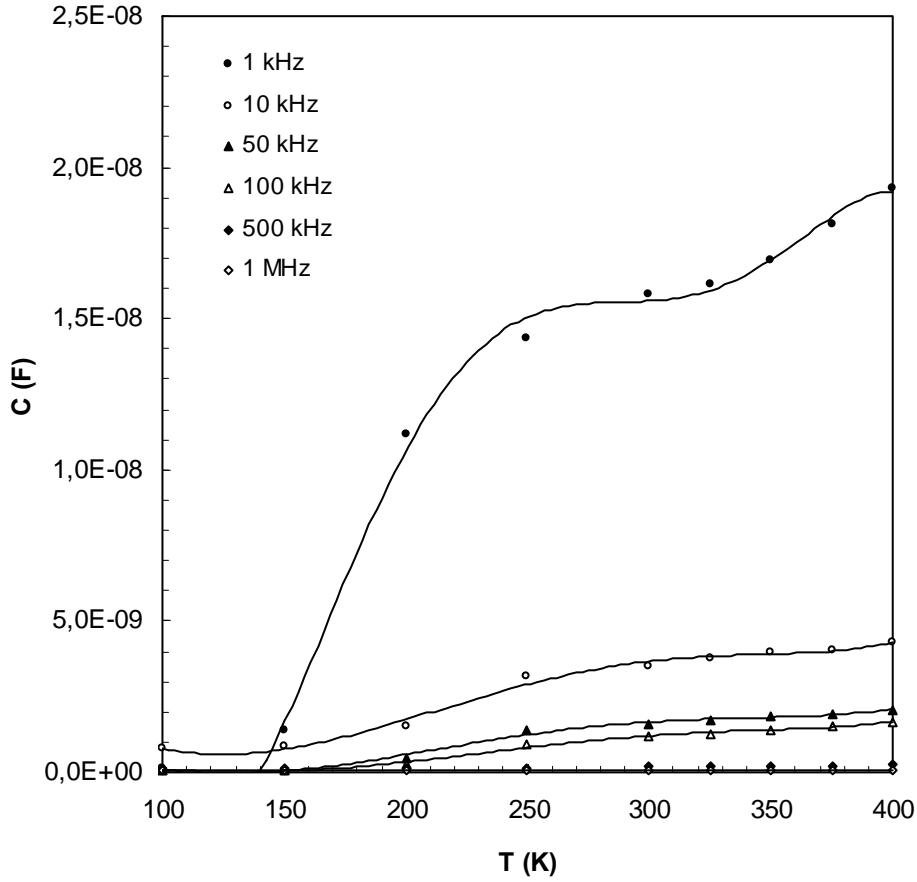
Şekil 4.6. MIS yapısının a) M' -V b) M'' -V karakteristiklerinin oda sıcaklığındaki frekans bağımlılığı

İmajiner elektrik modülü ise negatif bölgede artan frekansla artmakta ve artan voltajla azalmaktadır. Pozitif bölgede ise artan frekans ve voltajla artan bir dağılım sergilemektedir.

4.2. Sıcaklığa Bağlı Elektrik ve Dielektrik Özellikler

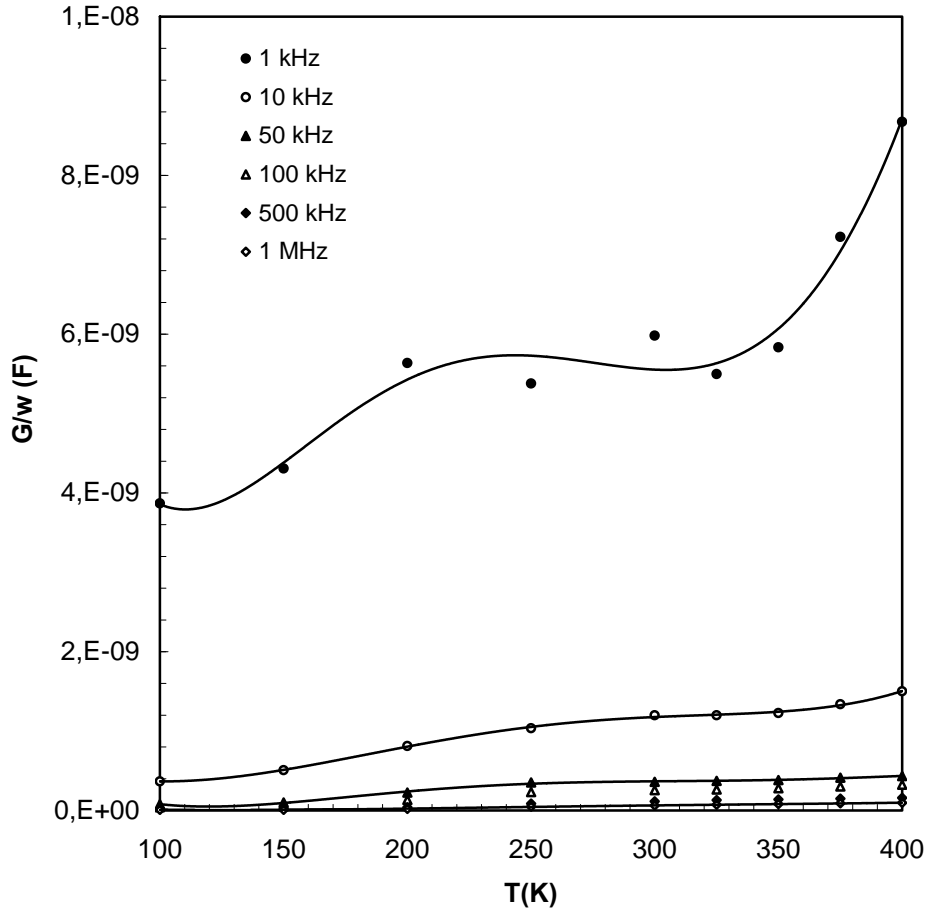
4.2.1. Elektriksel özellikler

Sıcaklığa bağlı kapasitans (C) ve iletkenlik (G/w) ölçümleri farklı frekanslarda, 100-400 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8, MIS yapının C ve G/w değerlerinin farklı frekanslar için sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Hem C hem de G/w değerleri sıcaklığa karşı çok hassastır. Kapasitans ve iletkenlik eğrileri artan sıcaklıkla artarken artan frekansla azalmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda etkili olan arayüzey uzay yüklerinden kaynaklanabilir [46]. Buna ilave olarak, kapasitans ve iletkenlikte meydana gelen katkı, uzay yükü değerlerinin artmasından kaynaklanır.



Şekil 4.7. Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı olarak kapasitans (C) 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/w 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 [37].

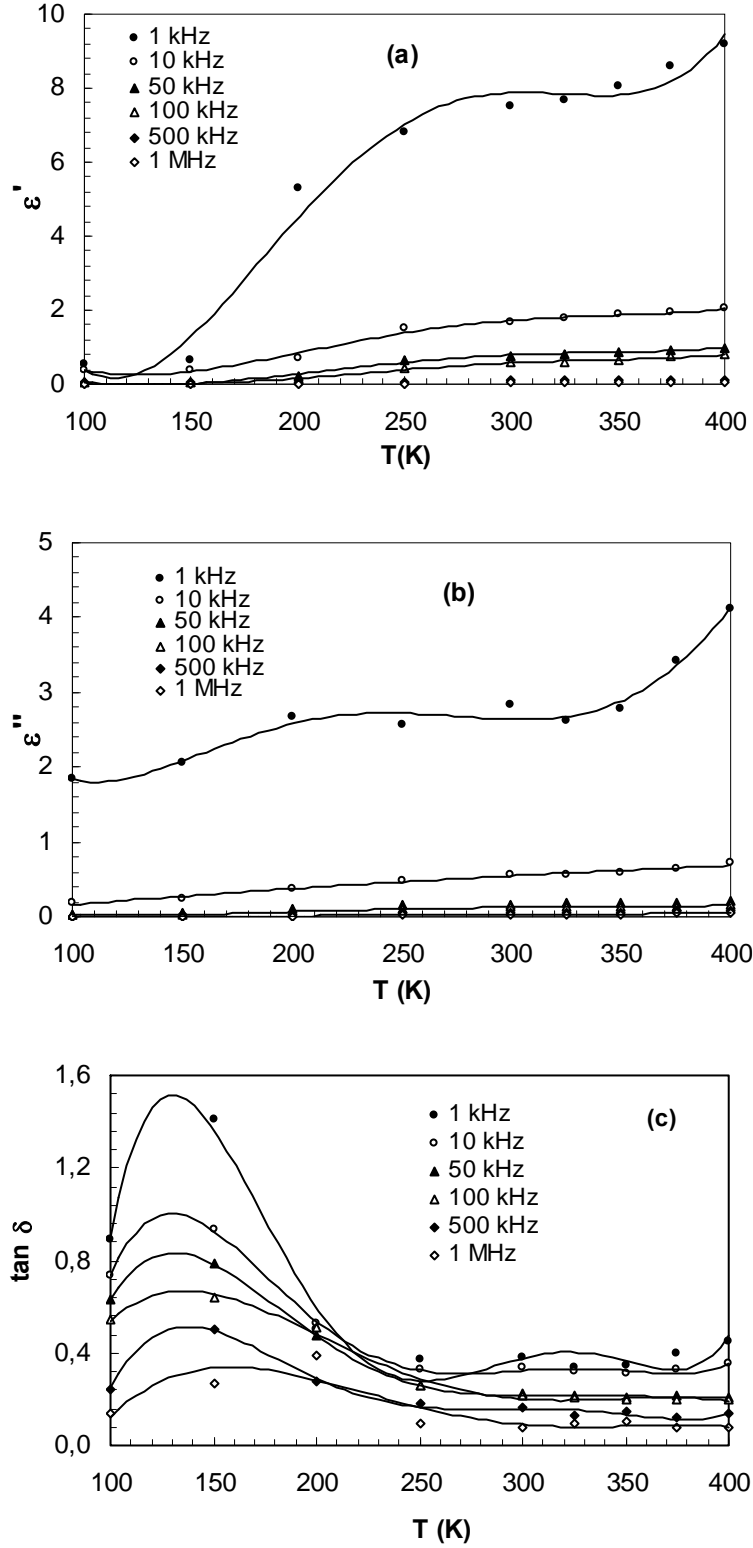


Şekil 4.8. Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapı için farklı frekanslarda G/w değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi

4.2.2. Dielektrik özellikler

Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülün sıcaklık ve frekansa bağımlılığı MIS yapısı için, farklı frekans değerleri ve 100-400 K sıcaklık aralığında incelendi.

MIS yapı için farklı frekanslarda ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ 'nın sıcaklık bağımlılığı sırasıyla Şekil 4.9.a, b ve c'de verildi. Şekillerden görüldüğü gibi, ϵ' ve ϵ'' değerleri artan sıcaklık ile artmaktadır. Sıcaklık arttıkça, örgüde kusurlar/düzensizlikler oluşur ve çoğunluk yük taşıyıcılarının (iyonlar ve elektronlar) hareketliliği (mobilitesi) artar [31, 37, 43, 45].

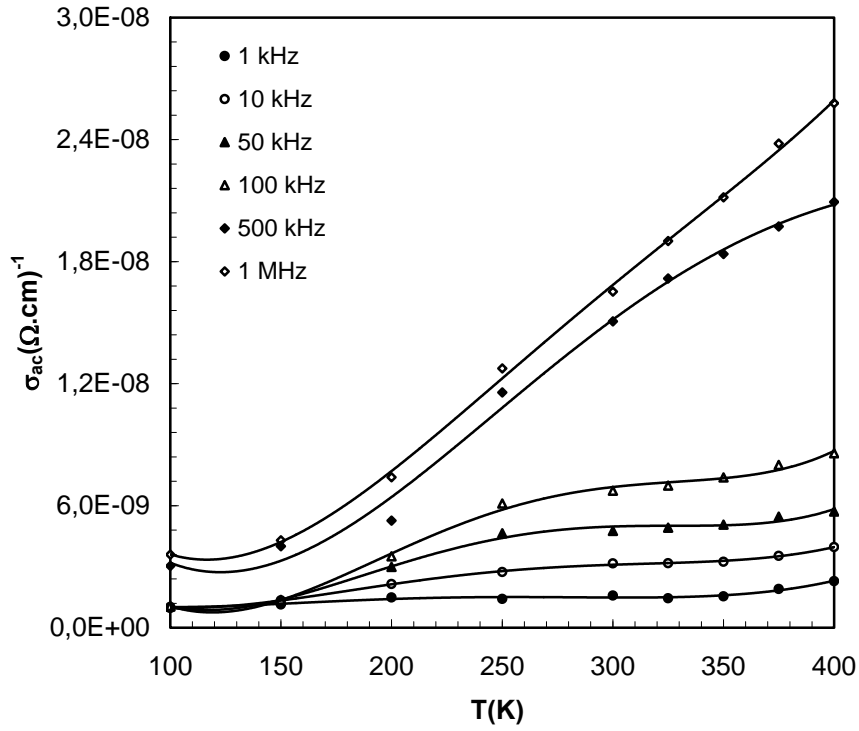


Şekil 4.9. MIS yapı için farklı frekanslarda a) ϵ' b) ϵ'' ve c) $\tan \delta$ 'nin sıcaklığa bağlı değişimi

Bileşik etki, sıcaklıkta bir artış ile ϵ' ve ϵ'' 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 [7, 33, 47, 48].

Ayrıca, 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 sabitinde bir artışa sebep olur. Frekans ile ϵ' ve ϵ'' nin değişimi 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.

Şekil 4.10'da, 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 artmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde de verilmiştir [36, 49-56]. MIS yapıdaki dielektrik polarizasyon yöntemi iletim yönetimine benzer bir mekanizmanın içinden yer aldığı literatürde önerilmiştir. Bu çalışmalarda [49, 50, 53, 54], yüksek sıcaklıklarda elektriksel iletkenliğin artması sınırdan yerleşmiş safsızlıklara atfedilmiştir.

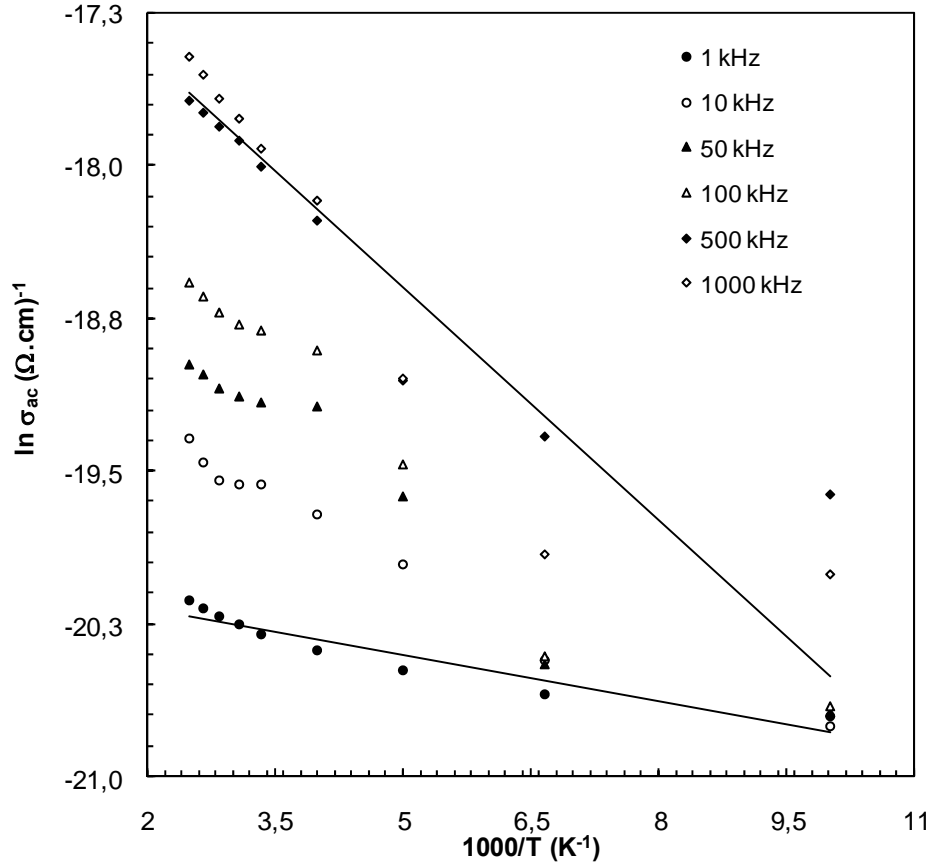


Şekil 4.10. MIS yapı için farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) sıcaklığa bağlı değişimi

Toplam iletkenlik ve mutlak sıcaklığın tersi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir [36, 51-53, 57].

$$\sigma = \sigma_o \exp(-E_a / kT) \quad (4.8)$$

Burada σ_o bileşik sabiti, k Boltzmann sabitini ve E_a aktivasyon enerjisini gösterir. 100-400 K aralığında elde edilen ac iletkenlik verilerin sıcaklıkla değişim grafiğinden yararlanılarak ve Eş. 4.8 kullanılarak eğrileri farklı frekanslar için elde edilerek Şekil 4.11'de verildi.



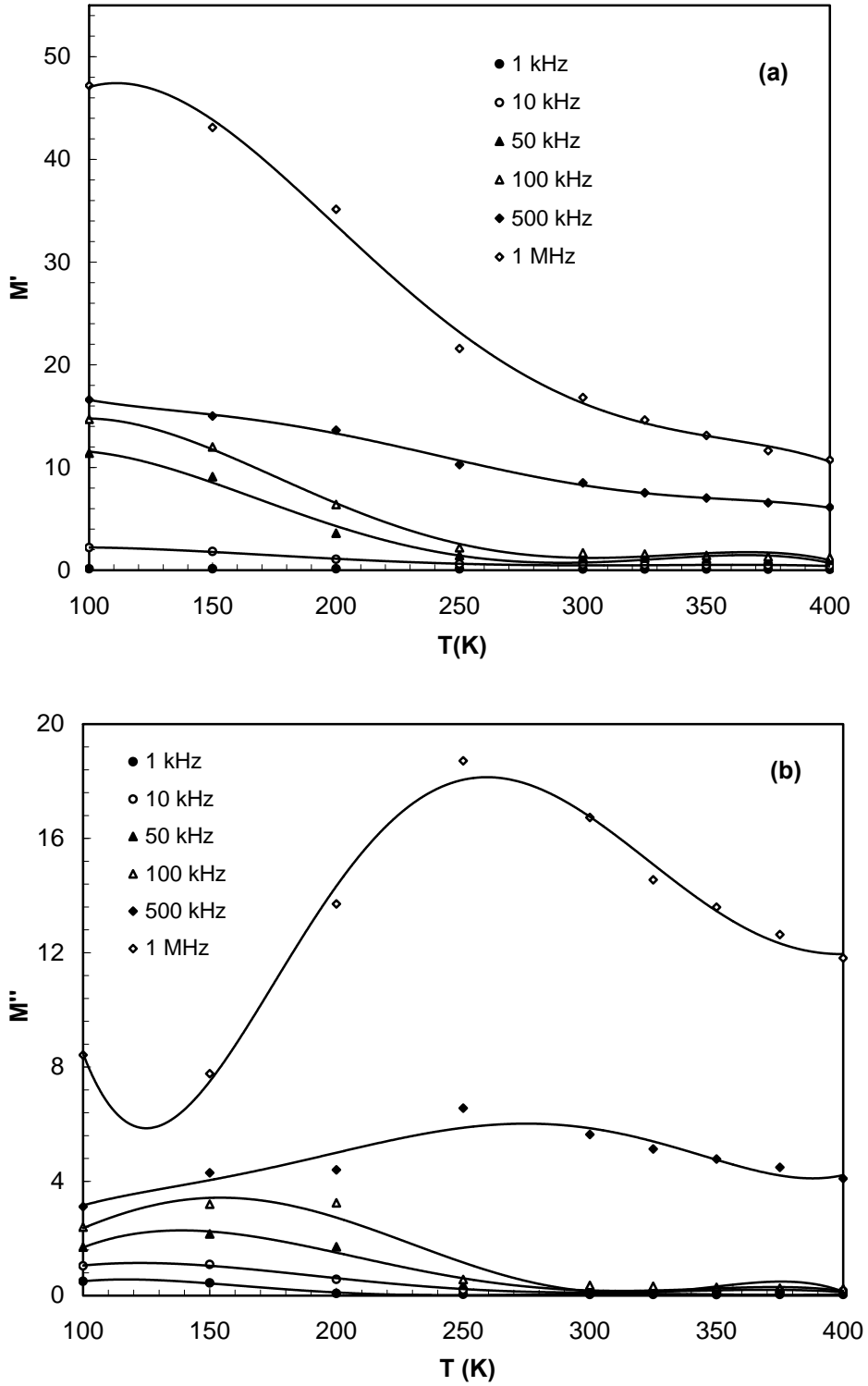
Şekil 4.11. MIS yapı için ac elektriksel iletkenliğin Arrhenius çizimi

Şekil 4.11’de 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 4.1’de verilmiştir [36, 51-53, 57]. Çizelge 4.1’den de görülebileceği gibi, artan frekans ile birlikte aktivasyon enerjisi artmaktadır. Yüksek sıcaklık bölgesinde gözlemlenen daha yüksek aktivasyon enerjisi, yük taşıyıcılarının üretimi ve onların boşluklara doğru olan hareketleri için gerekli olan enerjilerin toplamı sebebiyle olabilir [58].

Çizelge 4.1. Farklı frekans değerleri için aktivasyon enerjisi (E_a) ve bileşik sabiti (σ_0).

f (kHz)	E_a (meV)	σ_0 (Ωcm)⁻¹
1	14,0	$2,643 \times 10^{-9}$
10	17,4	$5,985 \times 10^{-9}$
50	19,9	$1,020 \times 10^{-8}$
100	28,0	$1,950 \times 10^{-8}$
500	34,4	$5,728 \times 10^{-8}$
1000	51,5	$1,187 \times 10^{-7}$

Şekil 4.12.a ve b, MIS yapı için farklı frekanslarda, sıcaklığa bağlı M^* elektrik modülünün gerçel kısmı M' ve sanal kısmı M'' 'yi göstermektedir. Şekil 4.12.a'da görüldüğü gibi, M' artan sıcaklık ile azalır, artan frekans ile artmaktadır. Öte yandan, Şekil 4.12.b'den görüldüğü gibi, M'' 1-100 kHz frekans aralığında artan frekans ile artarken artan sıcaklıkla azalmaktadır. Benzer çalışmalar literatürde rapor edilmiştir [36, 45, 50, 59].



Şekil 4.12. MIS yapı için farklı frekanslarda elektrik modülünün sıcaklığa bağlı değişimi a) reel kısmı M' ve b) imajiner kısmı M''

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada hazırlanan Au/SnO₂/n-Si (MIS) yapının dielektrik özellikleri ve ac elektriksel iletkenliği 1 kHz-1 MHz frekans ve 100-400 K sıcaklık aralığında C-V ve G/w-V ölçümleri kullanılarak incelendi. Tüm ölçümler geniş bir voltaj aralığında (-8V ile +8V 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 5×10^{-4} Torr'da gerçekleştirildi.

Ölçülen kapasitans (C) değeri tüm frekanslar için tersinim bölgesinde (-8V ile -6V 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 -4V ile +4V arasında bir pik vermektedir. Ayrıca G/w 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/w değerlerinin, seri direnç (R_s) ve arayüzey durumları (N_{ss}) değerlerine kuvvetli şekilde bağlı olduğu bulunmuştur. Yani düşük açılal frekanslarda elde edilen C-V veya G/w-V ölçümleri için periyot (T) değeri, arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcıların yaşam süresinden (τ) büyük olacaktır. Bu nedenle çok küçük frekanslarda ($f \leq 100$ Hz), hemen hemen tüm arayüzey durumları ac sinyalinin takip edebilirken, yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 1$ MHz), hemen hemen hiç bir arayüzey durumu ac sinyalinin takip edememektedir.

Ölçülen C_m ve G_m değerleri kullanılarak hesaplanan ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi incelendiğinde; dielektrik sabiti (ϵ') artan frekansla azalmaktadır. Dielektrik kayıp (ϵ'') değerleri de artan frekansla azalmaktadır. Düşük frekans bölgesine doğru bu değerlerde meydana gelen artışlar, düşük frekansta etkili olabilecek arayüzeysele kutuplaştırma mekanizmasının

mevcudiyetine atfedilebilir. Sonuç olarak şunu diyebiliriz ki; yeterince yüksek frekanslarda arayüzey durumları ac sinyali izleyemez ve herhangi bir arayüzeyel kutuplaştırma mekanizmasının olmaması nedeniyle de; C , ϵ' ve ϵ'' 'ne ilave bir katkıda olamaz. Genel olarak, MIS yapıların düşük frekanstaki yalıtkan davranışına dört olası mekanizma katkıda bulunabilir. Bunlar; elektrotların arayüzeyi, dc iletkenlik, dipol yönelimi ve yük taşıyıcılarıdır. Dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), artan frekans ile azalmakta ve daha sonra artan frekans ile artmaktadır.

Dielektrik sabiti-voltaj eğrileri incelendiğinde hem negatif hem de pozitif gerilimlerde dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp hızla azalmaktadır. Dielektrik sabitindeki bu düşme artan frekansla azalan polarizasyona atfedilebilir ve belirli bir yüksek frekansın üstünde elektron sıçramalarının, bu dış elektrik alanı takip edememesinden kaynaklanmaktadır. Dielektrik kayıp açısı-voltaj eğrileri incelendiğinde artan frekansla artmakta ve orta gerilim bölgesinde sabit olup gerilim ve frekanstan hemen hemen bağımsızdır.

Reel ve imajiner elektrik modülü-voltaj eğrileri hem negatif hem ileri pozitif gerilimlerde bir frekans dağılımı göstermektedir. Reel elektrik modülü artan frekansla artarken artan voltajla azalmaktadır. İmajiner elektrik modülü negatif gerilim bölgesinde artan frekansla artmakta ve artan voltajla azalmaktayken, pozitif gerilim bölgesinde artan frekans ve voltajla artmaktadır.

Farklı sıcaklık ve frekanslar için ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleri sıcaklık ve frekansa karşı oldukça duyarlıdır. Artan sıcaklıkla kapasitans ve iletkenlik değerleri artarken tüm sıcaklıklar için artan frekans ile azalmaktadır. Frekanstaki azalmayla kapasitans artar ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde homojen olmayan tabakanın kapasitans ile frekans dağılımının neden olduğu yalıtkan kapasitansıyla etkilenir. Bu frekansa bağımlılık arayüzey durumlarının düşük frekanslarda ac sinyalini takip edebilmesinden dolayı hem C hem de G/w değerlerinde ilave katkı meydana gelir.

MIS yapı için farklı frekans değerlerinde, dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), ve ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) artan sıcaklık ile artmaktadır. Kayıp açısı ($\tan\delta$) artan sıcaklıkla artıp sonra sıcaklıkla azalmaktadır. 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 konsantrasyonlarının 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.

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

Elektrik modülünün reel kısmı M' artan sıcaklıkla azalırken artan frekansla artmaktadır. Öte yandan, elektrik modülünün sanal kısmı M'' , 1-100 kHz frekans aralığında artan frekans ile artarken artan sıcaklıkla azalmaktadır.

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

KAYNAKLAR

1. Berger, L.I., "Semiconductor Materials", **CRC Press**, New York, 145-152 (1997).
2. Northrop, D.C., Rhoderick, E.H., "The Physics of Schottky barriers, in Impedance Devices", **Solid State Electron.** 4: 37-73 (1978).
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. Tataroğlu, A., "Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures", **Microelect. Eng.**, 83: 2551-2557 (2006).
6. Yücedağ, İ., "Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-52 (2007).
7. Sharma, B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications", **Plenum Press**, New York and London, 49-118 (1984).
8. Jarzebski, Z. M., "Physical properties of SnO₂ materials: 1. Preparation and defect structure", **J. Electrochem. Soc.**, 123(7): 199-205 (1976).
9. Grove, A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", **John Wiley & Sons**, New York, 91-106, 334-357 (1967).
10. Tataroğlu, A., "MOS yapılarında temel fiziksel parametrelerin frekans ve radyasyon miktarına bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-77 (2004).
11. Oral, M., "Elektrostatik", **Ege Ün. Matbaası**, İzmir, 221-252 (1983).
12. Chelkowski, A., "Dielectric Physics", **Elsevier**, Amsterdam, 97-105 (1980).
13. 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).
14. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", **Mc Graw-Hill**, New York, 420-450, 517-523 (1997).

15. Nicollian, E.H. and Brews, J.R., "MOS Physics and Technology", *John Wiley & Sons*, New York, 40-175, 222-226, 423-439 (1982).
16. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", *John Wiley & Sons*, New York, 362-390 (1981).
17. Grove, A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons*, New York, 91-106, 334-357 (1967).
18. Cooke, M. J., "Semiconductor Devices", *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
19. Ghandhi, S. K., "VLSI Fabrication Principles", *John Wiley & Sons*, New York, 401-405 (1983).
20. Tareev, B., "Physics of Dielectric Materials", *Mir Publishers*, Moscow, 67-95, 140-156 (1979).
21. Von Hippel, A. R., "Dielectrics and Waves", *John Wiley & Sons*, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234 (1959).
22. Popescu, M., Bunget, I., "Physics of Solid Dielectrics", *Elsevier*, Amsterdam, 206-245, 282-291 (1984).
23. Champness C. H., Clark, W. R., "Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 56(12):1104–1106 (1990).
24. Roosbroeck, W. Van., Jr. Casey, H. C., "Transport in relaxation semiconductors" *Phys. Rev. B.*, 5 (6): 2154-2175 (1972).
25. Jones, B. K., Santana, J., McPherson, M., "Negative capacitance effects in semiconductor diodes", *Sol. Stat. Com.*, 107(2):47-50 (1998).
26. Daniel, Vera V., "Dielectric Relaxation", *Academic Press*, London, 1-19, 79-87 (1967).
27. Symth, C. P., "Dielectric Behaviour and Structure", *McGraw-Hill*, New York, 52-61, 202-215 (1955).
28. Shuer, M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed", *Prentice-Hall, Int.Inc.*, New Jersey, 194-225 (1990).
29. Depas M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H., 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).

30. 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).
31. 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).
32. Hung, K. K., 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).
33. Kar, S., 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).
34. Chelkowski A., Dielectric Physics, *Elsevier*, Amsterdam, 313 (1980).
35. Tataroğlu, A., “Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures”, *Microelect. Eng.*, 83: 2551-2557 (2006).
36. Prabakar K., Narayandass S.K., Mangalaraj D “Dielectric properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te thin films” *Physica Status Solidi (a)*, 199(3): 507-514 (2003).
37. 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).
38. 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).
39. 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).
40. Fanggao, C., Saunders, G. A., “Temperature and frequency dependencies of the complex dielectric constant of poly under hydrostatic pressure”, *J. Polymer Sc. Part B: Polymer Phys.*, 34: 425-433 (1996).
41. 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).

42. Yücedağ, İ., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., “On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure”, *Microelect. Eng.*, 84: 180-186 (2007).
43. Bülbül, M.M., “Frequency and temperature dependent dielectric properties of Al/Si₃N₄/p-Si(100) MIS structure”, *Microelectron. Eng.*, 84: 124- 128 (2007).
44. Nicollian, E.H., Goetzberger, A., “MOS conductance technique for measuring surface states parameters”, *Appl. Phys. Lett.*, 7: 216-219 (1965).
45. Pissis P, Kyritsis A “Electrical conductivity studies in hydrogels”, *Solid State Ion.*, 97(1-4): 105-113 (1997).
46. Nicollian E. H BrewsJ.R., “Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology”, *John Wiley & Sons*, New York, 423-491 (1982).
47. Kar S., 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).
48. Schulz M., Klausmann E., Transient capacitance measurements of interface states on the intentionally contaminated Si-SiO₂ interface interface Applied Pyssics A:Materials *Science & Processing*, 18(2): 169-175 (1979).
49. Mattsson, M. S., Niklasson, G. A., Forsgren, K., 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).
50. 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).
51. 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).
52. Rahman, A.S.Md S., Islam, M.H., Hogarth, C.A., “AC electrical properties of vacuum-evaporated SiO/SnO₂ films”, *Int. J. Electronics*, 62(2): 167-179 (1987).
53. Maurya D, Kumar J, Shripal., “Dielectric-spectroscopic and a.c. conductivity studies on layered Na 2-XKXTi₃O₇ (X=0.2, 0.3, 0.4) ceramics”, *Journal of Physics and Chemistry Solids*, 66(10): 1614-1620 (2005).
54. Sattar A A., Rahman S A., “Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu-Zn Ferrites”, *Physica Status Solidi A*, 200(2): 415-422 (2003).

55. 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).
56. Dixit M., Kumar A., “Effect of Photocrystallization on the Photoconductivity of a-Se₆₅Te₂₀Sb₁₅”, *Physica B*, 252(4): 286-294 (1998).
57. Arora R., Kumar A., “Dielectric relaxation in glassy Se and Se_{100-x}Tex alloys”, *Physica Status Solidi A*, 115(1): 307-314 (1989).
58. 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).
59. Szu S.P., Lin C.Y., “AC impedance studies of copper doped silica glass”, *Materials Chemistry and Physics*, 82(2): 295-300 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERBAŞ ARAL, Hilal
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.10.1975 Kayseri
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 344 76 15
e-mail : hilalbasaral@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Ankara Üniversitesi/ Fizik Bölümü	1998
Lise	Cumhuriyet Lisesi	1992

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999-2006	İlke Dershanesi	Öğretmen
2007-2009	Nesibe Aydın Dershanesi	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Kitap okumak,müzik dinlemek